



HAL
open science

Évaluation des performances thermomécaniques des enrobés bitumineux à fort taux de recyclage: Apport du procédé de régénération Fenixfalt

Nelson Andrey Alvarado Patino

► To cite this version:

Nelson Andrey Alvarado Patino. Évaluation des performances thermomécaniques des enrobés bitumineux à fort taux de recyclage: Apport du procédé de régénération Fenixfalt. Génie civil. INSA de Rennes, 2018. Français. NNT : 2018ISAR0021 . tel-02124137

HAL Id: tel-02124137

<https://theses.hal.science/tel-02124137>

Submitted on 9 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE DE DOCTORAT DE

L'INSA RENNES
COMUE UNIVERSITÉ BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur
Spécialité : Génie Civil

Par

Nelson Andrey ALVARADO PATIÑO

Évaluation des performances thermomécaniques des enrobés bitumineux à fort taux de recyclage

Apport du procédé de régénération Fenixfalt

Thèse présentée et soutenue à l'INSA Rennes, le 5 décembre 2018
Unité de recherche : Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique
Thèse N° : 18ISAR 32 / D18 - 32

Composition du Jury :

Christophe PETIT
Cyrille CHAZALLON

Professeur des Universités
Professeur des Universités

Université de Limoges
INSA Strasbourg

Président/Rapporteur
Rapporteur

Anne DONY
Vincent GAUDEFROY
Aveline DARQUENNES
Juan MARTINEZ

Chercheur, Docteur
Chargé de Recherche, HDR
Professeur des Universités
Professeur Émérite

ESTP Paris
IFSTTAR Nantes
INSA Rennes
INSA Rennes

Examinateur
Examinateur
Examinateur
Directeur de thèse

Michel WILLEM

Directeur Technique

Le Foll TP

Invité

Intitulé de la thèse :

Évaluation des performances thermomécaniques des enrobés bitumineux à fort taux de recyclage.
Apport du procédé de régénération Fenixfalt.

Nelson Andrey ALVARADO PATIÑO

En partenariat avec :



Document protégé par les droits d'auteur

À la mémoire d'Emile LOPEZ

1947 – 2018

AVANT-PROPOS

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'une convention "CIFRE" (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche, sous l'égide du Ministère de la Recherche) regroupant le laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique (LGCGM) de l'INSA Rennes et la société Fenixfalt. Les entreprises routières Le Foll TP, Braja-Vésigné et Roger Martin ont également été des partenaires précieux du projet. Je désire en avant-propos adresser mes remerciements aux personnes qui ont permis l'aboutissement de ce travail de thèse.

En premier lieu, je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance à Emile LOPEZ, Président de la société Fenixfalt et mon responsable industriel CIFRE, malheureusement décédé quelques jours avant la soutenance et sans qui ce sujet de recherche n'aurait certainement pas vu le jour. Ses conseils avisés et sa confiance m'ont permis de progresser dans un cadre professionnel idéal. J'adresse mes condoléances à sa famille et en particulier à sa fille aînée Anne-Christelle CALI, nouvelle gérante de la société.

Je souhaite également associer Juan MARTINEZ, mon directeur de thèse, pour avoir dirigé ce travail et pour m'avoir guidé par ses conseils pendant toute la durée du doctorat. J'ai tout particulièrement apprécié la motivation et l'ouverture d'esprit qu'il a montrées lors de la recherche, ainsi que sa sympathie, son aide précieuse, sa patience, sa rigueur scientifique et son expertise.

Je tiens à adresser mes remerciements aux différents directeurs techniques des entreprises partenaires du projet, Michel WILLEM (Le Foll TP), Jean-Marc MOURIER (Braja-Vésigné) et Christophe RIBETTE (Roger Martin), pour m'avoir accueilli dans leurs laboratoires respectifs et pour l'intérêt constant qu'ils ont porté à ma recherche. J'exprime ma gratitude aux équipes de ces laboratoires pour leur aide ainsi que pour l'agréable atmosphère de travail que j'y ai trouvée. Mes vifs remerciements vont également à Guillaume GAILLARD, ingénieur du laboratoire Braja-Vésigné pour ses remarques et ses conseils précieux.

Je tiens à remercier de manière spéciale le professeur Cyrille CHAZALLON de l'INSA Strasbourg, ainsi que le professeur Christophe PETIT de l'Université de Limoges d'avoir accepté la lourde tâche de rapporter sur ma thèse, ainsi que pour ce dernier, d'avoir présidé le jury. Mes remerciements vont également à Anne DONY, Vincent GAUDEFROY et Aveline DARQUENNES, pour avoir examiné ce travail et participé au Jury.

Je remercie également toute l'équipe des professeurs, ingénieurs, techniciens, secrétaires et doctorants du LGCGM, ainsi que les nombreux stagiaires pour leur aide à des niveaux divers, avec un remerciement spécial à Christian GARAND pour son apport à la fois technique et humain, sans qui la réalisation des essais à basses températures aurait été beaucoup plus hasardeuse. Un grand merci à Aurore GOUIN du Service Recherche pour sa sympathie et son aide précieuse dans les démarches administratives.

Je remercie tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont apporté une contribution à ce travail par leurs connaissances et leur disponibilité tant sur le plan scientifique que sur le plan humain. Toute ma gratitude envers mes amis, tant en Europe qu'en Colombie, qui ont eu un rôle important en m'encourageant durant la thèse.

Enfin, je voudrais dédier cette thèse à mes parents, mes deux sœurs et mon neveu pour leur soutien et leur confiance, ils ont été ma source de motivation pour surmonter toutes les difficultés.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	i
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES	xvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	3
1. LES ENROBÉS BITUMINEUX À CHAUD	3
1.1. Squelette granulaire	4
1.2. Le bitume.....	4
1.2.1. Classification des bitumes.....	4
1.2.2. Constitution chimique du bitume.....	4
1.2.3. Analyse calorimétrique différentielle (DSC, Differential Scanning Calorimetry) ..	7
2. FORMULATION DES ENROBÉS	9
2.1. Approche dite « empirique » (niveaux N1 et N2)	10
2.1.1. Essai de compactibilité à la PCG	11
2.1.2. Essai de sensibilité à l'eau (essai « Duriez »)	11
2.1.3. Résistance aux déformations permanentes ou à « l'orniérage »	11
2.2. Approche dite « fondamentale » (niveaux N3 et N4).....	12
2.2.1. Module de rigidité.....	13
a. Courbes isothermes et courbe maîtresse	14
b. Courbes isochrones	14
c. Plan de Cole-Cole.....	14
d. Espace de Black	15
2.2.2. Résistance à la fatigue.....	15
3. PERFORMANCES À BASSE TEMPÉRATURE.....	18
3.1. Essai de traction uniaxiale (UTST)	18
3.1.1. Vitesse de déformation	20
3.1.2. Teneur et grade du bitume	20
3.1.3. Squelette granulaire	20
3.1.4. Vieillessement	20
3.2. Essai de retrait thermique empêché (TSRST)	21
3.2.1. Principe et interprétation.....	21
3.2.2. Vitesse de refroidissement	22
3.2.3. Dimensions et compacité des éprouvettes	23
3.2.4. Teneur et grade du bitume	23

3.2.5.	Squelette granulaire	25
3.2.6.	Niveau de vieillissement	25
3.2.7.	Température de départ et précision des résultats	27
4.	LE RECYCLAGE DES AGRÉGATS D'ENROBÉ (AE)	28
4.1.	Avantages économiques et environnementaux.....	28
4.2.	Le vieillissement du bitume.....	30
4.2.1.	Phénomènes physico-chimiques du vieillissement.....	31
4.2.2.	Évolution des caractéristiques du bitume	32
4.3.	Caractérisation expérimentale du vieillissement	33
4.3.1.	Essais RTFOT et PAV	34
4.3.2.	La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)	35
4.4.	Les Agrégats d'enrobés	35
4.5.	Les additifs	37
5.	LIMITATIONS ET EFFETS DU RECYCLAGE	38
5.1.	Limitations.....	38
5.1.1.	Liées aux caractéristiques de l'AE.....	38
5.1.2.	Liées à la fabrication et à l'homogénéité de l'enrobé recyclé	39
5.2.	Effets sur les propriétés du liant recomposé.....	41
5.3.	Effets sur les performances de l'enrobé	43
5.3.1.	Aptitude au compactage et résistance à l'orniérage.....	43
5.3.2.	Rigidité et résistance à la fatigue	43
5.3.3.	Performances à basse température	45
6.	CONCLUSION À L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE	47
CHAPITRE II. FORMULATION DES MATÉRIAUX ET CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE		49
1.	MATÉRIAUX ET FORMULES.....	49
1.	FORMULATION DES ENROBÉS RECYCLÉS.....	50
1.1.	Caractérisation des composants.....	50
1.1.1.	Granulats neufs	51
1.1.2.	Bitumes d'apport.....	51
1.1.3.	Agrégats d'enrobés	52
1.1.4.	Régénération	55
1.2.	Mise au point et fabrication des mélanges.....	56
1.2.1.	Recomposition	56
1.2.2.	Paramètres de fabrication.....	58
a.	Mise en température	59
b.	Malaxage	61
2.	PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES LIANTS.....	62

2.1.	Récupération du liant.....	63
2.1.1.	Préparation des échantillons et séparation des particules solides	63
2.1.2.	Distillation sous vide à l'évaporateur rotatif.....	63
2.2.	Analyse des résultats	64
2.2.1.	Pénétrabilité et TBA	64
2.2.2.	Analyse calorimétrique différentielle (DSC).....	67
2.2.3.	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....	69
2.2.4.	Fractions SARA	72
3.	CONCLUSIONS.....	75
CHAPITRE III. COMPACTIBILITÉ, SENSIBILITÉ A L'EAU, ORNIÉRAGE		77
1.	COMPACTIBILITÉ PCG.....	77
1.1.	Paramètres d'essai	77
1.2.	Résultats.....	77
1.2.1.	BBSG3	78
1.2.2.	GB4.....	79
1.2.3.	EME2	80
2.	SENSIBILITÉ À L'EAU (ESSAI DURIEZ).....	82
2.1.	Paramètres d'essai	82
2.2.	Résultats.....	82
2.2.1.	BBSG3	83
2.2.2.	GB4.....	84
2.2.3.	EME2	85
3.	RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE.....	86
3.1.	Paramètres d'essai	86
3.2.	Résultats.....	87
3.2.1.	BBSG3	87
3.2.2.	GB4.....	88
3.2.3.	EME2	89
4.	TENDANCES GÉNÉRALES.....	89
4.1.	Synthèse des résultats : effet des AE et du régénérant	89
4.2.	Corrélations générales	90
4.2.1.	Entre paramètres de niveaux N1 et N2	90
4.2.2.	Avec des paramètres physico-chimiques	91
a.	Pénétrabilité et TBA.....	91
b.	Fractions SARA	92
5.	CONCLUSIONS.....	93
CHAPITRE IV. MODULE COMPLEXE, RÉSISTANCE À LA FATIGUE.....		95
1.	PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL	95

1.1.	Préparation des éprouvettes	95
1.2.	Dispositif expérimental.....	97
2.	MODULE COMPLEXE	97
2.1.	Paramètres d'essai	97
2.2.	Analyse des résultats	98
2.2.1.	Béton Bitumineux (BBSG3).....	98
2.2.2.	Grave-Bitume (GB4)	100
2.2.3.	Enrobé à Module Élevé (EME2).....	104
3.	RÉSISTANCE À LA FATIGUE	107
3.1.	Paramètres d'essai	107
3.2.	Analyse des résultats	107
3.2.1.	Béton Bitumineux (BBSG3).....	107
3.2.2.	Grave-Bitume (GB4)	109
3.2.3.	Enrobé à Module Élevé (EME2).....	112
4.	TENDANCES GÉNÉRALES.....	115
4.1.	Synthèse des résultats : effet des AE et du régénérant	115
4.2.	Corrélations générales	116
4.2.1.	Entre paramètres de niveaux N3 et N4	116
4.2.2.	Avec des paramètres physico-chimiques	117
a.	Pénétrabilité et TBA.....	117
b.	Corrélation avec l'indice carbonyle	118
c.	Corrélations avec les fractions SARA.....	119
5.	APPLICATION AU DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉE.....	120
5.1.	Hypothèses de calcul	120
5.2.	Analyse des résultats	121
5.2.1.	Déformations transversales et verticales.....	121
5.2.2.	Trafic équivalent admissible (couche de surface BBSG3-0R)	122
5.2.3.	Influence de la rigidité de la couche de surface.....	123
6.	CONCLUSIONS.....	125
CHAPITRE V. PERFORMANCES À BASSE TEMPÉRATURE		127
1.	PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES.....	127
2.	MATÉRIELS ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX.....	128
2.1.	Essai de traction uniaxiale (UTST)	129
2.2.	Essai de retrait thermique empêché (TSRST) et réserve de traction.....	131
3.	BBSG3	133
3.1.	Analyse des résultats de traction uniaxiale.....	134
3.1.1.	Contrainte de rupture	134

3.1.2.	Température de transition fragile-ductile.....	134
3.1.3.	Déformation à la rupture	136
3.2.	Analyse des résultats de retrait empêché.....	137
3.3.	Réserve de traction	138
4.	GB4	140
4.1.	Analyse des résultats de traction uniaxiale.....	140
4.1.1.	Contrainte de rupture	140
4.1.2.	Température de transition fragile-ductile.....	141
4.1.3.	Déformation à la rupture	142
4.2.	Analyse des résultats de retrait empêché.....	144
4.3.	Réserve de traction	144
5.	EME2	146
5.1.	Analyse des résultats de traction uniaxiale.....	146
5.1.1.	Contrainte de rupture	146
5.1.2.	Température de transition fragile-ductile.....	147
5.1.3.	Déformation à la rupture	148
5.2.	Analyse des résultats de retrait empêché.....	150
5.3.	Réserve de traction	150
6.	TENDANCES COMMUNES ET GÉNÉRALES.....	151
6.1.	Synthèse des résultats : effet des AE et du régénérant	151
6.2.	Corrélations générales entre paramètres.....	152
6.2.1.	Entre paramètres thermomécaniques	152
6.2.2.	Avec des paramètres physico-chimiques.....	154
a.	Corrélation avec la température de transition vitreuse.....	154
b.	Corrélation avec l'indice carbonyle	155
c.	Corrélation avec SARA.....	155
7.	EXPÉRIMENTATION SUR CHAUSSÉE EN SERVICE (RD 996)	157
7.1.	Étude de formulation (2011).....	157
7.2.	Caractérisation physico-chimique des liants (2017).....	159
7.1.	Essais de fissuration à basse température	160
8.	CONCLUSIONS.....	163
	CONCLUSIONS & PERSPECTIVES.....	165
1.	CONCLUSIONS GÉNÉRALES.....	165
2.	PERSPECTIVES DE RECHERCHE.....	166
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	169
	ANNEXES	

LISTE DES FIGURES

Figure I-1. Constitution type et terminologie des différentes couches d'une chaussée [4].	3
Figure I-2. Types d'enrobés en fonction de la température de fabrication [7].	3
Figure I-3. Relation pénétration – température de ramollissement bille et anneau et indication des classes normalisées [12].	5
Figure I-4. Schéma de séparation chimique des constituants du bitume [16].	5
Figure I-5. Représentation schématique de deux types de bitume [12].	6
Figure I-6. Variation de la T_g avec (a) la pénétrabilité et (b) avec les FC d'après [23] [24] [25] [26] [27].	7
Figure I-7. Thermogramme d'un bitume en DSC, détermination de la T_g [13].	8
Figure I-8. Détermination de la teneur en fractions cristallisées FC à partir de la courbe DSC d'un bitume 180/220 [25].	8
Figure I-9. Liste des essais pour la formulation des enrobés bitumineux en France [31].	10
Figure I-10. Schéma de principe de l'essai PCG.	11
Figure I-11. Schéma de principe de l'essai d'orniérage.	12
Figure I-12. Classes de comportement du bitume en fonction de la déformation et la température [39].	12
Figure I-13. Comportement « types » des enrobés bitumineux à température fixée, (ϵ) déformation – (N) nombre de chargements [3].	13
Figure I-14. Principe de construction d'une courbe maîtresse à 15 °C [7].	14
Figure I-15. Résultats du module complexe représentés dans le plan Cole-Cole [34].	14
Figure I-16. Module complexe et angle de phase dans l'espace de Black [34].	15
Figure I-17. Schéma des sollicitations induites par le trafic [3].	15
Figure I-18. Principe de la modélisation d'une chaussée : logique des essais de fatigue sur enrobés [3].	16
Figure I-19. Schéma de principe de l'essai de résistance à la fatigue (2PB-TR).	16
Figure I-20. Exemple de droite de fatigue, béton bitumineux 0/14, 10°C, 25 Hz [38].	17
Figure I-21. Schématisation des sollicitations induites par la température [3] [34].	18
Figure I-22. Vue d'ensemble de l'équipement pour les essais UTST/TSRST [33].	19
Figure I-23. Influence de la température et de la vitesse de déformation sur le comportement en traction directe des liants et enrobés bitumineux [34].	19
Figure I-24. Influence de la vitesse de déformation et de la classe du liant sur le comportement en traction directe [34].	20
Figure I-25. Essai TSRST - Évolution de la contrainte cryogénique en fonction de la température (gradient thermique de -10 °C/h) [43].	21
Figure I-26. Influence du taux de refroidissement sur la contrainte cryogénique et la température de rupture lors de l'essai TSRST [53].	23
Figure I-27. Impact du pourcentage de vides (8 % ; 4 %), de la teneur en liant (4 % et 8 %) et de sa pénétrabilité (53 dmm ; 154 dmm) sur les performances en retrait empêché [53].	24
Figure I-28. Relation de la température de rupture en retrait thermique empêché avec la composition chimique du bitume (asphaltènes+résines) [68].	24
Figure I-29. Résultats TSRST pour différentes classes et nature de bitumes purs [67].	25
Figure I-30. Effet des polymères sur la température de rupture en TSRST [71].	25
Figure I-31. Comportement en retrait thermique empêché d'un enrobé au bitume pur (courbe inférieure) et au bitume modifié avec 7 % de SBS (courbe supérieure) [34] [69].	26
Figure I-32. Influence du vieillissement sur la température de rupture TSRST des enrobés avec différents bitumes [68].	26
Figure I-33. Influence du vieillissement sur la température de rupture TSRST des enrobés avec des bitumes purs ou modifiés [52].	27
Figure I-34. Impact de la température de départ de (a) +10 °C et (b) +20 °C [72].	27

Figure I-35. Simulation de la contrainte cryogénique selon la température de départ [43].	28
Figure I-36. Coûts liés à la fabrication des enrobés à chaud [84] [86].	29
Figure I-37. CO ₂ produit pendant la fabrication en centrale des enrobés à chaud avec des matériaux locaux [85].	29
Figure I-38. Consommation d'énergie pendant la fabrication et la mise en œuvre des enrobés bitumineux à chaud [84] [86].	30
Figure I-39. Évolution de la viscosité et de la composition du bitume au cours de l'enrobage et sur la chaussée [10].	30
Figure I-40. Phénomènes de vieillissement du bitume routier sur la chaussée [87].	31
Figure I-41. Paramètre G-R dans l'espace de Black [106].	32
Figure I-42. Évolution des fractions SARA de différents bitumes pour un vieillissement à court terme [30].	33
Figure I-43. Évolution (court et long termes) de l'indice carbonyle avec le vieillissement [92].	34
Figure I-44. Comparaison du spectre infrarouge d'un bitume neuf (en trait pointillé) et d'un liant issu d'AE (en trait plein) mettant en évidence l'oxydation du liant des AE par rapport à un liant neuf [111].	35
Figure I-45. Scénarios du degré de mélange entre le liant des AE et celui d'apport [136].	36
Figure I-46. Évolution des fractions SARA du bitume suite au vieillissement (gauche) et à la régénération par l'ajout des additifs de type régénérant (droite) [102] [150].	38
Figure I-47. Évolution du module complexe du liant des AE pendant la mise en température [152].	39
Figure I-48. Système multicouche dans les granulats des enrobés recyclés [135].	40
Figure I-49. Variation du coefficient de diffusion avec la température [159].	40
Figure I-50. Remobilisation du liant des AE lors du recyclage [102] [162].	41
Figure I-51. Effet du régénérant sur la pénétration après vieillissement [149].	41
Figure I-52. Effet du taux d'AE sur la rigidité et l'angle de phase du liant recomposé [41]. ..	42
Figure I-53. Effet des additifs sur la rigidité du liant vieilli [170].	42
Figure I-54. Effet du taux d'AE sur la compactibilité à la PCG (IMPROVMURE) [176].	43
Figure I-55. Norme du module complexe et angle de phase des mélanges avec AE [41].	44
Figure I-56. Évolution de la rigidité des enrobés avec le taux d'AE et le bitume d'apport [41].	44
Figure I-57. Résistance à la fatigue (ϵ_6) des enrobés recyclés selon le bitume d'apport [41]. ..	45
Figure I-58. Résistance à la fatigue des enrobés recyclés avec la température d'enrobage [5]	45
Figure I-59. Évolution de la température de rupture avec le taux d'AE et les cycles de recyclage (IMPROVMURE) [176].	46
Figure I-60. Évolution de la température de rupture TSRST avec le type de compactage (F : in situ ; L : laboratoire), le taux d'AE et le type de bitume d'apport [184].	46
Figure I-61. Évolution de la contrainte de rupture avec (a) le taux d'AE et (b) le % de vides (IMPROVMURE) [176].	46
Figure II-1. Plan d'expériences adopté.	49
Figure II-2. Vérification de la granulométrie et la teneur en liant des AE.	52
Figure II-3. Fuseaux granulométriques des agrégats d'enrobés : (a) AE-RM ; (b) AE-APRR ; (c) AE-LF ; (d) AE-BV.	53
Figure II-4. Comparaison des propriétés entre bitumes d'apport et liants des AE : (a) asphaltènes vs aromatiques ; (b) FC vs T _g	55
Figure II-5. Régénérant employé (Regefalt®).	55
Figure II-6. Recomposition granulométrique des différentes familles d'enrobé : (a) BBSG3, (b) GB4, (c) EME2 et (d) courbes moyennes des 3 familles.	58
Figure II-7. Principe de chauffe directe des AE en centrale d'enrobage [112].	59
Figure II-8. Températures de chauffe des bitumes d'apport.	60

Figure II-9. Choix des températures de chauffe (a) des granulats neufs ($\theta_{AE} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$) (b) des AE (BBSG3, $\theta_{\text{granulats}} = 165 \text{ }^\circ\text{C}$) [112].	60
Figure II-10. Malaxeurs utilisés : (a) INFRATEST ($\leq 45 \text{ kg}$) et (b) VMI ($\leq 90 \text{ kg}$).	61
Figure II-11. Méthodologie de fabrication adoptée.	62
Figure II-12. Températures d'enrobage des différentes formules.	62
Figure II-13. Schéma d'un évaporateur rotatif type.	63
Figure II-14. Évolution de la pénétrabilité lors de l'enrobage (BBSG3) : (a) liant recomposé ; (b) bitume d'apport et liant des AE.	64
Figure II-15. Évolution de la pénétrabilité lors de l'enrobage (GB4) : (a) liant recomposé ; (b) bitume d'apport et liant de l'AE.	65
Figure II-16. Évolution de la pénétrabilité lors de l'enrobage (EME2) : (a) liant recomposé ; (b) bitume d'apport et liant de l'AE.	65
Figure II-17. Évolution de la TBA des liants : (a) BBSG3, (b) GB4, (c) EME2 et (d) AE.	66
Figure II-18. Courbe DSC et paramètres-type des AE du BBSG3 après enrobage.	67
Figure II-19. Effet de l'enrobage sur (a) la T_g et (b) les FC des liants du BBSG3.	68
Figure II-20. Effet de l'enrobage sur (a) la T_g et (b) les FC des liants de la GB4.	68
Figure II-21. Effet de l'enrobage sur (a) la T_g et (b) les FC des liants de l'EME2.	69
Figure II-22. Relation de la T_g avec (a) les FC et (b) la pénétrabilité du liant.	69
Figure II-23. Spectre infrarouge après enrobage (liants de l'EME2).	70
Figure II-24. Indice carbonyle des liants du BBSG3 avant et après enrobage.	70
Figure II-25. Indice carbonyle des liants de la GB4 avant et après enrobage.	71
Figure II-26. Indice carbonyle des liants de l'EME2 avant et après enrobage.	71
Figure II-27. Relation de l'indice carbonyle avec : (a) la pénétrabilité et (b) la T_g du liant.	72
Figure II-28. Évolution des fractions SARA pendant l'enrobage (BBSG3) : (a) asphaltènes & saturés ; (b) résines & aromatiques.	73
Figure II-29. Évolution des fractions SARA pendant l'enrobage (GB4) : (a) asphaltènes & saturés ; (b) résines & aromatiques.	73
Figure II-30. Évolution des fractions SARA pendant l'enrobage (EME2) : (a) asphaltènes & saturés ; (b) résines & aromatiques.	74
Figure II-31. Effet de l'enrobage sur : (a) l'indice d'instabilité colloïdale et (b) le quotient asphaltènes/aromatiques.	74
Figure II-32. Relation de l'indice d'instabilité colloïdale (IC) avec : (a) la pénétrabilité et (b) l'indice carbonyle.	75
Figure III-1. PCG type 2, laboratoire Le Foll TP.	77
Figure III-2. Compactibilité à la PCG des formules de BBSG3 (a) à 10, 60 et 100 girations ; (b) effet du régénérant et spécifications à 60 girations.	78
Figure III-3. Dépendance de la compactibilité à la PCG des formules de BBSG3 avec (a) la pénétrabilité et (b) la TBA du liant recomposé (après enrobage).	79
Figure III-4. Compactibilité à la PCG des formules de GB4 (a) à 10, 60 et 100 girations ; (b) effet du régénérant et spécifications à 100 girations.	80
Figure III-5. Dépendance de la compactibilité à la PCG des formules de GB4 avec (a) la pénétrabilité et (b) la TBA du liant recomposé (après enrobage).	80
Figure III-6. Compactibilité à la PCG des formules d'EME2 : (a) à 10, 60 et 100 girations ; (b) effet du régénérant et spécifications à 100 girations.	81
Figure III-7. Dépendance de la compactibilité à la PCG des formules de EME2 avec (a) la pénétrabilité et (b) la TBA du liant recomposé (après enrobage).	81
Figure III-8. Presse pour l'essai Duriez, laboratoire Le Foll TP.	82
Figure III-9. Sensibilité à l'eau des formules de BBSG3 : (a) résistances à la compression et teneur en vides ; (b) rapport i/C et teneur en vides.	83
Figure III-10. Relation entre paramètres (BBSG3) : (a) résistances à la compression à l'air et à l'eau ; (b) vides aux essais PCG et Duriez.	84

Figure III-11. Sensibilité à l'eau des formules de GB4 : (a) résistances à la compression et teneur en vides ; (b) rapport i/C et teneur en vides.	84
Figure III-12. Relation entre paramètres (GB4) : (a) résistances à la compression à l'air et à l'eau ; (b) vides aux essais PCG et Duriez.	85
Figure III-13. Sensibilité à l'eau des formules de EME2 : (a) résistance à la compression et teneur en vides ; (b) rapport i/C et teneur en vides.	86
Figure III-14. Relation entre paramètres (EME2) : (a) résistances à la compression à l'air et à l'eau ; (b) vides aux essais PCG et Duriez.	86
Figure III-15. Ornièreur mlpc, laboratoire Le Foll TP.	87
Figure III-16. Résistance à l'orniérage des formules de BBSG3 : (a) valeurs mesurées ; (b) corrélation entre paramètres.	88
Figure III-17. Résistance à l'orniérage des formules de GB4 : (a) valeurs mesurées ; (b) corrélation entre paramètres.	88
Figure III-18. Résistance à l'orniérage des formules de EME2 : (a) valeurs mesurées ; (b) corrélation entre paramètres.	89
Figure III-19. Corrélation entre teneur en vides PCG et : (a) Duriez, (b) plaques d'orniérage.	90
Figure III-20. Relation entre performances et teneur en vides : (a) Duriez ; (b) orniérage.	91
Figure III-21. Corrélations entre compactibilité PCG et : (a) pénétrabilité, (b) TBA.	91
Figure III-22. Corrélations entre profondeur d'ornière et : (a) pénétrabilité, (b) TBA.	92
Figure III-23. Corrélations entre compactibilité PCG et : (a) indice colloïdal, (b) taux d'asphaltènes.	92
Figure III-24. Corrélations entre profondeur d'ornière et : (a) indice colloïdal ; (b) taux d'asphaltènes.	93
Figure IV-1. Procédure de compactage des plaques.	95
Figure IV-2. Température moyenne de compactage des plaques.	96
Figure IV-3. Découpe des éprouvettes trapézoïdales (TR).	96
Figure IV-4. Dispositif expérimental de flexion 2 points (Braja-Vésigné).	97
Figure IV-5. Norme du module complexe et angle de phase du BBSG3 : (a) 15 °C, 10 Hz ; (b) 10 °C, 10 Hz.	98
Figure IV-6. Variations relatives des paramètres de rigidité des formules de BBSG3 sous l'effet du taux d'AE et du régénérant : (a) module complexe et (b) angle de phase.	99
Figure IV-7. Module complexe à 15 °C (BBSG3) : (a) norme du module ; (b) angle de phase.	100
Figure IV-8. Rigidités complexes des formules de BBSG3 dans : (a) l'espace de Black et (b) le plan de Cole-Cole.	100
Figure IV-9. Variation des paramètres de rigidité avec la compacité : (a) norme du module complexe ; (b) angle de phase.	102
Figure IV-10. Norme du module complexe et angle de phase des formules de GB4 (4,5 % de vides) : (a) 15 °C et 10 Hz ; (b) 10 °C et 10 Hz.	102
Figure IV-11. Variations relatives des paramètres de rigidité des formules de GB4 sous l'effet du taux d'AE et du régénérant : (a) module complexe et (b) angle de phase.	103
Figure IV-12. Rigidité complexe à 15 °C (GB4) : (a) norme du module ; (b) angle de phase.	103
Figure IV-13. Rigidités complexes des formules de GB4 dans : (a) l'espace de Black et (b) le plan de Cole-Cole.	104
Figure IV-14. Norme du module complexe et angle de phase des formules d'EME2 : (a) 15 °C & 10 Hz ; (b) 10 °C & 10 Hz.	105
Figure IV-15. Variations relatives des paramètres de rigidité des formules d'EME2 sous l'effet du taux d'AE et du régénérant : (a) module complexe et (b) angle de phase.	105
Figure IV-16. Rigidité complexe à 15 °C (EME2) : (a) norme du module ; (b) angle de phase.	106

Figure IV-17. Rigidités complexes des formules d'EME2 dans : (a) l'espace de Black et (b) le plan de Cole-Cole.....	106
Figure IV-18. Courbes de fatigue des formules de BBSG3. (a) : effet du taux d'AE ; (b), (c) & (d) : effet du régénérant (en trait plein).	108
Figure IV-19. Paramètres conventionnels de la résistance à la fatigue (BBSG3).....	109
Figure IV-20. Effets des AE et du régénérant sur les formules de BBSG3 : (a) ϵ_6 et (b) pente b.	109
Figure IV-21. Variation de ϵ_6 avec la compacité (GB4) : (a) valeurs mesurées ; (b) variations relatives.	110
Figure IV-22. Courbes de fatigue des formules de GB4. (a) : effet du taux d'AE ; (b), (c) & (d) : effet du régénérant (en trait plein).	111
Figure IV-23. Paramètres conventionnels de la résistance à la fatigue (GB4).	112
Figure IV-24. Effets du taux d'AE et du régénérant sur les formules de GB4 : (a) ϵ_6 et (b) pente b.	112
Figure IV-25. Courbes de fatigue des formules d'EME2. (a) : effet du taux d'AE ; (b), (c) & (d) : effet du régénérant (en trait plein).	113
Figure IV-26. Paramètres conventionnels de la résistance à la fatigue (EME2).....	114
Figure IV-27. Effets des AE et du régénérant sur les formules d'EME2 : (a) ϵ_6 et (b) pente b.	115
Figure IV-28. Corrélations entre paramètres de rigidité aux deux températures d'essai : (a) norme du module complexe ; (b) angle de phase.	116
Figure IV-29. Corrélations entre l'angle de phase et : (a) la norme du module complexe ; (b) le paramètre de fatigue ϵ_6	116
Figure IV-30. (a) corrélation entre ϵ_6 et module complexe ; (b) valeurs du produit $\epsilon_6 E^* ^{0.5}$	117
Figure IV-31. Relation de la norme du module complexe avec : (a) la pénétrabilité ; (b) la TBA.	117
Figure IV-32. Corrélations entre ϵ_6 et : (a) pénétrabilité ; (b) TBA.	118
Figure IV-33. Corrélation de l'indice carbonyle avec (a) la norme du module complexe et (b) la résistance à la fatigue.	118
Figure IV-34. Relation de la norme du module complexe avec : (a) indice d'instabilité colloïdale ; (b) asphaltènes + résines.....	119
Figure IV-35. Relation du paramètre de fatigue ϵ_6 avec : (a) l'indice d'instabilité colloïdale ; (b) le taux d'asphaltènes.....	119
Figure IV-36. Structure adoptée pour le dimensionnement.	120
Figure IV-37. Déformations maximales calculées : (a) transversales de l'EME2 et (b) verticales de la PF1.....	122
Figure IV-38. Trafic équivalent admissible (couche de surface BBSG3-0R) : (a) b variable et (b) b = -0,2.....	123
Figure IV-39. Trafic équivalent admissible (b = -0,2) : (a) couche de surface BBSG3-0R et (b) couche de surface BBSG3-Std.....	124
Figure V-1. Température moyenne de compactage des plaques.....	127
Figure V-2. Plan de carottage des éprouvettes des essais à froid.....	128
Figure V-3. Dispositifs des essais à basse température.....	129
Figure V-4. Courbes contrainte-déformation lors d'essais de traction (BBSG3-55CR') : (a) rupture fragile à -25 et -10 °C ; (b) rupture ductile à +5 et +20 °C.....	130
Figure V-5. Température de transition fragile-ductile T_{fd} en UTST (BBSG3-55CR').....	131
Figure V-6. Résultats d'essais de retrait thermique empêché (BBSG3-55CR') : (a) répétabilité des essais ; (b) paramètres caractéristiques.	132
Figure V-7. Réserve de traction (BBSG3-55CR').	132
Figure V-8. Résistance à la traction directe à l'essai UTST (BBSG3) : (a) -25 et -10 °C ;(b) +5 et +20 °C.	134

Figure V-9. Résistance en traction directe vs température pour les formules de BBSG3. (a) : effet du % d'AE ; (b), (c), & (d) : effet de l'additif.	135
Figure V-10. Résistance maximale à la traction directe et température de transition fragile-ductile pour les formules de BBSG3.	136
Figure V-11. Déformation conventionnelle à la rupture à l'essai UTST (BBSG3) : (a) selon les formules ;(b) selon la dureté du liant recomposé.	136
Figure V-12. Résistance à la traction et déformation conventionnelle de rupture (BBSG3) : (a) -25 °C ; (b) +5 °C.	137
Figure V-13. Résultats de l'essai de retrait empêché (BBSG3) : (a) températures de rupture et de transition ; (b) contrainte de rupture et pente dS/dT.	138
Figure V-14. Réserve de traction d'après les essais de traction directe et de retrait empêché (BBSG3) : (a) effet des AE ; (b), (c), (d) effet du régénérant.	139
Figure V-15. Résistance à la traction directe à l'essai UTST (GB4) : (a) -25 et -10 °C ;(b) +5 et +20 °C.	141
Figure V-16. Résistance en traction directe vs température pour les formules de GB4. (a) : effet du % d'AE ; (b), (c), & (d) : effet de l'additif.	142
Figure V-17. Déformation conventionnelle à la rupture à l'essai UTST (GB4) : (a) toutes les températures ; (b) Corrélation avec T_{fd} ($T = +5$ °C)	143
Figure V-18. Résistance à la traction et déformation conventionnelle de rupture (GB4) : (a) -25 °C ; (b) +5 °C.	143
Figure V-19. Résultats de l'essai de retrait empêché (GB4) : (a) températures de rupture et de transition ; (b) contrainte de rupture et pente dS/dT.	144
Figure V-20. Réserve de traction d'après les essais de traction directe et de retrait empêché (GB4) : (a) effet des AE ; (b), (c), (d) effet du régénérant.	145
Figure V-21. Résistance à la traction directe à l'essai UTST (EME) : (a) -25 et -10 °C ;(b) +5 et +20 °C.	147
Figure V-22. Résistance en traction directe vs température pour les formules d'EME2. (a) : effet du % d'AE ; (b), (c), & (d) : effet de l'additif.	148
Figure V-23. Déformation conventionnelle à la rupture à l'essai UTST (EME2) : (a) toutes les températures ; (b) corrélation avec T_{fd} ($T = +5$ °C).	149
Figure V-24. Résistance à la traction et déformation conventionnelle de rupture (EME2) : (a) -25 °C ; (b) +5 °C.	149
Figure V-25. Résultats de l'essai de retrait empêché (EME2) : (a) températures de rupture et de transition ; (b) contrainte de rupture et pente dS/dT.	150
Figure V-26. Réserve de traction d'après les essais de traction directe et de retrait empêché (EME2) : (a) effet des AE ; (b), (c), (d) effet du régénérant.	151
Figure V-27. Corrélation entre températures : (a) température de transition fragile-ductile et température de rupture (TSRST) ; (b) température de transition fragile-ductile et température critique (réserve nulle).	152
Figure V-28. Corrélation entre températures caractéristiques et déformation à la rupture à +5 °C : (a) température de transition fragile-ductile ; (b) température de rupture.	153
Figure V-29. Corrélation entre paramètres de rigidité et de fatigue avec des paramètres à basse température : (a) module de rigidité complexe vs température de rupture (TSRST) ; (b) résistance conventionnelle à la fatigue vs déformation à la rupture (UTST ; $T = +5$ °C).	154
Figure V-30. Corrélation entre températures caractéristiques des essais à froid et température de transition vitreuse : (a) température de transition fragile-ductile ; (b) température de rupture en retrait empêché.	154
Figure V-31. Corrélation entre températures caractéristiques des essais à froid et indice carbonyle : (a) température de rupture en retrait empêché ; (b) température de transition fragile-ductile.	155

Figure V-32. Corrélation entre températures caractéristiques des essais à froid et indice colloïdal : (a) température de rupture en retrait empêché ; (b) température de transition fragile-ductile.	156
Figure V-33. Corrélation entre la température de rupture en TSRST et SARA : (a) Asphaltènes + résines ; (b) Asphaltènes / aromatiques.....	156
Figure V-34. Recomposition granulométrique des enrobés de la RD 996.....	158
Figure V-35. Résultats des épreuves de formulation de la RD 996 : (a) teneur en vides PCG, Duriez et plaques d'orniérage ; (b) résistances à la compression et rapport r/R.....	158
Figure V-36. Caractéristiques des liants de la RD 996 après 6 ans de service : (a) pénétrabilité et TBA ; (b) T_g et FC.....	160
Figure V-37. Essais FTIR et SARA sur les liants de la RD 996 : (a) indice carbonyle I_{CO} et d'instabilité colloïdale IC ; (b) Teneur en asphaltènes, saturés, résines et aromatiques.	160
Figure V-38. Résultats des essais UTST à -10 °C : (a) contrainte conventionnelle de rupture ; (b) déformation conventionnelle de rupture et rigidité.	162
Figure V-39. Résultats de l'essai TSRST : (a) contrainte cryogénique moyenne (3 répliques par courbe) ; (b) températures de rupture et de transition.	162
Figure V-40. Résultats de l'essai TSRST : (a) contrainte de rupture et pente dS/dT ; (b) réserve de traction à -10 °C.....	163

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1. Composition du bitume [18].	6
Tableau I-2. Évolution PAV des propriétés de différents bitumes à basse température [107].	34
Tableau I-3. Relation entre la connaissance de l'état des AE et le taux de remplissage [123].	36
Tableau I-4. Classification des additifs [102].	37
Tableau II-1. Essais réalisés sur les liants et sur les enrobés.	50
Tableau II-2. Caractéristiques des granulats neufs destinés aux enrobés.	51
Tableau II-3. Caractérisation des bitumes d'apport.	52
Tableau II-4. Caractéristiques des AE.	54
Tableau II-5. Caractéristiques des formules recomposées de BBSG3 (RM).	56
Tableau II-6. Caractéristiques des formules recomposées de GB4 (LF).	57
Tableau II-7. Caractéristiques des formules recomposées pour l'EME2 (BV).	57
Tableau II-8. Écarts maximaux autorisés pour la vérification de la recombinaison.	61
Tableau III-1. Résultats des essais à la PCG : pourcentage de vides moyen.	78
Tableau III-2. Résultats de l'essai Duriez pour l'ensemble des formules.	83
Tableau III-3. Résistance à l'orniérage.	87
Tableau III-4. Influence des AE et du régénérant : synthèse.	90
Tableau IV-1. Paramètres de rigidité du BBSG3 (10 et 15 °C ; 10 Hz).	98
Tableau IV-2. Rigidité des formules de GB4 à 4,5 % de vides (10 °C & 15 °C ; 10 Hz).	101
Tableau IV-3. Rigidité des formules de GB4 à 6 % de vides (10 °C et 15 °C ; 10 Hz).	101
Tableau IV-4. Paramètres de rigidité de l'EME2 (10 et 15 °C ; 10 Hz).	104
Tableau IV-5. Paramètres de résistance à la fatigue du BBSG3 (10 °C ; 25 Hz).	107
Tableau IV-6. Paramètres de résistance à la fatigue de la GB4 (10 °C ; 25 Hz).	110
Tableau IV-7. Paramètres de résistance à la fatigue de l'EME2 (10 °C ; 25 Hz).	113
Tableau IV-8. Influence des AE et du régénérant : synthèse.	115
Tableau IV-9. Facteurs de risque	121
Tableau IV-10. Valeurs du paramètre ϵ_1 .	121
Tableau IV-11. Déformations maximales transversales (EME2) et verticales (PF1).	122
Tableau IV-12. Trafic équivalent admissible (couche de surface BBSG3-0R).	123
Tableau IV-13. Trafic équivalent admissible : BBSG3-0R & BBSG3-Std.	124
Tableau V-1. Résultats des essais à basse température du BBSG3.	133
Tableau V-2. Résultats des essais à basse température de la GB4.	140
Tableau V-3. Résultats des essais à basse température de l'EME2.	146
Tableau V-4. Influence des AE et du régénérant : synthèse.	152
Tableau V-5. Caractéristiques des formules de BBSG3 de la RD 996.	157
Tableau V-6. Résultats des essais sur le liant extrait (RD 996).	159
Tableau V-7. Caractérisation à basse température des formules de la RD 996.	161

ABRÉVIATIONS ET SYMBOLES

AE	Agrégats d'enrobé
b	Pente de la droite de fatigue de Wöhler
BBSG3	Béton Bitumineux Semi-Grenu classe 3
C _D	Résistance à la compression simple éprouvettes sèches (MPa), essai Duriez
C _w	Résistance à la compression simple éprouvettes imbibées (MPa), essai Duriez
dS/dT	Pente d'accumulation des contraintes en TSRST
DSC	Differential Scanning Calorimetry
E*	Norme du module complexe (MPa)
E ₁	Composante élastique ou réelle du module complexe (MPa)
E ₂	Composante visqueuse ou imaginaire du module complexe (MPa)
EME2	Enrobé à Module Élevé classe 2
FC	Fractions cristallisables
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
FTP	Fiche technique du produit
GB4	Grave-Bitume classe 4
G-R	Paramètre de Glover-Rowe
i/C	Rapport de résistances de la sensibilité à l'eau (équivalence avec r/R)
IC	Indice d'instabilité colloïdale
I _{co}	Indice carbonyle
I _{so}	Indice sulfoxyde
K	Module de richesse des mélanges
LCT	Température limite de fissuration (°C), essai TPBT
MVR _E	Masse volumique réelle de l'enrobé
MVR _G	Masse volumique des granulats
N	Nombre de cycles
NE _{adm}	Trafic équivalent admissible
PAV	Pressure Aging Vessel
PCG	Presse à cisaillement giratoire
Pén.	Pénétrabilité du liant (mm/10)
PF1	Plateforme de classe 1 (E = 20 MPa)
P _{N=30000}	Pourcentage d'orniére à 30000 cycles
RD 996	Route départementale 996, Côte d'Or
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test

SARA	Saturés, aromatiques, résines et asphaltènes
S_N	Écart-type résiduel des durées vie
Std	Enrobé Standard (spécifications)
T_{23°	Température d'iso déphasage 23 degrés (°C), module complexe
$T_{300\text{MPa}}$	Température d'iso module $T_{S=300\text{ MPa}}$ (°C), essai BBR
$T_{300\text{MPa}^*}$	Température d'iso module 300 MPa et 1 Hz (°C), module complexe
TBA	Température de ramollissement bille et anneau (°C)
T_{Crit}	Température critique $T_{m=0,3}$ (°C), essai BBR
T_{critique}	Température pour réserve de résistance nulle (°C)
T_{diss}	Température d'iso dissipation (°C), essai TPBT
T_{failure}	Température de rupture en TSRST (°C)
T_{fd}	Température de transition fragile-ductile en UTST (°C)
T_{fdR}	Température de transition ou de fin de relaxation en TSRST (°C)
T_{Fraass}	Température de fragilité FRAASS (°C)
T_g	Température de transition vitreuse (°C)
t_{int}	Teneur en liant interne (%)
T_{mfR}	Température de micro-fissuration en TSRST (°C)
TSRST	Retrait thermique empêché (Tensile Stress Restrained Specimen Test)
UTST	Traction uniaxiale (Uniaxial Tensile Strength Test)
VNRS	Voies du Réseau Non Structurant
α	Coefficient de dilatation-contraction thermique ($\mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$)
β_t	Contrainte conventionnelle de rupture en UTST (MPa)
$\beta_{t\text{ max}}$	Contrainte correspondante à T_{fd} (MPa)
$\Delta\epsilon_6$	Indice de qualité de la déformation conventionnelle de fatigue ($\mu\text{m}/\text{m}$)
$\Delta\beta_t$	Réserve de résistance en traction (MPa)
ϵ_6	Déformation caractéristique de la résistance à la fatigue ($\mu\text{m}/\text{m}$)
$\epsilon_{\text{failure}}$	Déformation conventionnelle ($\mu\text{m}/\text{m}$) de rupture en UTST
ϵ_t	Déformation critique horizontale de traction pour l'enrobé ($\mu\text{m}/\text{m}$)
ϵ_z	Déformation critique verticale de compression pour la plateforme ($\mu\text{m}/\text{m}$)
θ_{AE}	Température de chauffe des agrégats d'enrobé (°C)
$\theta_{\text{granulats}}$	Température de chauffe des granulats (°C)
$\theta_{\text{référence}}$	Température de référence (°C)
σ_{cry}	Contrainte cryogénique en TSRST (MPa)
$\sigma_{\text{cry, failure}}$	Contrainte cryogénique de rupture (MPa)
φ	Angle de phase (degrés)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Avec une production mondiale annuelle proche de 2 000 Mt [1] d'enrobés bitumineux, contenant environ 100 Mt de bitume, la construction routière a un impact environnemental important, à la fois en termes de prélèvement de ressources naturelles, mais aussi en matière de consommation énergétique, compte tenu des différents processus industriels mis en jeu depuis l'extraction des granulats et la production du bitume jusqu'à la mise en oeuvre des enrobés sur la chaussée. En outre, l'émission de CO₂ est estimée en moyenne à 50 kg/t.

Dans un contexte international de sensibilisation aux problèmes environnementaux et au changement climatique, les acteurs impliqués dans la construction routière (maîtres d'ouvrage, entreprises) ont pris conscience de la nécessité de contribuer à la réduction des impacts environnementaux. En France, la démarche a donné lieu à la « Convention d'engagement volontaire » signée en 2009 entre des représentants des entreprises de Travaux Publics (FNTP, USIRF) et le Ministère de l'Écologie visant à réduire l'émission de gaz à effet de serre, à utiliser des eco-comparateurs et à favoriser le réemploi des matériaux de déconstruction.

Différentes études ont montré que parmi l'ensemble des processus mis en jeu dans la construction des chaussées, les opérations les plus consommatrices d'énergie, sont la production des granulats et la fabrication des enrobés. Pour réduire la consommation énergétique lors de la fabrication, la France a augmenté sa production d'enrobés tièdes, semi-tièdes et à froid, mais en 2017 les enrobés à chaud constituent encore 83 % de la production totale [2].

Le recyclage permet la réduction des impacts énergétiques et environnementaux notamment lors des phases de production de granulats et de bitume. En 2017 le taux moyen d'agrégats d'enrobés (AE) introduits dans la fabrication d'enrobés bitumineux en France a été de 18,4 %. Il est admis que moyennant une bonne caractérisation des agrégats d'enrobés et une adaptation des centrales de fabrications un taux de recyclage de 40 % ne produit pas d'altération du mélange résultant.

Des taux de recyclage supérieurs à 40 % ont néanmoins été utilisés à titre expérimental sur route et en laboratoire, qui selon le cas ont donné des résultats parfois contradictoires en termes de performances thermomécaniques. Le recyclage des enrobés à fort taux reste donc pour le moment une technique qui pose des questions ouvertes à la fois en termes de fabrication et de performances des produits.

Le problème majeur posé par la production et l'utilisation d'enrobés à fort taux de recyclés est dû au vieillissement et au durcissement conséquent du bitume des AE qui rend difficile son mélange avec le bitume neuf d'apport. Une solution souvent adoptée consiste à utiliser des additifs qui fluidifient et/ou modifient chimiquement le bitume vieilli. Dans le cas d'une modification chimique du liant vieilli, on parle de régénérant (rejuvenator en anglais).

Des projets de recherche collaborative ont été développés au niveau national (MURE, IMPROVMURE) ou international (Re-Road, BioRePavation, NCHRP 9-58) afin de répondre aux problèmes posés par le recyclage à fort taux.

En l'absence de spécifications sur les régénérants, il est difficile à l'utilisateur de choisir parmi les nombreux produits proposés par les industriels, aussi des essais sont souvent nécessaires pour adapter le type et le dosage de régénérant à la nature du bitume vieilli.

Dans ce contexte, le présent travail de recherche, a pour objectifs :

- d'évaluer les performances de plusieurs types d'enrobés à différents taux de recyclage, allant jusqu'à 70 %,
- et d'analyser les effets d'un régénérant (Regefalt) sur les propriétés ci-dessus.

Ce travail a été mené dans le cadre d'une convention CIFRE avec la société Fenixfalt SAS, pilote d'un groupement d'entreprises (Braja-Vésigné, Le Foll, Roger Martin), lesquelles ont été des acteurs essentiels pour la réalisation du projet en mettant à disposition les matériaux et la plupart des matériels d'essais.

L'approche choisie est essentiellement expérimentale en laboratoire et comprend, pour chaque composition, la totalité des essais correspondants aux différents niveaux de formulation ainsi que des essais complémentaires sur les caractéristiques physico-chimiques des liants et sur la tenue des enrobés à basse température.

Le mémoire se décompose en cinq chapitres principaux.

Le premier chapitre est une étude bibliographique sur les essais utilisés pour la formulation des enrobés, sur le vieillissement des bitumes et sur les propriétés des enrobés recyclés.

Le chapitre suivant décrit les caractéristiques des divers composants constituant les mélanges (agrégats d'enrobés, granulats, bitumes : vieilli, d'apport et recomposé), le processus d'élaboration des différentes formules testées et le programme expérimental mis en œuvre.

Le chapitre trois présente les résultats des essais de formulation de niveaux N1 (aptitude au compactage et résistance à l'eau) et N2 (résistance à l'orniérage), ainsi que des relations avec les propriétés physico-chimiques du liant recomposé.

Les résultats des essais de détermination du module de rigidité complexe des différentes compositions d'enrobés (niveau N3) et des essais de résistance à la fatigue (niveau N4) sont détaillés au chapitre 4, ainsi que des relations entre différents paramètres. L'effet des résultats sur le dimensionnement structurel est étudié.

Le dernier chapitre expose la méthodologie suivie pour caractériser la résistance des enrobés à basse température ainsi que les résultats obtenus et leur dépendance avec d'autres paramètres. Les résultats d'une campagne expérimentale menée sur une route départementale en service (RD 996) sont également détaillés.

Des conclusions générales sont enfin tirées des résultats obtenus et des perspectives de la recherche sont énoncées.

CHAPITRE I. ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1. LES ENROBÉS BITUMINEUX À CHAUD

Les chaussées routières sont des structures multicouches (Figure I-1) dont les couches de surface et d'assise sont majoritairement réalisées avec des matériaux traités aux liants bitumineux. Les couches de surface sont responsables de la sécurité et du confort des usagers ainsi que de la protection hydrique, thermique et mécanique des couches d'assise. Le rôle des couches d'assise est de protéger le sol support vis-à-vis de la pénétration du gel par temps froid et de réduire à ce niveau les sollicitations dues au trafic [3].

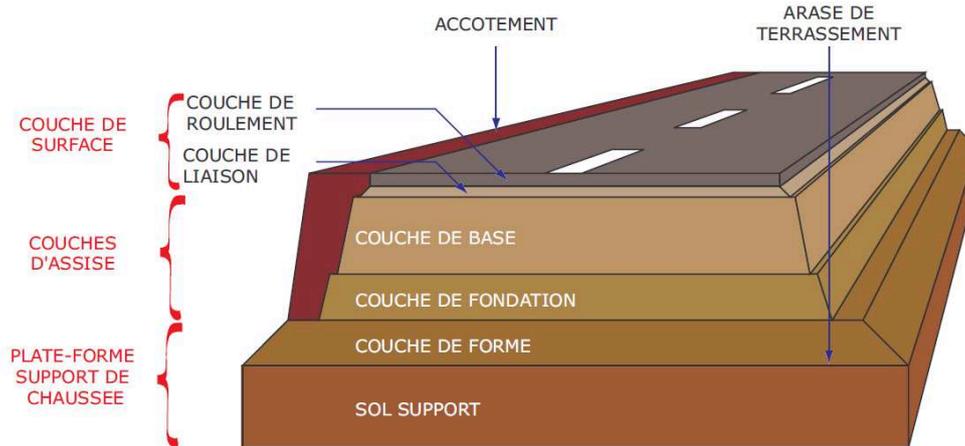


Figure I-1. Constitution type et terminologie des différentes couches d'une chaussée [4].

Ce multicouche hydrocarboné peut comporter différents types de mélanges bitumineux, classifiés selon leur température de fabrication (Figure I-2), leur mise en œuvre et leur composition. Ces derniers sont constitués par l'association de matériaux pierreux (filler, sable, gravillons), formant le squelette minéral, et de liants hydrocarbonés (asphalte, goudron, bitume) qui assurent la cohésion [5] [6].

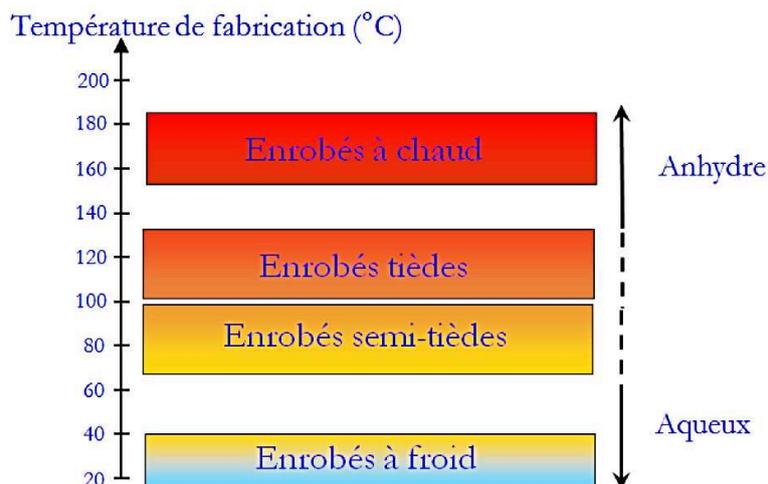


Figure I-2. Types d'enrobés en fonction de la température de fabrication [7].

Les enrobés bitumineux à chaud comportent généralement 95 % de granulats pour environ 5 % de liant. Différents types d'enrobés sont élaborés selon la proportion et la nature

des constituants, et selon la méthode de mise en œuvre. Ainsi une teneur en vides élevée (jusqu'à 20 %) est demandée pour les enrobés drainants [8]. Par ailleurs, des taux variables d'agrégats d'enrobés (AE) sont de plus en plus incorporés dans les nouveaux mélanges [9].

1.1. SQUELETTE GRANULAIRE

Le squelette granulaire est constitué par des petites et grosses particules dont le filler, mélangé prioritairement avec le bitume, constitue le mastic [6] [10].

Selon leur nature minéralogique et leurs propriétés, les granulats présentent plus ou moins d'affinité avec le bitume. L'adhésion du bitume au granulat est surtout déterminée par la présence de cations en surface de ce dernier autorisant l'adsorption des composés acides et phénoliques du bitume. Des granulats à haute teneur en silice et présentant peu de cations en surface ne permettent donc pas une bonne adhésion. Les calcaires, à l'inverse, présentent une bonne adhésivité.

Les formules, avec des pourcentages de sables et gravillons bien distribués, permettent un meilleur compactage que les formules riches en gravillons, mais elles peuvent présenter une résistance faible à l'orniérage [8]. Les caractéristiques intrinsèques des gravillons (dureté, résistance à l'usure par frottement et résistance au polissage) doivent garantir une bonne qualité du squelette granulaire, qui impacte les performances mécaniques de l'enrobé. Cette caractérisation se fait par différents essais : Los Angeles (L.A.), Micro Deval (M.D.E.), polissage accéléré, sensibilité au gel... [11].

1.2. LE BITUME

1.2.1. Classification des bitumes

En France, les bitumes sont caractérisés par un certain nombre d'essais normalisés dont les plus pratiqués sont la pénétrabilité à l'aiguille et la température de ramollissement bille et anneau (TBA), qui permettent d'apprécier leur consistance et varient en sens inverse (Figure I-3). La viscosité du bitume augmente lorsque la valeur de la pénétrabilité diminue ; la résistance à l'orniérage augmente avec la TBA.

En Europe, les bitumes sont définis par les bornes inférieure et supérieure de leur pénétrabilité, exprimée en 10^e de millimètre [12]. Les classes les plus utilisées en France sont : 20/30 – 35/50 – 50/70 – 70/100 – 160/220, pour les bitumes classiques. Pour les bitumes de grade dur, les classes retenues sont : 10/20 et 15/25.

1.2.2. Constitution chimique du bitume

Constitué majoritairement de carbone (82-88 %) et d'hydrogène (8-11 %), le bitume est un matériau complexe composé de différents hydrocarbures, distincts par leur masse, leur degré d'aromaticité, le nombre et la nature de leurs groupements polaires [8] [13].

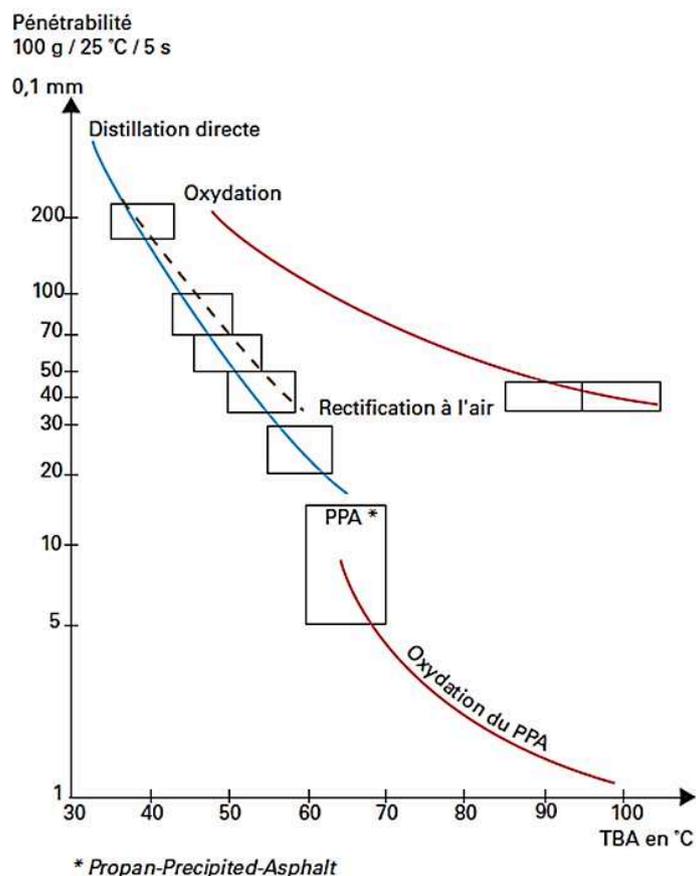


Figure I-3. Relation pénétration – température de ramollissement bille et anneau et indication des classes normalisées [12].

On regroupe les constituants du bitume au sein de grandes fractions génériques [12] à l'aide de la méthode de fractionnement SARA (saturés, aromatiques, résines et asphaltènes) [8] [10] [14] [15]. Cette méthode consiste à séparer ces quatre fractions (Figure I-4), lesquelles peuvent se regrouper en deux groupes génériques séparables : les asphaltènes qui correspondent à la partie insoluble et les maltènes qui forment la matrice huileuse, rassemblant les saturés, aromatiques et résines. La détermination de la phase maltène est réalisée par Chromatographie sur Couche Mince (IATROSCAN) après élution dans différents solvants [15].

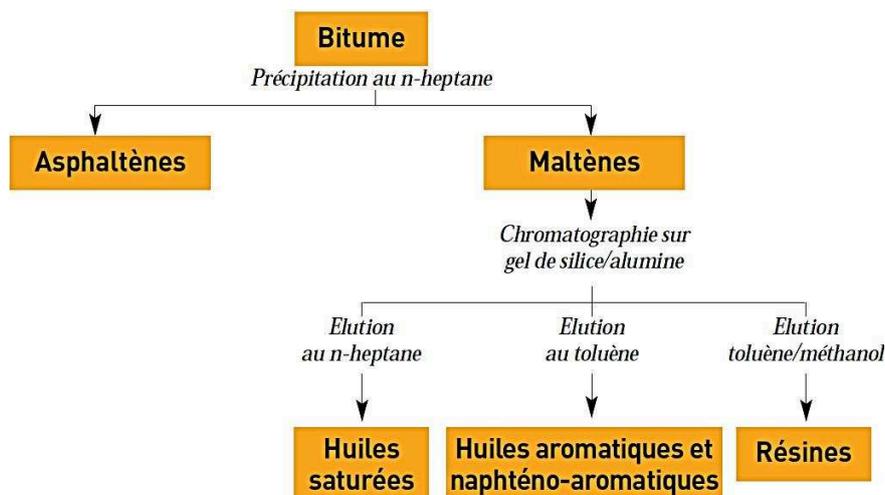


Figure I-4. Schéma de séparation chimique des constituants du bitume [16].

Les proportions des différentes familles dépendent de divers facteurs : origine du brut, mode de fabrication du bitume, grade et état de vieillissement... et de la méthode de séparation utilisée, qu'il est donc impératif de préciser lors des résultats [8] [10] [17]. Les caractéristiques de chaque constituant, sont précisées dans le Tableau I-1.

Tableau I-1. Composition du bitume [18].

Caractéristiques	Maltènes			Asphaltènes
	Saturés	Aromatiques	Résines	
% dans le bitume (massique)	5 % - 10 %	40 % - 65 %	10 %	5 % - 25 %
Masse moléculaire (g/mol)	300 – 2000	300 – 2000	500 – 50000	1000 – 100000
Couleur	Incolore – jaunâtre	Rouge – brun sombre	Noire – brun foncé	Noir
Constituant	Carbone, Hydrogène	Carbone, Hydrogène et Soufre	Carbone, Hydrogène, Azote, Oxygène et Soufre	Carbone, Hydrogène, Azote, Oxygène et Soufre
Propriétés données au bitume	Viscosité et fluidité	Viscosité et fluidité	Adhésivité et ductilité	Résistance et rigidité

Sur le plan structurel, le bitume est un milieu colloïdal dans lequel les asphaltènes sont entourés par des résines et reposent dans un milieu intermicellaire constitué par les huiles saturées et les aromatiques [12] [16] [19]. On parle de système Sol, dans le cas où les résines et les aromatiques sont en quantité suffisante et les asphaltènes totalement dispersés. À l'inverse, si la teneur en résines et aromatiques est faible, les asphaltènes flocculent aboutissant alors à un système qualifié de Gel [7] [8].

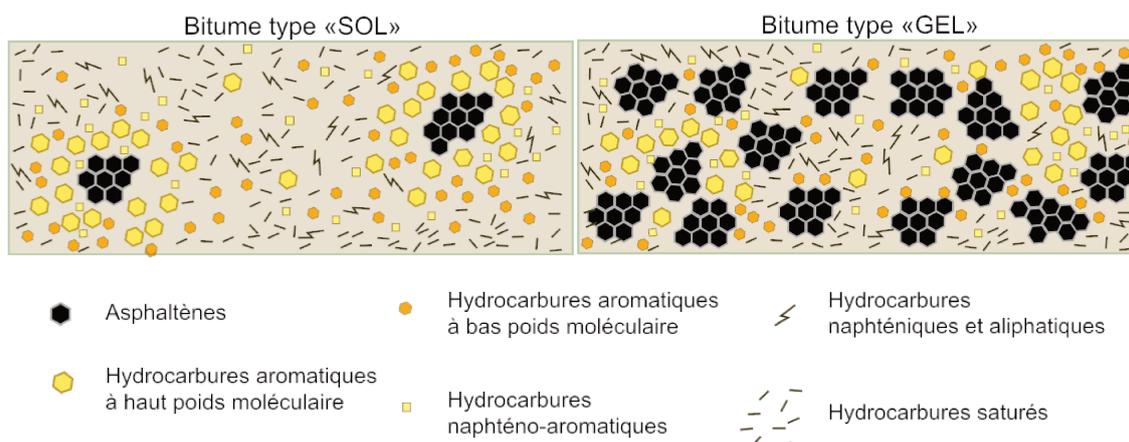


Figure I-5. Représentation schématique de deux types de bitume [12].

Les bitumes ayant un caractère Sol résistent très bien aux sollicitations rapides, mais ils sont plus sensibles aux sollicitations très lentes ainsi qu'aux variations de température. D'autre part, le caractère Gel confère une bonne résistance aux charges de longue durée par fortes températures [12] [16].

Afin de quantifier les proportions entre familles, on introduit l'indice d'instabilité colloïdale « IC » défini par [20]:

$$IC = \frac{(teneur\ en\ asphaltènes) + (teneur\ en\ saturés)}{(teneur\ en\ résines) + (teneur\ en\ aromatiques)} \quad (I-1)$$

Dans le cas des bitumes de distillation directe à usage routier, IC est faible, ce qui correspond à un produit peu structuré qui se comporte comme un Sol. Les phénomènes de déshydrogénation et de condensation des asphaltènes et des résines, intervenant lors du processus d'oxydation par l'air à température élevée, conduisent à un accroissement significatif de l'indice d'instabilité colloïdale [12].

La dureté du bitume impose la température d'enrobage. Une viscosité proche de 0,2 Pa.s est communément admise afin d'assurer un bon enrobage. Pour un bitume de classe 35/50, cette valeur de viscosité est obtenue pour une température d'environ 160 °C [7] [16].

1.2.3. Analyse calorimétrique différentielle (DSC, Differential Scanning Calorimetry)

La DSC est une méthode d'analyse calorimétrique basée sur la mesure de la différence de flux de chaleur entre un échantillon du matériau à tester et un échantillon de référence, ce qui permet d'étudier les propriétés thermodynamiques des matériaux bitumineux. Les résultats fournissent la température en-dessous de laquelle les molécules ont une faible mobilité relative, appelée T_g (température de transition vitreuse), ainsi que le taux de fractions cristallisables dues aux saturés (FC).

La température T_g peut s'interpréter comme le début de la fragilité [15] [21] [22]. La présence des FC dans le bitume peut entraîner des conséquences néfastes sur le comportement thermomécanique de celui-ci, surtout dans les intervalles de température où se produit leur dissolution [23]. D'après les résultats de Claudy et al. [24], les paramètres DSC ne peuvent pas être estimés à partir des propriétés classiques du liant, tel que la pénétrabilité. Une relation entre la T_g et les FC peut être observée (Figure I-6). Des tendances similaires sont aussi constatées par d'autres chercheurs [23] [25] [26] [27].

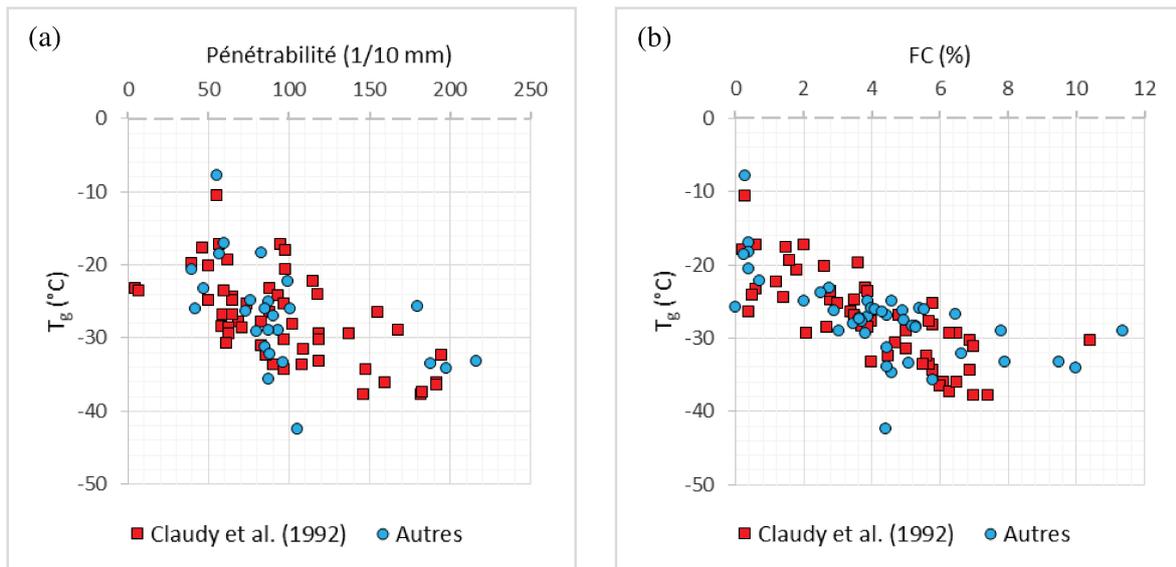


Figure I-6. Variation de la T_g avec (a) la pénétrabilité et (b) avec les FC d'après [23] [24] [25] [26] [27].

Baglieri et al. [28] indiquent que la T_g d'un bitume modifié aux polymères est significativement affectée par le changement de la source de bitume de base, alors que

l'influence de la modification du polymère peut être moins importante. Leurs résultats montrent une T_g plus basse pour le liant extrait des enrobés que pour les liants de base, possiblement liée au type de filler présent dans le mélange [29].

Un thermogramme du liant (Figure I-7 et Figure I-8) présente généralement deux accidents thermiques : une transition vitreuse (T_g), attribuée aux fractions aromatiques et à une partie des fractions saturées, suivie d'un massif endothermique correspondant à la dissolution des matières cristallisables [23] [27] [30].

Sur la Figure I-7, entre -100 °C et -30 °C aucun accident thermique n'est constaté. Puis, entre -30 °C et -10 °C on observe la zone de transition vitreuse avec un point d'inflexion dont l'abscisse est prise par convention égale à T_g .

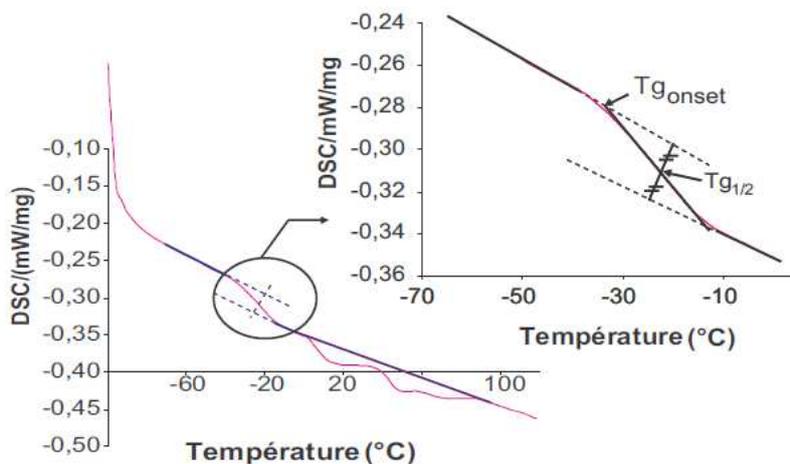


Figure I-7. Thermogramme d'un bitume en DSC, détermination de la T_g [13].

Les FC sont généralement caractérisées par intégration du signal endothermique observé au-dessus de la T_g (Figure I-8) [13] [24]. La droite de base utilisée pour le calcul des FC peut se prendre à partir de la tangente à la courbe après T_g et jusqu'à la fin de la dissolution, autour de 90-95 °C [27] [30].

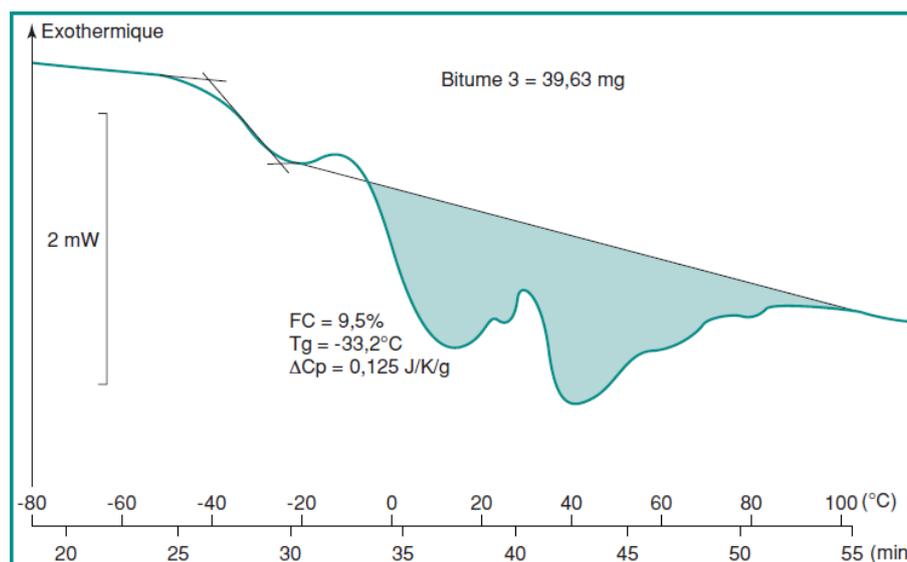


Figure I-8. Détermination de la teneur en fractions cristallisées FC à partir de la courbe DSC d'un bitume 180/220 [25].

La teneur en fractions cristallisables (FC), exprimée en pourcentage, se calcule d'après l'aire ΔH du massif de dissolution (exprimée en J/g) et l'enthalpie moyenne ΔH_m de dissolution des fractions cristallisables (valeur de référence égale à 200 J/g) [23] [24] :

$$FC = 100 \times \frac{\Delta H}{\Delta H_m} \quad (\text{I-2})$$

2. FORMULATION DES ENROBÉS

La conception d'un enrobé hydrocarboné à chaud en France comporte cinq niveaux de formulation (niveaux 0 à 4 détaillés dans la Figure I-9). Le premier niveau (N0) commence par la détermination de la composition granulométrique (squelette granulaire) et de la teneur en liant (classe comprise), avec l'objectif de garantir un enrobage correct et durable des granulats.

Une première estimation de la teneur en liant peut être réalisée à l'aide de la valeur du module de richesse K (variant entre 2,5 et 3,6) qui représente l'épaisseur moyenne du film de liant autour des granulats. Les nouvelles normes ont adopté des valeurs de teneur en liant minimales ainsi que des enveloppes de granularité pour chaque type d'enrobé [3] [31] [32], mais une teneur en liant trop forte favorise l'orniérage. La teneur en liant tl_{int} est définie par :

$$tl_{int} = 100 \times \frac{\text{Masse bitume}}{\text{Masse granulats secs} + \text{Masse bitume}} \quad (\text{I-3})$$

Elle peut s'exprimer en fonction du module de richesse par :

$$tl_{int} = \frac{100 \times K \times \alpha^5 \sqrt{\Sigma}}{100 + (K \times \alpha^5 \sqrt{\Sigma})} \quad (\text{I-4})$$

où α est défini par :

$$\alpha = 2,65 / MVR_G \quad (\text{I-5})$$

MVR_G étant la masse volumique des granulats (t/m^3) et Σ est la surface spécifique des granulats, déterminée à l'aide de la relation empirique :

$$100\Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 150 f \quad (\text{I-6})$$

avec G, S, s et f les pourcentages massiques correspondant respectivement aux fractions granulaires d/D (mm) : $D > 6,3$; $0,25/6,3$; $0,063/0,25$; $d < 0,063$.

Les propriétés de l'enrobé sont par la suite évaluées à travers une série d'essais destinés à reproduire, à l'échelle du laboratoire, les sollicitations des couches de chaussée. Le niveau d'exigence dépend de la couche considérée, du type et du niveau de sollicitation (climat, trafic) et de la dégradation associée. Pour les couches d'assise ce sont la rigidité et la tenue en fatigue qui sont déterminantes, tandis que pour les couches de surface, les performances vis-à-vis des sollicitations climatiques deviennent prépondérantes : résistance à l'orniérage par temps chaud et fissuration à basse température [3].

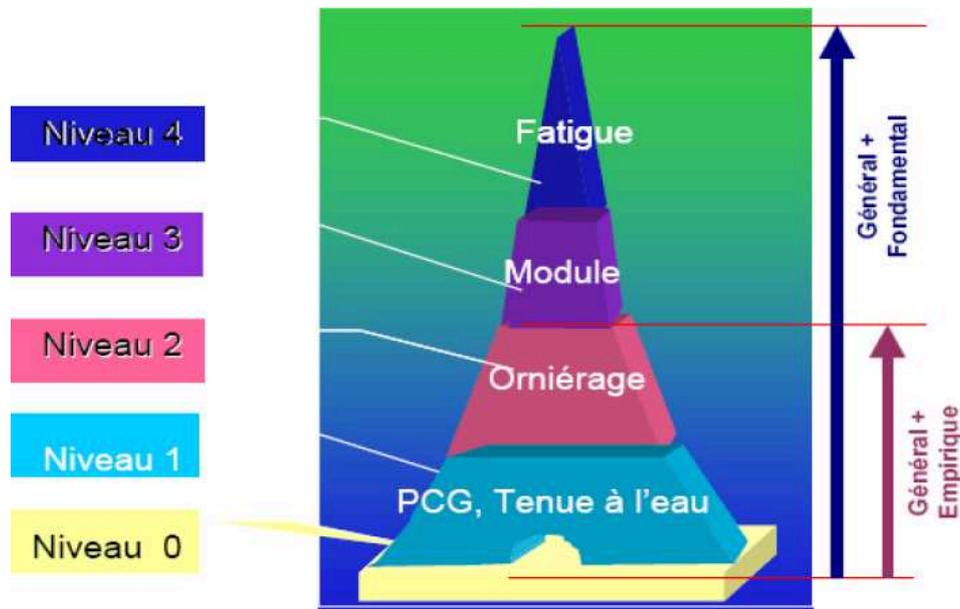


Figure I-9. Liste des essais pour la formulation des enrobés bitumineux en France [31].

Actuellement la méthode française de formulation des enrobés (niveaux 0 à 4) ne prend pas systématiquement en compte la fissuration à basse température, qui peut apparaître avec les cycles thermiques journaliers ou saisonniers [33] [34], mais celle-ci peut être évaluée à l'aide d'essais de niveau complémentaire (niveau NC).

Dans le cadre de la formulation des enrobés recyclés, il faut suivre la même procédure que pour les enrobés neufs. Pour un taux de recyclage supérieur à 10 % pour les couches de roulement et supérieur à 20 % pour les couches de liaison ou d'assises, le liant d'ajout doit être un bitume pur tel que la pénétrabilité du mélange final soit adaptée à l'usage recherché. Pour cela on applique la loi de mélange (I-7) :

$$a \log(\text{pen}_1) + b \log(\text{pen}_2) = (a + b) \log(\text{pen}_{\text{mix}}) \quad (\text{I-7})$$

où a et b sont respectivement les proportions en masse du liant issu des AE et du liant ajouté dans le mélange ($a+b=1$) ; pen_1 et pen_2 étant les valeurs correspondantes de la pénétrabilité.

De même, sur la température de ramollissement, on utilise (I-8) [31] :

$$a \times T_{BA1} + b \times T_{BA2} = T_{BA\text{mix}} \quad (\text{I-8})$$

avec T_{BA1} , T_{BA2} et $T_{BA\text{mix}}$ les valeurs respectives des températures de ramollissement des liants des AE, ajouté et du mélange

2.1. APPROCHE DITE « EMPIRIQUE » (NIVEAUX N1 ET N2)

Le niveau N1 comprend l'évaluation de l'aptitude au compactage (essai PCG) et de la sensibilité à l'eau (essai Duriez). Le niveau N2 est recommandé pour les couches exposées à un risque d'orniérage, par exemple à un trafic important, lent, canalisé et sous des températures élevées.

2.1.1. Essai de compactibilité à la PCG

La PCG [35] mesure l'aptitude au compactage des enrobés via l'évolution de la teneur en vides d'une masse d'enrobé à l'intérieur d'un cylindre métallique tournant (Figure I-10), sous une contrainte axiale de compression statique de l'ordre de 0,6 MPa. Le matériau est conditionné à la température de consigne avant l'essai (par exemple 165 °C pour BBSG 35/50).

L'interprétation des résultats considère la teneur en vides après 10 girations et après un nombre de girations (ng) qui dépend du type d'enrobé et de son épaisseur dans la chaussée, permettant d'estimer la compacité de l'enrobé lors de sa mise en œuvre.

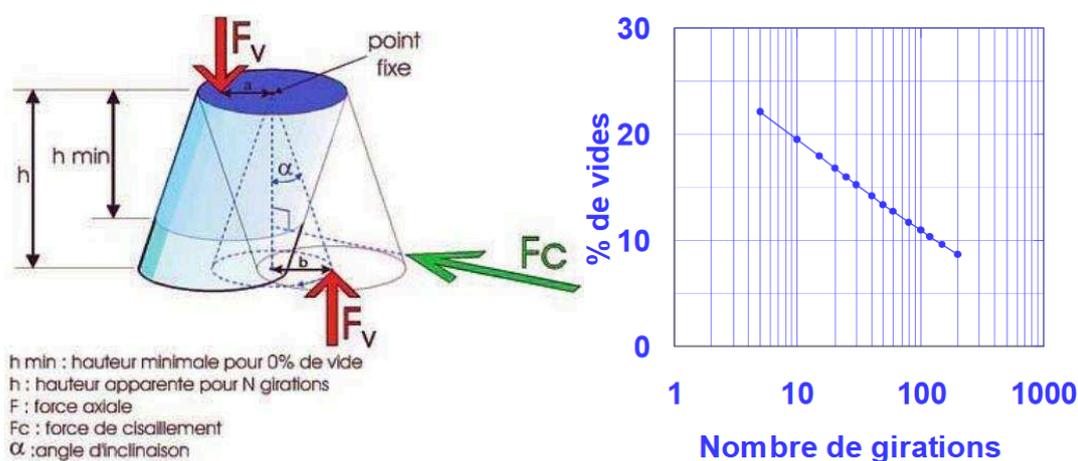


Figure I-10. Schéma de principe de l'essai PCG.

2.1.2. Essai de sensibilité à l'eau (essai « Duriez »)

L'essai Duriez [36] consiste à déterminer la perte de résistance en la compression simple d'éprouvettes conservées dans l'eau pendant 7 jours à 18 °C par rapport à celles maintenues dans l'air à la même température. Le rapport i/C entre la résistance d'échantillons conservés dans l'eau (C_w) et celle des éprouvettes conservées à l'air (C_D) donne une estimation de la tenue à l'eau de l'enrobé, qui doit être supérieure aux valeurs établies par les spécifications.

2.1.3. Résistance aux déformations permanentes ou à « l'orniérage »

Cet essai évalue la résistance aux déformations permanentes de l'enrobé sous le passage répété du trafic. L'essai [37] consiste dans l'application d'une charge roulante à l'aide d'un pneumatique (fréquence : 1 Hz, pression : 0,6 MPa) sur une éprouvette parallélépipédique d'enrobé bitumineux à une température de 60 °C (Figure I-11).

La profondeur d'ornière est mesurée en fonction du nombre de passages de la charge (100, 300, 1000, 3000, 10000 et 30000 passages) et exprimée en pourcentage de l'épaisseur initiale de la plaque d'enrobés. Les spécifications déterminent l'orniérage maximal pour un nombre prédéfini de cycles, variant en fonction du type de matériau et du niveau de trafic.

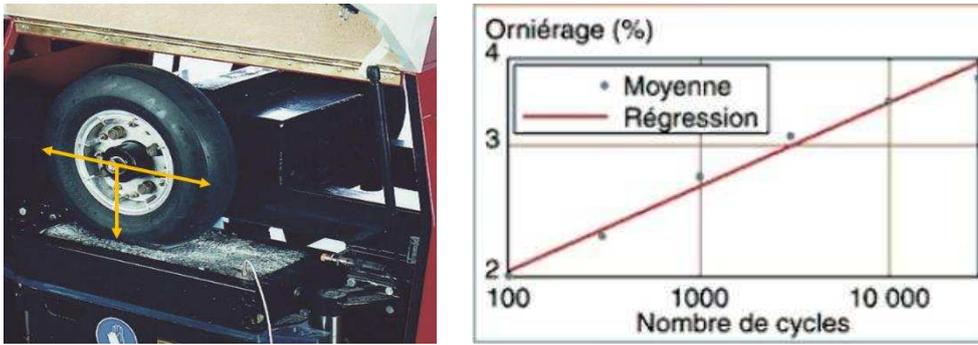


Figure I-11. Schéma de principe de l'essai d'orniérage.

2.2. APPROCHE DITE « FONDAMENTALE » (NIVEAUX N3 ET N4)

Le chargement répété du trafic sur les chaussées bitumineuses produit deux types de dégradations : l'orniérage et la fissuration par fatigue [38]. Le dimensionnement de celles-ci vis-à-vis du trafic exige la connaissance de deux propriétés mécaniques des matériaux : le module de rigidité (niveau N3) et la résistance à la fatigue (niveau N4) sous grand nombre de chargements (de l'ordre de 10^5 à 10^7).

Le comportement des enrobés est lié à celui du bitume, lequel dépend fortement de la température (Figure I-12). Aux températures extrêmes, les paramètres régissant le comportement du bitume sont les rigidités élastiques (E et G), la ténacité K_c à basse température (comportement fragile) et la viscosité η à température élevée. Dans le domaine visco-élastique intermédiaire, le comportement est caractérisé par les modules complexes Young (E^*) et de cisaillement (G^*), et par la résistance à la traction σ_p .

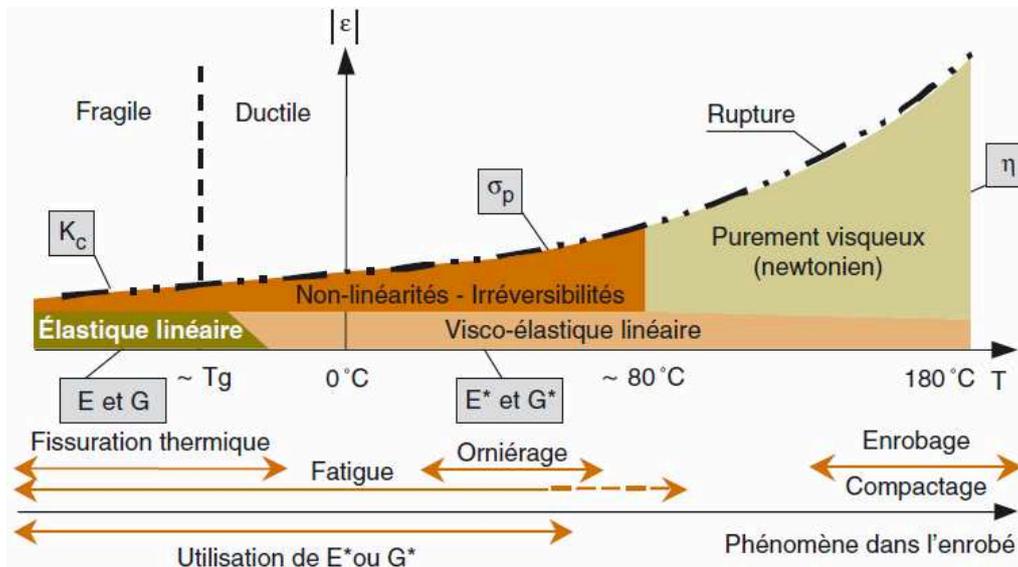


Figure I-12. Classes de comportement du bitume en fonction de la déformation et la température [39].

À température fixée, le comportement des enrobés bitumineux dépend du nombre N de chargements et du niveau de déformation ϵ (Figure I-13). Par la suite nous nous intéressons aux faibles déformations ($\epsilon < 10^{-4}$).

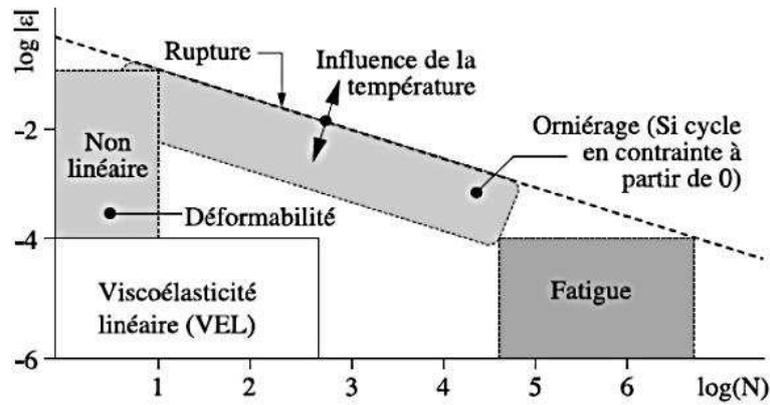


Figure I-13. Comportement « types » des enrobés bitumineux à température fixée, (ϵ) déformation – (N) nombre de chargements [3].

2.2.1. Module de rigidité

La rigidité des enrobés bitumineux se détermine en contrôlant la température, ceux-ci étant thermosensibles. Les méthodes de mesure de la rigidité des enrobés se différencient par le mode de chargement : quasi-statique, sinusoïdal, mixte (par impulsions) [38]. En France [40], le plus fréquent est le mode fréquentiel, sous sollicitation sinusoïdale à des fréquences variables, en flexion deux points sur des éprouvettes trapézoïdales (essai 2PB-TR) qui fournit la valeur de la norme du module complexe ($|E^*|$).

Nombre complexe, E^* comporte une partie réelle (E_1 , composante élastique) et une partie imaginaire (E_2 , composante visqueuse) ; on a :

$$E^* = |E^*| \times (\cos \varphi + i \sin \varphi) \quad (\text{I-9})$$

où φ est le déphasage (ou angle de phase) entre la contrainte et la déformation. On a donc :

$$E_1 = |E^*| \times \cos \varphi \quad (\text{I-10})$$

et :

$$E_2 = |E^*| \times \sin \varphi \quad (\text{I-11})$$

avec :

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (\text{I-12})$$

Pour les matériaux purement élastiques, la valeur de l'angle de phase φ est de 0° , tandis que pour les matériaux à viscosité prédominante, φ est proche de 90° . Les enrobés bitumineux ont une valeur de φ comprise entre 0° et 90° [41].

Les différentes composantes du module complexe varient avec la température et avec la fréquence de sollicitation. Les grandeurs $|E^*|$, φ , E_1 , E_2 , sont exprimées à l'aide de plusieurs représentations ci-dessous [3] [38].

a. Courbes isothermes et courbe maîtresse

Pour chaque température, on trace la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la fréquence de sollicitation. La pente des isothermes permet d'estimer la susceptibilité cinétique du matériau bitumineux (variation de module complexe avec la vitesse de la sollicitation).

Une même valeur de module complexe peut être obtenue pour différents couples (fréquence, température) : la propriété d'équivalence temps-température permet de construire une courbe unique ($\log |E^*|$, $\log F$), où F est la fréquence, pour une température de référence (T_R) choisie arbitrairement. La courbe ainsi obtenue est appelée courbe maîtresse (Figure I-14).

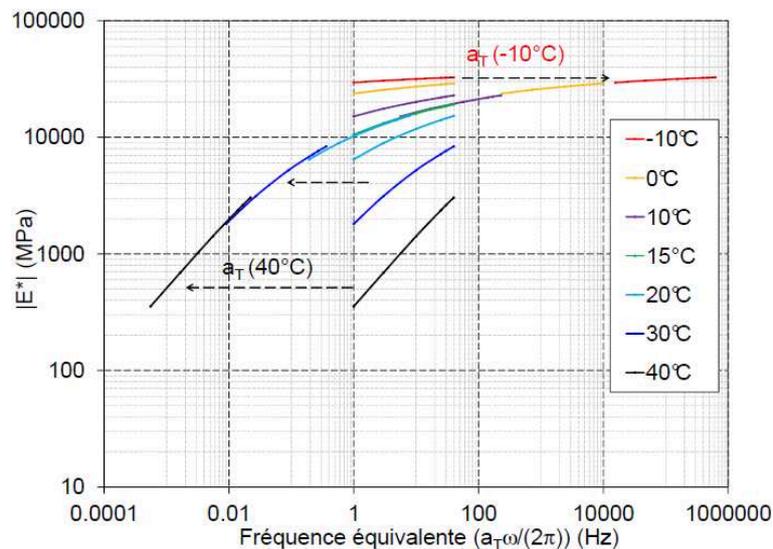


Figure I-14. Principe de construction d'une courbe maîtresse à 15 °C [7].

b. Courbes isochrones

Elles sont obtenues en traçant la norme du module complexe $|E^*|$ en fonction de la température pour chacune des fréquences d'essai, ce qui permet d'estimer la susceptibilité thermique de l'enrobé bitumineux (variation de sa rigidité avec la température).

c. Plan de Cole-Cole

Ce plan est formé par les parties réelle et imaginaire du module complexe (Figure I-15) mais n'est pas très précis pour les faibles valeurs du module complexe.

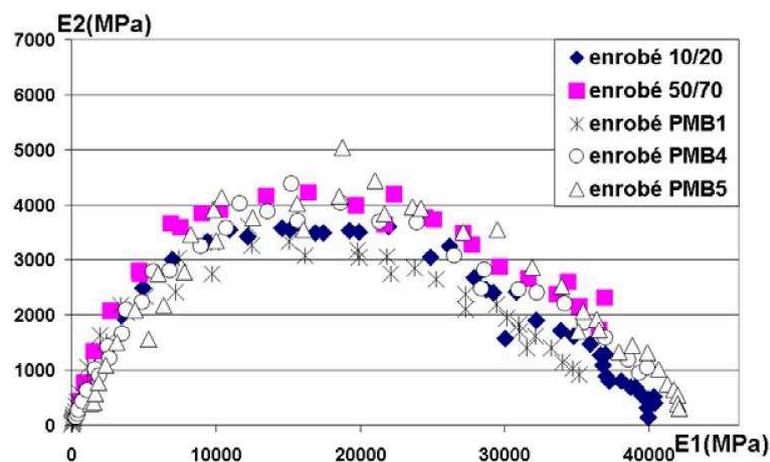


Figure I-15. Résultats du module complexe représentés dans le plan Cole-Cole [34].

d. Espace de Black

Cette représentation (Figure I-16) consiste à tracer la norme du module complexe en fonction de l'angle de phase. Lorsque le matériau obéit au principe d'équivalence temps-température, il existe une courbe unique, caractéristique du matériau testé.

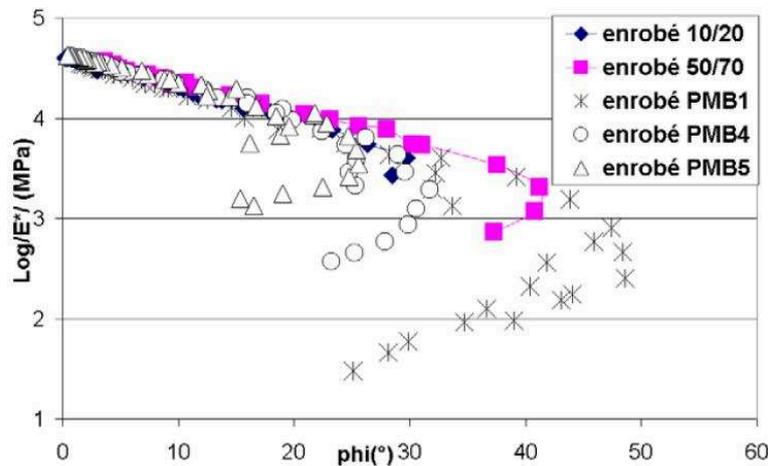


Figure I-16. Module complexe et angle de phase dans l'espace de Black [34].

La norme du module complexe augmente avec la dureté du bitume ; elle diminue avec une teneur en liant excessive [3] [31]. Moutier a observé une relation linéaire entre la norme du module complexe et la compacité, et une relation parabolique avec la teneur en liant où on peut identifier une teneur en liant optimale. La granulométrie des granulates affecte la rigidité de l'enrobé via la compacité. La présence d'eau peut réduire la rigidité jusqu'à 30 % [42].

2.2.2. Résistance à la fatigue

Le trafic génère des efforts de flexion à la base des couches bitumineuses, répétés à chaque passage de roues (Figure I-17). Bien que ces charges ne provoquent pas une rupture instantanée, après un grand nombre de répétitions ($N > 10^4$) des fissures apparaissent, associées au phénomène de fatigue, qui peuvent se propager et entraîner la ruine du matériau.

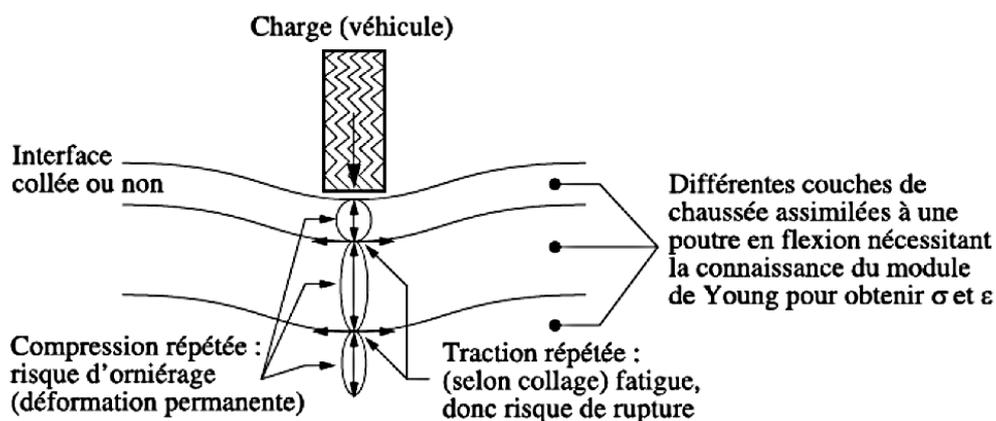


Figure I-17. Schéma des sollicitations induites par le trafic [3].

La résistance à la fatigue des enrobés bitumineux peut être évaluée in situ ou en laboratoire. Les essais in situ sont effectués sur des chaussées instrumentées (essais AASHO) ou en manège de fatigue (IFSTTAR). Lors du dimensionnement, les déformations en traction

par flexion sont comparées aux déformations maximales supportées par une éprouvette d'enrobé lors d'un essai de fatigue en laboratoire (Figure I-18) [11].

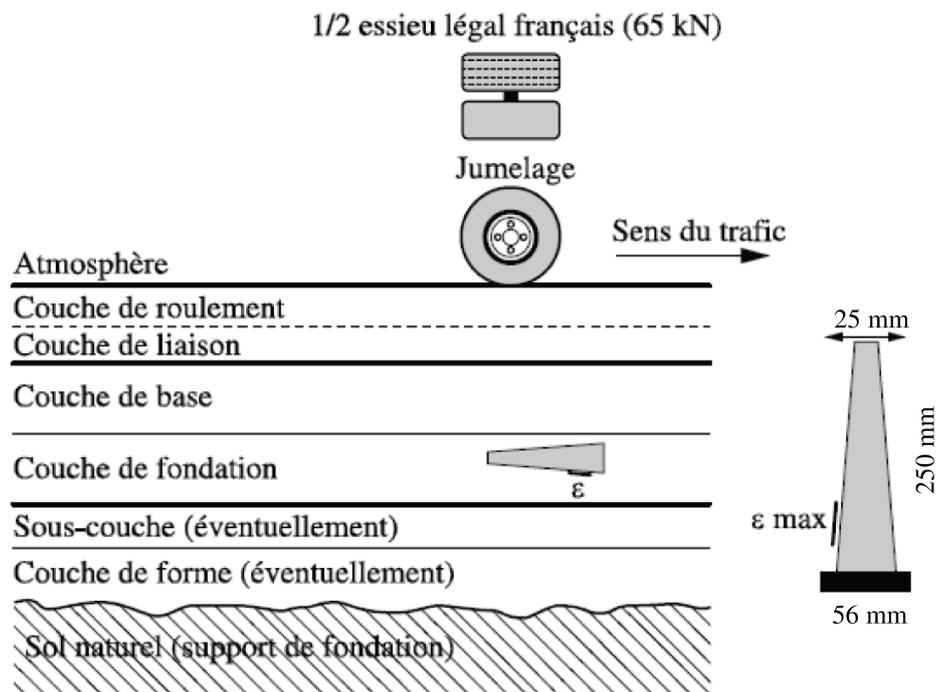


Figure I-18. Principe de la modélisation d'une chaussée : logique des essais de fatigue sur enrobés [3].

Pour simuler l'action du trafic en laboratoire on impose à une éprouvette de matériau des sollicitations répétées en flexion, traction-compression ou cisaillement, [3] [38] [41]. Durant l'essai, la raideur de l'éprouvette diminue par endommagement : le critère conventionnel de rupture considère une réduction de 50 % du module de rigidité initial.

En France, la résistance à la fatigue se détermine sur une éprouvette de forme trapézoïdale testée en flexion deux points (2PB-TR), en mode de déformation contrôlée (Figure I-19), lors d'une sollicitation sinusoïdale [11] [43], à une température de 10 °C et à une fréquence de 25 Hz. Ces conditions peuvent être changées dans des cas particuliers [44].

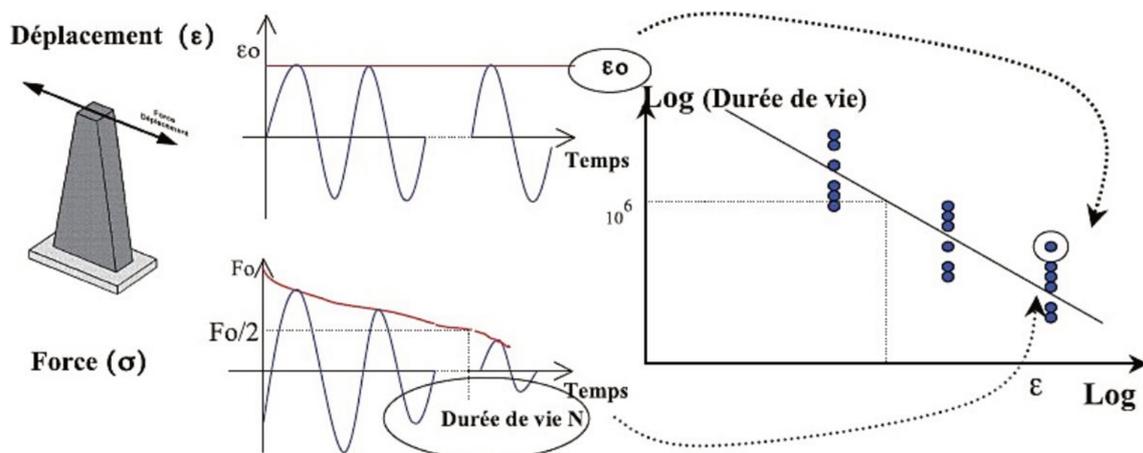


Figure I-19. Schéma de principe de l'essai de résistance à la fatigue (2PB-TR).

Compte tenu de la dispersion sur les résultats, les normes préconisent de tester au moins 18 échantillons différents (3 niveaux de déformation, 6 éprouvettes par niveau) [44]. Les essais

permettent de tracer une courbe de fatigue (Figure I-20) de type $N = f(\varepsilon)$. Cependant, la représentation classique des résultats est donnée par une relation de type Wöhler :

$$\log \varepsilon = b \log N + c \quad (\text{I-13})$$

Outre la pente b (de l'ordre de $-0,2$) on considère la déformation à 10^6 cycles, notée ε_6 et fortement dépendante du matériau testé et des conditions d'essai [3] [11] [38] [43]. Avec ces notations, la relation 1-13 peut encore s'écrire :

$$\varepsilon = \varepsilon_6 (N/10^6)^b \quad (\text{I-14})$$

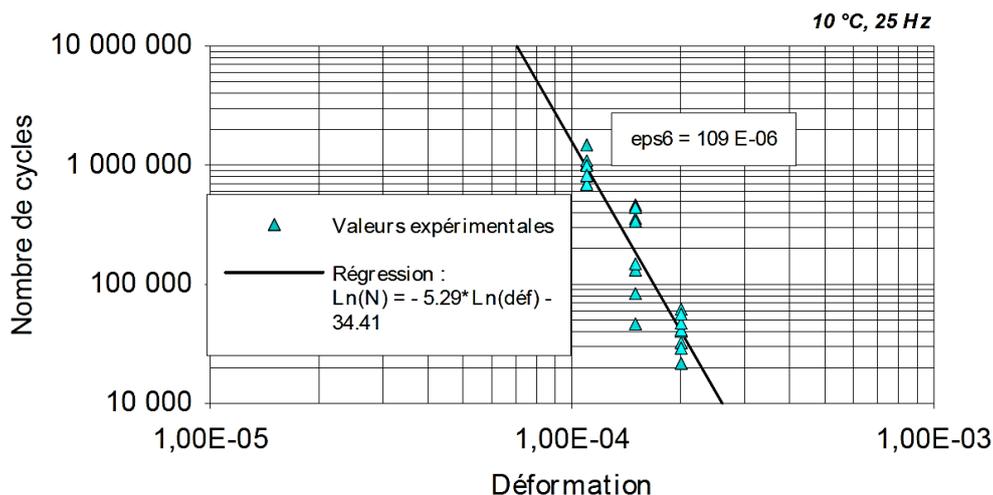


Figure I-20. Exemple de droite de fatigue, béton bitumineux 0/14, 10°C, 25 Hz [38].

Les performances en fatigue des enrobés bitumineux sont fortement influencées par l'origine et la classe du bitume. Pour des bitumes de même classe de pénétration et différentes origines, la valeur de ε_6 peut varier entre 88 et 150 $\mu\text{m/m}$ [42], présentant des meilleures performances pour les enrobés aux liants modifiés. Dans le cas de bitumes de même origine, la valeur de ε_6 augmente si le grade du bitume diminue [42] [45], avec des pentes plus plates pour les bitumes de basse pénétration [41] [46].

D'après Baaj [45], l'augmentation de la teneur en fractions cristallisables (FC) améliore la résistance en fatigue y compris dans le cas des bitumes polymères. Une étude sur des couches de base d'autoroute a montré que les performances en fatigue initiales ont été conservées pendant les années de service. Ce résultat peut être expliqué par le vieillissement en place des matériaux qui augmente leur rigidité et diminue les déformations des couches sous trafic.

Moutier [42] a constaté une relation linéaire entre la résistance à la fatigue et la compacité et une relation parabolique avec la teneur en liant. La variation de la déformation ε_6 avec la température apparaît aussi parabolique dans l'intervalle ($-10\text{ °C} < \theta < +30\text{ °C}$) :

$$\varepsilon_6 = 10^{-4}(1,21 - 0,0088 \theta + 0,00148 \theta^2) \quad (\text{I-15})$$

Cette relation présente un minimum pour $\theta = +3\text{ °C}$. Une réduction de la teneur en liant entraîne un aplatissement de la courbe de réponse [3] [42].

3. PERFORMANCES À BASSE TEMPÉRATURE

La prédiction du comportement thermique des bitumes et des enrobés est nécessaire car le risque de fissuration à basse température est élevé pour des valeurs extrêmes de celle-ci (Figure I-21). Bien qu'en faible quantité par rapport aux granulats, le liant joue un rôle très important sur les performances thermomécaniques de l'enrobé, du fait de sa susceptibilité thermique et cinétique. À basse température, le bitume acquiert une rigidité et une cohésion élevées (Figure I-12), entraînant une rigidification importante de l'enrobé bitumineux [33] [43] [47].

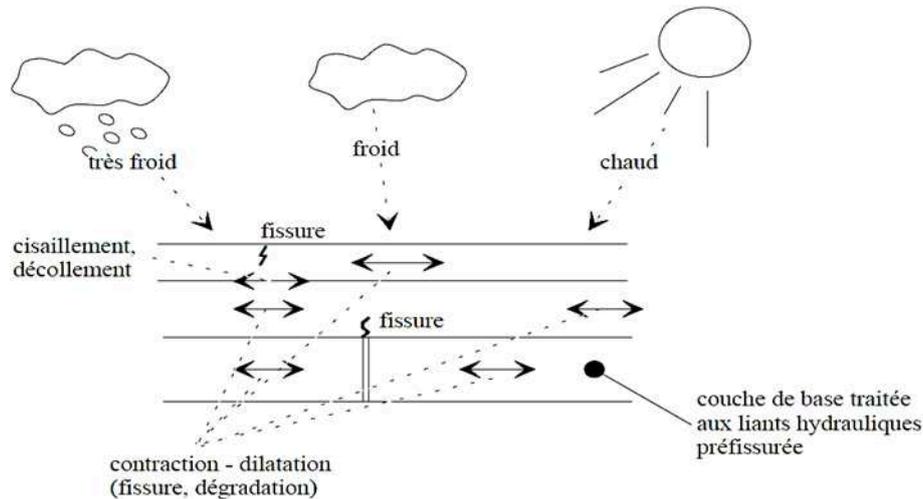


Figure I-21. Schématisation des sollicitations induites par la température [3] [34].

Le bitume devenant fragile à basse température, des fissures peuvent apparaître et se propager avec les cycles thermiques en particulier pour les couches de roulement, les plus exposées. Ce phénomène s'ajoute à l'effet répété des sollicitations mécaniques dues au trafic et accélère le processus de dégradation [33] [43].

Dans des climats tempérés, les baisses ponctuelles de température en hiver peuvent favoriser l'apparition des microfissures même si les sollicitations thermiques sont de faible importance [48] [49] [50] [51] [52].

La fatigue thermique provoque des fissures transversales mais aussi longitudinales pour des chaussées de grande largeur [47] [48] [50] [53]. Afin de limiter le risque de fissuration, on sélectionne le bitume par ses caractéristiques standard (pénétrabilité, TBA, Fraas) ou dans de conditions extrêmes de température (spécifications SUPERPAVE). Cependant, ces essais traduisent mal le comportement plus complexe de l'enrobé [33].

Parmi les essais de caractérisation thermomécanique des enrobés à basse température, l'essai de traction uniaxiale (UTST, Uniaxial Tensile Strength Test) et l'essai de retrait thermique empêché (TSRST, Tensile Stress Restrained Specimen Test) apparaissent les plus représentatifs [33] [34] [51] [54]. L'appareillage usuel est illustré sur la Figure I-22.

3.1. ESSAI DE TRACTION UNIAXIALE (UTST)

Cet essai permet d'évaluer la résistance de l'enrobé bitumineux à la fissuration sous sollicitation mécanique : pour une température fixée, l'éprouvette est soumise à une vitesse de déformation constante jusqu'à la rupture [50] [55].

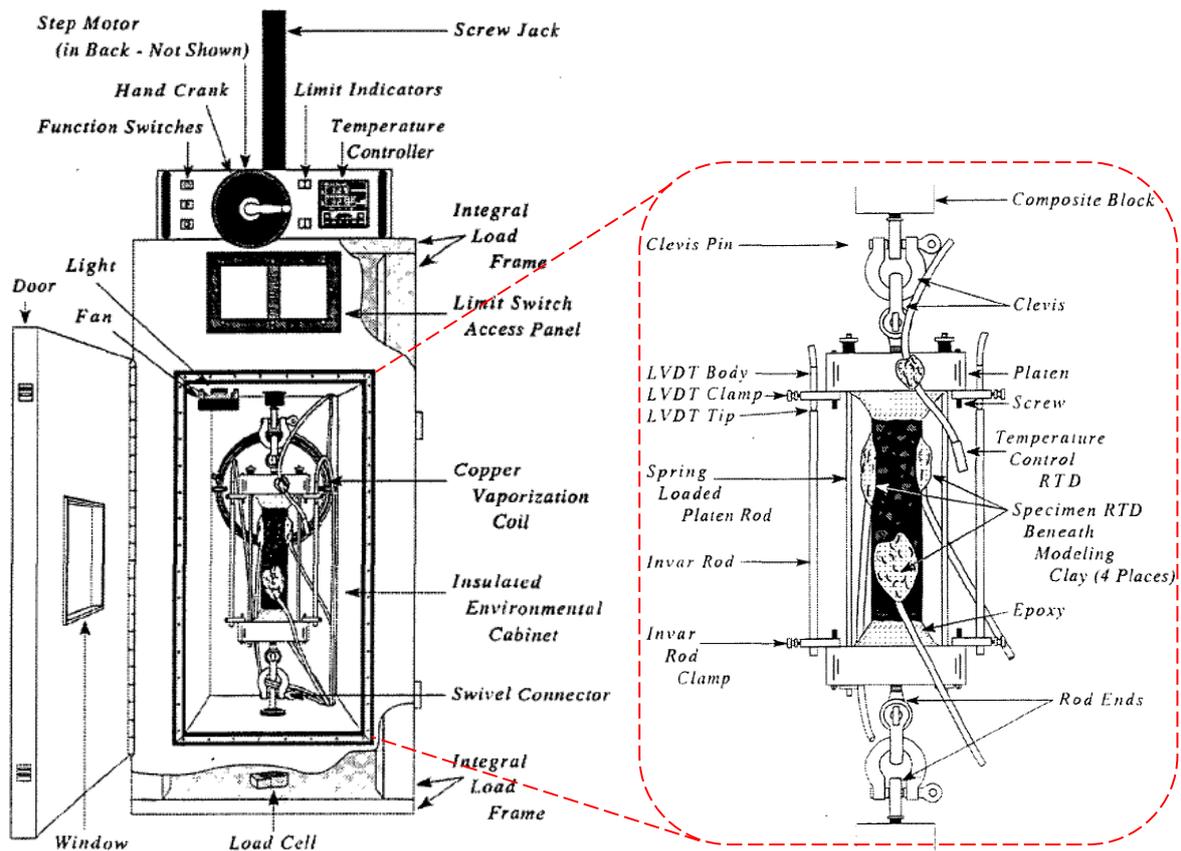


Figure I-22. Vue d'ensemble de l'équipement pour les essais UTST/TSRST [33].

Les paramètres mesurés sont la contrainte σ , la déformation ε et la température T lesquels fournissent la contrainte maximale atteinte β_t et la déformation correspondante $\varepsilon_{\text{fail}}$ considérée comme la déformation conventionnelle à la rupture [54]. Pour estimer la résistance par temps froid, la vitesse de déformation recommandée dans les spécifications européennes est de 375×10^{-3} m/m/h (ou 104×10^{-6} s $^{-1}$) [54].

En dessous d'une certaine valeur de la température, la résistance en traction des enrobés bitumineux décroît et la rupture fragile se produit à des faibles niveaux de déformation. Dans la Figure I-23, la température de transition (T_{fd}) entre les comportements ductile et fragile du matériau correspond au pic de résistance dans le diagramme température-résistance [34].

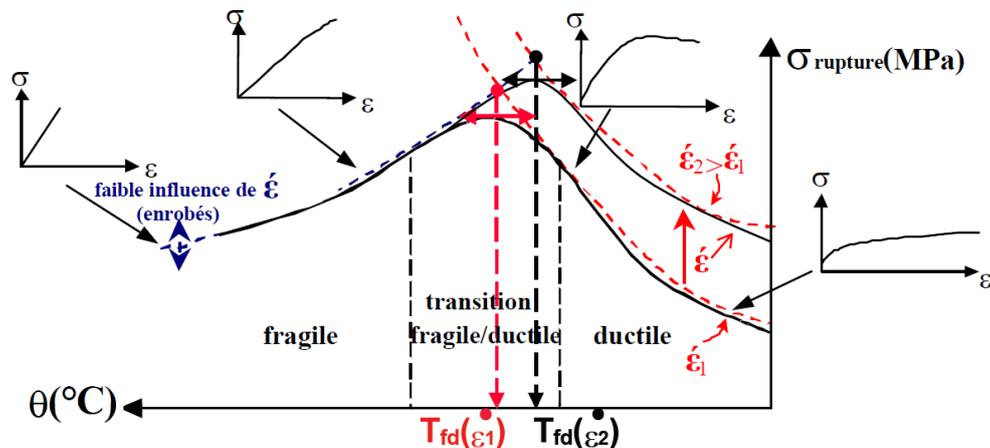


Figure I-23. Influence de la température et de la vitesse de déformation sur le comportement en traction directe des liants et enrobés bitumineux [34].

Les principaux paramètres dont dépendent résultats UTST sont détaillés ci-dessous.

3.1.1. Vitesse de déformation

Lorsque la vitesse de déformation augmente la contrainte de rupture augmente alors que la déformation à la rupture diminue [33] [34] [56] [57]. Cependant, dans la mesure où le comportement des enrobés dans le domaine fragile dépend faiblement de la vitesse de déformation, on peut prédire la fissuration thermique dans ce domaine à une vitesse de déformation quelconque [43] [51] [57].

La résistance de l'enrobé lors des essais de traction s'avère différente de celle du liant [34]. Cette différence est due au fait qu'au sein de l'éprouvette d'enrobé la vitesse de déformation du bitume n'est pas homogène ; en particulier celle du film mince de bitume entre deux particules granulaires est localement très élevée.

3.1.2. Teneur et grade du bitume

L'effet du grade du bitume sur la courbe résistance-température est illustré sur la Figure I-24 : dans le domaine fragile la contrainte de rupture de l'enrobé augmente avec le grade du bitume [51]. On observe également une translation des courbes et de la température de transition T_{fd} vers les valeurs négatives lorsque le grade du bitume augmente. En outre, la déformation de rupture augmente avec la teneur en liant, surtout dans le domaine ductile [51] [58].

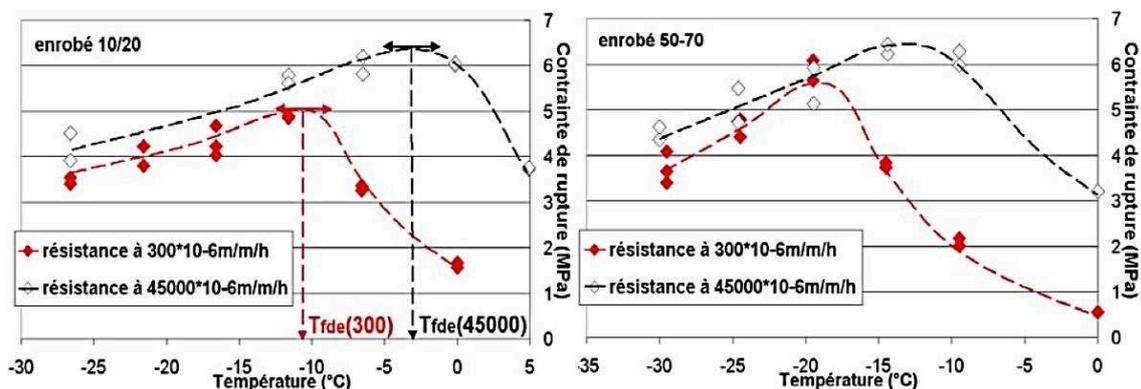


Figure I-24. Influence de la vitesse de déformation et de la classe du liant sur le comportement en traction directe [34].

3.1.3. Squelette granulaire

L'affinité entre les granulats et le bitume, ainsi que la rugosité des granulats et le pourcentage des fines (mastic), ont un effet direct sur les performances en traction uniaxiale. Pucci [33] a constaté que le plan de rupture se localise généralement dans le film du bitume et à l'interface liant/granat, avec exceptionnellement rupture des granulats.

3.1.4. Vieillessement

La fragilisation de l'enrobé, due aux phénomènes de vieillissement du bitume, entraîne une perte de la résistance et de la déformation de rupture en traction dans le domaine fragile [33] [59]. Cependant la contrainte de rupture augmente dans le domaine ductile.

3.2. ESSAI DE RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ (TSRST)

3.2.1. Principe et interprétation

Lors d'une baisse de la température, la contraction des couches de chaussée est empêchée par la continuité de la chaussée dans le sens longitudinal, générant des efforts de traction. Plus localement, la différence entre les coefficients de dilatation des granulats et du liant, produit le phénomène de retrait thermique empêché à l'échelle microscopique, ce qui induit une tension dans le liant au sein de l'enrobé [53]. Lorsque ces tensions atteignent la résistance en traction du bitume elles peuvent induire des microfissures dans le mastic [47].

Dans l'essai de retrait thermique empêché l'enrobé est soumis à une baisse de température contrôlée. La déformation de l'éprouvette étant empêchée, des contraintes de traction cryogéniques ou thermiques σ_{cry} sont générées (Figure I-25) ; la rupture se produit à la température T_{fail} à l'origine des fissurations observées à basse température sur les chaussées [33] [34] [51] [54]. Le programme SHRP a montré que l'essai TSRST est le plus pertinent pour étudier les performances des matériaux bitumineux à basse température [48] [53] [59].

Sur la courbe contrainte-température, la pente dS/dT augmente d'abord dans une zone caractérisée par des phénomènes de relaxation associés à la viscosité, jusqu'à une température de transition T_{fdR} . Pour des températures inférieures, cette pente devient quasi-constante dans un intervalle d'accumulation des contraintes cryogéniques, jusqu'au début de la fissuration ou de la rupture du matériau [53] [60] qui se produit quand la contrainte maximale est atteinte [33] [34] [43] [47] [48] [52].

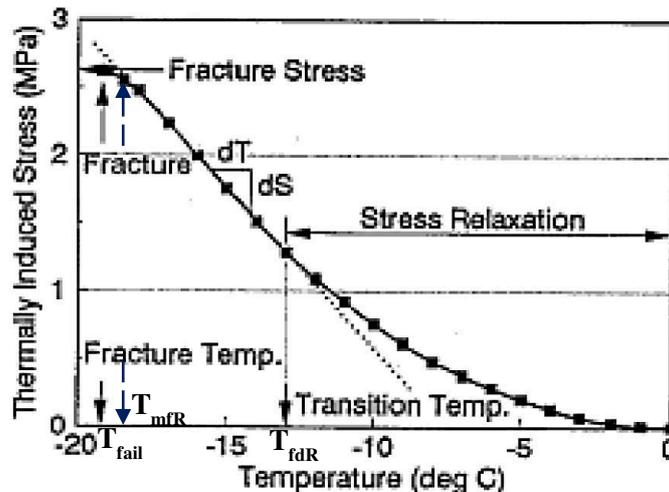


Figure I-25. Essai TSRST - Évolution de la contrainte cryogénique en fonction de la température (gradient thermique de $-10\text{ }^{\circ}\text{C/h}$) [43].

La température de transition caractérise la capacité de l'enrobé à résister à des baisses de température sans générer des contraintes de retrait excessives. Il est souhaitable que l'enrobé présente une température de transition basse, liée à une rigidité peu élevée et à une bonne capacité de relaxation du bitume, de manière à supporter et à dissiper les contraintes de retrait générées par les variations journalières et saisonnières de température [33].

Jung et Vinson [53] mentionnent que la température de transition T_{fdR} , déduite de l'essai de retrait thermique empêché, joue un rôle très important dans l'interprétation du comportement des enrobés soumis aux basses températures et reste une propriété rhéologique pertinente dans la prévision de la fissuration thermique des chaussées.

La pente dS/dT caractérise la sensibilité thermique de l'enrobé : plus elle est élevée, plus les contraintes thermiques générées sont importantes [47] [53] [60] [61]. La rupture de l'enrobé peut se produire de manière brutale ou douce. Dans le premier cas, une fissuration brutale apparaît correspondante à un comportement fragile. En revanche, la rupture douce correspond à un endommagement progressif et volumique dû à la formation de microfissures [53] et à la perte d'adhérence entre le liant et les granulats, permettant aux contraintes de se relâcher [52].

Classiquement l'endommagement est quantifié par un scalaire D , variant de manière irréversible entre 0 (éprouvette vierge) et 1 (éprouvette endommagée) [62] ; il est souvent traduit par une diminution de la rigidité apparente du matériau d'une valeur initiale vierge E à une valeur endommagée E_D telle que :

$$E_D = E(1 - D) \quad (\text{I-16})$$

Par ailleurs, la contrainte cryogénique s'exprime par :

$$\sigma_{cry} - \sigma_0 = \alpha E(T - T_0) \quad (\text{I-17})$$

où α et E sont respectivement le coefficient de dilatation-contraction et le module de rigidité du matériau, σ_0 et T_0 les valeurs initiales de l'essai.

Ainsi, l'endommagement induit une diminution de la pente de la courbe $\sigma_{cry}(T)$ qui se produit à la température T_{mR} de début de microfissuration avant la rupture [53].

Le comportement en retrait empêché dépend des paramètres de l'essai lui-même ainsi que des performances de l'enrobé.

3.2.2. Vitesse de refroidissement

Sur la chaussée, le taux de refroidissement d'un enrobé peut varier entre -1 °C/h et -5 °C/h). Pucci [33] a mesuré des variations à la surface de la chaussée l'ordre de -30 °C en 16 heures, soit environ -2 °C/heure en moyenne.

Les essais de laboratoire montrent que la température et la contrainte de rupture augmentent avec la valeur absolue de la vitesse de refroidissement (Figure I-26) [33] [43] [48] [53] [63]. Au contraire, Hajj [64] trouve que la température de rupture diminue quand le gradient thermique passe de $-2,5$ à -10 °C/h.

En accord avec la relation entre vitesse de déformation et contrainte dans les corps visqueux [33], un refroidissement rapide diminue le temps de relaxation et augmente la contrainte thermique [53]. Pour un refroidissement lent, la viscosité du bitume permet un relâchement des contraintes et une diminution de la température de transition T_{fAR} [47].

Les normes européennes [54] recommandent une vitesse de refroidissement égale à -10 °C/h, ce qui permet de réduire la durée des essais et conduit à des résultats sécuritaires.

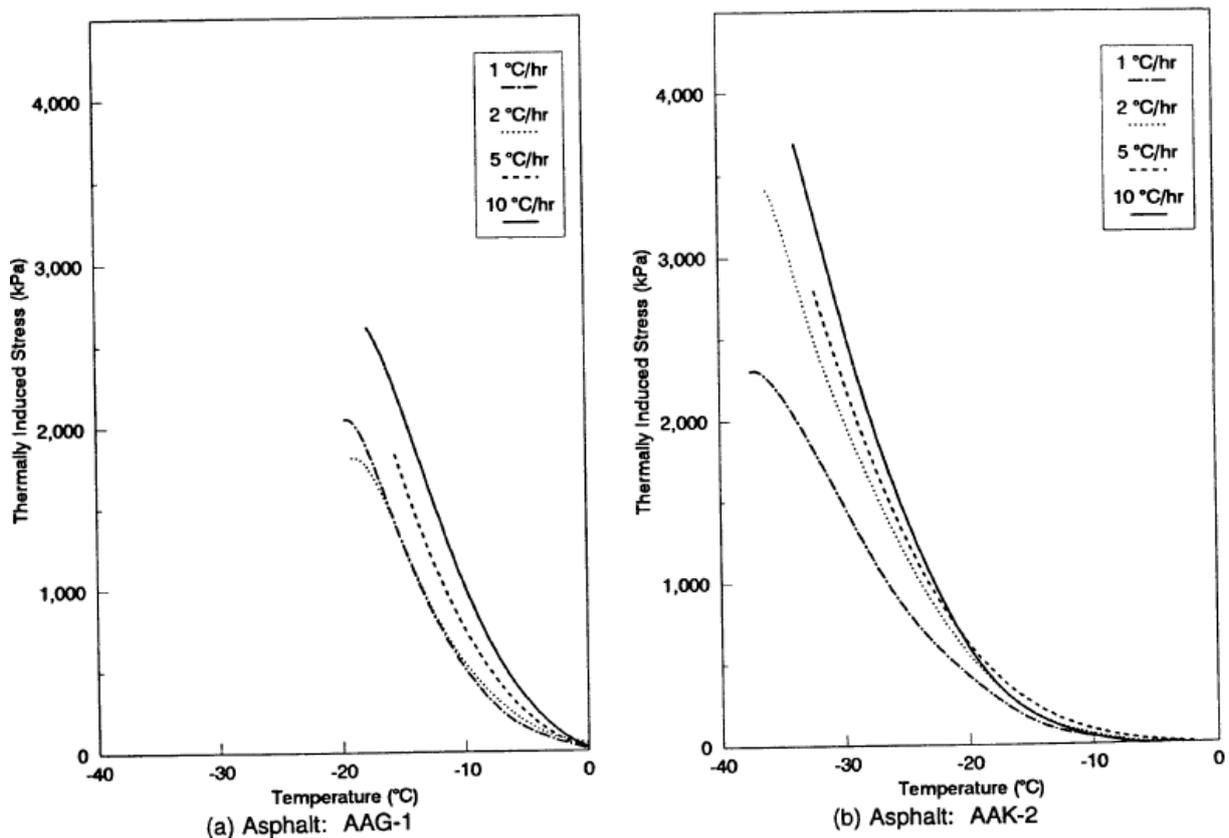


Figure I-26. Influence du taux de refroidissement sur la contrainte cryogénique et la température de rupture lors de l'essai TSRST [53].

3.2.3. Dimensions et compacité des éprouvettes

En cours d'essai, il existe au sein de l'éprouvette une différence de température entre le coeur et la surface. Cette différence s'accroît avec le taux de refroidissement et les dimensions de l'éprouvette. Les échantillons plus épais requièrent un temps plus important pour atteindre l'équilibre thermique et un champ de température homogène. L'effet du rapport longueur/épaisseur de l'éprouvette sur les résultats s'avère négligeable, mais la forme de l'échantillon peut augmenter leur dispersion [64].

La compacité ne semble pas avoir un impact bien défini sur la contrainte et la température de rupture, mais l'augmentation de la section résistante retarde le début de la microfissuration. Selon Jung et Vinson [53], une augmentation de la compacité entraîne une augmentation de la contrainte et de la température de rupture (Figure I-27). À l'inverse, les résultats de Pucci [33] montrent que la température de rupture diminue avec la compacité.

3.2.4. Teneur et grade du bitume

Une teneur en liant élevée diminue la rigidité de l'enrobé et améliore sa résistance à la fissuration thermique [50] [51] [65]. La Figure I-27 montre que la température de rupture varie de -15 °C à -30 °C pour une variation de pénétrabilité du liant de 55 à 155 dmm [53] [66]. L'initiation de l'endommagement s'avère contrôlée par l'origine du bitume [33] [67], en accord avec Isacsson et al. [68], qui ont montré (Figure I-28) que la température de rupture est corrélée avec le taux d'éléments constitutifs du liant (résines, aromatiques, saturés, asphaltènes).

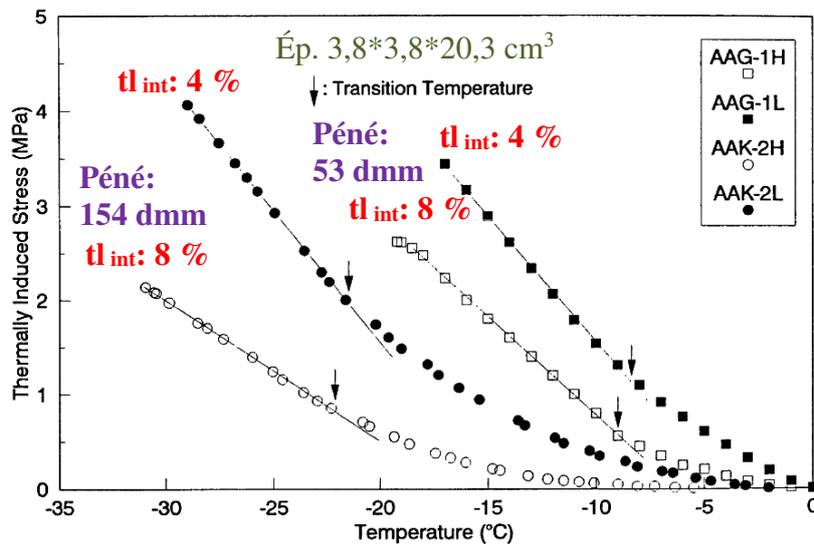


Figure I-27. Impact du pourcentage de vides (8 % ; 4 %), de la teneur en liant (4 % et 8 %) et de sa pénétrabilité (53 dmm ; 154 dmm) sur les performances en retrait empêché [53].

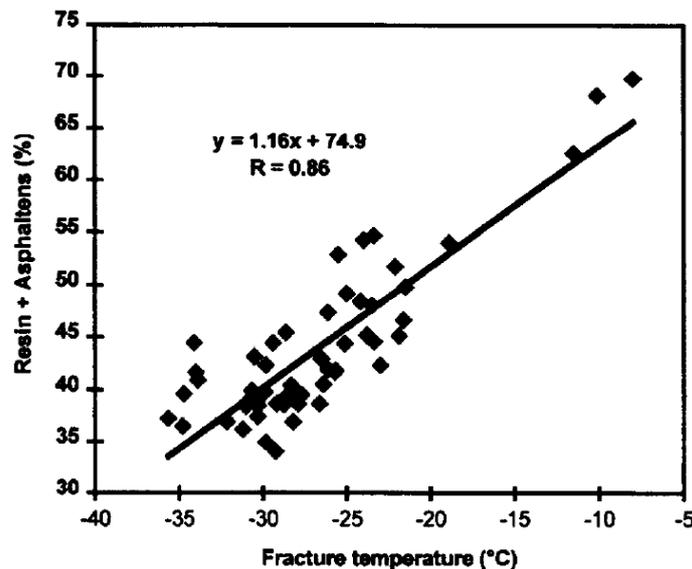


Figure I-28. Relation de la température de rupture en retrait thermique empêché avec la composition chimique du bitume (asphaltènes+résines) [68].

Largeaud et al. [67] montrent des différences importantes entre températures de rupture selon la nature du bitume (Figure I-29). Les polymères semblent avoir un effet bénéfique sur la température de fissuration thermique [34] [52] [66] [69], qui diminue lorsque la teneur en polymères augmente [67] [70]. D'autres recherches montrent que les polymères n'augmentent pas la résistance à la fissuration thermique de l'enrobé (Figure I-30) [61] [71].

Considérant le type de rupture (Figure I-31), les enrobés avec bitumes purs montrent une rupture instantanée tandis que les enrobés avec des bitumes modifiés ou vieillis subissent une rupture progressive [33] [34] [60] avec une diminution post-pic de la contrainte.



Figure I-29. Résultats TSRST pour différentes classes et nature de bitumes purs [67].

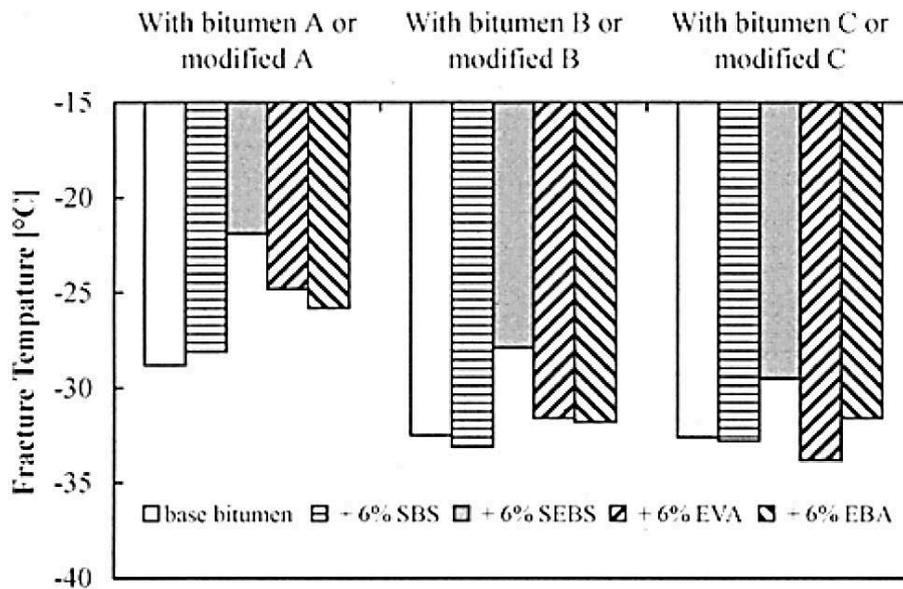


Figure I-30. Effet des polymères sur la température de rupture en TSRST [71].

3.2.5. Squelette granulaire

Selon Isacson et Zeng [68], la granulométrie a peu d'influence sur la température de rupture. Mais d'après Arand [51], une granulométrie grossière est défavorable, les vides favorisant le vieillissement du bitume. Vinson et Fortier [52] mentionnent que la porosité des granulats et l'adhésivité bitume-granulat sont des facteurs qui impactent la résistance à basse température. Carter [47] a pu observer qu'une surdose en filler augmente la température de rupture et réduit la contrainte correspondante.

3.2.6. Niveau de vieillissement

Dû au durcissement résultant, le vieillissement du bitume augmente la température de rupture de l'enrobé (Figure I-32 et Figure I-33) [53] [65] [68]. Hung et al. [70] ont constaté une augmentation de la température de rupture lors du vieillissement à long terme d'environ +5 °C pour les enrobés conventionnels (liant pur de classe 35/50) et de +2,5 °C pour ceux avec liant Styrelf (3,5 % de polymère).

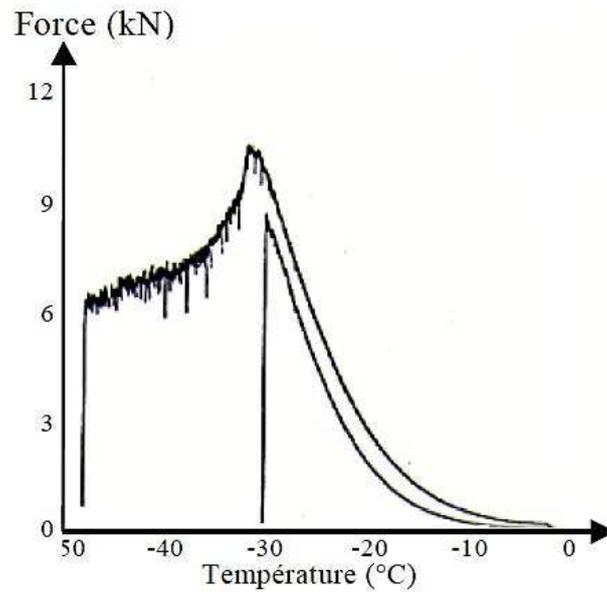


Figure I-31. Comportement en retrait thermique empêché d'un enrobé au bitume pur (courbe inférieure) et au bitume modifié avec 7 % de SBS (courbe supérieure) [34] [69].

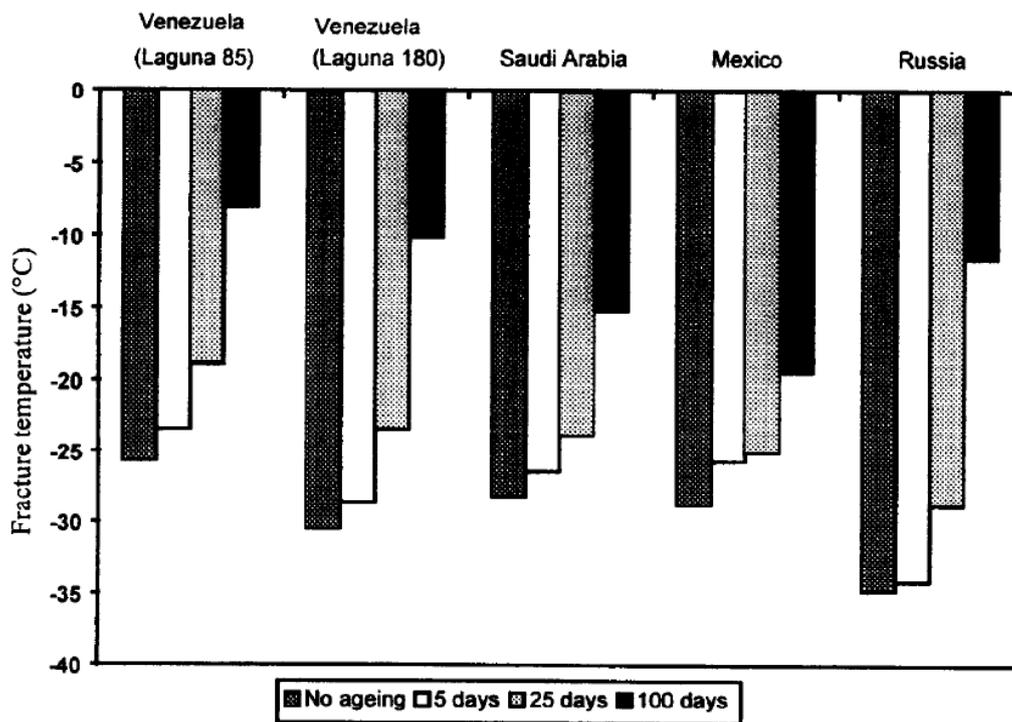


Figure I-32. Influence du vieillissement sur la température de rupture TSRST des enrobés avec différents bitumes [68].

Dans le cas des bitumes modifiés, une moindre détérioration de la température de rupture avec l'évolution du vieillissement est constatée (Figure I-33). Cela peut s'expliquer par le fait que l'ajout d'additif se faisant pendant l'enrobage, il est possible que la maturation de ces produits se produise sur le long terme améliorant ainsi leurs performances [33] [34] [52].

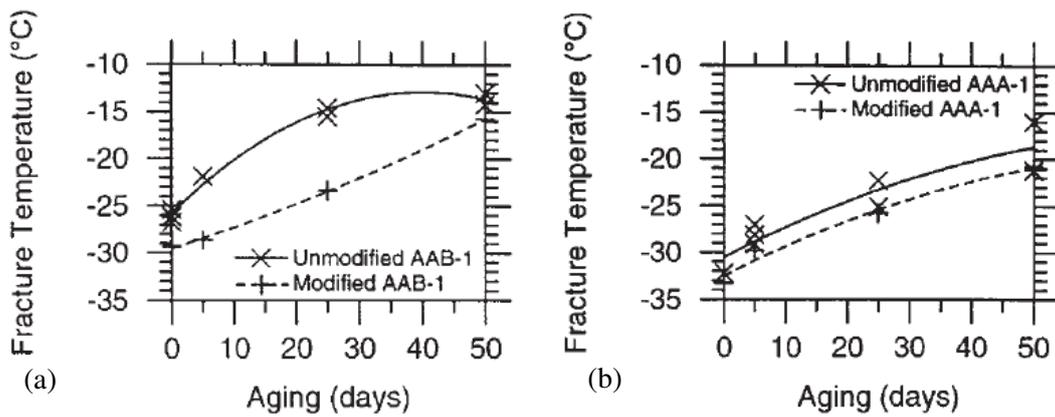


Figure I-33. Influence du vieillissement sur la température de rupture TSRST des enrobés avec des bitumes purs ou modifiés [52].

3.2.7. Température de départ et précision des résultats

Les spécifications américaines fixent la température initiale d'essai TSRST à +5 °C [33] [34] [47] tandis que la norme européenne recommande +20 °C [54]. Certains auteurs considèrent qu'une température de départ comprise entre ces deux valeurs ne modifie pas les résultats, d'autres montrent que les températures de transition et de rupture de l'enrobé augmentent avec celle de départ [64].

Hribar et al. [72] ont constaté (Figure I-34) que pour des températures de départ de +10 °C et +20 °C l'écart est négligeable en termes de contrainte et de température de rupture [50]. La modélisation visco-élastique de l'essai TSRST montre (Figure I-35) que la contrainte cryogénique atteinte est supérieure pour une température initiale plus élevée [43] [63]. Pratiquement, pour des températures initiales comprises entre -1 et +10 °C, les variations sont faibles, tandis qu'au-delà de 10 °C elles peuvent être considérées nulles.

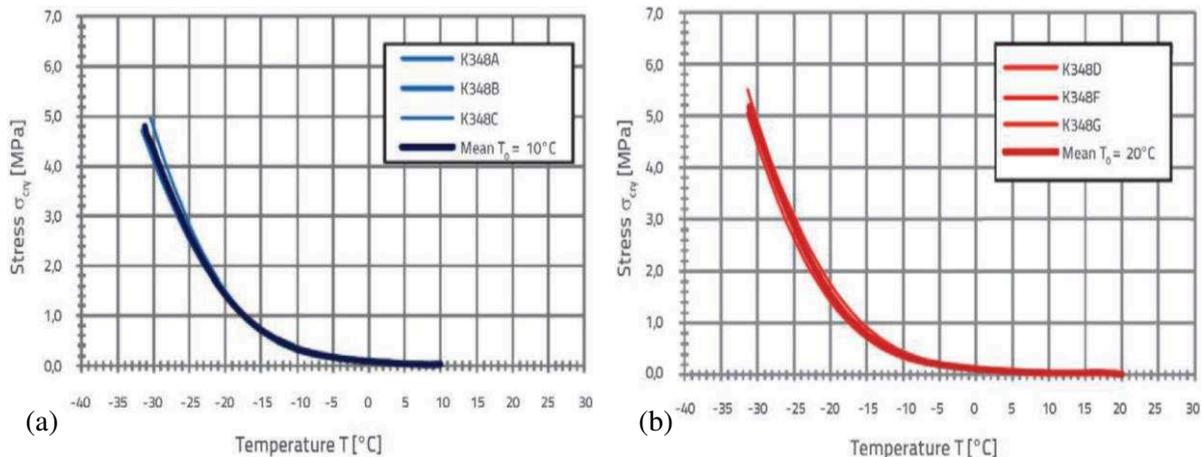


Figure I-34. Impact de la température de départ de (a) +10 °C et (b) +20 °C [72].

En termes de précision de l'essai, une bonne répétabilité de l'évolution de la contrainte cryogénique avant la rupture est constatée tandis que les paramètres de rupture peuvent être très dispersés [73]. Les spécifications Européennes préconisent un écart maximal de 2 °C pour la température de rupture et de 0,5 MPa pour la contrainte correspondante [54].

Jung et Vinson [59] ont trouvé des précisions de l'ordre de $\pm 10\%$ pour la température de rupture et $\pm 20\%$ pour la contrainte de rupture. Dans le cas d'une rupture douce, Pucci [33] [60] a constaté que la dispersion de la température et de la contrainte de rupture (2,8 °C et 0,32

MPa) est plus importante que celle de la température et de la contrainte d'initiation de la fissuration (1 °C et 0,25 MPa).

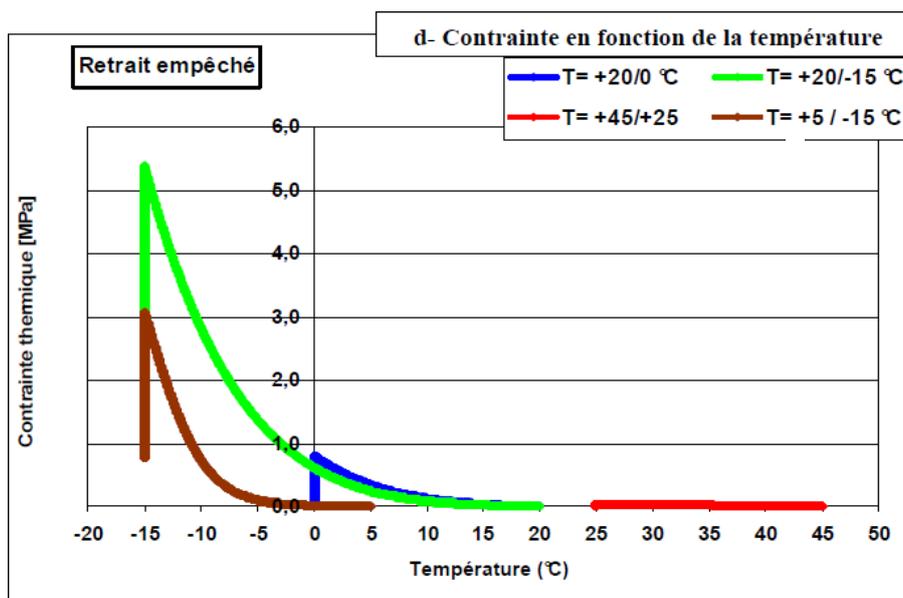


Figure I-35. Simulation de la contrainte cryogénique selon la température de départ [43].

4. LE RECYCLAGE DES AGRÉGATS D'ENROBÉ (AE)

4.1. AVANTAGES ÉCONOMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

Le terme « recyclage » signifie que le matériau est réutilisé pour un usage identique à l'initial, minimisant ainsi la production de déchets et le prélèvement de nouveaux matériaux [74]. La construction routière est une grande consommatrice de bitume et de granulats de qualité. Mais une grande ressource de ces matériaux est la route elle-même, car les déchets bitumineux produits par les opérations d'entretien peuvent être réutilisés pour la fabrication d'enrobés bitumineux [5] [8] [75]. Cette problématique a fait l'objet de la convention d'engagement volontaire du 25 mars 2009 entre différents acteurs du BTP et le MEEDDAT (MEEDDAT 2009), dont l'objectif est d'atteindre un pourcentage de recyclage en centrale, d'environ 100 % à l'horizon 2020 (60 % pour 2012), en réduisant les émissions de gaz à effet de serre de 33 % [9].

Actuellement, le taux de recyclage varie selon le pays [76] et se trouve limité par la technologie des centrales d'enrobage [77] [78] [79] [80] [81] [82]. Selon l'EAPA (European Asphalt Pavement Association), en France, entre 2009 et 2016, la part des agrégats d'enrobés disponible et réutilisée dans la fabrication des enrobés recyclés est passée de 41 % à 70 % (soit de 7,2 % à 13,3 % de la production annuelle d'enrobés). Cependant, ce taux reste inférieur à celui d'autres pays : Finlande (100 % de réutilisation / 19,5 % de recyclage), Pays-Bas (71 % de réutilisation / 38,4 % de recyclage), Allemagne (87 % de réutilisation / 25,5 % de recyclage), États-Unis (94 % de réutilisation / 20,5 % de recyclage) [76].

Diverses études montrent qu'en augmentant le taux d'incorporation de matériaux recyclés dans les nouveaux mélanges on accroît les avantages économiques (Figure I-36) et environnementaux (Figure I-37 et Figure I-38) [83] [84] [85].

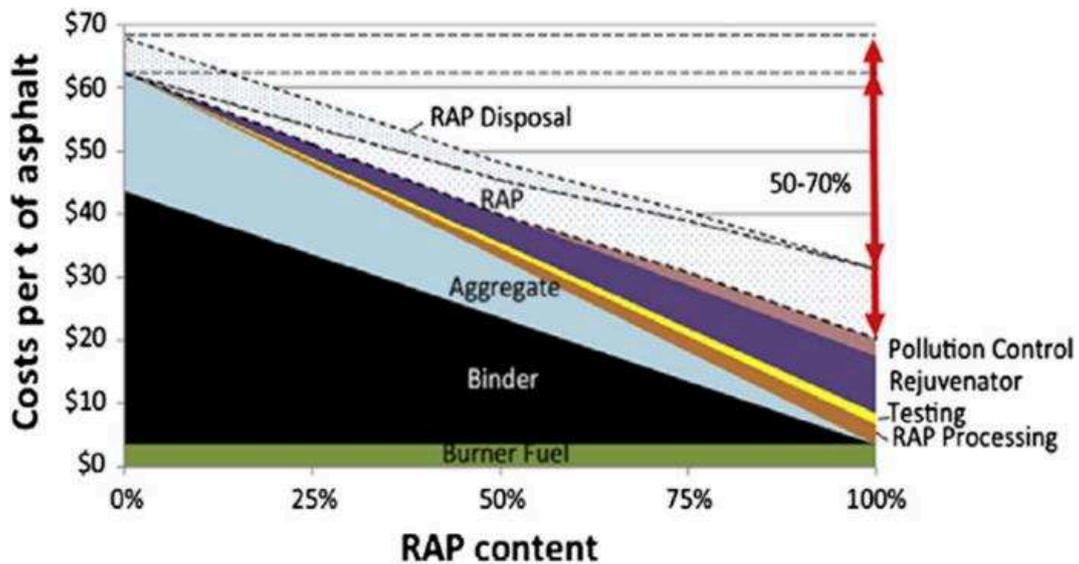


Figure I-36. Coûts liés à la fabrication des enrobés à chaud [84] [86].

La fabrication des enrobés à chaud est responsable d'émissions polluantes et de consommation énergétique. Cependant, des études montrent que l'ajout des AE à des taux de 30 à 70 % permet de réduire d'entre 20 et 35 % l'émission de CO₂ (Figure I-37) [84] [86] [87] [88]. Ainsi, sur un chantier de 500 tonnes de BBSG3 à 25 % d'AE et 1000 tonnes de GB3 à 30 % de recyclage, il a été possible d'économiser 6,3 tonnes de CO₂ et 10⁵ MJ d'énergie [89].

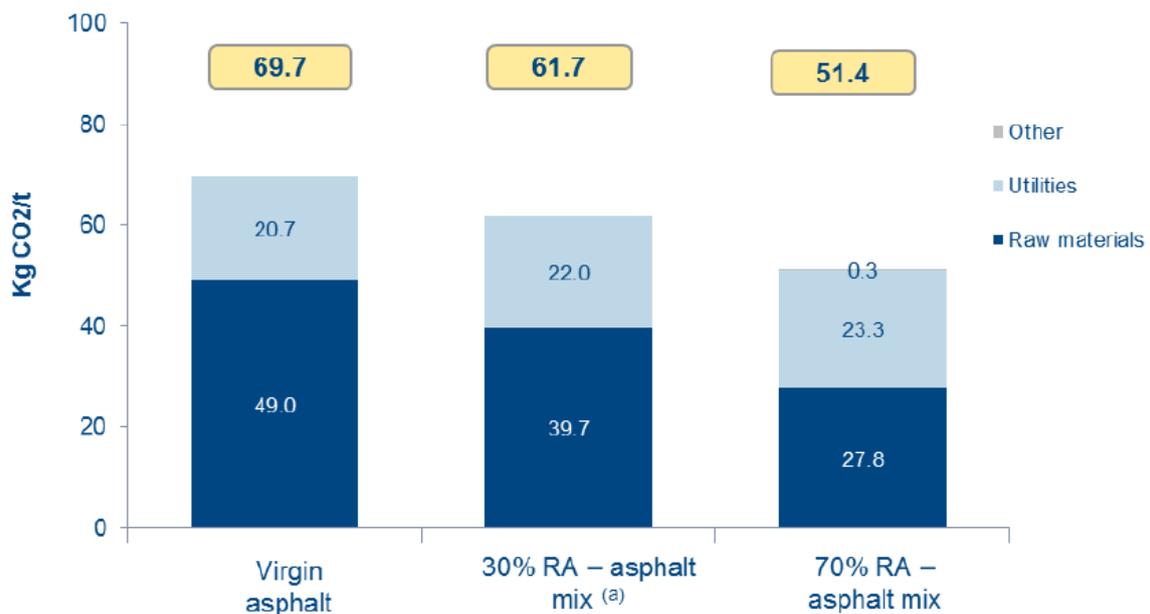


Figure I-37. CO₂ produit pendant la fabrication en centrale des enrobés à chaud avec des matériaux locaux [85].

Des études [84] [86] [90] affirment que l'énergie nécessaire pour la fabrication des enrobés recyclés et pour leur mise en œuvre est indépendante du taux d'AE (Figure I-38).

Afin de répondre aux diverses questions posées par le recyclage et d'améliorer cette technique, différents projets de recherche collaborative ont été menés au niveau national (MURE, IMPROVMURE...) ou international (Re-Road, NCHRP, BioRePavation...)

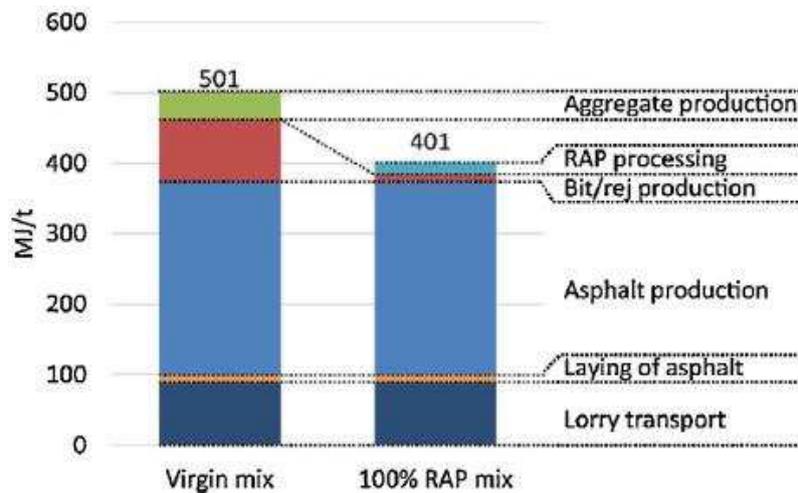


Figure I-38. Consommation d'énergie pendant la fabrication et la mise en œuvre des enrobés bitumineux à chaud [84] [86].

4.2. LE VIEILLISSEMENT DU BITUME

Le bitume subit un vieillissement depuis sa production jusqu'au stade ultime de la vie de l'enrobé qui se traduit par une augmentation importante de sa viscosité [8] [10] [21]. Lors de la mise en œuvre, cette évolution est très marquée, et à long terme elle s'accroît avec la proximité de l'enrobé à la surface de la chaussée. Les modifications chimiques du bitume qui accompagnent son durcissement sont représentées de façon schématisée par la Figure I-39.

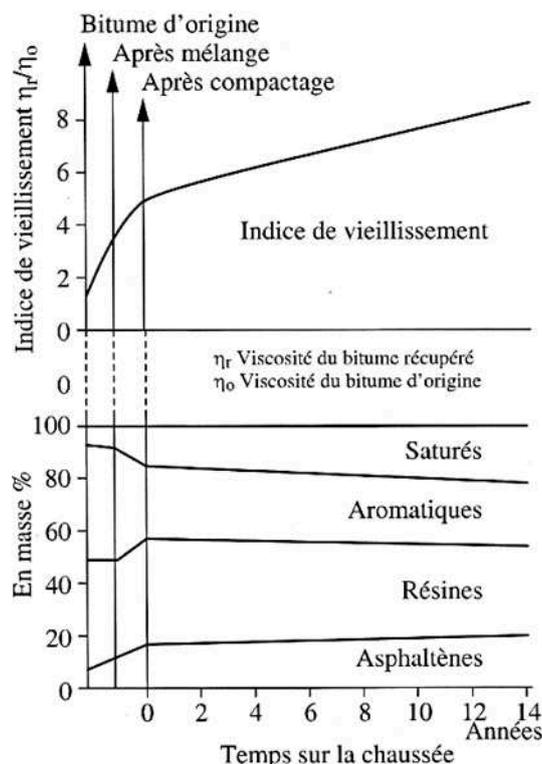


Figure I-39. Évolution de la viscosité et de la composition du bitume au cours de l'enrobage et sur la chaussée [10].

Le durcissement initial lors de l'enrobage (température de l'ordre de 160-180 °C) est en grande partie dû à l'évaporation des aromatiques légers et naphéniques tandis que le

vieillessement à long terme est dû principalement à l'oxydation de l'enrobé sur la route en service (Figure I-40) [21] [88] [91] [92].

Les revêtements âgés sont plus susceptibles aux fissurations thermiques et moins susceptibles à l'orniérage. Lorsque le bitume devient fragile, les fortes tensions se manifestant aux surfaces d'adhésion avec les granulats, peuvent entraîner des phénomènes de fissuration par fatigue thermique [8].

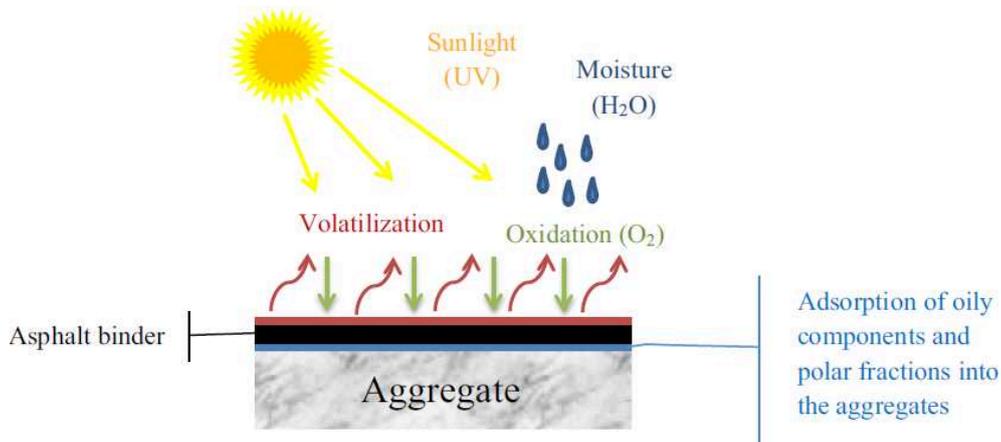


Figure I-40. Phénomènes de vieillissement du bitume routier sur la chaussée [87].

4.2.1. Phénomènes physico-chimiques du vieillissement

Le phénomène de vieillissement dépend de différents facteurs [8] [10] [21] [87] [93]:

- la température, responsable de l'évaporation des substances les plus volatiles,
- la lumière, capable de provoquer une polymérisation des résines en asphaltènes,
- l'oxygène, facteur principal du durcissement chimique,
- l'eau, décomposable en agents oxydants par des radiations ionisantes,
- l'épaisseur du film de bitume (5 à 15 μm), exposée à une température élevée pendant la fabrication (pertes de 30 % en pénétrabilité),
- le type de granulats, susceptibles de provoquer la migration des fractions huileuses du bitume à travers leur porosité,
- le pourcentage de vides, facilitant l'entrée de l'oxygène et de l'eau au sein de l'enrobé.

Le vieillissement purement physique entraîne une augmentation de la viscosité sans modification chimique des constituants. Il touche essentiellement l'organisation colloïdale du matériau lors de la fabrication, dont la remise en structure est lente [94].

L'évaporation des fractions les plus volatiles du bitume constitue un autre type de vieillissement physique [8] [88]. Cette migration, faible et lente, engendre la formation de particules de grosses tailles (asphaltènes) [17] [43] [88] [94]. La présence de fractions cristallisables (paraffines) peut conduire également à un durcissement physique du bitume par un processus plus rapide.

Le vieillissement chimique, le plus important et le plus complexe, se produit pendant l'enrobage et la mise en œuvre ainsi que sur la route en service (Figure I-40) [8] [21]. Les principales conséquences sont une modification de la composition générique (augmentation des asphaltènes, variation des aromatiques et des résines) et une diminution de la susceptibilité au vieillissement [19] [21] [91] [94]. La réduction du quotient Maltènes/Asphaltènes provoque une rigidification et/ou une fragilisation du liant, surtout à basse température.

4.2.2. Évolution des caractéristiques du bitume

L'évolution des caractéristiques physico-chimiques et structurales du liant pendant l'enrobage, ainsi que pendant la durée de service de la chaussée, modifie les performances de l'enrobé [95] [96] [97] [98] [99] [100].

En termes de rhéologie [101], la capacité de relaxation du bitume se voit réduite avec le vieillissement, surtout à basses températures : une augmentation de la température de transition vitreuse T_g est normalement observée.

L'évolution du vieillissement peut être suivie dans le diagramme de Black par le paramètre de Glover-Rowe (G-R) [102] [103] [104] [105] défini par :

$$G - R = \frac{|G^*|(\cos \delta)^2}{\sin \delta} \quad (\text{I-18})$$

où $|G^*|$ et δ sont le module complexe et l'angle de phase du liant mesurés à 15°C et 0,005 rad/s.

Des valeurs particulières de G-R définissent des zones saine ($G-R < 180 \text{ kPa}$) et fissurée ($G-R > 450 \text{ kPa}$) séparées par une zone d'endommagement (Figure I-41).

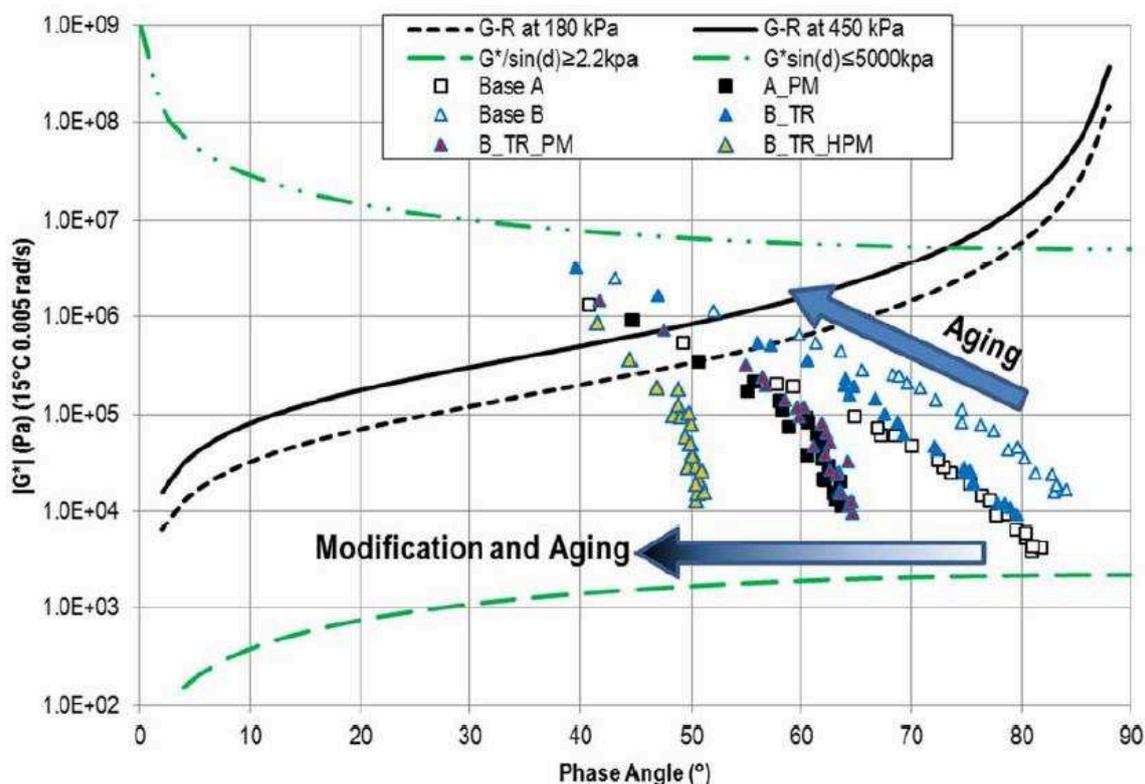
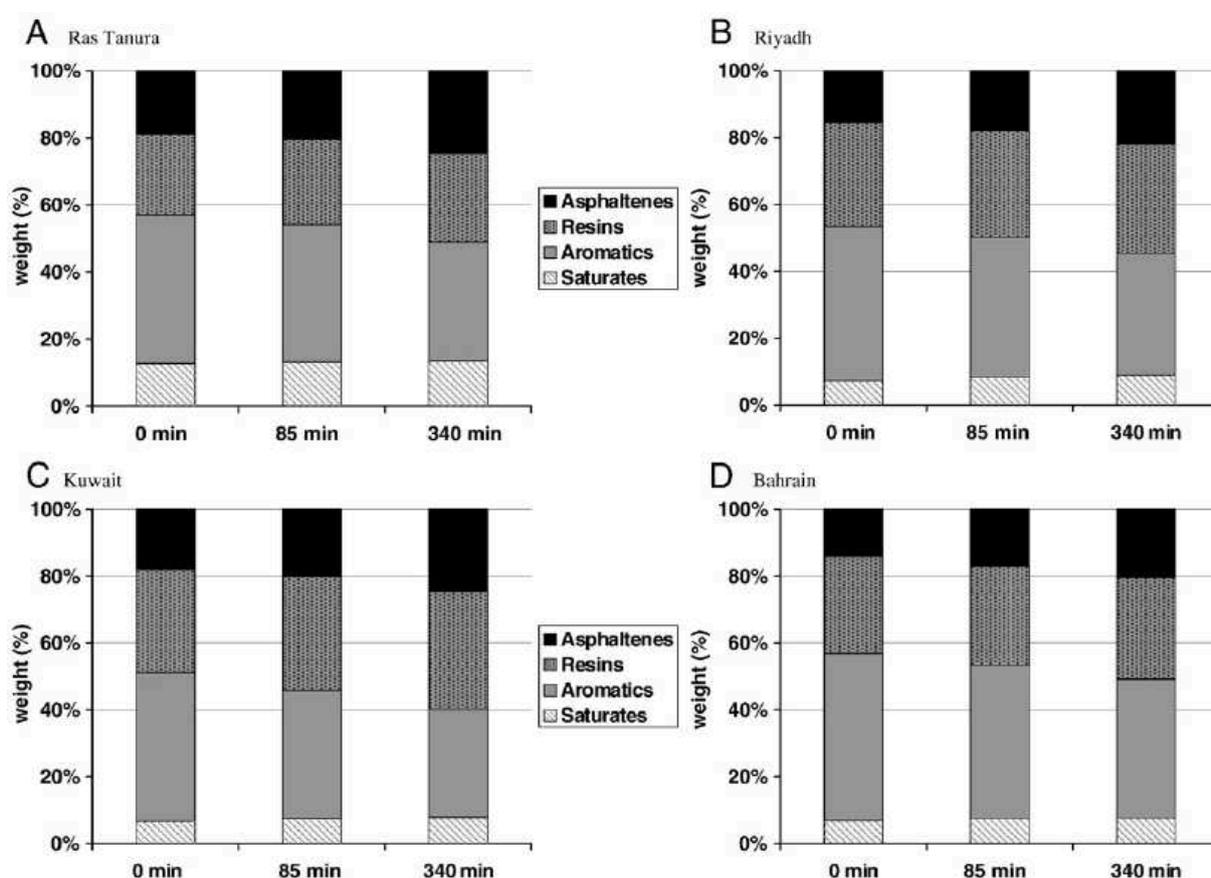


Figure I-41. Paramètre G-R dans l'espace de Black [106].

En termes des fractions SARA, les taux d'asphaltènes et de résines (Figure I-39 et Figure I-42) augmentent avec le vieillissement, tandis que les saturés se montrent relativement stables. La perte de masse du bitume après fabrication indique une volatilisation de la fraction aromatique la plus légère ou saturée. Ces évolutions sont dues à la transformation de la fraction aromatique par l'exposition à des températures élevées et à celle des résines par l'exposition à l'oxygène. Sauf pour les saturés, il semble exister un équilibre entre le reste des fractions : l'oxydation des aromatiques tend à les agglomérer pour former des résines et des asphaltènes, de même, les résines s'agglomèrent pour former des asphaltènes. Par conséquent, un accroissement de l'indice d'instabilité colloïdale est observé.

Par ailleurs, l'oxydation du bitume est souvent associée à l'augmentation des liaisons carbonyles (C = O) et sulfoxydes (S = O). À partir de la spectrométrie infrarouge FTIR, on identifie l'évolution des groupes fonctionnels résultant du processus d'oxydation (Figure I-44). Une augmentation dans chaque groupe est la conséquence directe du phénomène de vieillissement [100].



4.3. CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DU VIEILLISSEMENT

La nécessité de comprendre, pour mieux en maîtriser les effets, les mécanismes de vieillissement des bitumes et des enrobés, a conduit à développer des essais qui reproduisent l'essentiel des phénomènes intervenants, en particulier au cours de la fabrication des enrobés et sur la chaussée en service (Figure I-43 et Tableau I-2).

Les essais normalisés les plus représentatifs pour la simulation en laboratoire de l'évolution des propriétés mécaniques et structurales des liants bitumineux au cours du temps sont le RTFOT et le PAV.

4.3.1. Essais RTFOT et PAV

L'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) simule l'enrobage et la mise en œuvre, en reproduisant l'oxydation et les pertes de matières volatiles. Soumis à une température de 165 °C pendant 75 mn le bitume se répartit en films minces sur la paroi intérieure des récipients qui constituent le matériel d'essai ; puis des mesures de pénétrabilité et TBA sont réalisées [8] [43].

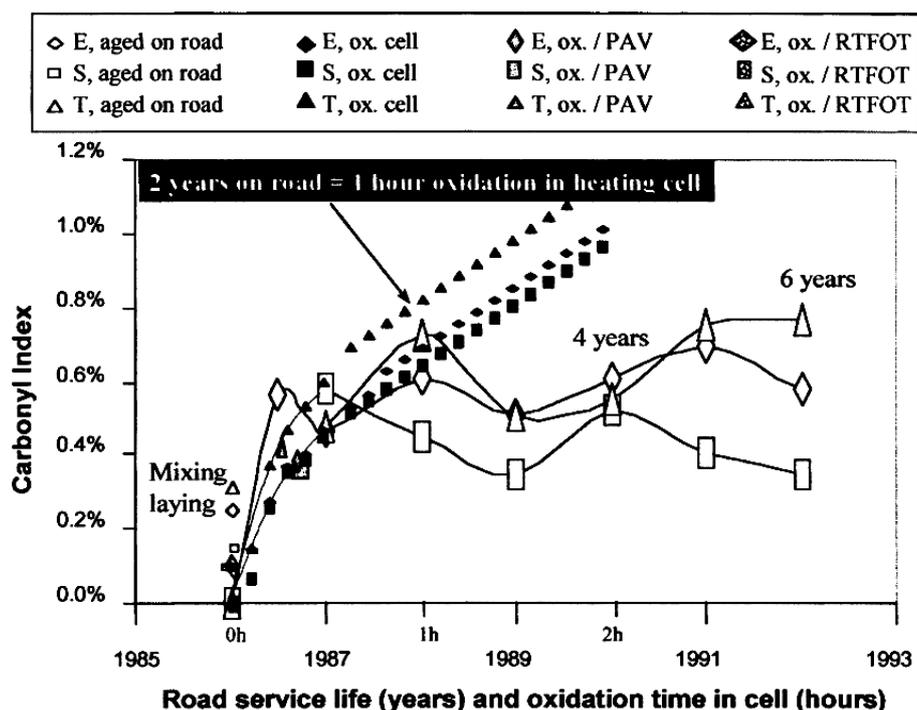


Figure I-43. Évolution (court et long termes) de l'indice carbonyle avec le vieillissement [92].

L'essai PAV (Pressure Aging Vessel) reproduit l'évolution du bitume en phase de service dans la chaussée. Les résidus de l'essai RTFOT sont à nouveau vieillis à des conditions de pression et température bien définies pendant une vingtaine d'heures. Le bitume est ensuite récupéré et soumis à différents tests de caractérisation [33].

Tableau I-2. Évolution PAV des propriétés de différents bitumes à basse température [107].

Bitumen	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B _{M1}	B _{M2}	B _{M3}	B _{M4}
T _{Fraass} (°C)	-9.0	-12.5	-14.5	-13.5	-7.0	-14.0	-10.0	-13.0
T _{Fraass} (°C) *	-3.0	-7.0	-8.0	-8.5	-5.0	-4.5	-4.0	-6.0
T _{300MPa} (°C)	-15.9	-20.9	-16.0	-21.1	-13.9	-16.2	-17.7	-17.0
T _{300MPa} (°C) *	-12.7	-17.9	-13.2	-19.7	-11.1	-14.3	-14.3	-14.3
T _{300MPa*} (°C)	0.5	-5.5	-0.6	-6.7	2.0	-0.3	-1.8	-1.6
T _{300MPa*} (°C) *	4.1	0.4	4.1	-4.1	4.7	1.5	3.7	1.8
T _{Crit} (°C)	-16.2	-20.8	-17.3	-18.3	-13.4	-16.1	-16.5	-16.6
T _{Crit} (°C) *	-8.6	-10.7	-13.4	-7.1	-4.6	-9.9	-9.4	-9.8
T _{23°} (°C)	-3.6	-9.6	-6.7	-8.4	-1.5	-3.8	-4.2	-4.6
T _{23°} (°C) *	2.8	0.7	2.9	-1.2	6.2	0.4	4.4	1.3
LCT (°C)	-5.0	-5.0	-5.0	-8.0	-3.0	-3.0	-7.0	-7.0
LCT (°C) *	4.0	5.0	2.0	2.0	7.0	3.0	2.0	0.0
T _{diss} (°C)	-16.5	-14.5	-10.4	-16.0	-7.1	-11.2	-21.2	-11.5
T _{diss} (°C) *	-5.7	-4.8	-10.7	-8.3	-3.2	-7.1	-8.1	-8.0

*Results for the materials obtained after the aging process.

4.3.2. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

L'oxydation des bitumes entraîne création de liaisons carbonyles et sulfoxydes, identifiées à l'aide de la spectrométrie infrarouge qui permet de les étudier de façon accélérée et en continu, sans perturber les équilibres internes de ces produits complexes [92] [99].

Sur le spectre infrarouge (Figure I-44), les groupes carbonyle (C = O) et sulfoxyde (S = O), correspondent à des absorbances autour de 1700 et 1030 cm^{-1} respectivement [108] [109]. On calcule les indices carbonyle I_{CO} et sulfoxyde I_{SO} par :

$$I_{CO} = \frac{\text{Aire autour de } 1700 \text{ cm}^{-1}}{\text{Aire autour de } 1460 \text{ cm}^{-1} + \text{Aire autour de } 1375 \text{ cm}^{-1}} \quad (\text{I-19})$$

$$I_{SO} = \frac{\text{Aire autour de } 1030 \text{ cm}^{-1}}{\text{Aire autour de } 1460 \text{ cm}^{-1} + \text{Aire autour de } 1375 \text{ cm}^{-1}} \quad (\text{I-20})$$

Certains auteurs ont trouvé que l'aromaticité du bitume (teneur relative des liaisons aromatiques C = C, mesurée à 1600 cm^{-1}) tend à augmenter avec le vieillissement [92] [110].

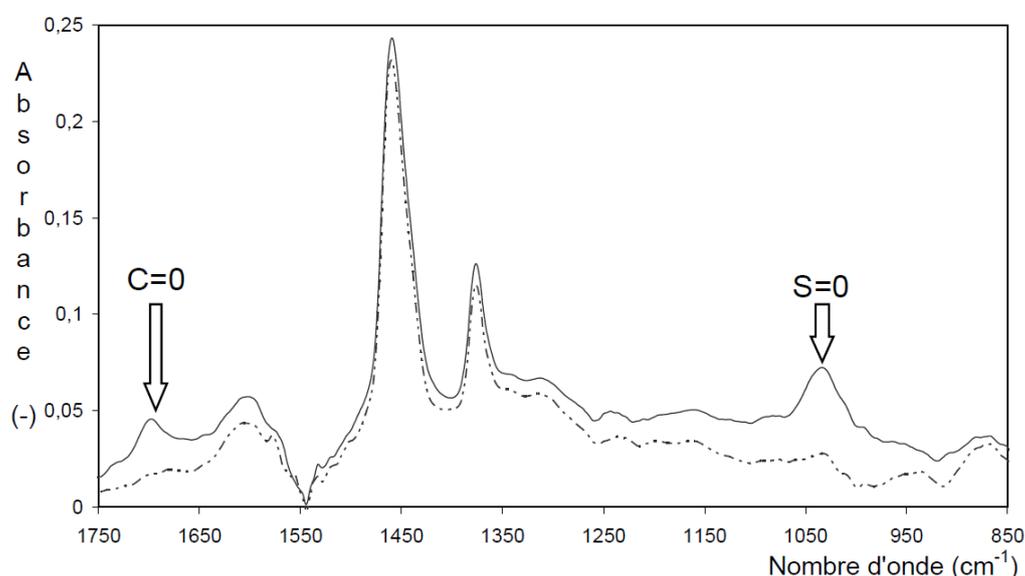


Figure I-44. Comparaison du spectre infrarouge d'un bitume neuf (en trait pointillé) et d'un liant issu d'AE (en trait plein) mettant en évidence l'oxydation du liant des AE par rapport à un liant neuf [111].

4.4. LES AGRÉGATS D'ENROBÉS

Les AE sont des matériaux bitumineux précédemment rabotés et/ou concassés et criblés. Ils sont identifiés, stockés puis prédosés avant mélange, conformément à la norme NF EN 13108-21 [112]. Leur réutilisation en technique routière est fondée sur des bases écologiques [113], économiques [75] [114] [115] [116] et techniques [117] [118] [119] [120] [121]. Ils sont désignés par le symbole AE, précédé par la taille maximale U des morceaux de l'enrobé concassé et suivi des dimensions du plus petit (d) et du plus gros granulat (D) : U AE d/D [31] [122].

Le Guide d'Utilisation des Normes Enrobés à Chaud [123] propose des taux de recyclage en fonction du degré de connaissance des caractéristiques des AE. Ces pourcentages (Tableau I-3), peuvent être augmentés sous réserve de maîtriser l'homogénéité et la qualité des

AE. La dénomination 1, 2 et NS correspond au niveau croissant de dispersion des résultats (degré d'homogénéité).

Tableau I-3. Relation entre la connaissance de l'état des AE et le taux de emploi [123].

Utilisation des agrégats d'enrobés							
Usage dans la chaussée	Couche de roulement		0 %	10 % ⁽¹⁾	30 %	10 %	40%
	Couche de liaison		10 %	20 %	30 %	40 %	
	Couche d'assise						
Composants de l'agrégat d'enrobé	Liant bitumineux	Teneur	TL _{NS}	TL ₂	TL ₁		
		Pénétrabilité ou TBA	B _{NS}		B ₂	B ₁	
	Granulats	Granularité	G _{NS}		G ₂	G ₁	
		Caractéristiques intrinsèques	R _{NS}			R ₁	R _{NS}
⁽¹⁾ si la teneur en liant moyenne de l'agrégat est supérieure à 5 %, on considère que l'enrobé est un béton bitumineux dont les granulats ont été choisis selon des critères minimaux voisins de ceux qui sont recherchés pour le matériau recyclé.							

Les propriétés thermomécaniques de l'enrobé recyclé peuvent être altérées par des variations trop importantes des constituants de l'AE [80] [124]. L'hétérogénéité des AE étant liée à leur origine et aux variations du squelette granulaire et du liant [78] [125] [126] [127]. [128], un contrôle strict de la teneur en liant, de la pénétrabilité, de la température bille-anneau et de la granulométrie doit être fait [5] [80] [125] [129], en particulier pour les taux de recyclage élevés [115] [130].

La séparation en lots homogènes [129] [131] permet d'augmenter le taux de recyclage [83] [132] ; l'homogénéité d'un lot étant définie par des valeurs limites de la variation de ses propriétés [8] [93]. Certaines recherches ont montré que cette variabilité peut être contrôlée, [133], tandis que d'autres montrent que la grande variabilité dans les matériels de fabrication affecte grandement la variabilité de la teneur en liant et de la courbe granulométrique du mélange final, en particulier à forts taux de recyclage [126].

L'homogénéité du mélange entre le liant des AE et le bitume d'apport, dépend de deux processus majeurs non simultanés : le mélange mécanique à court terme et celui par diffusion à long terme (Figure I-45) [111] [132] [134] [135].

Si la remobilisation du liant des AE est faible, un mauvais contact entre les deux liants est observé (a), même si les deux liants en contact finissent par se mélanger partiellement (b). En cas de bon contact mais de mauvaise affinité (diffusion) entre les deux liants, les propriétés du mélange seront médiocres (c) ; avec un bon contact et une bonne diffusion le mélange sera homogène et ses propriétés optimales (d). Cependant, il peut exister des régions où les liants ne sont pas en contact direct empêchant un mélange parfaitement homogène [103] [136].

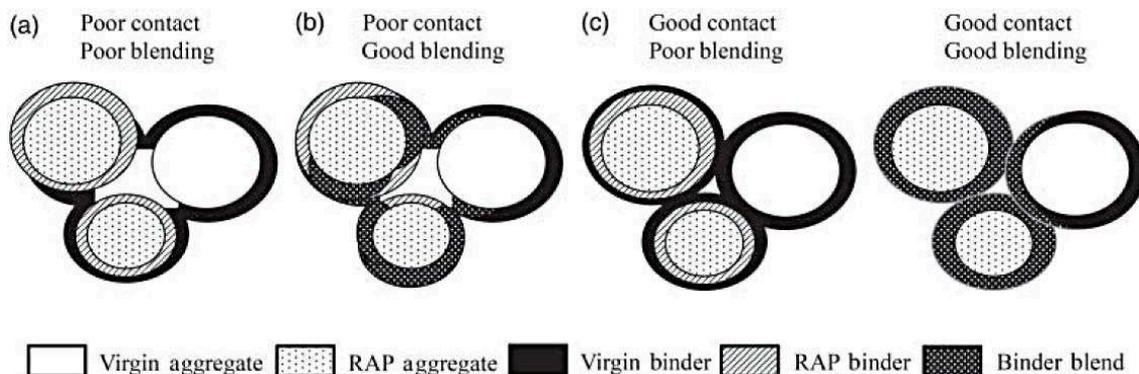


Figure I-45. Scénarios du degré de mélange entre le liant des AE et celui d'apport [136].

4.5. LES ADDITIFS

L'altération des propriétés thermomécaniques de l'enrobé produite par les AE [115] [132] [137] [138] peut être limitée par des additifs [86] [87] permettant en outre d'augmenter le taux de recyclage [139]. Un classement des additifs est présenté dans le tableau I-4.

Tableau I-4. Classification des additifs [102].

Origine pétrolière	Origine biomasse
Huiles paraffiniques	Triglycérides / acides gras
Huiles aromatique / Extraits aromatiques	Dérivés de Tall oil (résines de pin), de suif ...
Bitume mous	Stérols
Maltenes	Résidus de pyrolyse de lisier de porc
REOB (VTAE)	

Dans le cas où l'additif a pour but de restaurer des propriétés physico-chimiques du liant vieilli, on parle d'« additif de type régénérant ». Dans l'enrobé recyclé, le bitume pur d'apport n'est pas considéré comme additif, il joue un rôle de simple fluidifiant ou d'agent correcteur de la pénétrabilité du liant recomposé.

En l'absence de spécifications relatives à l'utilisation des additifs de type régénérant, divers projets de recherche (Re-Road, BioReparation, NCHRP 9-58 ...) ont été menés pour étudier l'efficacité de ces additifs en techniques de recyclage [90] [102] [103] [140] [141], à savoir :

- leur effet ramollissant sur le liant des AE,
- leur capacité à renverser le niveau de vieillissement du liant des AE par interaction avec certains produits d'oxydation (asphaltènes en particulier),
- l'amélioration des propriétés en fatigue et à basse température,
- le maintien des effets à court (fabrication) et long terme (chaussée),
- la mesure de leur efficacité (rhéologie, DSC, SARA, Infrarouge...).

L'effet attendu de la régénération, est d'inverser l'évolution des propriétés du liant produite par le vieillissement (Figure I-46) [137] [142] [143], sous réserve de réussir la compatibilité et le mélange de l'additif avec le liant vieilli [128] [144] [145] [146] [147]. L'efficacité des régénérants se manifeste davantage à long terme que pendant la fabrication et la mise en œuvre [87] [143] [148] [149]. Cependant, un mauvais choix des régénérants peut entraîner des détériorations des performances [102] [140] [141] [142].

La contribution de certains régénérants aux émissions de CO₂ est négligeable [85] ; l'effet de ceux-ci sur les performances de l'enrobé est détaillé dans les paragraphes suivants.

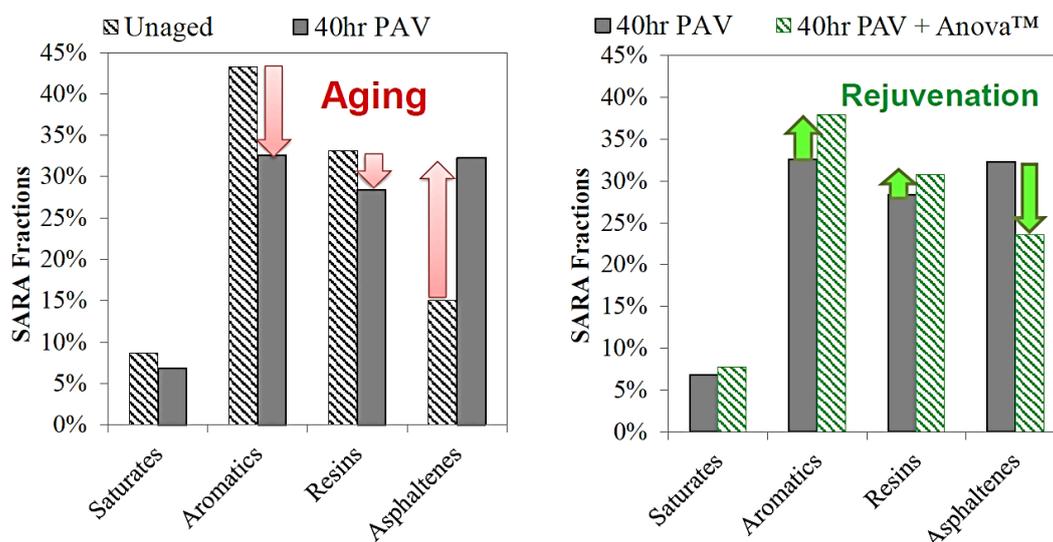


Figure I-46. Évolution des fractions SARA du bitume suite au vieillissement (gauche) et à la régénération par l'ajout des additifs de type régénérant (droite) [102] [150].

5. LIMITATIONS ET EFFETS DU RECYCLAGE

5.1. LIMITATIONS

Le recyclage total a été envisagé dans les années 70, mais les limites technologiques des centrales d'enrobage et les mauvaises performances thermomécaniques du mélange à basse température et en fatigue ont limité le taux d'AE entre 30 et 70 % [84]. Bien qu'actuellement des centrales d'enrobage permettent d'augmenter le taux de recyclage [77] [78] [81] [147], parfois vers 100%, les performances du mélange présentent encore un défi pour les enrobés recyclés [8] [80] [93] [128].

5.1.1. Liées aux caractéristiques de l'AE

D'après Valdes et al. [78], un taux de recyclage de l'ordre de 60 % est techniquement réalisable moyennant une caractérisation adéquate de l'AE. Brosseaud et al. [130] confirment qu'un taux de recyclage entre 50 et 60 % est envisageable si l'AE présente une très bonne homogénéité.

Les AE contiennent un pourcentage élevé de fines qui peut limiter leur taux d'incorporation ; aussi un fractionnement granulométrique est recommandé [5] [41] [108] [111] [131]. Cependant, la majorité du liant étant contenue dans les fines, une réduction de cette fraction diminue la quantité de liant récupérable.

Lors de l'extraction du liant des AE, une partie de celui-ci, composé des fractions les plus dures et oxydées, peut rester fixée aux granulats, entraînant une sous-estimation du niveau de vieillissement [8] [143]. Par ailleurs, une évolution des propriétés du liant avec le temps peut se produire dans les lots stockés durablement. En outre, le niveau de vieillissement du liant des AE dépend de la proximité de la couche à la surface de la chaussée, produisant une variabilité élevée des propriétés sur la même source [128]. Afin d'éviter les difficultés liées au degré d'homogénéité, certaines études [5] [8] [93] [111] [151] ont été menées avec de l'AE fabriqué en laboratoire, vieilli artificiellement.

5.1.2. Liées à la fabrication et à l'homogénéité de l'enrobé recyclé

Certaines études [5] [138] [143] [144] [152] ont montré que l'évolution des performances du mélange est très dépendante des conditions de fabrication et que la limitation du taux de recyclage est fortement liée à la centrale d'enrobage [77] [78] [127]. Ainsi le taux de recyclage maximal des enrobés à chaud, garantissant une bonne qualité du mélange varie de 25 à 65 % selon le type de centrale [8] [79] [93] [153] [154]. En France, moins de 2 % des centrales sont adaptées au recyclage à plus de 60 % ; la plupart surchauffent les granulats vierges pour transférer de la chaleur aux AE [112] [155].

En laboratoire, un recyclage total est envisageable [93], sous la prémisses d'un contrôle adéquat de la production [83]. Selon Navaro [5], la réduction de la température affecte l'homogénéité du liant recomposé : une baisse de 30 °C de la température multiplie par deux la durée de malaxage. Selon Rad et al. [138], une température inférieure à 100 °C ne donne pas lieu à mélange des liants.

La fabrication des enrobés recyclés à chaud comprend le préchauffage de l'AE afin de ramollir le liant vieilli et de garantir sa diffusion avec le bitume d'apport et le régénérant éventuel [156]. Au laboratoire, les AE peuvent être préchauffés à 110 °C ou à la température de consigne (≥ 150 °C) avant l'introduction dans le malaxeur [157]. À 110 °C on limite le taux de recyclage, les granulats vierges devant être surchauffés (250 à 300 °C) pour apporter de la chaleur aux AE, ce qui provoque une possible dégradation superficielle des minéraux (calcaires notamment) et une augmentation de fines dans le mélange [108] [130]. D'après El Beze [8], une oxydation violente du liant peut avoir lieu au contact avec les granulats vierges surchauffés pendant la phase d'enrobage, celle-ci étant plus importante sur le bitume d'apport que sur le liant des AE [75] [97] [127] [158].

La plupart des études en laboratoire préchauffent l'AE autour de 110 °C pour éviter une oxydation trop importante du liant déjà vieilli [143] [152]. McDaniel et al. [152] indiquent que le module complexe du liant des AE préchauffés pendant deux heures à 110 et à 150 °C varie faiblement, mais pour des durées de préchauffage plus longues, la température de 150 °C produit un module complexe significativement supérieur (Figure I-47). Une température similaire à celle de consigne apporte de la rigidité et améliore la résistance à la fatigue [120]. Une augmentation du temps de malaxage permet aussi d'améliorer la qualité du mélange entre les liants et avec le régénérant éventuel [103] [135] [144] [159] [160]. El Beze [8] [161] a observé que le mélange peut avoir lieu de façon partielle, selon le niveau de vieillissement du liant de l'AE.

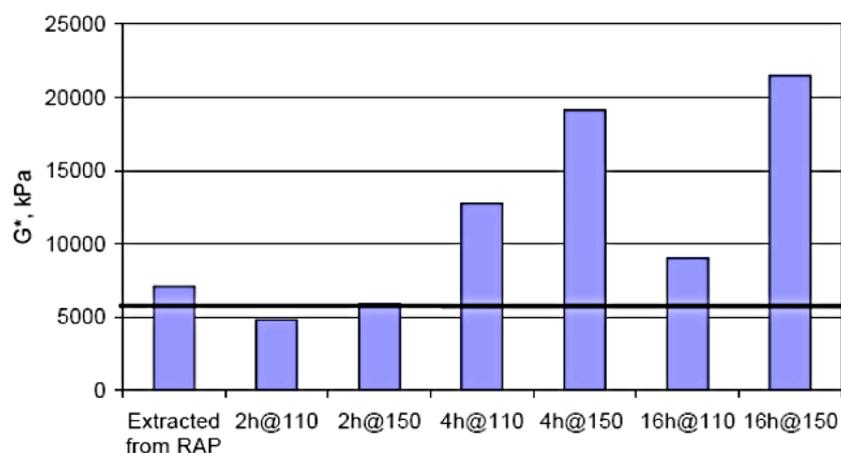


Figure I-47. Évolution du module complexe du liant des AE pendant la mise en température [152].

À l'échelle du granulat, Huang et al. [135] ont observé que la viscosité du liant autour du celui-ci augmente lorsque la distance à la surface du granulat diminue, et que seulement une petite partie du bitume vieilli des AE participe au mélange. Dans la majorité des cas, le liant vieilli forme une couche d'enrobage rigide autour des granulats de l'AE (Figure I-48), lequel ne permet pas un bon mélange avec le bitume d'apport. Ce multicouche a été aussi observé par Nguyen [93], qui conclut que le mélange total entre les liants ne se produit pas pendant l'enrobage, même si on augmente le temps de malaxage.

Carpenter et Wolosick [143] ont constaté que lorsqu'un régénérant est utilisé, seule une partie du liant vieilli est modifiée immédiatement après le malaxage. Le temps nécessaire pour que le régénérant se diffuse complètement dans le film du liant vieilli dépend des matériaux et des conditions de fabrication. Karlsson et Isacson [159] ont observé que la diffusion est aussi influencée par le type de bitume d'apport, par le régénérant et par la composition chimique de celui-ci. Ils introduisent un coefficient de diffusion indicateur du degré de mélange entre le liant vieilli, le bitume d'apport et l'éventuel régénérant (Figure I-49).

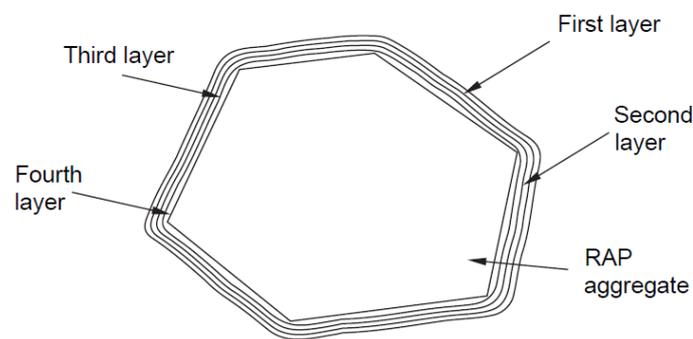


Figure I-48. Système multicouche dans les granulats des enrobés recyclés [135].

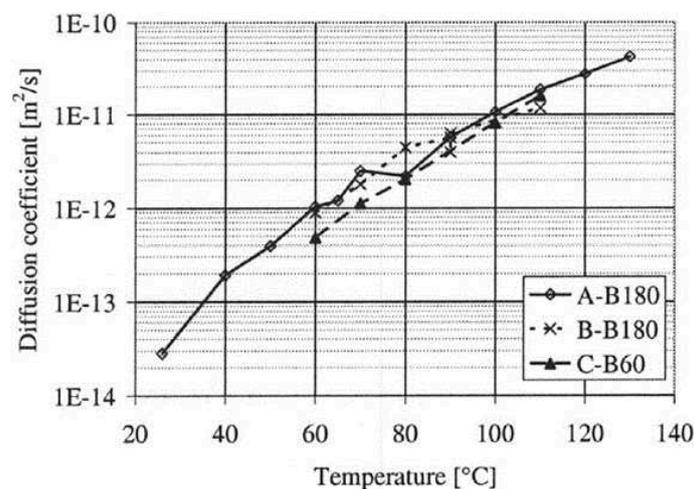


Figure I-49. Variation du coefficient de diffusion avec la température [159].

Si la température des AE ou le temps de malaxage sont insuffisants pour séparer les fractions (granulats, fines, liant) [144] [159] il se produit le phénomène de « black rock » (Figure I-50) observé par McDaniel et al. [152] où certains granulats sont recouverts par du liant vieilli et d'autres par du bitume neuf [93] [159].

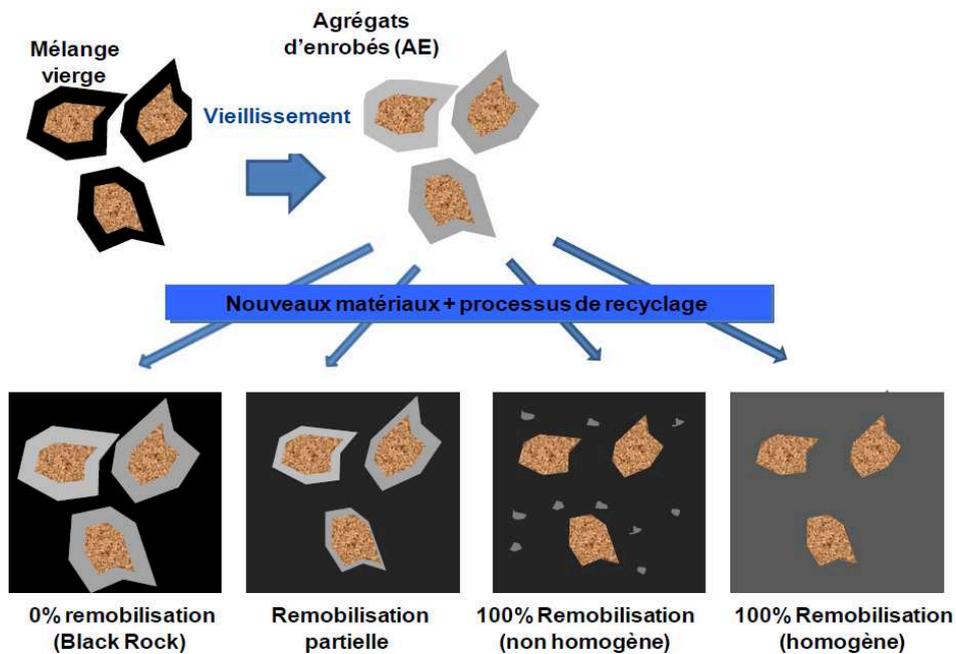


Figure I-50. Remobilisation du liant des AE lors du recyclage [102] [162].

5.2. EFFETS SUR LES PROPRIÉTÉS DU LIANT RECOMPOSÉ

Le recyclage développe certaines propriétés de l'enrobé recyclé [163] [164] [165] [166] [167] mais d'autres se dégradent [8] [108] [119] [138] dues au vieillissement des AE [88] [107] [149] [168], qui augmente le risque de fissuration à basse température [152]. L'ajout des AE entraîne également une diminution de la cohésion du liant et de l'adhérence avec les granulats [8] [130] [137] ainsi qu'une augmentation du caractère élastique [86] [93] [144].

L'apport de composants oxydés par le liant vieilli des AE [103] [107] [138] [148] [149], est limité par le bitume d'apport et l'additif employé [97] mais le vieillissement du bitume d'apport pendant l'enrobage semble être plus important que celui du liant des AE [41] [75] [83] [97] [127] [158], ce dernier étant réduit par la présence éventuelle de régénérants [137]. Les régénérants limitent aussi la baisse de la pénétration γ compris après vieillissement (Figure I-51) ; la diminution correspondante de la viscosité permet d'obtenir un mélange plus homogène avec une température de fabrication réduite [83] [86] [146] [162].

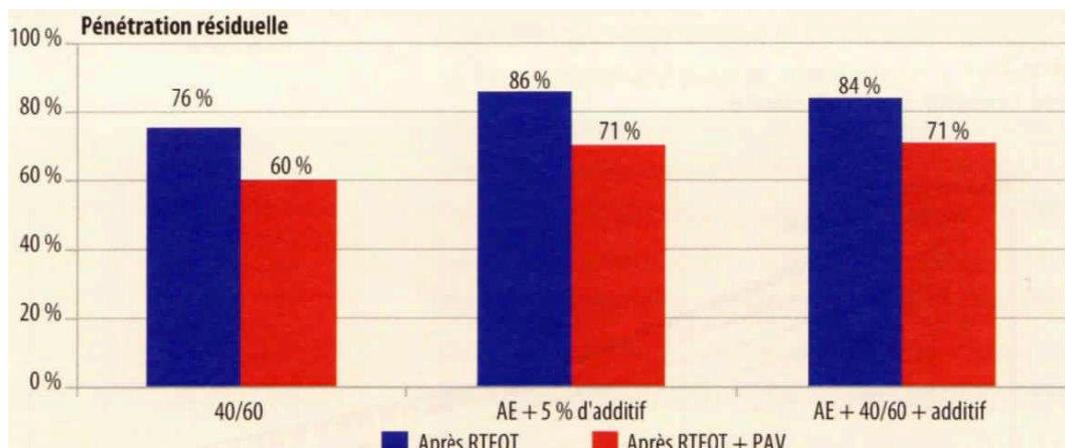


Figure I-51. Effet du régénérant sur la pénétration après vieillissement [149].

Des études [41] [104] [169] montrent une variation inverse du module complexe et de l'angle de phase avec le taux d'AE (Figure I-52), l'effet étant d'autant plus marqué que la fréquence est faible (ou la température élevée). Le régénérant a pour effet opposé de réduire le module complexe (Figure I-53), et d'accroître l'angle de phase, c-à-d de restituer en partie le caractère visqueux de l'enrobé [88] [162]. D'après Lopez et al. [148], les liants régénérés peuvent montrer des comportements rhéologiques similaires à ceux de liants traités avec polymères.

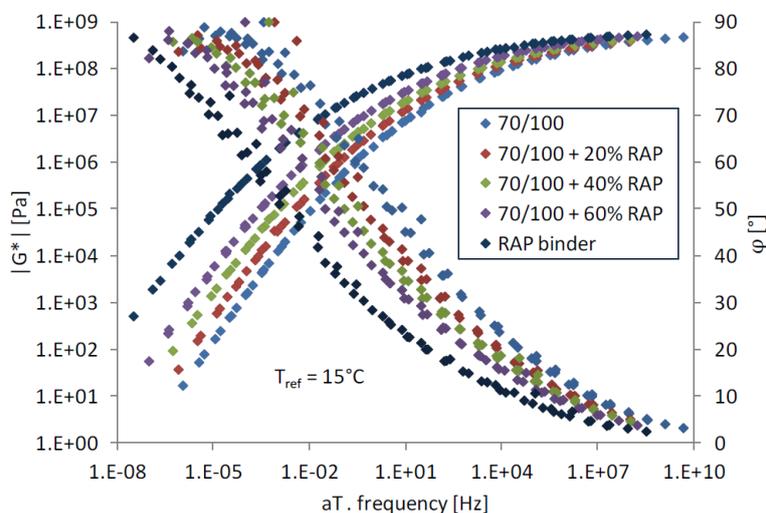


Figure I-52. Effet du taux d'AE sur la rigidité et l'angle de phase du liant recomposé [41].

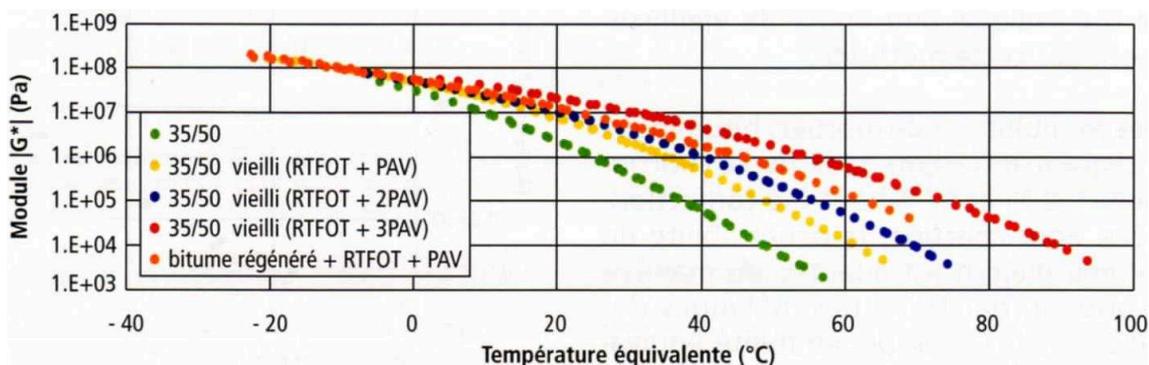


Figure I-53. Effet des additifs sur la rigidité du liant vieilli [170].

Certains auteurs [8] [75] affirment que les enrobés recyclés sont moins susceptibles au vieillissement à long terme que ceux avec des liants conventionnels [127] [154] [169] [170]. Par ailleurs, la susceptibilité du liant vieilli à la fissuration à basses températures [105] est réduite par l'ajout d'additifs [88] [162].

Les résultats FTIR montrent une augmentation des indices I_{CO} et I_{SO} avec l'ajout des AE [8] [93] [108] [171]. L'emploi de régénérants permet de réduire les carbonyles, tandis que les sulfoxydes semblent rester constants [88] [172]. La variation SARA des fractions asphaltènes et maltènes produite par les AE (Figure I-46), est partiellement compensée par le bitume d'apport et le régénérant [97]. Cependant, le liant recomposé ne peut être régénéré complètement en liant neuf [142]. Les résultats de Romera et al. [173] montrent que la teneur en asphaltènes du liant vieilli passe de 30 à 27,5 % suite à l'ajout de régénérant.

5.3. EFFETS SUR LES PERFORMANCES DE L'ENROBÉ

5.3.1. Aptitude au compactage et résistance à l'orniérage

L'évaluation des performances des enrobés recyclés suit la même démarche que pour les enrobés neufs [31] [115] [174]. Malgré la variabilité des propriétés selon les conditions de fabrication [175], certaines études [119] [120] [176] montrent des compactibilités des enrobés recyclés similaires à, voire meilleures que, celles des mélanges neufs (Figure I-54). D'autres [83] [88] [154] constatent des difficultés au compactage attribuées à la viscosité apportée par le liant vieilli.

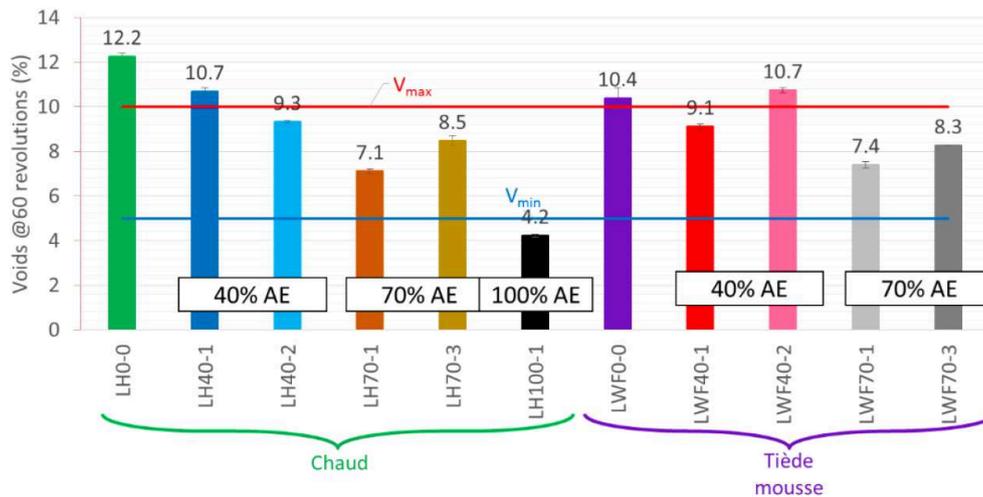


Figure I-54. Effet du taux d'AE sur la compactibilité à la PCG (IMPROVMURE) [176].

La résistance à l'orniérage est améliorée avec l'AE [78] [119] [154] [177], du fait de la rigidité apportée au mélange [108] [178]. L'ajout de régénérants modifie peu cet effet [83] [162]. Cependant, Mogawer et al. [166] constatent que l'ajout d'un liant bio-sourcé augmente légèrement l'orniérage. Par ailleurs, les AE s'avèrent diminuer la sensibilité à l'eau [108].

5.3.2. Rigidité et résistance à la fatigue

Lié à l'évolution du liant, la rigidité du mélange augmente avec l'AE [83] [129] [130] [174] tandis que l'angle de phase diminue [75] [158] [170] [171] (Figure I-55). Les effets sont plus importants au-delà d'un taux de recyclage de 40 % [152] [169] [176] (Figure I-56). L'ajout des additifs semble réduire légèrement la rigidité apportée par les AE [83] [166].

L'effet des AE sur les paramètres de fatigue sont variables d'une étude à l'autre : soit une détérioration de la résistance [78] [129] [179] [180], soit une amélioration de celle-ci [108] [164] [168] [169] [181]. Huang et al. [135] associent cette amélioration au multicouche formé autour des granulats, permettant une meilleure répartition des contraintes locales.

Copeland [115] affirme que la durée de vie des enrobés recyclés est équivalente et parfois supérieure à celle des mélanges neufs si l'homogénéité du mélange est correcte [93], l'augmentation observée de la pente de la courbe de fatigue favorisant les grandes durées de service [41] [163] [171] [178].

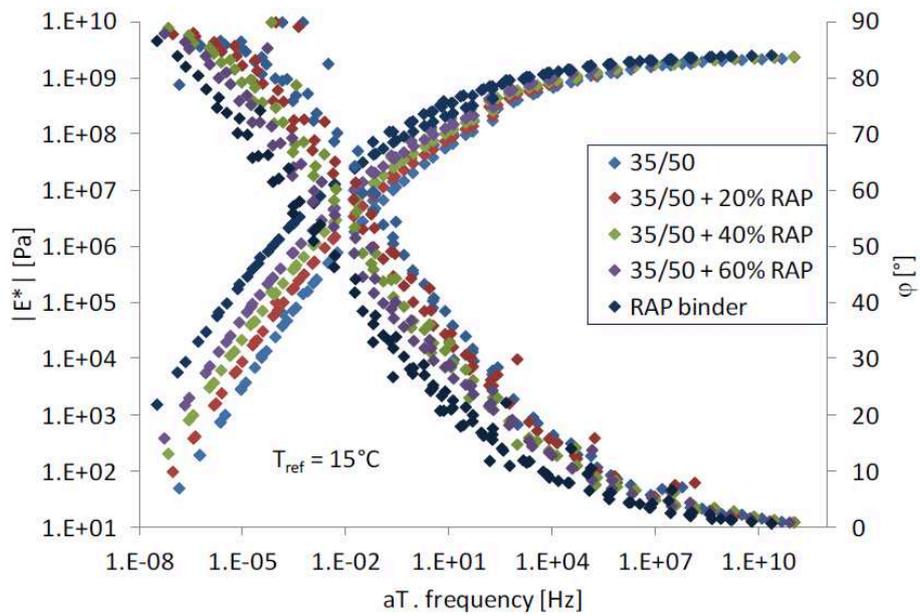


Figure I-55. Norme du module complexe et angle de phase des mélanges avec AE [41].

Le recyclage à très fort taux réduit la résistance à la fatigue du fait de la faible quantité de bitume d'apport [182], même avec un grade élevé [183]. Cependant, Mangiafico [41] trouve des variations non monotones avec le taux d'AE et la consistance du bitume d'apport (Figure I-57).

L'emploi d'additifs ou d'un liant bio-sourcé se montre généralement favorable [41] [83] [165] [166]. Par ailleurs (Figure I-58), la résistance à la fatigue diminue avec la température d'enrobage [5] [104] [120].

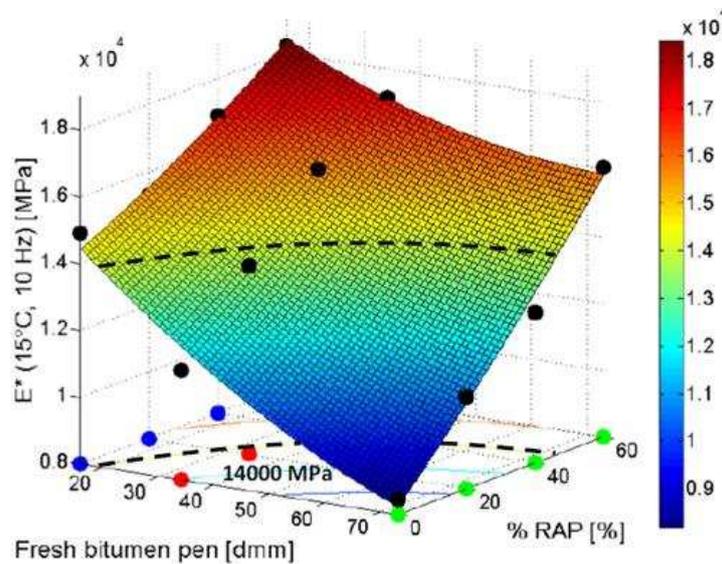


Figure I-56. Évolution de la rigidité des enrobés avec le taux d'AE et le bitume d'apport [41].

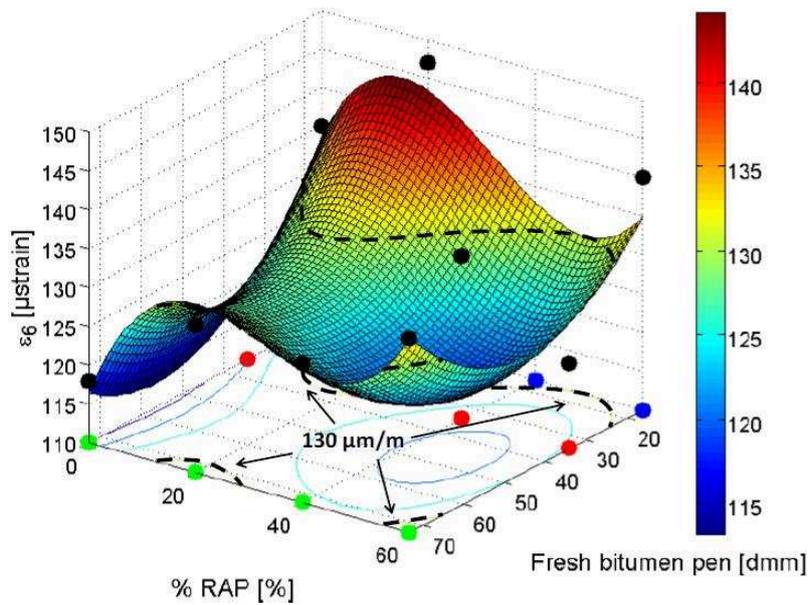


Figure I-57. Résistance à la fatigue (ϵ_6) des enrobés recyclés selon le bitume d'apport [41].

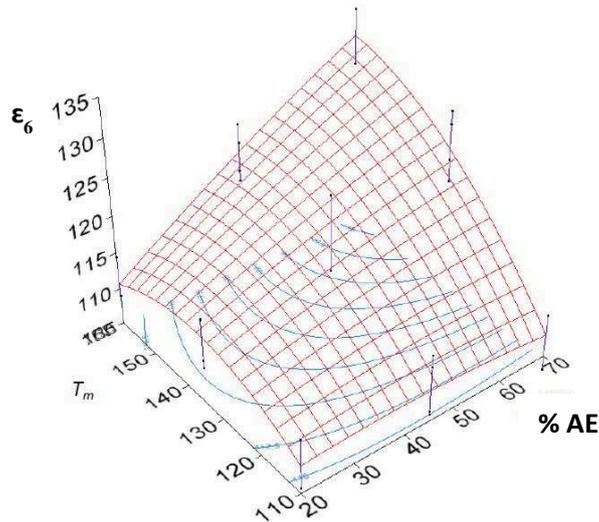


Figure I-58. Résistance à la fatigue des enrobés recyclés avec la température d'enrobage [5]

5.3.3. Performances à basse température

Les AE détériorent les performances de l'enrobé à basse température [8] [75] [137] [152] selon les conditions de fabrication et le niveau de vieillissement du liant [119] [168] [182]. Les additifs ou les liants bio-sourcés limitent ou compensent cette détérioration [166].

Selon Ambaiowei et al. [116], les enrobés à faible taux de recyclage ne présentent pas de perte importante de la résistance à la fissuration thermique, mais leur susceptibilité est plus importante. D'après Pedraza [176], la température de rupture est améliorée avec le taux d'AE (Figure I-59), tandis que les résultats d'Hajj montrent une détérioration de celle-ci (Figure I-60).

La contrainte de rupture semble aussi augmenter avec le taux d'AE, cependant, cette tendance est probablement liée à la compacité des éprouvettes (Figure I-61).

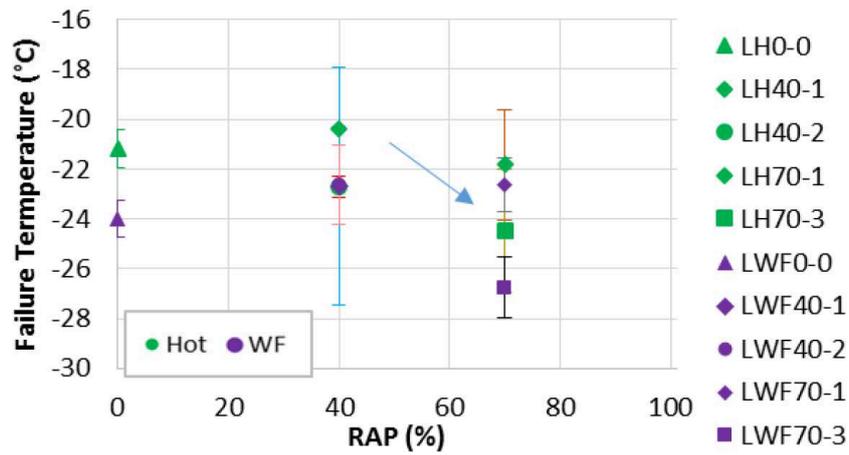


Figure I-59. Évolution de la température de rupture avec le taux d'AE et les cycles de recyclage (IMPROVMURE) [176].

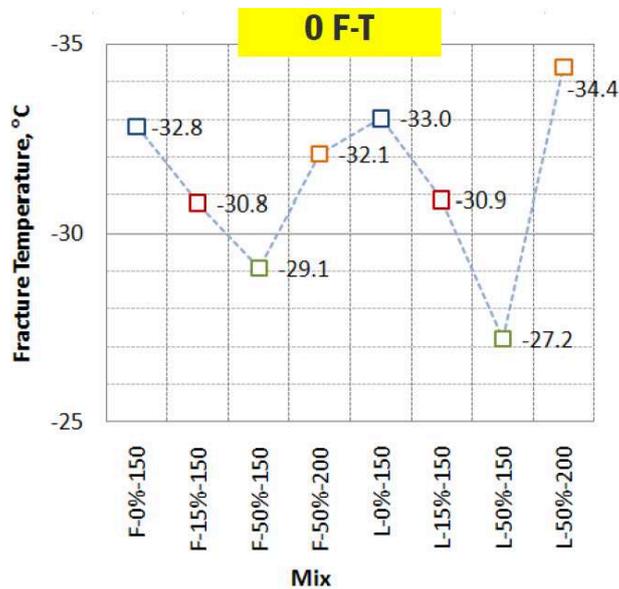


Figure I-60. Évolution de la température de rupture TSRST avec le type de compactage (F : in situ ; L : laboratoire), le taux d'AE et le type de bitume d'apport [184].

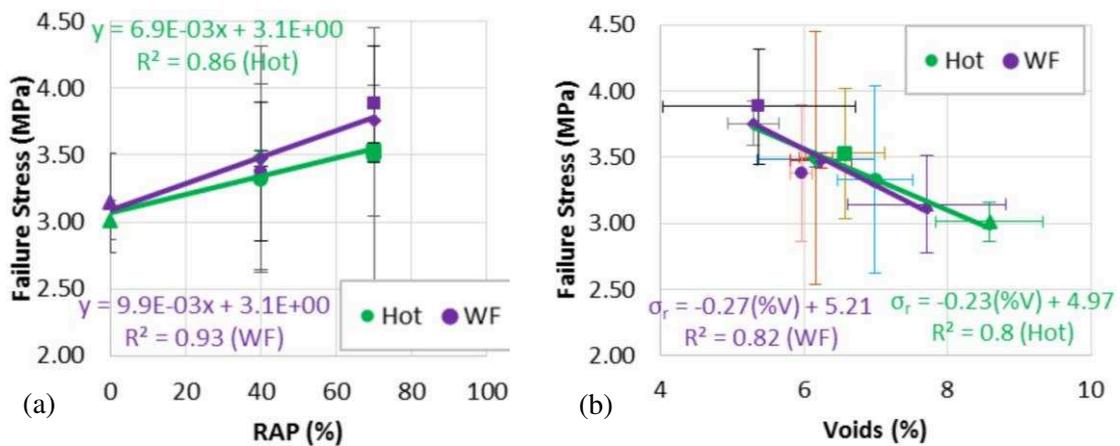


Figure I-61. Évolution de la contrainte de rupture avec (a) le taux d'AE et (b) le % de vides (IMPROVMURE) [176].

6. CONCLUSION À L'ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

L'étude bibliographique ci-dessus montre que le recyclage des enrobés bitumineux a fait l'objet de nombreux travaux de recherche à l'échelle internationale, à la fois sur le plan fondamental du vieillissement des liants et de la qualité du mélange du liant vieilli avec le liant d'apport au cours de la fabrication des enrobés, mais également sur le plan plus pratique de l'évaluation des performances thermomécaniques des enrobés.

Néanmoins la technique du recyclage laisse encore des questions ouvertes sur les conditions optimales de fabrication (température, énergie et durée du malaxage), sur l'affinité physico-chimique entre liant des AE, bitume d'apport et additif éventuel, ainsi que sur les performances thermomécaniques à court et à long terme des enrobés recyclés, en particulier à fort taux d'AE. En outre, sur certains de ces aspects, les résultats des recherches s'avèrent contradictoires.

Dans ce contexte, le présent travail de recherche a pour objectifs d'apporter des éléments de réponse à certaines des questions qui restent posées, en particulier sur :

- l'efficacité et l'optimisation des procédés de fabrication des enrobés recyclés en laboratoire,
- l'impact du taux d'AE sur les performances thermomécaniques des enrobés recyclés à tous les niveaux de leur caractérisation et en particulier à basse température,
- l'effet d'un régénérant (Regefalt) sur les performances ci-dessus
- le lien éventuel entre les performances des enrobés recyclés et certaines propriétés physico-chimiques des liants.

À cet effet, une approche expérimentale exhaustive a été adoptée portant sur les trois grandes familles d'enrobés : Béton Bitumineux Semi Grenu, Enrobé à Module Élevé et Grave-Bitume, considérant des taux de recyclage élevés (depuis 40 % jusqu'à 70 %). Les paramètres de formulation ont été figés de manière à mettre en évidence séparément l'impact du taux d'AE et l'effet de l'additif.

Les nombreuses compositions élaborées ont fait l'objet de la gamme complète d'essais constituant les différents niveaux conventionnels de formulation (niveaux N0 à N4) ainsi que les essais complémentaires à basses températures : traction uniaxiale et retrait thermique empêché. Une attention particulière a été portée sur la répétabilité de l'ensemble de ces essais.

CHAPITRE II. FORMULATION DES MATÉRIAUX ET CAMPAGNE EXPÉRIMENTALE

1. MATÉRIAUX ET FORMULES

Dans le cadre de cette thèse, trois types d'enrobés bitumineux à chaud sont considérés (Figure II-1) :

- un béton bitumineux semi grenu 0/10 de classe 3 (BBSG3) de l'entreprise Roger Martin (RM),
- une grave-bitume 0/14 de classe 4 (GB4) de l'entreprise Le Foll TP (LF),
- et un enrobé à module élevé 0/14 de classe 2 (EME2) de l'entreprise Braja-Vésigné (BV).

Quel que soit le type d'enrobé, trois taux de recyclage sont adoptés : 40, 55 et 70 % ; les formules correspondantes sont identifiées par « 40R », « 55R » et « 70R » respectivement et comparées à une formule de contrôle constituée de granulats et de bitume « neufs » (formule « 0R »). La courbe granulométrique, la teneur en liant totale et la consistance du liant recomposé ont été visées indépendantes du taux de recyclage pour chaque famille d'enrobés.

Un additif du type régénérant (Regefalt[®]), dont le rôle est de reproduire les caractéristiques des bitumes conventionnels routiers, est incorporé dans les mélanges ci-dessus. Les trois enrobés conduisent aux formules « 40R' », « 55R' » et « 70R' » afin d'évaluer l'effet du régénérant sur les performances de l'enrobé recyclé et sur les propriétés physico-chimiques du liant recomposé.

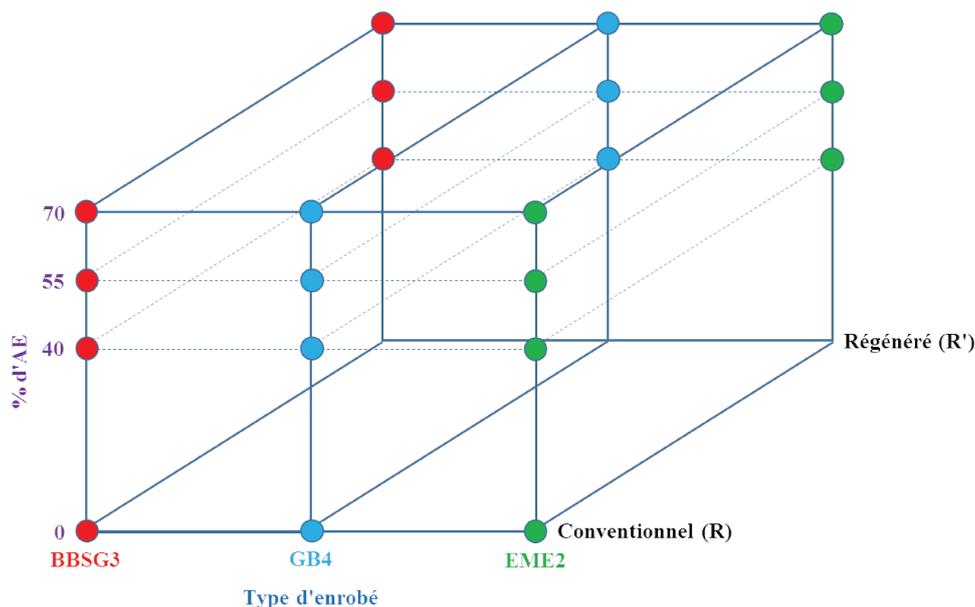


Figure II-1. Plan d'expériences adopté.

Les propriétés de chaque mélange sont évaluées, conformément à la méthode française de formulation des enrobés, à l'aide des différents essais de niveau N0 à N4 [31]. Cette caractérisation a été menée principalement dans les laboratoires des entreprises partenaires : Le Foll TP (Corneville-sur-Risle) et Braja Vésigné (Mondragon).

L'évaluation des performances à basse température par les essais de traction uniaxiale (UTST) et de retrait thermique empêché (TSRST) a été effectuée au laboratoire GCGM de l'INSA Rennes.

Une caractérisation physico-chimique des liants a aussi été effectuée par des essais de pénétrabilité et TBA, et par des essais d'analyse calorimétrique différentielle (DSC), infrarouge FTIR et fractions SARA. La DSC et la FTIR ont été réalisées par le laboratoire LEICAL de l'université de Valladolid (Espagne), tandis que le fractionnement SARA a été effectué au laboratoire GEOS (Belgique).

Le Tableau II-1 présente les essais réalisés sur l'ensemble des formules (liants & enrobés) avec un nombre de répétitions sur chaque test conforme aux spécifications en vigueur. En raison des variations constatées sur le liant vieilli des AE du BBSG3, des formules complémentaires (0CR, 55CR et 55 CR') ont dû être ajoutées au plan d'expérience initial (21 formules).

Tableau II-1. Essais réalisés sur les liants et sur les enrobés.

Essais		Niveau	BBSG3 ⁽¹⁾						GB4 & EME2			
			0R	55CR	0CR	40R	55R	70R	0R	40R	55R	70R
				55CR'		40R'	55R'	70R'		40R'	55R'	70R'
Sur liants	Pénétrabilité et TBA (>enrobage)	-	X	X	-	X					X	
	Calorimétrie différentielle (DSC)											
	Infrarouge (FTIR)	-	X	X	-	X					X	
	Fractions SARA											
Sur enrobés	Granulométrie	N0	X	-	-	X	X				X	
	Teneur en liant											
	Compactibilité à la PCG	N1	X	-	-	X	X				X	
	Sensibilité à l'eau (Duriez)											
	Résistance à l'orniérage	N2	X	-	-	X	X				X	
	Module complexe (2PB-TR)	N3		X	-	X	X				X	
	Résistance à la fatigue (2PB-TR)	N4		X	-	-	X				X	
Traction uniaxiale (UTST)												
Retrait empêché (TSRST)	NC		X	X	-	X					X	
55CR & 55CR' : formules complémentaires pour comparaison avec la formule témoin 0R (1) 0CR : formule témoin complémentaire de référence pour mélanges avec AE-RM (40R-R', 55R-R', 70R-R')												

1. FORMULATION DES ENROBÉS RECYCLÉS

1.1. CARACTÉRISATION DES COMPOSANTS

La conception des mélanges exige la connaissance des propriétés de chaque composant [31], plus particulièrement de celles des AE [88] [133]. Bien qu'une caractérisation préalable ait été effectuée sur les granulats neufs et sur les AE, consignée sur la « fiche technique du produit » (FTP), nous avons vérifié systématiquement les propriétés les plus importantes de chaque composant. Dans le cas des AE, les caractéristiques du liant n'ont pas pu être vérifiées

avant le début des essais, les valeurs de pénétrabilité et TBA ont été prises directement de la FTP.

1.1.1. Granulats neufs

Les différentes coupures granulaires destinées à la fabrication de chaque enrobé ont été caractérisées en matière de granulométrie et de masse volumique. Les résultats de cette vérification sont présentés dans l'annexe A et dans le Tableau II-2.

Le filler d'apport, commun pour toutes les formules, provient de la carrière Gy (Fillocarb OMYA).

Tableau II-2. Caractéristiques des granulats neufs destinés aux enrobés.

Propriétés	Fillocarb	BBSG3 (RM)		GB4 (LF)				EME2 (BV)			
	OMYA	0/4	4/10	0/4	4/6	6/10	10/14	0/4	4/6	6/10	10/14
MB (g/kg) ⁽¹⁾	1,5	0,6	-	0,5	-	-	-	0,4	-	-	-
FI ⁽²⁾	-	-	11,5	-	14,6	10,1	8,6	-	12,9	7,6	9,4
MV (kg/m ³) ⁽³⁾	2670	2613	2630	2647	2633	2611	2621	2670	2642	2656	2665
Carrière (département)	Gy (70)	Moissey (39)		Vignats (14)				Maroncelli (84)			
Nature	Calcaire	Porphyre		Grès quartzite				Silico-calcaire			
⁽¹⁾ Présence des argiles et matière organique, essai au bleu de méthylène ⁽²⁾ Coefficient d'aplatissement (forme des gravillons) ⁽³⁾ Masse volumique											

Les caractéristiques intrinsèques des gravillons, telles que la dureté, la résistance à l'usure par frottement et la résistance à la fragmentation n'ont pas été vérifiées ; elles sont conformes aux spécifications d'après la FTP [31] [123].

1.1.2. Bitumes d'apport

Les bitumes d'apport sont d'abord caractérisés par leur pénétrabilité à l'aiguille et par leur point de ramollissement bille et anneau (TBA), nécessaires pour la recombinaison des formules [31] [122] [123]. La viscosité dynamique à 135, 150 et 165 °C est aussi vérifiée [12]. Cette caractérisation est complétée, à la fin de la campagne expérimentale, par l'identification de la température de transition vitreuse (T_g), des fractions cristallisées (FC), de l'indice carbonyle (I_{CO}) et des fractions SARA.

Les résultats (Tableau II-3) confirment la dépendance de certaines propriétés du liant avec son origine [12] [18] : par exemple, les différences de comportement du bitume 35/50 Exxon Mobil avec le 35/50 Total (Feyzin) malgré leur similitude en matière de consistance.

Par des raisons pratiques, les bitumes sont conditionnés dans des pots métalliques d'un litre à couvercle fermé ce qui permet de limiter à deux fois leur mise en température avant utilisation pour l'enrobage, en évitant un vieillissement excessif.

Tableau II-3. Caractérisation des bitumes *d'apport*.

Bitume d'apport	Roger Martin	Le Foll TP				Braja Vésigné		
	35/50	20/30 ⁽²⁾	35/50	50/70	70/100	10/20 ⁽¹⁾	20/30	35/50
Pénétrabilité (1/10 mm)	40	26	45	60	72	16	26	39
TBA (°C)	52,6	61,1	52,6	49,4	48,4	67,2	61,2	53,2
Viscosité à 135 °C (Pa*s)	0,61	1,40	0,64	0,55	0,50	1,49	0,98	0,63
Viscosité à 150 °C (Pa*s)	0,41	0,65	0,44	0,39	0,35	0,88	0,62	0,43
Viscosité à 165 °C (Pa*s)	0,29	0,40	0,30	0,27	0,26	0,53	0,40	0,30
Saturés (%)	4,8	10,5	5,4	5,5	5,4	4,7	7,7	6,5
Aromatiques (%)	66,5	53,7	61,5	56,4	57,0	58,2	59,9	60,9
Résines (%)	19,1	20,1	20,8	27,3	27,4	19,7	13,8	19,9
Asphaltènes (%)	9,7	15,7	12,2	10,8	10,3	17,4	18,6	12,8
Indice colloïdal (IC)	0,17	0,36	0,21	0,19	0,19	0,28	0,36	0,24
Indice carbonyle (I _{co})	0	0	0	0	0	0	0	0
Tg (°C)	-19,3	-31,5	-19,6	-21,9	-23,0	-16,9	-28,5	-25,5
FC (%)	2,8	5,7	2,4	2,7	2,8	3,0	4,8	4,2
Producteur	Exxon Mobil	BP	Total			Total		
Raffinerie	-	Lavera	Normandie			Normandie	Feyzin	

⁽¹⁾ Bitume commandé pour cette étude (EME2 témoin), utilisé aussi pour le BBSG3

⁽²⁾ Bitume disponible sur place, mais non utilisé en centrale (GB4 témoin)

1.1.3. Agrégats d'enrobés

En raison de l'hétérogénéité des AE en matière de granulométrie et de teneur en liant [80] [124], une caractérisation rigoureuse a dû être effectuée avant le début de la campagne expérimentale [115] [129] [130] : entre 12 et 20 prélèvements, homogénéisés par quartage.

Les extractions du liant sont réalisées à l'aide de l'Asphalt Analysator (Figure II-2), selon les exigences de la NF EN 12697-1 [185].



Figure II-2. Vérification de la granulométrie et la teneur en liant des AE.

La quantité de liant est déterminée par différence massique entre la prise d'essai et la matière minérale récupérée. Sur cette dernière, une analyse granulométrique est effectuée (Figure II-3 et annexe A) où un pourcentage très élevé de fines est observé dans chaque AE [5] [8] [131]. Le fractionnement granulométrique n'a pas été envisagé afin de garantir un maximum de liant récupérable, contenu principalement dans la fraction la plus fine.

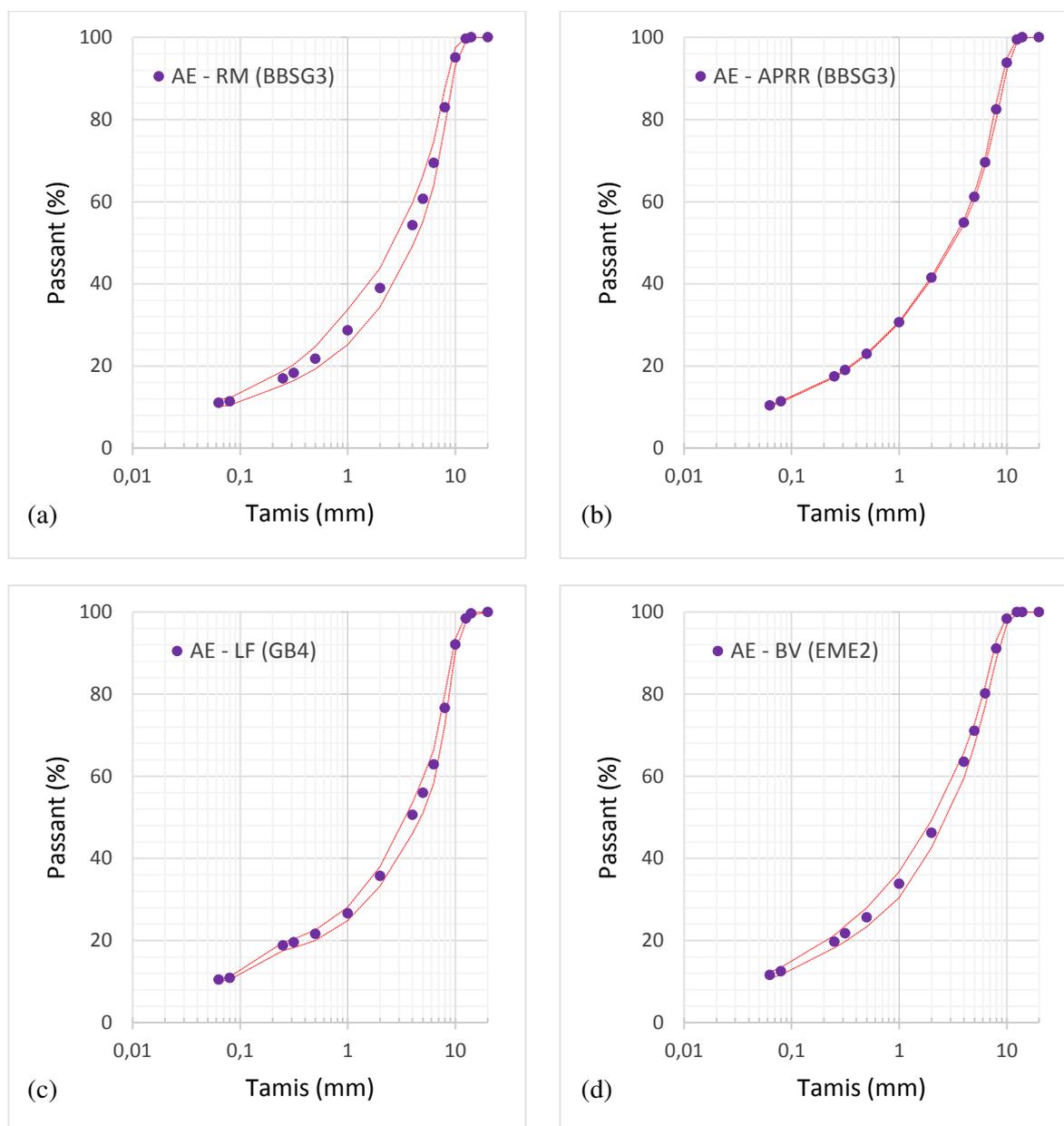


Figure II-3. Fuseaux granulométriques des agrégats d'enrobés : (a) AE-RM ; (b) AE-APRR ; (c) AE-LF ; (d) AE-BV.

Les propriétés physico-chimiques du liant des AE n'ont pas pu être vérifiées avant le début des essais (indisponibilité du matériel pour la séparation du liant et du solvant). Les valeurs de pénétrabilité et de TBA ont été prises dans la FTP de chaque AE.

On notera que la récupération du liant pour les analyses physico-chimiques, effectuée à la fin des travaux de recherche, a montré des différences de la consistance des liants des stocks des AE entre les FTP de 2013 et la vérification de 2016 (Tableau II-4).

Ces variations du liant des AE se traduisent par une diminution de la pénétrabilité et par une augmentation de la TBA, ce qui peut provenir d'un vieillissement des liants par exposition aux éléments atmosphériques dans le stock ou à des variations des fournitures du bitume au cours du chantier.

En particulier, l'écart très significatif constaté sur l'AE-RM laisse un doute sur la FTP du matériau livré, malgré la conformité de la teneur en liant et de la courbe granulométrique. Pour pallier à cet écart, un nouvel AE (APRR) a été intégré à l'étude, avec une consistance du liant vieilli plus proche de celle initialement visée pour les formules de BBSG3.

Tableau II-4. Caractéristiques des AE.

Propriété \ AE		AE - RM (BBSG3)	AE - APRR (BBSG3)	AE - LF (GB4)	AE - BV (EME2)
		10 AE 0/10	14 AE 0/10	12,5 AE 0/10	12,5 AE 0/10
FTP	Teneur en liant (%)	5,60	5,30	5,09	4,91
	Pénétrabilité (1/10 mm)	47	19	16	11
	TBA (°C)	-	76,5	65,5	73,0
Vérification	Teneur en liant (%)	5,50	5,61	5,11	5,26
	Pénétrabilité (1/10 mm)	9	18	10	6
	TBA (°C)	76,9	72,4	73,2	90,3
Nature minéralogique		Porphyre	Porphyre	Eruptif - Quartzite	Silico - Calcaire
Origine		Diffuseur Dôle	APRR	A28 - Section Bernay	RD 941 - Grillon
Masse volumique (kg/m ³)		2433	2358	2472	2483
Catégorie NF EN 13108-8		TL ₁ - B ₁ - G ₁ - R _{NS}	TL ₁ - B ₁ - G ₁ - R _{NS}	TL ₁ - B ₁ - G ₁ - R ₁	TL ₁ - B ₂ /B ₁ - G ₁ - R _{NS}
Liant extrait	Saturés (%)	5,2	5,9	3,9	3,9
	Aromatiques (%)	42,1	44,8	45,1	36,5
	Résines (%)	31,3	31,2	31,6	31,4
	Asphaltènes (%)	21,4	18,1	19,4	28,2
	Indice d'instabilité colloïdale (IC)	0,36	0,32	0,30	0,47
	Indice carbonyle (I _{CO})	0,13	0,18	0,16	0,18
	Tg (°C)	-16,7	-23,2	-13,2	-7,8
FC (%)	2,1	2,2	1,8	1,6	

Comparés aux bitumes d'apport, les AE ont un taux d'asphaltènes plus élevé et une quantité d'aromatiques et de FC plus faible (Figure II-4). La relation décroissante qui apparaît entre T_g et taux de FC, a déjà été observée dans la littérature [23] [24] [25] [26] [27].

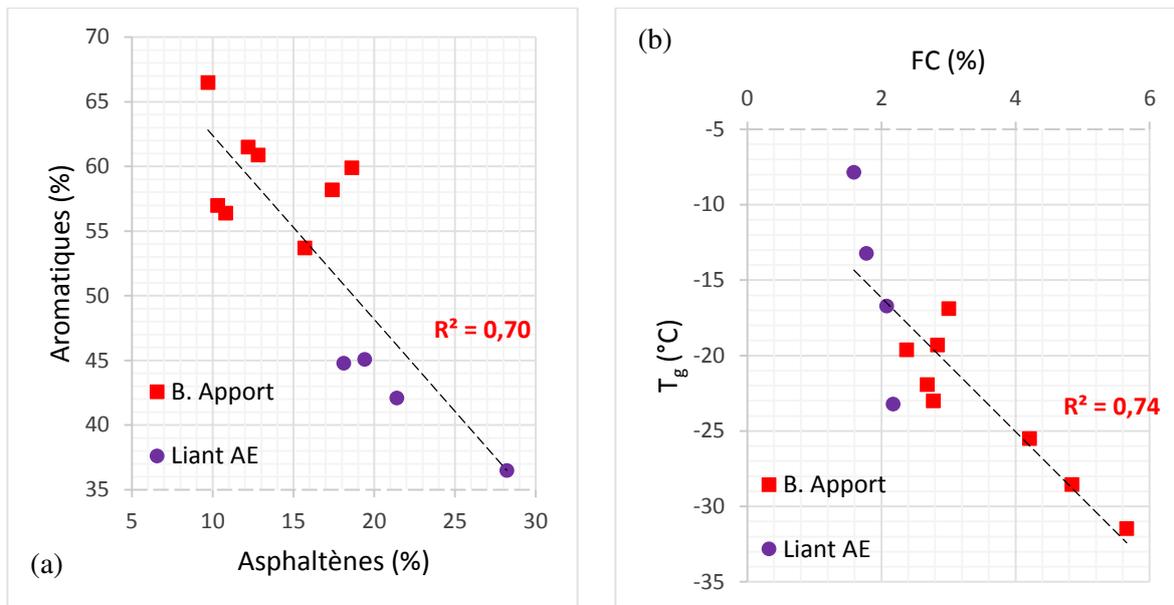


Figure II-4. Comparaison des propriétés entre bitumes d'apport et liants des AE : (a) asphaltènes vs aromatiques ; (b) FC vs T_g .

1.1.4. Régénérateur

Pour mémoire, l'incorporation d'un régénérateur dans l'enrobé recyclé vise à compenser ou à limiter les possibles dégradations liées au vieillissement [86] [87], tout en gardant son effet à long terme [140] [141] [144] [146].

Le régénérateur utilisé dans cette recherche est le Regefalt[®] ; destiné au recyclage à chaud ($160\text{ °C} < T < 190\text{ °C}$), il vise à réduire la quantité des composants oxydés présents dans le liant des AE, à faciliter la diffusion avec le bitume d'apport et par conséquent à améliorer les performances du mélange [88] [148].

La quantité de régénérateur Q (%) à ajouter par rapport à la masse totale d'enrobé est proportionnelle au taux d'AE (T) et à sa teneur en liant (X) [186]:

$$Q = 36 T X \quad (\text{II-1})$$

Bien que l'additif Regefalt[®] se présente commercialement sous forme de granulés, il est conditionné sous forme de poudre pour la recherche et les études au laboratoire (Figure II-5).



Figure II-5. Régénérateur employé (Regefalt[®]).

1.2. MISE AU POINT ET FABRICATION DES MÉLANGES

1.2.1. Recomposition

La recomposition initiale pour chaque famille d'enrobé est établie conformément aux spécifications françaises [31] [32]. La courbe granulométrique et la teneur en liant sont visées constantes pour les différents taux d'AE (Figure II-6). La consistance du liant recomposé, visée aussi indépendante du taux de recyclage, est calculée à l'aide des lois de mélange sur la pénétrabilité et la TBA (relations I-7 et I-9). La masse volumique réelle du mélange (MVR_E) est calculée à partir des masses volumiques des composants, en utilisant l'expression suivante [31] :

$$MVR_E = \frac{100}{\frac{\% G_1}{\rho_{g1}} + \frac{\% G_2}{\rho_{g2}} + \dots + \frac{\% G_n}{\rho_{gn}} + \frac{tl_{int}}{\rho_b}} \quad (\text{II-2})$$

où $\% G_i$ sont les pourcentages des fractions granulaires et ρ_{gi} leurs masses volumiques respectives, tandis que ρ_b représente la masse volumique du liant.

La mise au point des formules se fait à partir de l'essai à la PCG, en commençant par le mélange le plus contraignant (70 % d'AE). La teneur en liant est définie en tenant compte des valeurs minimales recommandées par les spécifications [32], avec un module de richesse qui garantisse un enrobage correct et durable des granulats [31].

Les caractéristiques de recomposition pour chaque enrobé sont présentées dans les Tableau II-5, Tableau II-6, Tableau II-7 et la Figure II-6. Le pourcentage de fines (tamis 0,063 mm) des formules sont conformes aux spécifications européennes [32] : 8,7 % pour le BBSG3 et 8,4 % pour la GB4 et l'EME2.

Le choix du bitume d'apport visait une valeur de consistance du liant recomposé similaire pour l'ensemble des formules d'une même famille, mais l'évolution du liant des AE depuis leur stockage a conduit à des variations de pénétrabilité et de TBA entre les différents taux de recyclage. Les valeurs corrigées en utilisant les lois de mélanges apparaissent sur les tableaux.

Tableau II-5. Caractéristiques des formules recomposées de BBSG3 (RM).

Paramètres	Formules									
	0R	0CR	40R	40R'	55R	55R'	55CR	55CR'	70R	70R'
Taux d'AE (%)	0		40 ⁽¹⁾		55 ⁽¹⁾		55 ⁽²⁾		70 ⁽¹⁾	
Bitume 10/20 (BV) (%)	-	5,60	-							
Bitume 35/50 (RM) (%)	5,60	-	3,40		2,57		-	-	1,75	
Bitume 70/100 (LF) (%)	-						2,52		-	
REGEFALT (‰)	-			0,8	-	1,1	-	1,1	-	1,4
MVR_E (kg/m ³)	2417		2422		2424		2385		2426	
tl_{int} (%)	5,60									
M. richesse (K)	3,4									
Pén _{mix} (corrigée) (mm/10)	40	16	22		18		34		14	
T _{BA mix} (corrigée) (°C)	52,6	67,2	62,2		65,8		61,6		69,3	

⁽¹⁾ Ces formules comportent de l'AE-RM (pénétrabilité de 9 dmm après vérification) à comparer avec 0CR

⁽²⁾ Formules avec de l'AE-APRR qui vise à corriger l'écart de pénétrabilité par rapport à la formule témoin (0R)

Dans le cas du BBSG3 (Tableau II-5), suite aux écarts déjà signalés sur la pénétrabilité des AE-RM, de nouvelles formules à 55 % de recyclage avec l'AE-APRR (55CR et 55CR') et une nouvelle formule de contrôle (OCR) ont été ajoutées.

Les écarts de consistance (pénétrabilité, TBA) des mélanges de GB4 (Tableau II-6) et d'EME2 (Tableau II-7) n'ont pas donné lieu à l'élaboration de formules modifiées, estimant que les consistances sont suffisamment proches et compte tenu de leur évolution attendue au cours de la fabrication des mélanges (mise en température et enrobage).

Tableau II-6. Caractéristiques des formules recomposées de GB4 (LF).

Paramètres	Formules						
	0R	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Taux d'AE (%)	0	40		55		70	
Bitume 20/30 (LF) (%)	4,90	-					
Bitume 35/50 (LF) (%)	-	2,85	-				
Bitume 50/70 (LF) (%)	-		2,09		-		
Bitume 70/100 (LF) (%)	-					1,32	
REGEFALT (‰)	-	0,7	-	1,0	-	1,3	
MVR _E (kg/m ³)	2449	2461	2465		2470		
tl _{int} (%)	4,90						
M. richesse (K)	3,0						
Pén _{mix} (corrigée) (mm/10)	26	24	21		17		
T _{BA mix} (corrigée) (°C)	61,1	61,2	63,1		66,5		

Tableau II-7. Caractéristiques des formules recomposées pour l'EME2 (BV).

Paramètres	Formules						
	0R	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Taux d'AE (%)	-	40	40	55	55	70	70
Bitume 10/20 (BV) (%)	5,45	-					
Bitume 20/30 (BV) (%)	-	3,35	2,56		-		
Bitume 35/50 (BV) (%)	-					1,77	
REGEFALT (‰)	-	0,8	-	1,0	-	1,3	
MVR _E (kg/m ³)	2443	2456	2462		2467		
tl _{int} (%)	5,45						
M. richesse (K)	3,4						
Pén _{mix} (corrigée) (mm/10)	16	15	12		11		
T _{BA mix} (corrigée) (°C)	67,2	72,4	76,6		78,2		

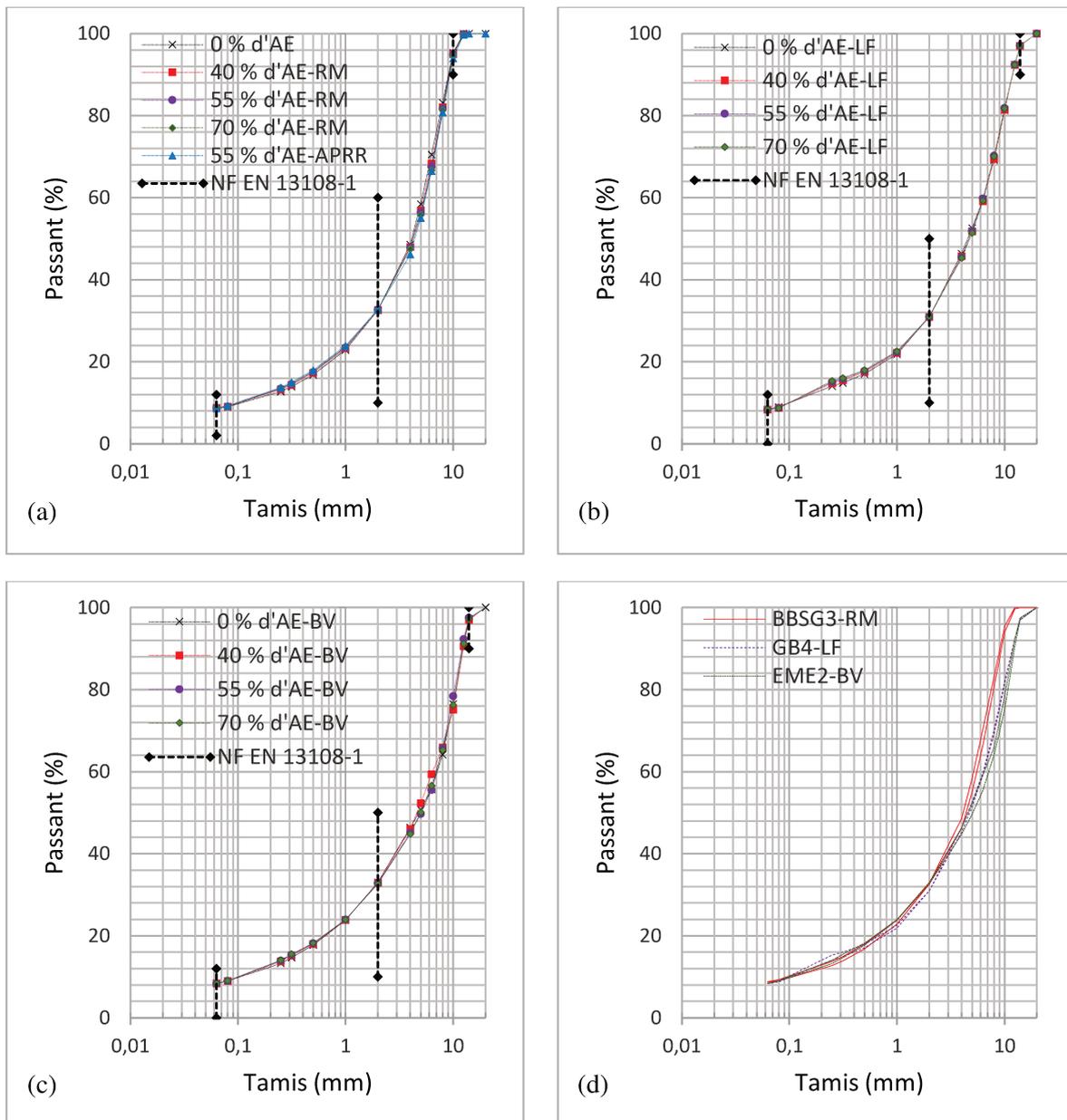


Figure II-6. Recomposition *granulométrique des différentes familles d'enrobé* : (a) BBSG3, (b) GB4, (c) EME2 et (d) courbes moyennes des 3 familles.

1.2.2. Paramètres de fabrication

La méthode de fabrication des mélanges adoptée est indépendante du taux d'AE et conduit au chauffage direct de ces derniers à la température de fabrication [157]. En centrale d'enrobage les AE sont chauffés à une température maximale de 130 °C, inférieure à la température de fabrication (Figure II-7) mais l'énergie mécanique de malaxage est supposée supérieure à celle des malaxeurs de laboratoire.

Selon la norme NF EN 12697-35 [157], la température de fabrication est fonction de la pénétrabilité du liant recomposé. Dans notre cas, malgré les différences de consistance entre formules d'une même famille, elle est la même pour tous les taux d'AE étant contrôlée systématiquement au cours de chaque enrobage. À partir des valeurs de pénétrabilité ciblées du liant recomposé, les températures de référence adoptées pour chaque famille d'enrobé sont : 165 °C pour le BBSG3, 180 °C pour la GB4 et 185 °C pour l'EME2.

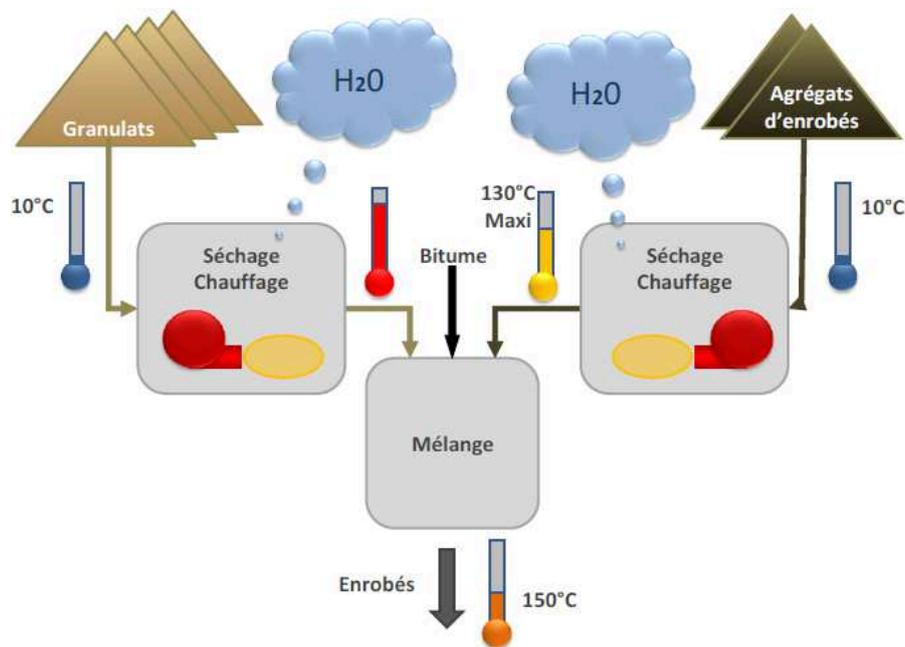


Figure II-7. Principe de chauffe directe des AE en centrale d'enrobage [112].

a. Mise en température

La température de chauffe des composants est limitée par plusieurs contraintes : disponibilité et puissance des étuves, conditionnement indépendant du taux d'AE, choc thermique minimal entre le bitume d'apport et les granulats (risque de vieillissement prématuré), taux de remobilisation du liant des AE, homogénéité du liant recomposé.

Le bitume d'apport est chauffé à sa température de référence [157] pendant 3h (Figure II-8) pour atteindre une viscosité proche de 0,2 Pa.s, communément admise pour assurer un bon enrobage des granulats [7] [16].

Pour les granulats neufs et les AE deux scénarios sont possibles (Figure II-9). Le premier (Figure II-9a) consiste à surchauffer les granulats neufs (jusqu'à 230 °C) afin qu'ils transfèrent de la chaleur aux AE et de limiter la température de chauffe de ceux-ci (à 110 °C). Dans le deuxième cas (Figure II-9b), granulats et AE sont chauffés à la température de fabrication, permettant d'abaisser la viscosité du liant vieilli et d'augmenter son taux de remobilisation [160]. Le vieillissement produit alors dans le liant des AE sera moins important que dans le bitume d'apport en contact avec des granulats surchauffés [41] [75] [83] [97] [127] [158]. Les températures de chauffe des granulats neufs pour chaque scénario sont calculées par [157]:

$$\theta_{\text{granulats}} = \frac{(100 \times \theta_{\text{référence}} - \%AE \times \theta_{AE})}{(100 - \%AE)} \quad \text{(II-3)}$$

La limitation de la température des étuves du laboratoire à 210 °C a posé des difficultés pour les mélanges à 55 et 70 % d'AE (Figure II-9a), aussi le premier scénario a-t-il été écarté.

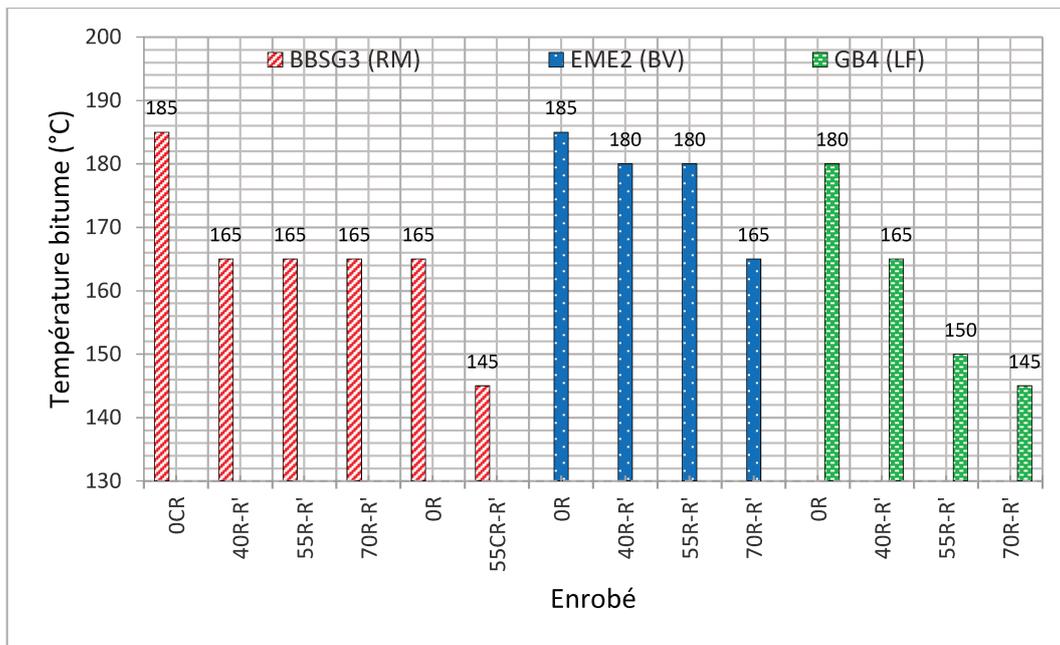


Figure II-8. Températures de chauffe des bitumes d'apport.

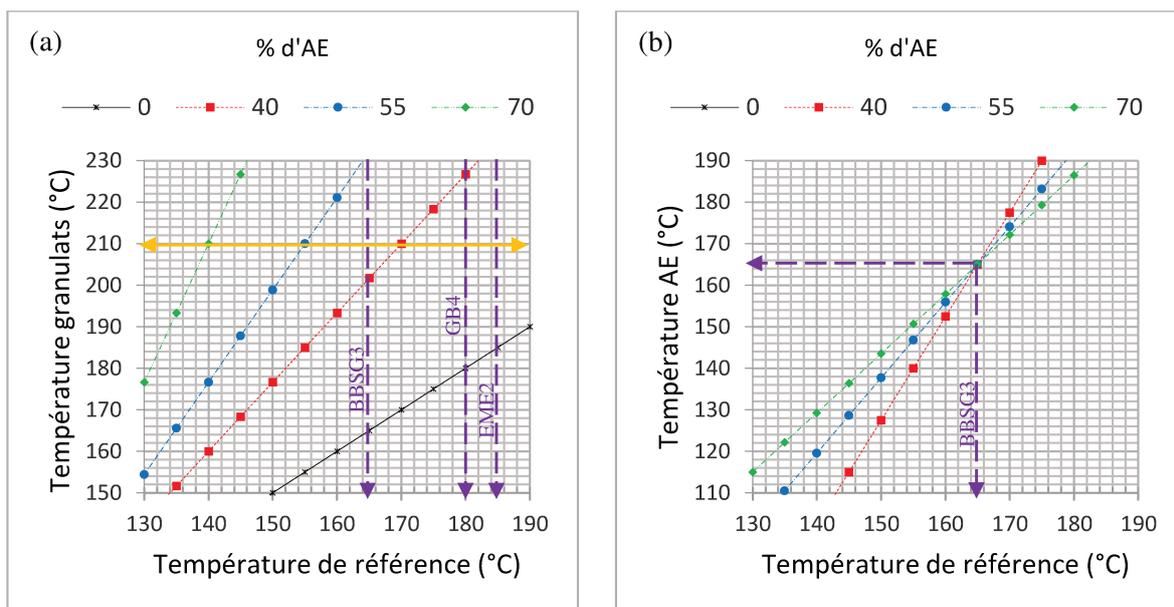


Figure II-9. Choix des températures de chauffe (a) des granulats neufs ($\theta_{AE} = 110 \text{ }^\circ\text{C}$) (b) des AE (BBSG3, $\theta_{\text{granulats}} = 165 \text{ }^\circ\text{C}$) [112].

Cette recherche visant à vérifier l'effet du taux d'AE et du régénérant sur les performances des enrobés recyclés, afin de bloquer au maximum les autres paramètres, nous avons adopté pour chaque famille d'enrobés des conditions de mise en température des granulats neufs et des AE, identiques pour tous les taux de recyclage. En raison des chutes de température pendant l'incorporation des granulats neufs dans le malaxeur, la température de conditionnement de ceux-ci a été augmentée de $10 \text{ }^\circ\text{C}$ par rapport à celle de l'expression II-3.

La durée de conditionnement en étuve avant introduction dans le malaxeur, est d'au moins 18h pour les granulats neufs et d'au plus 3,5h pour les AE, ces derniers étant protégés pour éviter un vieillissement excessif par contact avec l'air chaud [157].

b. Malaxage

La fabrication des enrobés est réalisée à l'aide de deux malaxeurs thermostatés (Figure II-10) réglés à la température de référence, majorée de 15 °C pour pallier aux chutes éventuelles de température pendant l'introduction des composants. L'enrobage est réalisé conformément aux spécifications de la norme française NF EN 12697-35 [157] et selon la chronologie détaillée dans la Figure II-11.



Figure II-10. Malaxeurs utilisés : (a) INFRATEST (≤ 45 kg) et (b) VMI (≤ 90 kg).

Un contrôle de la température d'enrobage est systématiquement effectué après chaque malaxage, la moyenne des mesures est présentée sur la Figure II-12. Dans le malaxeur INFRATEST, une homogénéisation manuelle est nécessaire entre chaque malaxage.

Lors des essais de niveau N1 et N2, la reconstitution de chaque enrobé (granulométrie et teneur en liant) est vérifiée à la fin du malaxage (annexe B). Les écarts maximaux entre valeurs ciblées et mesurées doivent être conformes au Tableau II-8, sinon une nouvelle fabrication est faite. Ces contrôles nous ont permis de limiter les effets des variations de la reconstitution sur les performances mesurées lors de chaque essai.

Tableau II-8. Écarts maximaux autorisés pour la vérification de la reconstitution.

Recomposition	BBSG3	GB4	EME2
P. Tamis 0,063 mm	$8,7 \pm 0,8 \%$	$8,4 \pm 0,8 \%$	
P. Tamis 2 mm	$\pm 2 \%$		
P. Tamis 6,3 mm	$\pm 3 \%$		
P. Tamis D mm	$\pm 2 \%$		
Teneur en liant	$5,60 \pm 0,25 \%$	$4,90 \pm 0,25 \%$	$5,45 \pm 0,25 \%$

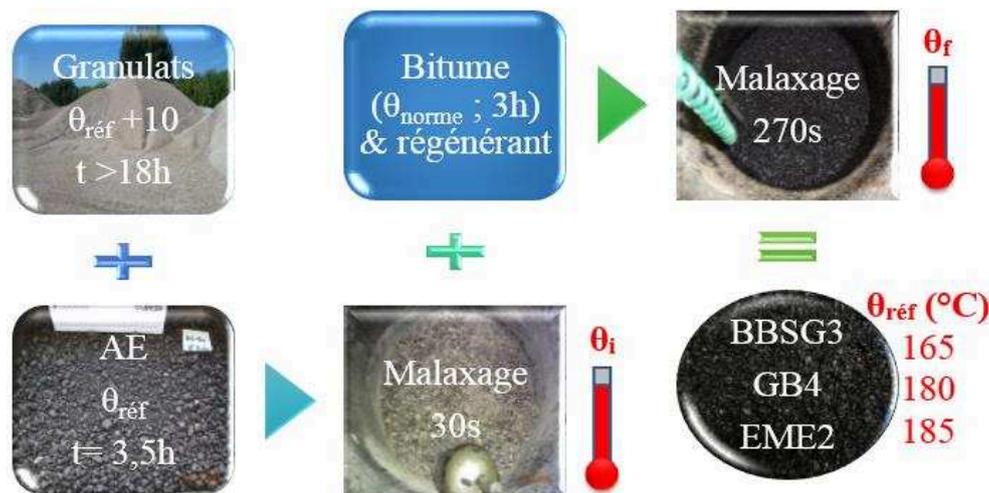


Figure II-11. Méthodologie de fabrication adoptée.

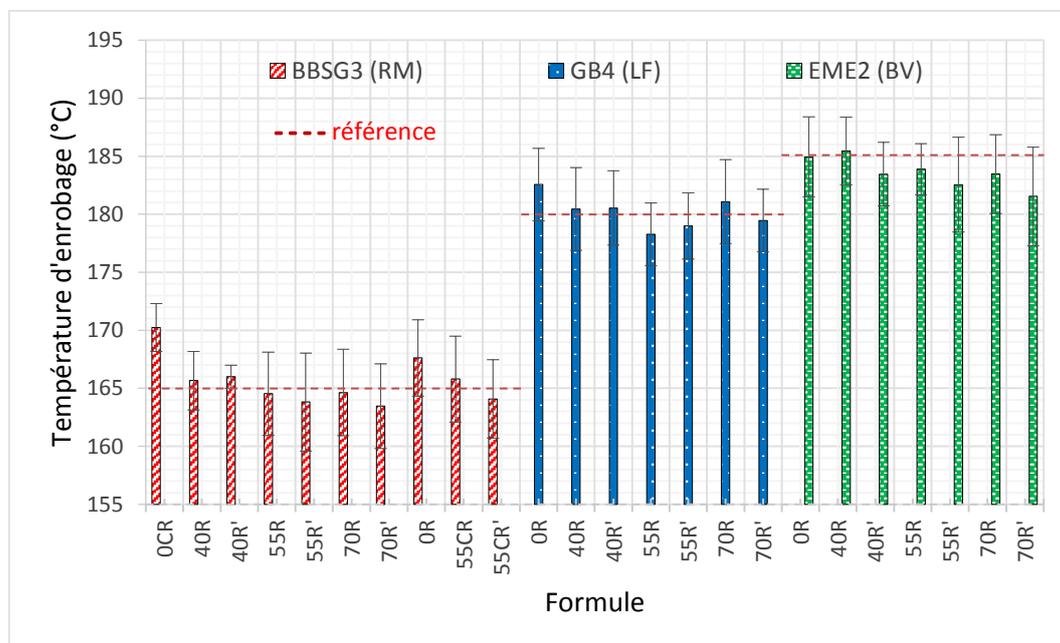


Figure II-12. Températures d'enrobage des différentes formules.

2. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES LIANTS

L'incorporation des AE et le procédé de fabrication donnent lieu au vieillissement du liant recomposé [103] [138] [148], lequel affecte les performances de l'enrobé recyclé [97] [98] [99] [100]. Afin de caractériser les effets ci-dessus, des analyses physico-chimiques (pénétrabilité, TBA, DSC, FTIR et SARA) des liants d'apport et du liant recomposé de chaque mélange ont été effectuées [88] [107] [149] [168] sur des prélèvements effectués en fin de fabrication et stockés dans des seaux métalliques fermés pour limiter un possible vieillissement ultérieur. Les résultats sont détaillés dans l'annexe A.

Afin d'étudier séparément l'évolution des propriétés du bitume d'apport et du liant des AE des échantillons complémentaires sont fabriqués selon le même procédé que pour les formules d'étude : un enrobé à 100 % d'AE et des formules témoin avec les différents bitumes d'apport.

2.1. RÉCUPÉRATION DU LIANT

2.1.1. Préparation des échantillons et séparation des particules solides

La prise d'essai (autour de 4000 g d'enrobé pour obtenir environ 200 g de liant) est effectuée sur l'enrobé foisonné et homogénéisé au préalable. L'échantillon est ensuite mis dans de récipients en plastique avec une quantité suffisante de gel de silice pour absorber l'humidité, puis le solvant (tétrachloroéthylène) est ajouté dans le récipient jusqu'à que l'enrobé soit totalement immergé. Le contenu est conservé à l'abri de la lumière pendant quelques heures pour assurer le désenrobage.

Afin de procéder à la séparation des particules solides, le récipient est placé dans un agitateur automatique pendant 30 minutes, puis le mélange est passé par une centrifugeuse équipée de deux tamis de rétention des particules. On soumet la solution recueillie à une seconde opération de centrifugation afin d'éliminer le matériau insoluble puis est mise à l'abri de la lumière pendant 30 minutes pour permettre la précipitation de fines restantes.

2.1.2. Distillation sous vide à l'évaporateur rotatif

Après assemblage et vérification de l'appareillage (Figure II-13), la distillation suit la norme NF EN 12697-3 [187] qui distingue deux phases : la première à 110 °C et 40 kPa permet le pompage de la solution bitumineuse, la deuxième à 160 °C et 2 kPa est destinée à séparer le solvant du liant.

Afin d'éviter un vieillissement du liant par le contact avec l'oxygène de l'air, de l'azote est utilisé pour rétablir la pression atmosphérique. À la fin de la distillation, le liant est récupéré directement dans des godets de pénétrabilité (30 g par récipient) et protégé avec un couvercle.

Pour éviter que le solvant (tétrachloroéthylène) engendre un durcissement significatif du liant, la durée de la distillation est limitée à 20h après avoir mélangé enrobé et solvant.

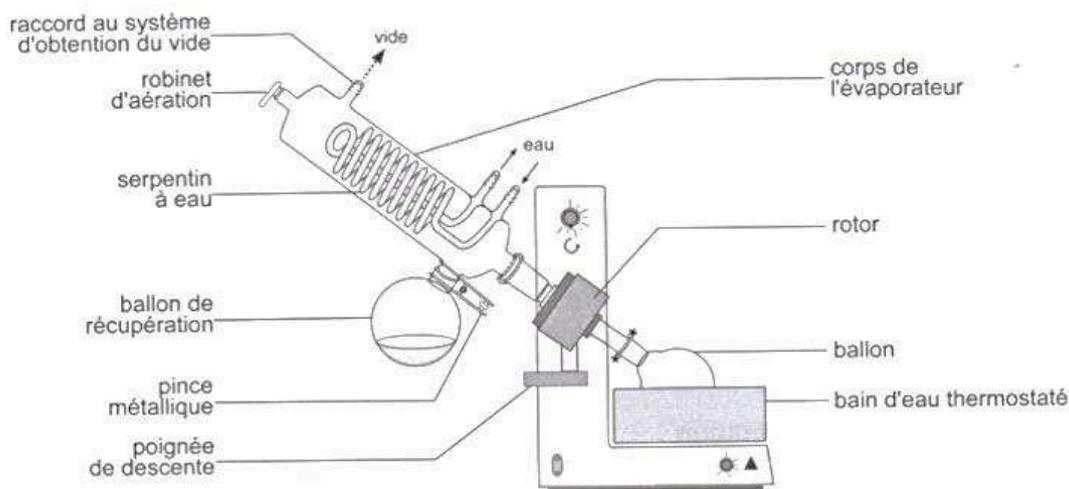


Figure II-13. Schéma d'un évaporateur rotatif type.

2.2. ANALYSE DES RÉSULTATS

2.2.1. Pénétrabilité et TBA

La Figure II-14 présente la variation de la pénétrabilité des liants recomposés, des AE et d'apport lors de l'enrobage pour les formules de BBSG3. On observe un durcissement systématique davantage marqué pour les liants de pénétrabilité élevée et partiellement compensé par l'ajout du régénérant (Figure II-14a). La corrélation entre pénétrabilités avant et après enrobage est plus nette pour l'ensemble bitume d'apport et liant des AE (Figure II-14b) que pour le liant recomposé compte tenu de l'effet du régénérant (Figure II-14a).

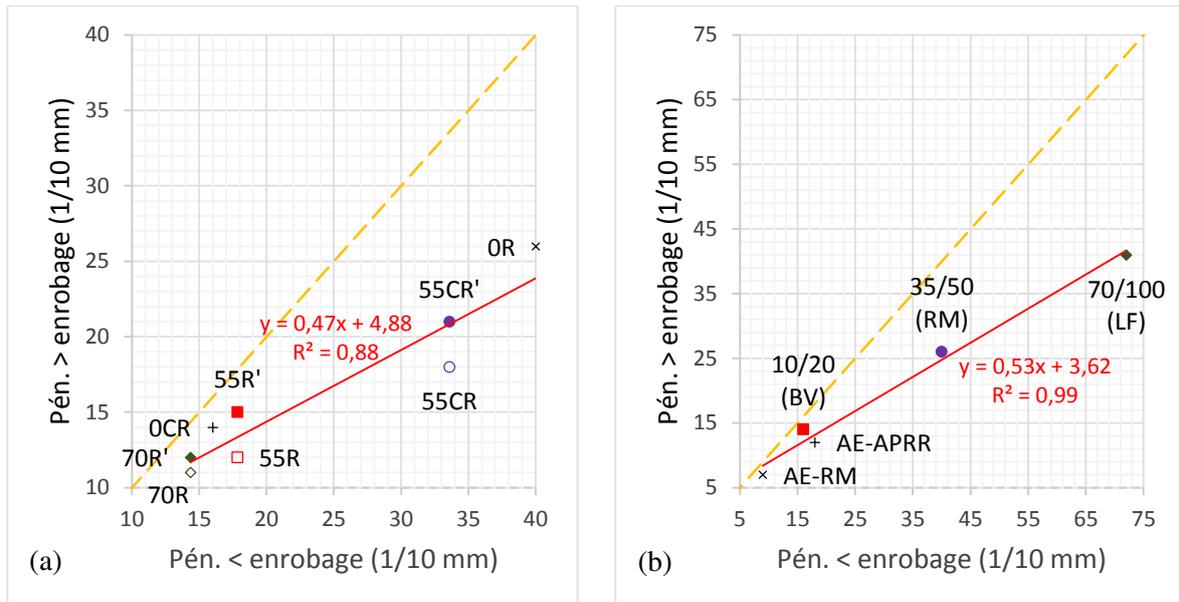


Figure II-14. Évolution de la pénétrabilité lors de l'enrobage (BBSG3) : (a) liant recomposé ; (b) bitume d'apport et liant des AE.

Compte tenu des différences entre les pénétrabilités des formules de BBSG3 (Figure II-14a), il y a lieu de rassembler celles-ci en deux groupes : (OR, 55CR, 55CR') d'une part et (OCR, 55R, 55R', 70R, 70R') d'autre part.

Les résultats des formules de GB4 (Figure II-15), montrent que la formule témoin (20/30 Lavera) est moins susceptible au vieillissement pendant l'enrobage (Figure II-15a), tandis que le liant recomposé semble influencé par la susceptibilité du bitume d'apport (Total, Normandie). Compte tenu de l'incertitude des mesures (± 2 mm/10), l'effet du régénérant est ici moins net que dans le cas précédent.

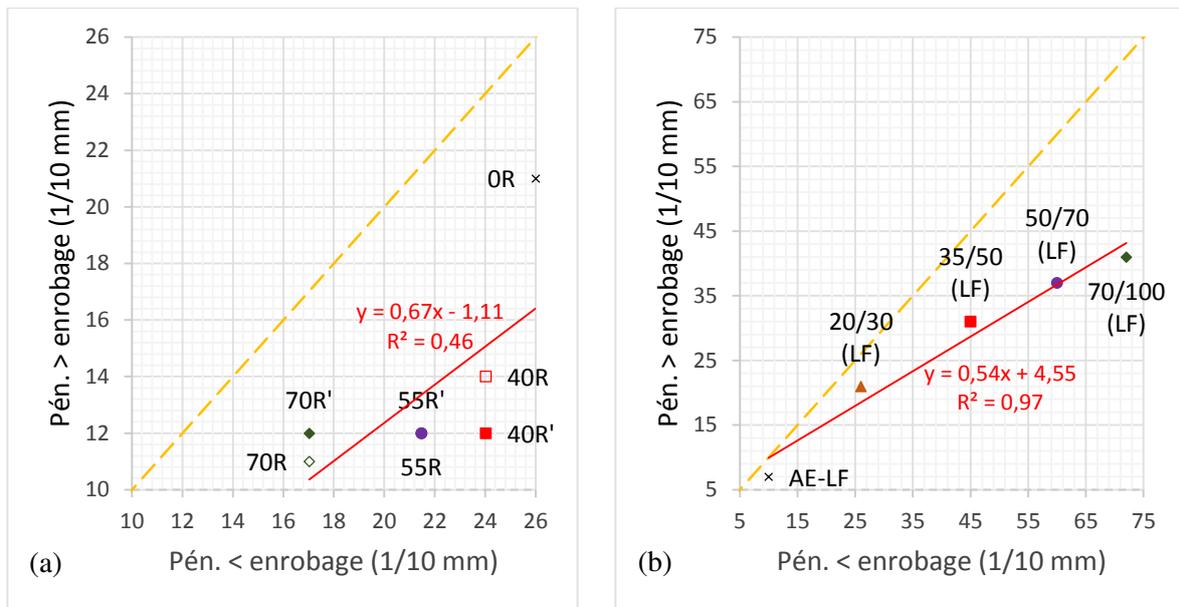


Figure II-15. Évolution de la pénétrabilité lors de l'enrobage (GB4) : (a) liant recomposé ; (b) bitume d'apport et liant de l'AE.

Les résultats obtenus sur les formules d'EME2 (Figure II-16) confirment la relation entre susceptibilité au vieillissement et pénétrabilité du liant. Comme pour le BBSG3, on constate que l'ajout du régénérant permet de compenser partiellement les effets de l'enrobage.

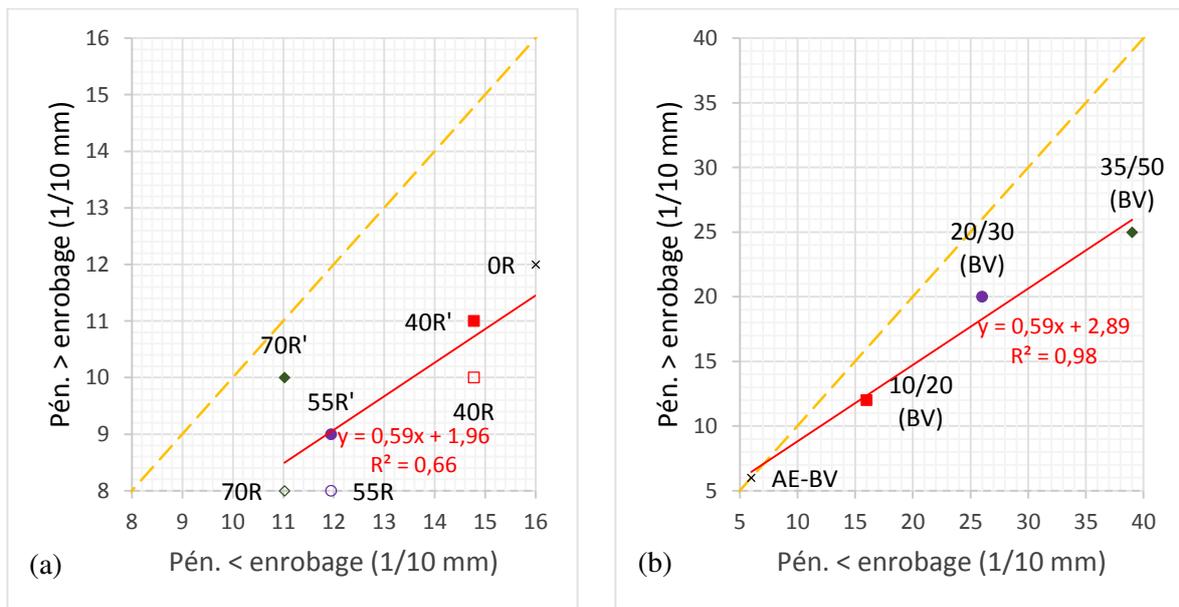


Figure II-16. Évolution de la pénétrabilité lors de l'enrobage (EME2) : (a) liant recomposé ; (b) bitume d'apport et liant de l'AE.

Pour toutes les familles de matériaux, les corrélations très nettes des effets de l'enrobage sur l'ensemble des bitumes d'apport et des liants des AE, permettent en général une bonne prédiction de la pénétrabilité du liant recomposé en appliquant la loi des mélanges (annexe A).

La TBA après enrobage est vérifiée sur le liant recomposé et sur celui des AE. Quelques essais (TBA estimée ≥ 80 °C) ont dû être réalisés avec du glycérol dont le point d'ébullition est supérieur à celui de l'eau distillée.

En cohérence avec les variations de pénétrabilité, on constate une augmentation systématique de la TBA lors de l'enrobage quelle que soit la famille de matériaux (Figure II-17). Sur les formules de BBSG3 (Figure II-17a), la variation de TBA ne semble pas dépendre du niveau initial de celle-ci, et en outre l'effet adoucissant du régénérant n'est pas aussi systématique qu'en termes de pénétrabilité.

La variation de la TBA des formules de GB4 (Figure II-17b) est assez significative (jusqu'à +15 °C), possiblement influencée par la susceptibilité du liant des AE-LF (Figure II-17d). Cette variation est du même ordre pour l'EME2 (Figure II-17c), malgré une moindre susceptibilité du liant des AE-BV. Les effets du régénérant sur la variation de TBA ne s'avèrent pas significatifs.

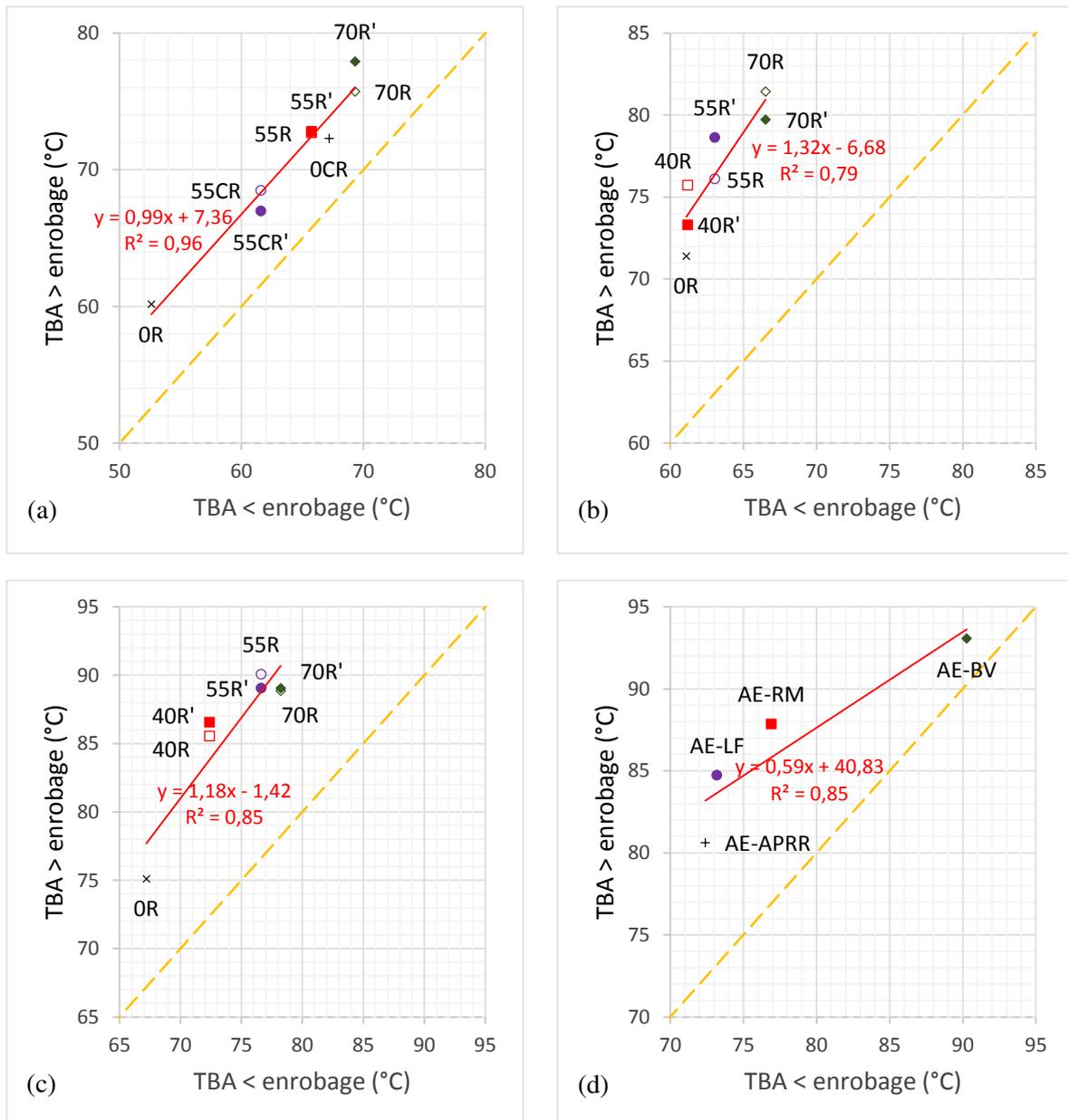


Figure II-17. Évolution de la TBA des liants : (a) BBSG3, (b) GB4, (c) EME2 et (d) AE.

2.2.2. Analyse calorimétrique différentielle (DSC)

La température de transition vitreuse (T_g) et les fractions cristallisables (FC) sont calculées à partir du thermogramme du liant obtenu lors de la DSC (Figure II-18) : la première par détermination mathématique du point d'inflexion dans la zone de transition vitreuse et les deuxièmes par intégration du signal endothermique au-dessus de la T_g et à l'aide de l'expression (I-2). Chaque analyse est réalisée sur une faible quantité du liant (14-22 mg), avec deux répétitions par échantillon. Dans le cas de la T_g , l'incertitude est de l'ordre de ± 1 °C (DSC 822e Mettler Toledo SAE avec capteur céramique FSR5).

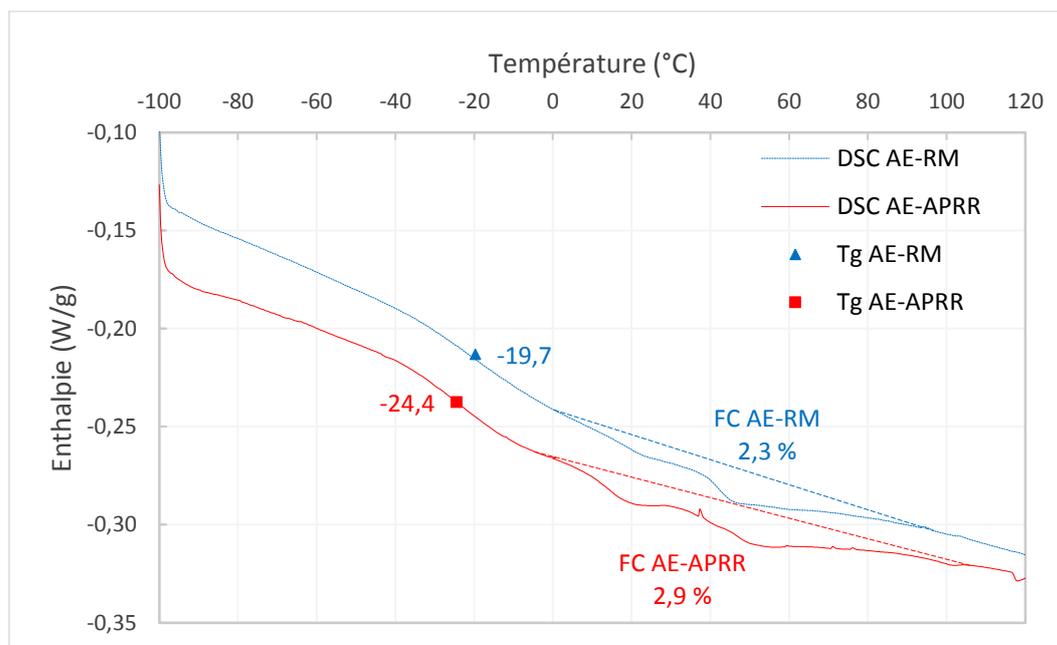


Figure II-18. Courbe DSC et paramètres-type des AE du BBSG3 après enrobage.

La T_g des AE du BBSG3 (Figure II-18) varie dans le même sens que la dureté du liant, alors que les FC augmentent avec celle-ci.

Les résultats obtenus sur l'ensemble des liants du BBSG3 (d'apport, AE et recomposé) sont présentés sur la Figure II-19. On constate que l'enrobage produit une diminution de la T_g et une augmentation des FC (sauf pour le liant OCR = 10/20). Bien que les effets sur les FC soient bien conformes au vieillissement, la T_g présente un comportement inattendu, déjà observé par d'autres auteurs [28] [29], attribué à l'interaction avec le filler du mélange.

Pour les formules avec le même bitume d'apport (55R, 55R', 70R, 70R') le taux d'AE augmente la T_g et diminue légèrement les FC après enrobage.

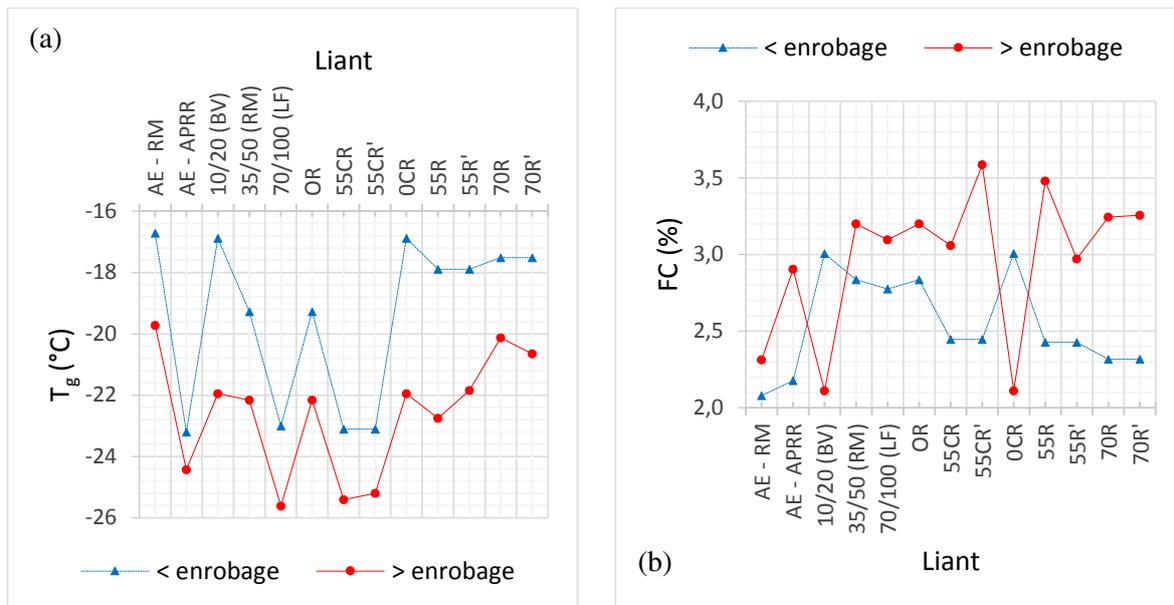


Figure II-19. Effet de l'enrobage sur (a) la T_g et (b) les FC des liants du BBSG3.

Dans le cas de la GB4 (Figure II-20) et de même que pour le BBSG3, suite à l'enrobage la T_g diminue et les FC augmentent, sauf 20/30 (OR) qui présente une valeur déjà élevée des fractions cristallisables. Les variations sur les liants recomposés sont légèrement compensées par le régénérant. Après enrobage, le taux d'AE entraîne une légère augmentation de la température de transition vitreuse. Le taux de recyclage n'a pas d'influence directe sur les FC.

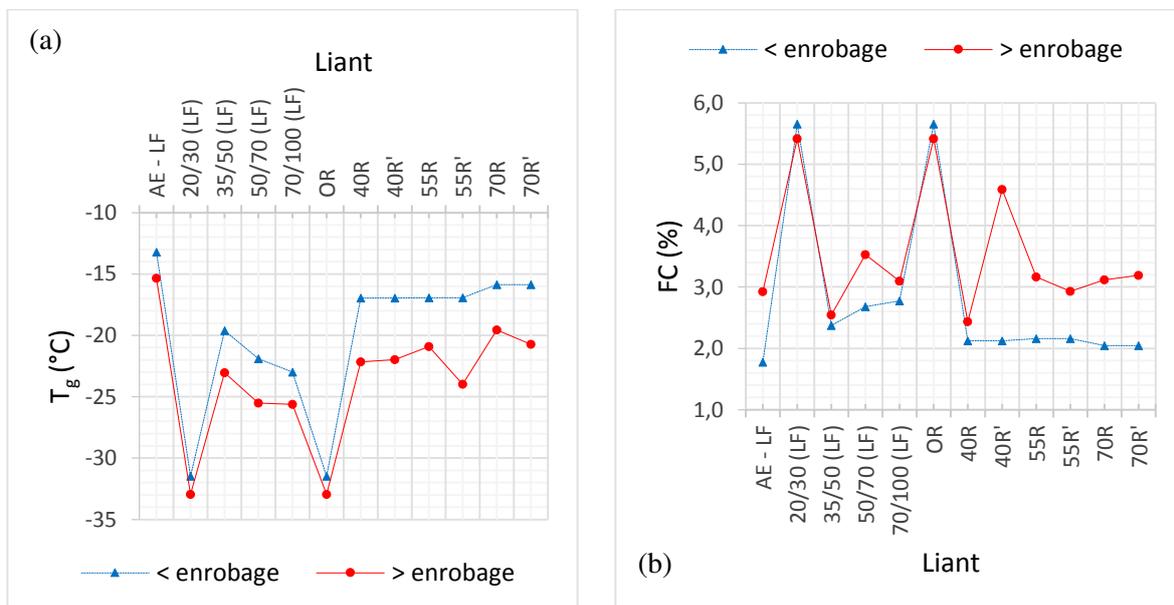


Figure II-20. Effet de l'enrobage sur (a) la T_g et (b) les FC des liants de la GB4.

Les résultats obtenus sur les liants de l'EME2 sont présentés dans la Figure II-21 : ils confirment les effets précédents de l'enrobage sur la T_g et sur les FC. En outre, on observe clairement une augmentation de la T_g et une diminution des FC avec le taux de recyclage, effets liés directement aux caractéristiques du liant de l'AE : T_g élevée et FC faibles.

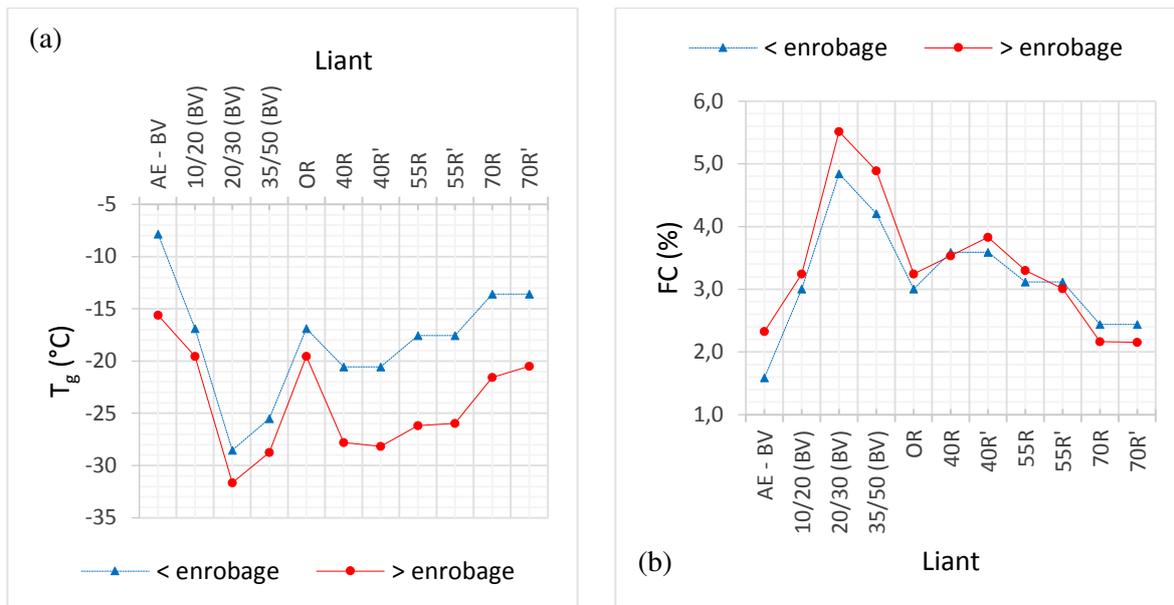


Figure II-21. *Effet de l'enrobage sur (a) la T_g et (b) les FC des liants de l'EME2.*

Pour l'ensemble des liants (BBSG3, GB4, EME2), des corrélations sont évaluées entre T_g et FC (Figure II-22a) et entre T_g et pénétrabilité (Figure II-22b). On constate qu'une amélioration en température de transition vitreuse s'accompagne d'une augmentation des FC, comme déjà mis en évidence par d'autres recherches [23] [24] [25] [26] [27]. La relation entre T_g et pénétrabilité du liant est moins marquée.

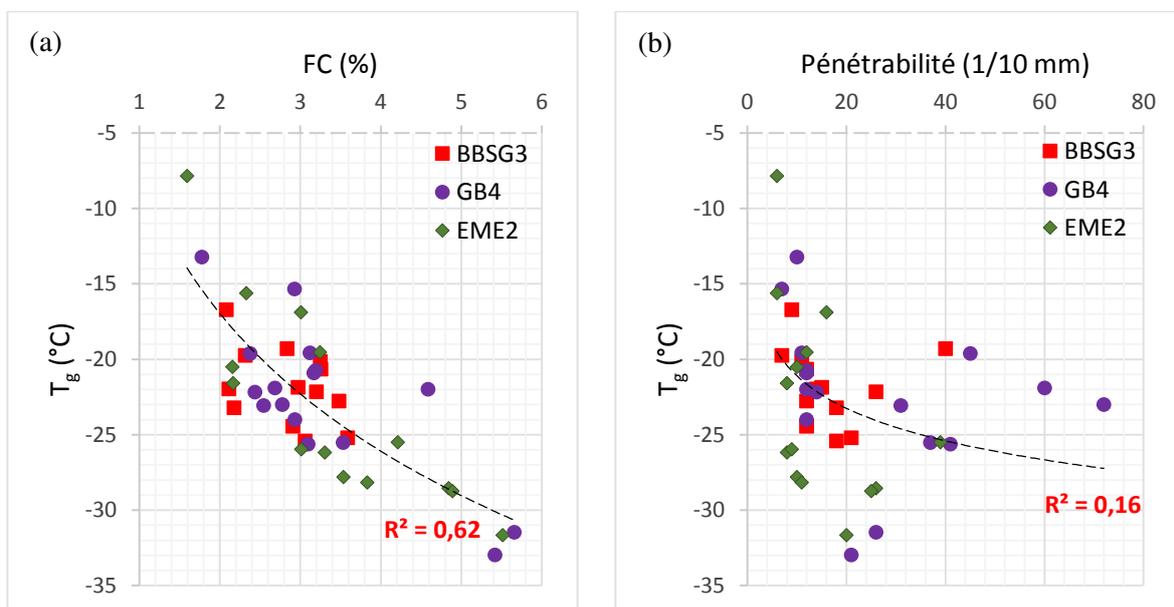


Figure II-22. Relation de la T_g avec (a) les FC et (b) la pénétrabilité du liant.

2.2.3. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)

La Figure II-23 présente, à titre d'exemple, le spectre infrarouge de quelques liants de l'EME2. L'ensemble des spectres sont rassemblés dans l'annexe A. Le niveau de vieillissement se traduit par une augmentation des groupes carbonyles ($C = O$) et sulfoxydes ($S = O$), ainsi que des liaisons insaturées ($C = C$), comme cela a déjà été observé [92] [100] [110]. Nous nous limitons ici à l'analyse des liaisons carbonyles, à l'aide de l'indice correspondant (I_{CO}).

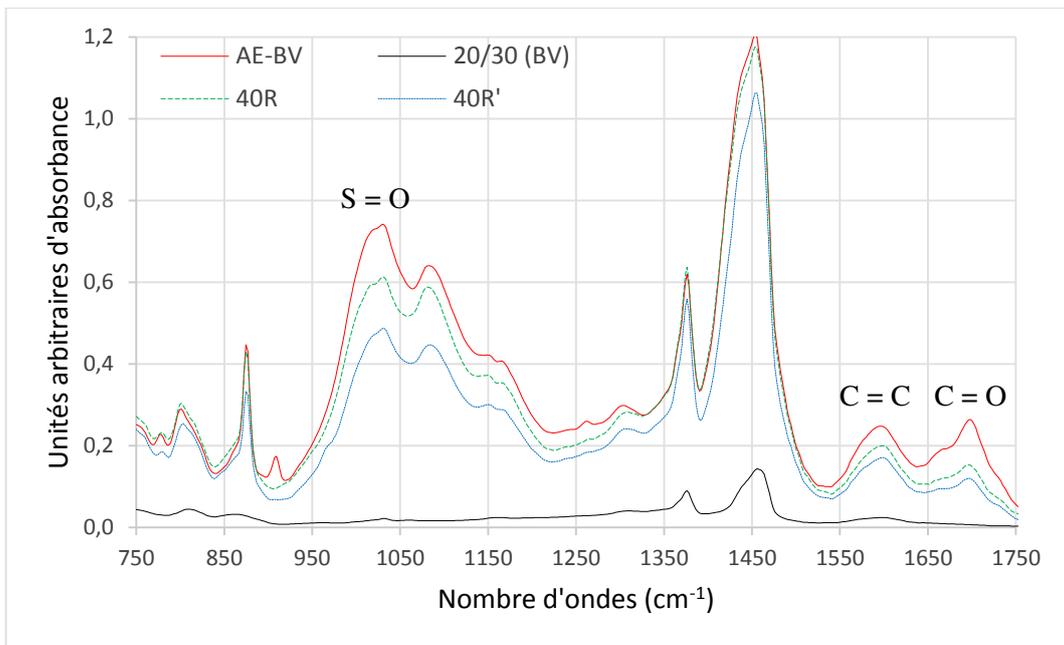


Figure II-23. Spectre infrarouge après enrobage (liants de l'EME2).

Dans le cas du liant du BBSG3 (Figure II-24) les I_{CO} des liants des AE et recomposés sont logiquement plus élevés que ceux des bitumes neufs, comme observé par ailleurs [8] [93] [108] [171]. Les effets de l'enrobage se traduisent par une augmentation de l' I_{CO} , sauf pour l'AE-APRR dont la valeur avant enrobage semble surestimée (double pic C = C). L'ajout de régénérant limite l'effet de l'enrobage sur les liants recomposés [88] [172]. Les taux d'AE croissants entraînent une augmentation des carbonyles.

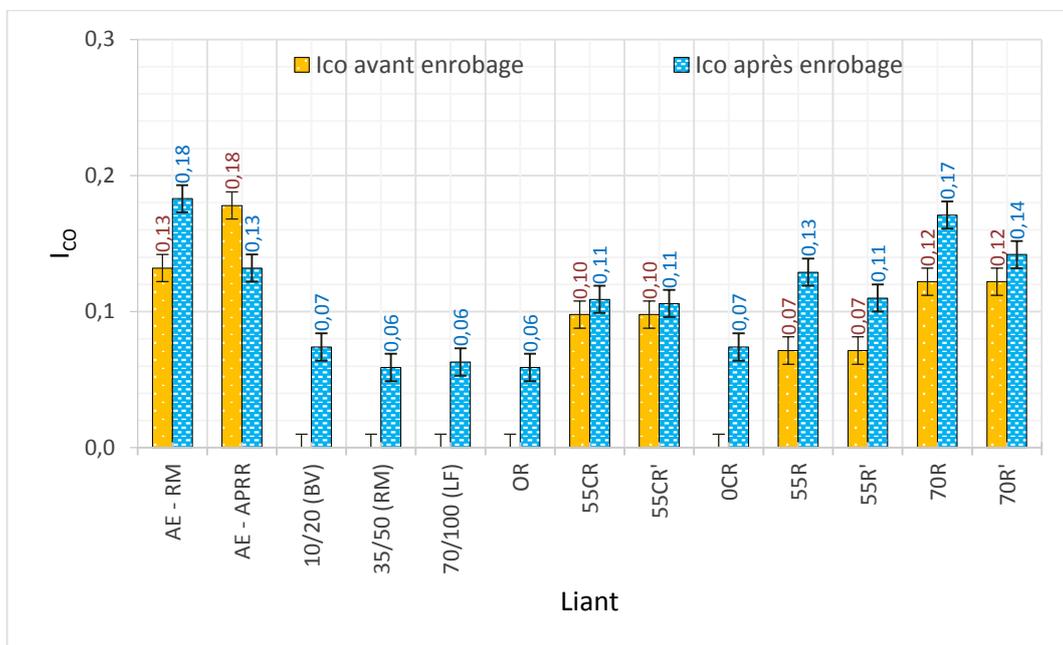


Figure II-24. Indice carbonyle des liants du BBSG3 avant et après enrobage.

Dans le cas de la GB4 (Figure II-26), sous l'effet de l'enrobage l' I_{CO} des liants (d'apport, de l'AE et recomposé) augmente systématiquement, avec à nouveau une compensation partielle par l'ajout de régénérant. De même que pour le BBSG3, l' I_{CO} augmente avec le taux d'AE.

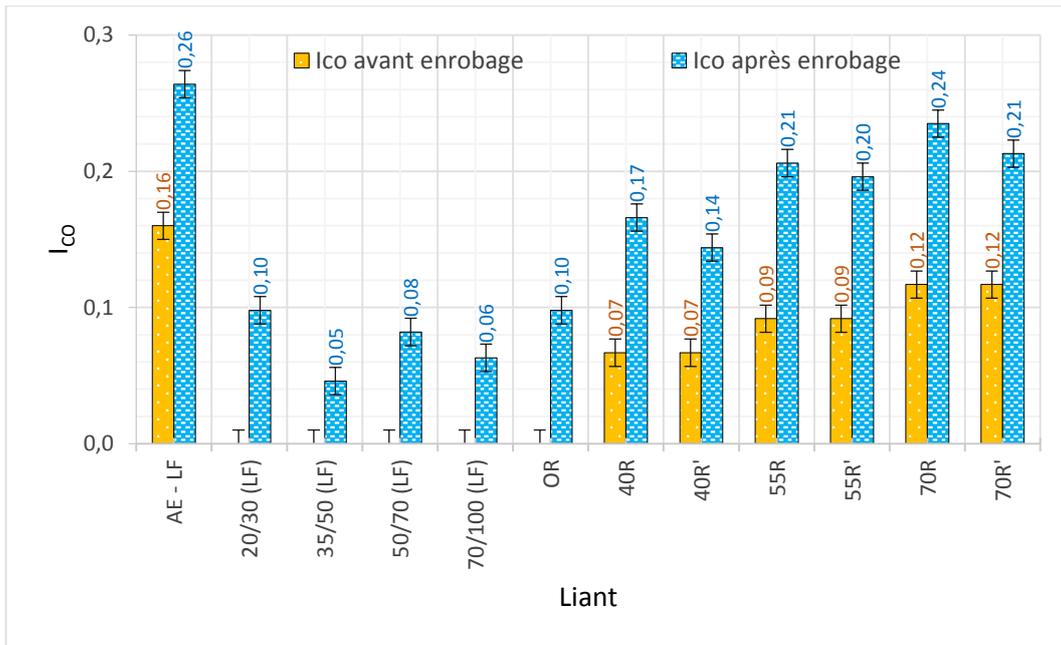


Figure II-25. Indice carbonyle des liants de la GB4 avant et après enrobage.

Dans le cas de l'EME2 (Figure II-26), les résultats conduisent à des conclusions similaires à celles formulées pour le BBSG3 et la GB4.

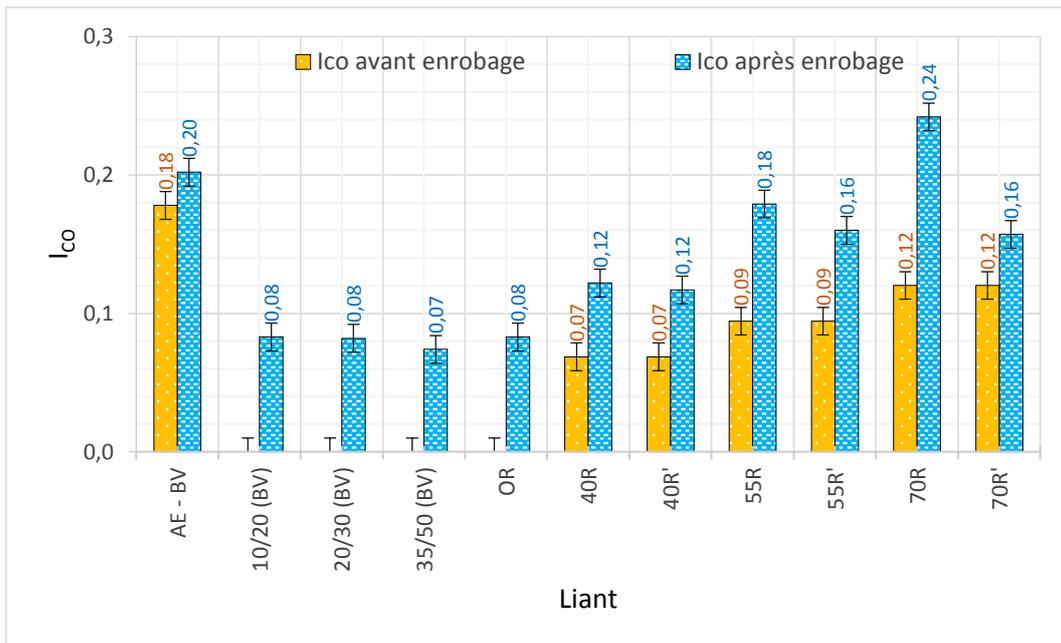


Figure II-26. Indice carbonyle des liants de l'EME2 avant et après enrobage.

De manière plus globale, pour l'ensemble des formules, la Figure II-27 confronte l' I_{co} avec la consistance (Figure II-27a) et avec la température de transition vitreuse (Figure II-27b). On observe que l'indice carbonyle augmente avec la dureté du liant surtout aux valeurs élevées de cette dernière (pénétrabilité < 20 mm/10) mais il n'apparaît pas fortement corrélé avec la T_g malgré une tendance à varier dans le même sens.

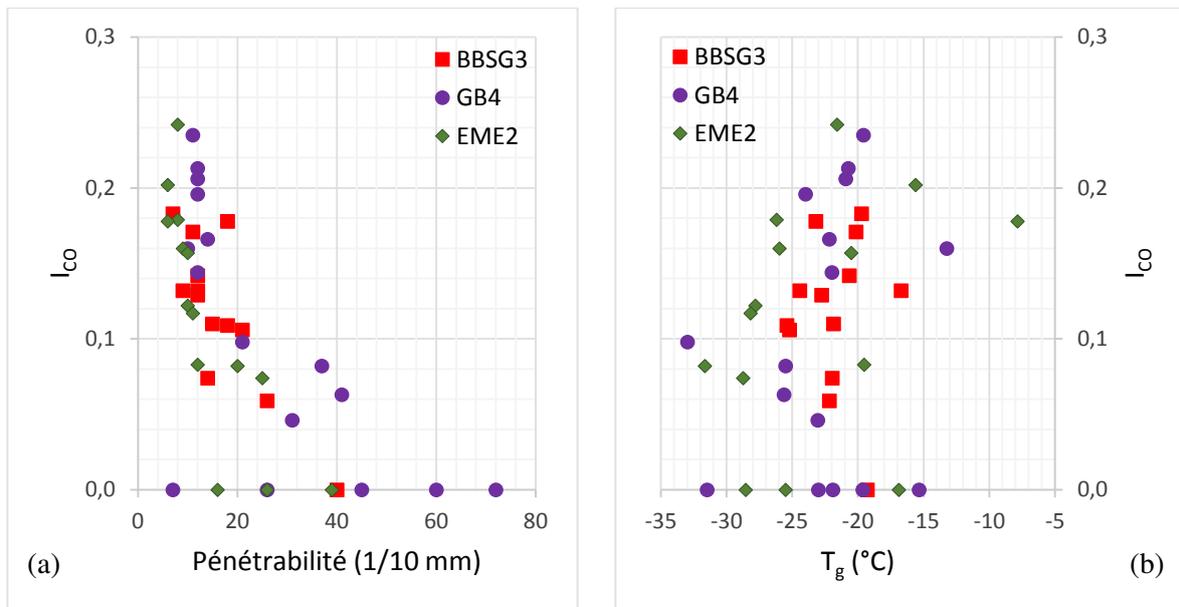


Figure II-27. Relation de l'indice carbonyle avec : (a) la pénétrabilité et (b) la T_g du liant.

2.2.4. Fractions SARA

Les fractions des liants recomposés ne pouvant être mesurées qu'après enrobage, les valeurs initiales sont logiquement obtenues à partir des dosages respectifs des liants d'apport et des AE.

La Figure II-28 présente les résultats SARA pour l'ensemble des liants du BBSG3. Sur la Figure II-28a on observe des taux d'asphaltènes des AE et des formules recyclées avant et après enrobage logiquement supérieurs à ceux des bitumes neufs d'apport ainsi qu'un pourcentage de saturés similaire pour tous les liants. On remarquera que malgré des duretés très différentes, les bitumes 35/50 (RM) et 70/100 (LF) ont des taux d'asphaltènes très proches.

L'enrobage produit une augmentation systématique des asphaltènes (qui peut atteindre près de 10 %), tandis que le pourcentage de saturés reste pratiquement inchangé (Figure II-28a). On n'observe pas d'influence nette générale du taux d'AE ni du régénérant sur l'évolution des asphaltènes pendant l'enrobage. On note par ailleurs que l'impact de l'enrobage sur le taux d'asphaltènes du liant de l'AE-APRR est bien plus significatif que sur celui de l'AE-RM dont la valeur de pénétrabilité est plus basse.

Figure II-28b montre des taux des fractions d'aromatiques plus élevés pour les bitumes neufs que pour les liants recomposés ou des AE et décroissants avec le taux de ces derniers ; à l'inverse des valeurs initiales des résines. L'effet de l'enrobage se traduit globalement par une diminution de ces deux fractions avec une légère compensation par l'ajout du régénérant [97].

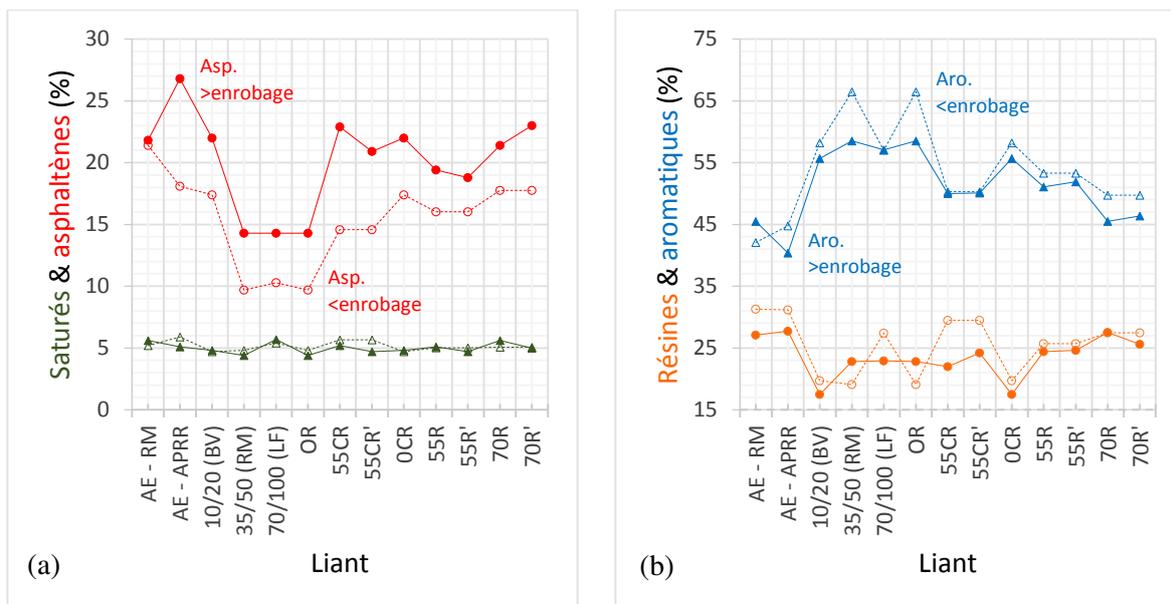


Figure II-28. *Évolution des fractions SARA pendant l'enrobage (BBSG3) : (a) asphaltènes & saturés ; (b) résines & aromatiques.*

Les résultats obtenus sur les liants de la GB4 (Figure II-29) montrent des taux d'asphaltènes et de résines croissants avec la dureté du bitume neuf et avec le taux d'AE ; les aromatiques montrant une tendance inverse (courbes « en miroir ») et les saturés, pratiquement constants quelle que soient les formules, présentent un pic pour le bitume neuf de classe 20/30.

Lors de la fabrication, on constate une augmentation très nette des asphaltènes de tous les liants, davantage marquée sur les liants recomposés, ainsi qu'un effet négligeable sur les saturés (Figure II-29a). Les fractions aromatiques subissent une diminution plus marquée que précédemment, tandis que la variation des résines ne suit pas une tendance globale bien définie.

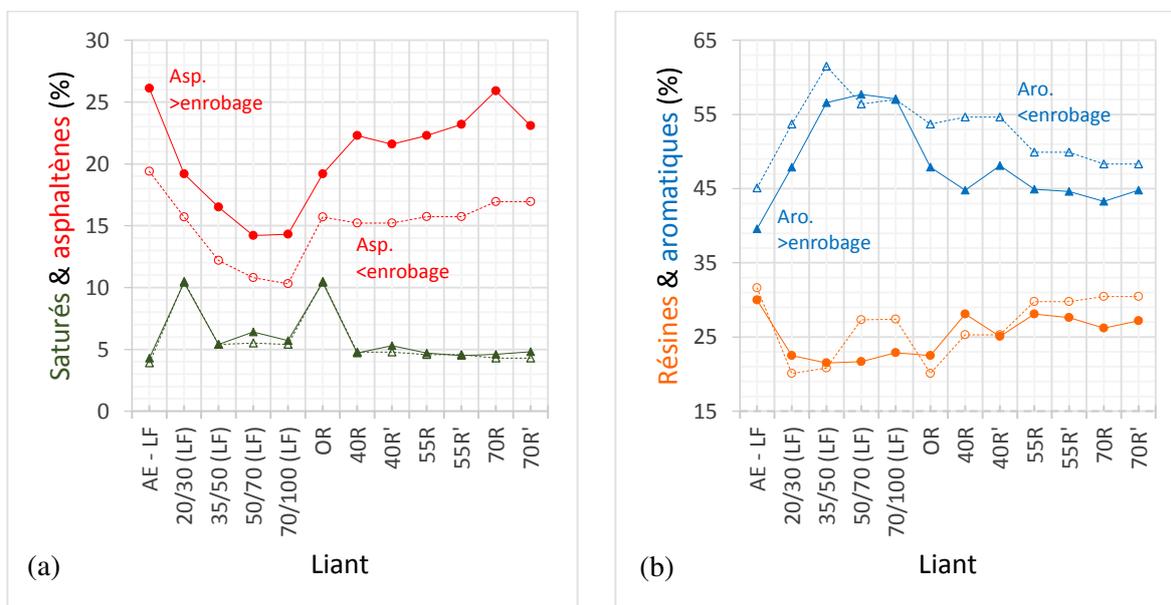


Figure II-29. *Évolution des fractions SARA pendant l'enrobage (GB4) : (a) asphaltènes & saturés ; (b) résines & aromatiques.*

Les liants de l'EME2 (Figure II-30) suivent les mêmes tendances et effets que ceux de la GB4 : augmentation nette des asphaltènes et diminution significative des aromatiques lors de l'enrobage avec une faible variation des saturés et des résines. L'ajout de régénérant corrige légèrement l'augmentation des asphaltènes des liants recomposés.

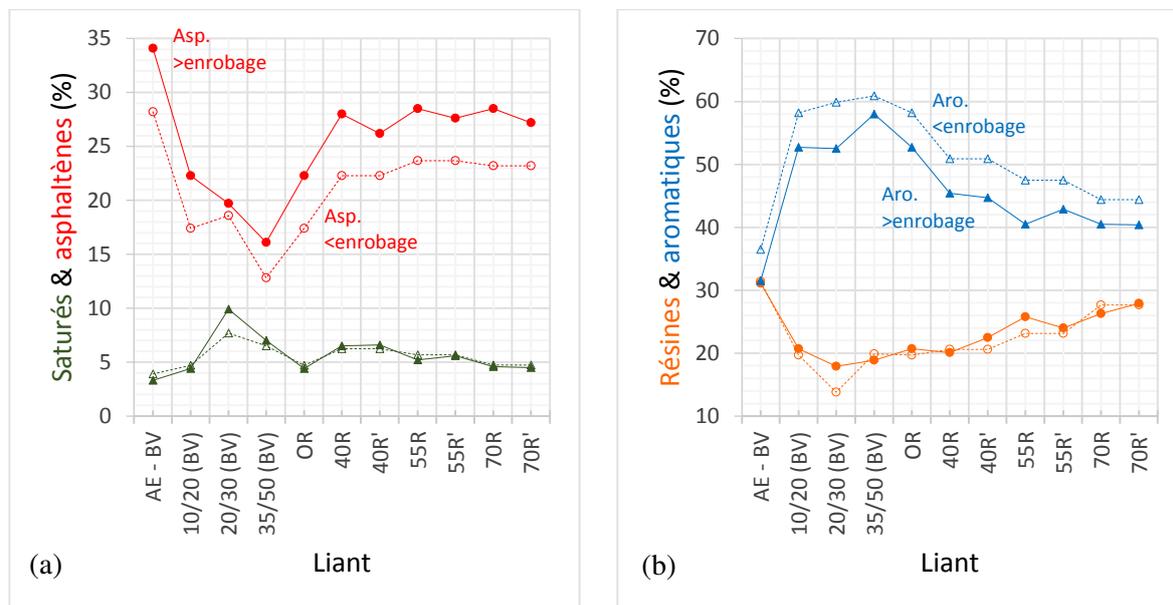


Figure II-30. Évolution des fractions SARA pendant l'enrobage (EME2) : (a) asphaltènes & saturés ; (b) résines & aromatiques.

La Figure II-31 présente, pour l'ensemble des mélanges, la variation de l'indice d'instabilité colloïdale et du quotient asphaltènes/aromatiques suite à l'enrobage. On constate une augmentation de chaque paramètre sous l'effet du vieillissement [12] [19] [21] [91] [94], du même ordre de grandeur pour l'ensemble des liants. La valeur maximale sur chaque courbe correspond au liant de l'AE-BV (EME2).

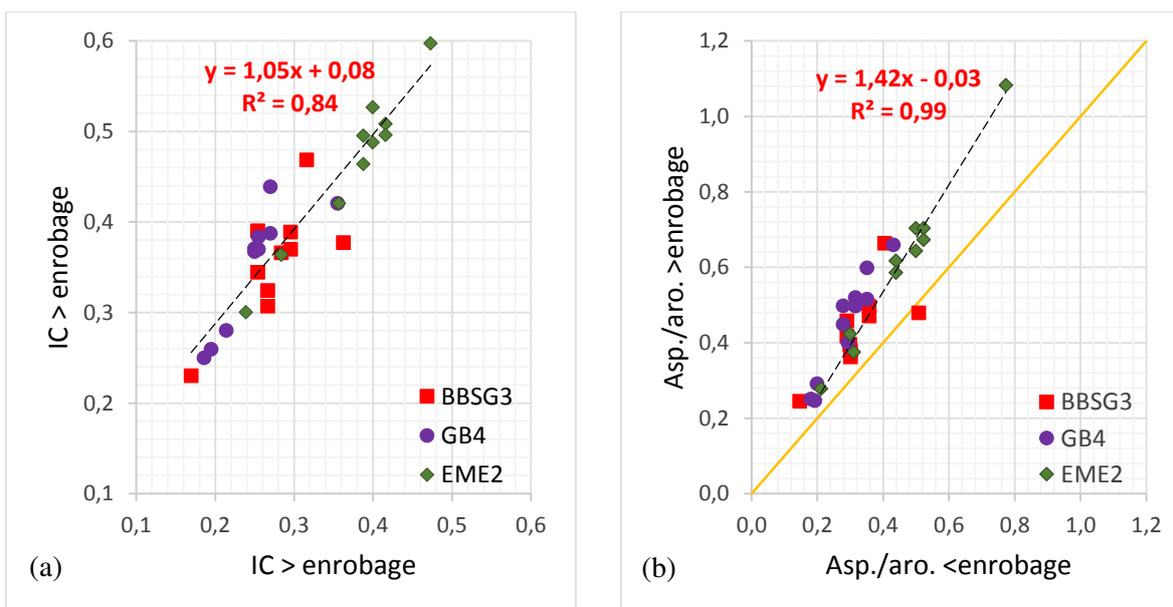


Figure II-31. Effet de l'enrobage sur : (a) l'indice d'instabilité colloïdale et (b) le quotient asphaltènes/aromatiques.

Les relations de l'IC avec la consistance et avec l'indice carbonyle des liants sont présentées sur la Figure II-32. On observe que l'indice d'instabilité colloïdale est assez corrélé avec la pénétrabilité. Malgré une forte dispersion, il semble exister une relation croissante entre IC et I_{CO} qui apparaissent tous deux comme indicateurs du vieillissement.

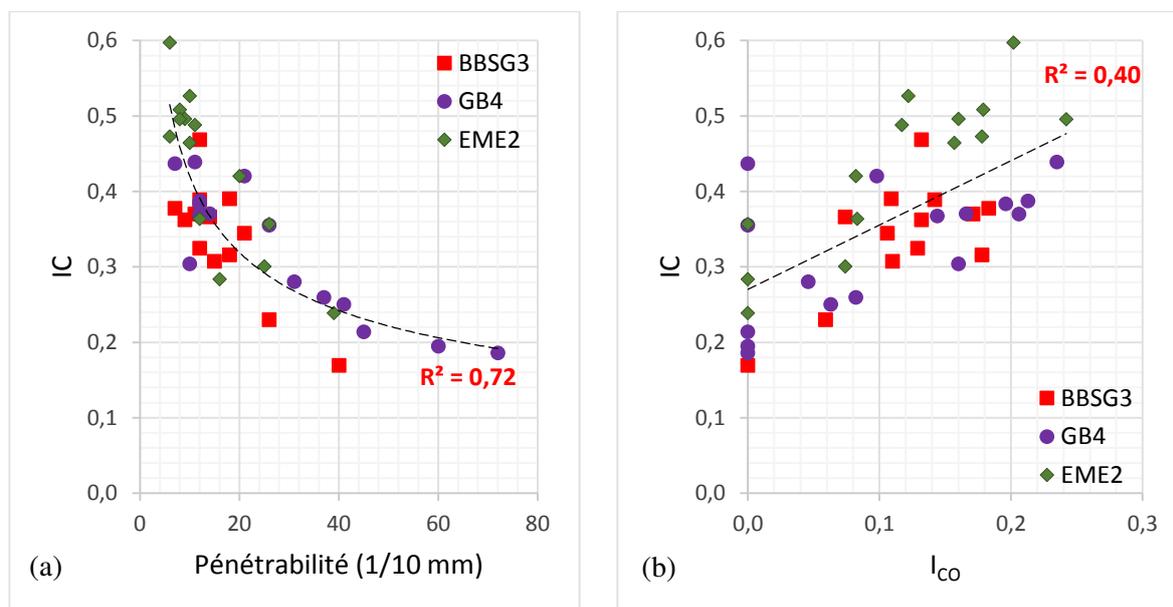


Figure II-32. Relation de l'indice d'instabilité colloïdale (IC) avec : (a) la pénétrabilité et (b) l'indice carbonyle.

3. CONCLUSIONS

Cette campagne expérimentale, comportant un nombre important de formules (24), est conçue pour évaluer l'effet de forts pourcentages d'AE et d'un additif de type régénérant sur les performances de trois familles d'enrobés recyclés (BBSG3, GB4 et EME2). À cet effet, le procédé de fabrication, adapté au recyclage à très fort taux d'AE, est identique pour toutes les formules d'une même famille, avec des contrôles systématiques de l'homogénéité de ceux-ci. De même, les paramètres de composition (granularité et teneur en liant totale) sont identiques par famille d'enrobés quelle que soit la formule. Compte tenu de l'évolution probable du liant des AE dans les stocks, les variations trop importantes de pénétrabilité et de TBA ont dû parfois être corrigées à l'aide de nouvelles formules.

Suite à l'enrobage, une diminution de la pénétrabilité et une augmentation de la TBA, toutes deux significatives, sont constatées, en général plus marquées pour les liants de grade élevé, corrigées partiellement avec l'ajout de régénérant.

L'analyse calorimétrique (DSC) montre que la température de transition vitreuse est davantage corrélée avec les fractions cristallisables qu'avec la pénétrabilité du liant. L'enrobage entraîne une augmentation logique des FC et une diminution inattendue de la T_g probablement liée au filler présent dans les mélanges.

Les indices carbonyle des AE et des enrobés avec recyclés mesurés par la spectrographie infrarouge (FTIR), sont supérieurs à ceux des bitumes neufs. L'enrobage produit une augmentation de l'indice carbonyle (I_{CO}), partiellement récupérée avec l'ajout de régénérant, surtout à très fort taux de recyclage.

Les taux d'asphaltènes et de résines des AE et des enrobés avec recyclés, déterminés par l'analyse SARA, sont supérieurs à ceux des liants neufs d'apport, la tendance étant inverse pour les aromatiques. L'enrobage augmente la teneur en asphaltènes, diminue les aromatiques et impacte faiblement les saturés et les résines. L'ajout de régénérant corrige légèrement l'augmentation des asphaltènes des liants recomposés.

CHAPITRE III. COMPACTIBILITÉ, SENSIBILITÉ A L'EAU, ORNIÉRAGE

1. COMPACTIBILITÉ PCG

1.1. PARAMÈTRES D'ESSAI

Le matériel PCG utilisé pour la réalisation des essais est représenté sur la Tableau III-1. Le diamètre intérieur du cylindre contenant l'enrobé est de 160 mm. Le nombre d'éprouvettes par essai est égal à trois. La température d'essai des matériaux est variable selon le type : 165 °C pour le béton bitumineux, 180 °C pour la grave-bitume et 185 °C pour l'enrobé à module élevé.



Figure III-1. PCG type 2, laboratoire Le Foll TP.

1.2. RÉSULTATS

Pour l'ensemble des matériaux et des formules testées, les résultats complets des essais à la PCG en termes de teneur en vides entre 5 et 200 girations, sont détaillés dans l'annexe B. Le Tableau III-1 récapitule les valeurs moyennes obtenues à 10, 60 et 100 girations et associe également les teneurs en liant mesurées sur chacune des compositions après enrobage.

Pour chaque famille de matériaux, sur les figures qui suivent la dispersion est représentée par l'intervalle entre valeurs minimales et maximales mesurées.

Tableau III-1. Résultats des essais à la PCG : pourcentage de vides moyen.

Enrobé \ Paramètres		Formules							Référence
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'	
BBSG3	Vides à 10 girations (%)	17,0	15,4	15,3	15,6	15,3	14,8	14,3	> 11
	Vides à 60 girations (%)	9,9	8,3	8,0	8,4	8,1	7,5	6,8	5 < v < 10
	Vides à 100 girations (%)	8,1	6,4	6,1	6,6	6,3	5,6	4,8	-
	Teneur en liant (%)	5,44	5,59	5,78	5,59	5,52	5,52	5,65	-
	Module de richesse (K)	3,36	3,41	3,52	3,52	3,37	3,33	3,41	-
GB4	Vides à 10 girations (%)	15,2	16,0	15,6	16,5	15,4	16,4	15,3	-
	Vides à 60 girations (%)	8,4	9,5	9,0	9,9	8,9	9,8	8,5	-
	Vides à 100 girations (%)	6,6	7,8	7,2	8,2	7,2	8,0	6,7	≤ 9
	Teneur en liant (%)	4,97	5,02	4,94	5,01	4,97	4,80	4,95	-
	Module de richesse (K)	3,01	3,07	3,05	3,07	3,07	2,96	3,08	-
EME2	Vides à 10 girations (%)	11,8	11,9	11,7	11,7	10,6	11,5	10,2	-
	Vides à 60 girations (%)	4,3	4,5	4,4	4,3	3,5	4,1	3,2	-
	Vides à 100 girations (%)	2,4	2,8	2,7	2,6	2,4	2,6	2,3	≤ 6
	Teneur en liant (%)	5,33	5,23	5,46	5,26	5,24	5,40	5,46	-
	Module de richesse (K)	3,28	3,20	3,38	3,28	3,26	3,34	3,37	-

1.2.1. BBSG3

Les teneurs en vides des formules de BBSG3 suivant les divers cycles de girations (Figure III-2a) montrent une meilleure aptitude au compactage lorsque le taux d'AE augmente (possible influence de la teneur en liant et du pourcentage de fines), ainsi qu'un effet favorable du régénérant sur la compactibilité. Ce dernier effet est dû à l'action chimique du régénérant sur le liant vieilli (remobilisation) contribuant à modifier la rhéologie du liant recomposé. Cette tendance est également illustrée à 60 girations sur la Figure III-2b, laquelle montre en outre que toutes les formules sont conformes aux spécifications [32].

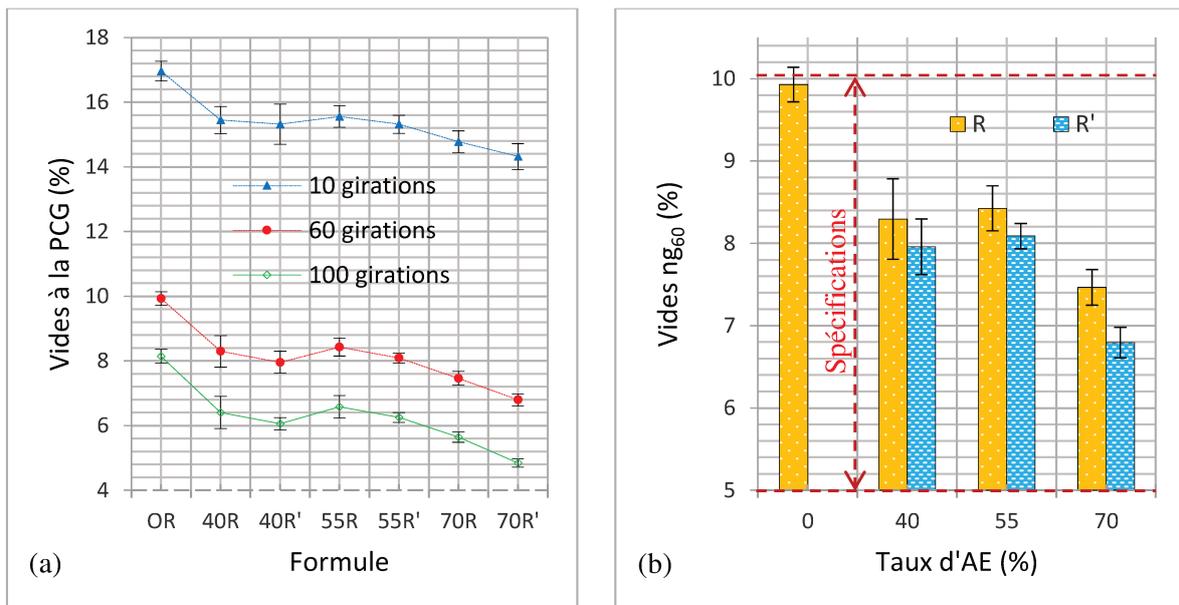


Figure III-2. Compactibilité à la PCG des formules de BBSG3 (a) à 10, 60 et 100 girations ; (b) effet du régénérant et spécifications à 60 girations.

Les relations entre la teneur en vides des enrobés à 60 girations et les paramètres conventionnels (pénétrabilité, température de ramollissement) du liant recomposé sont représentées sur la Figure III-3. On observe une augmentation de la teneur en vides lorsque la pénétrabilité augmente (Figure III-3a) et lorsque la température de ramollissement diminue, cependant, cette tendance est influencée par les valeurs de teneur en liant et pourcentage de fines sur la formule témoin (OR). En outre, les valeurs extrêmes des figures correspondent aux pourcentages extrêmes de recyclage (0 % et 70 %). La cohérence entre ces résultats semble montrer qu'à la température élevée de l'essai à la PCG, la compactibilité des formules ne dépend pas seulement de la rhéologie à chaud du liant total, mais aussi des caractéristiques des granulats.

Compte tenu de la température d'enrobage relativement basse (165 °C), de la faible pénétrabilité du bitume des AE (9 mm/10) et de la valeur de TBA de celui-ci (76,9 °C), une partie résiduelle de bitume vieilli a pu rester adhérente aux granulats de l'AE [93] [135] [176] et favoriser la compactibilité des formules y compris en l'absence de régénérant. L'effet réactif de l'additif sur la compactibilité s'observe par la diminution des vides, associés à des variations de la pénétrabilité (Figure III-3a), ou bien à même TBA (Figure III-3b).

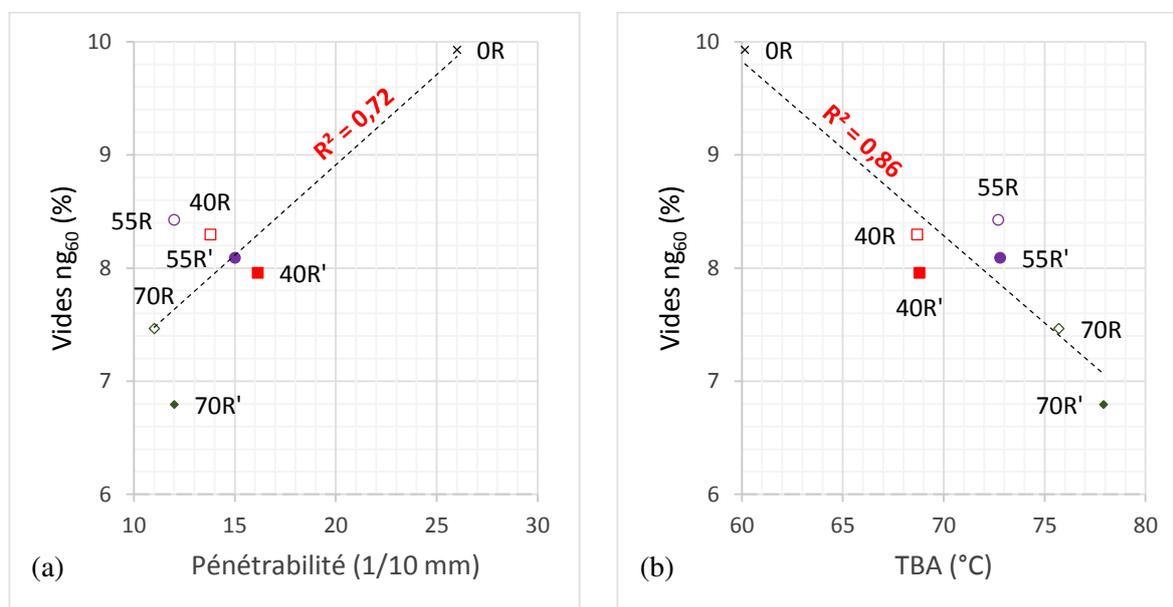


Figure III-3. Dépendance de la compactibilité à la PCG des formules de BBSG3 avec (a) la pénétrabilité et (b) la TBA du liant recomposé (après enrobage).

1.2.2. GB4

Les teneurs en vides des formules de GB4 pour diverses valeurs du nombre de girations à la PCG, sont présentées sur la Figure III-4. Comparées à la formule témoin, les teneurs en vides des formules avec AE sont légèrement supérieures quel que soit le nombre de girations, alors que, comme avec les formules de BBSG3, le régénérant améliore la compactibilité (Figure III-4a). Cette tendance est illustrée en particulier à 100 girations (Figure III-4b), où dans la formule à 70 % d'AE le régénérant a pour effet de récupérer intégralement la compactibilité de la formule témoin. Par ailleurs toutes les formules sont conformes aux spécifications françaises.

La température de conditionnement étant plus élevée que précédemment (180 °C au lieu de 165 °C) un résidu éventuel de liant vieilli à la surface des granulats des AE paraît moins probable, malgré des propriétés de celui-ci assez proches des précédentes (pénétrabilité = 10 mm/10 ; TBA = 73,2 °C).

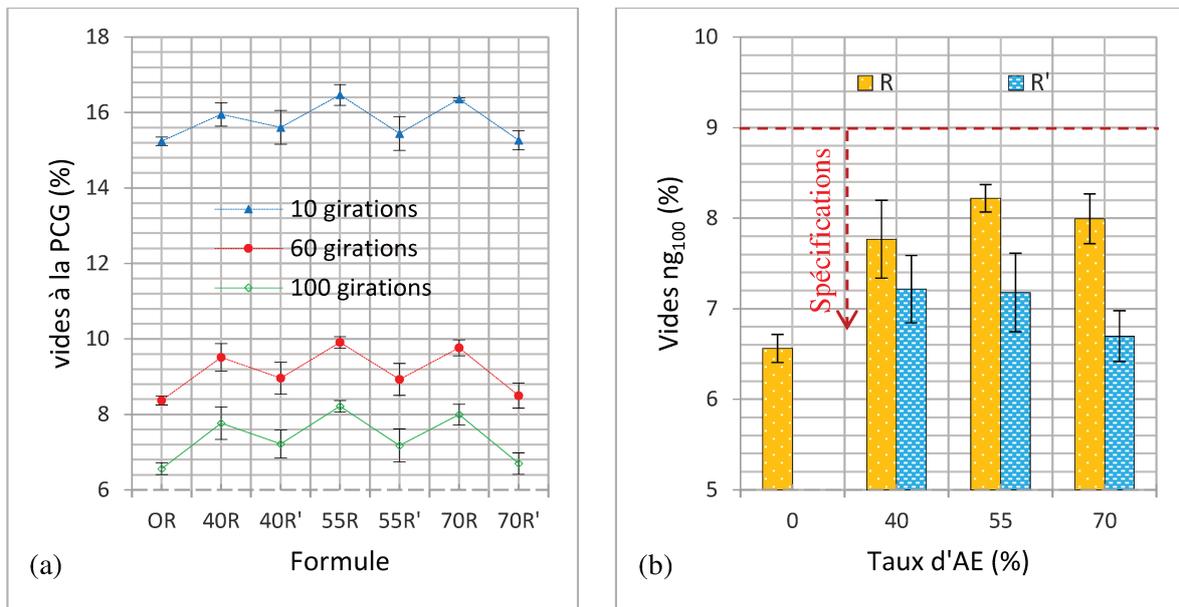


Figure III-4. Compactibilité à la PCG des formules de GB4 (a) à 10, 60 et 100 girations ; (b) effet du régénérant et spécifications à 100 girations.

La Figure III-5 ne montre pas de relation entre la teneur en vides à la PCG et la pénétrabilité du liant recomposé ou sa TBA, mais elle met en évidence l'effet favorable du régénérant sur la compactibilité, déjà signalé ci-dessus. L'effet compactant de l'additif apparaît également non corrélé aux variations éventuelles de pénétrabilité et de TBA qu'il induit.

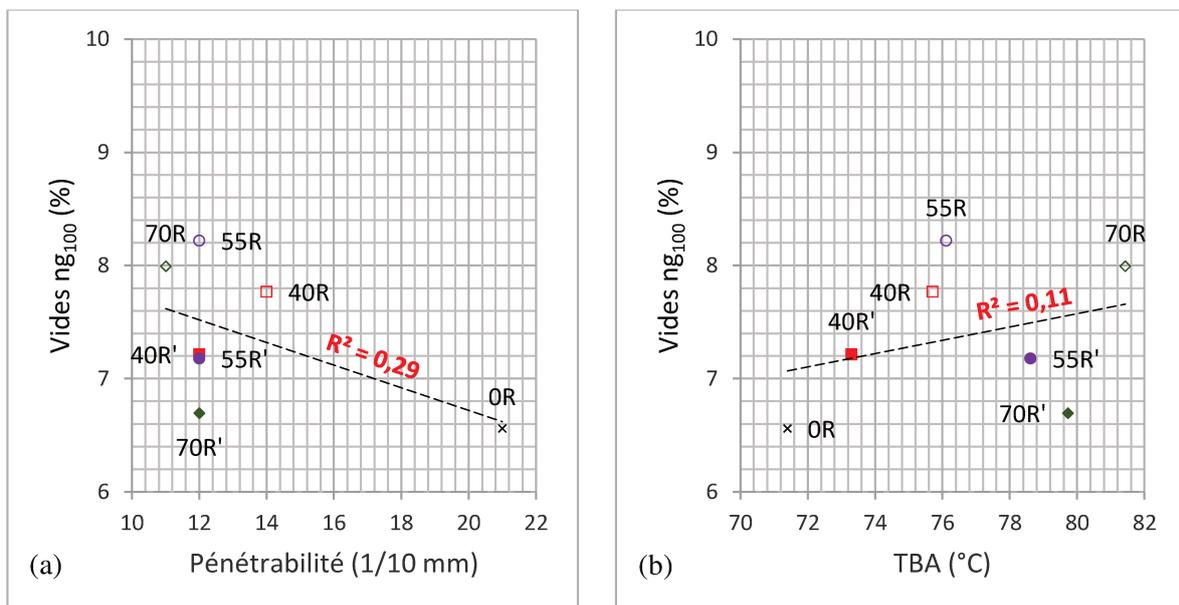


Figure III-5. Dépendance de la compactibilité à la PCG des formules de GB4 avec (a) la pénétrabilité et (b) la TBA du liant recomposé (après enrobage).

1.2.3. EME2

Les teneurs en vides des formules d'EME2 lors des essais à la PCG, sont présentées sur la Figure III-6. On observe que la compacité des formules non régénérées est largement supérieure à celle préconisée par les spécifications, liée probablement aux propriétés des granulats [31], le régénérant pour sa part augmentant à nouveau la compactibilité

Les valeurs des différentes formules sont assez proches compte tenu de la précision des mesures, avec un effet légèrement favorable du régénérant davantage visible pour les formules à fort taux d'AE : 55 % et 70 % (Figure III-6a). Cet effet est illustré à 100 girations (Figure III-6b), où le régénérant a pour effet de récupérer la compactibilité de la formule témoin.

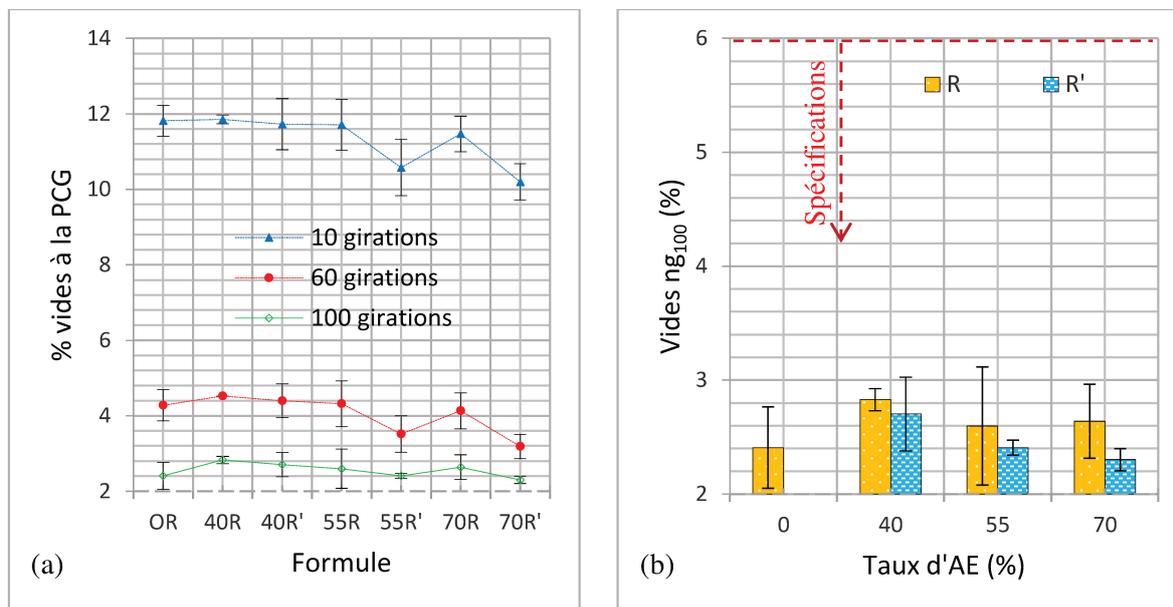


Figure III-6. Compactibilité à la PCG des formules d'EME2 : (a) à 10, 60 et 100 girations ; (b) effet du régénérant et spécifications à 100 girations.

La Figure III-7 montre une absence de corrélation entre la teneur en vides à la PCG et aussi bien la pénétrabilité du liant recomposé que sa TBA.

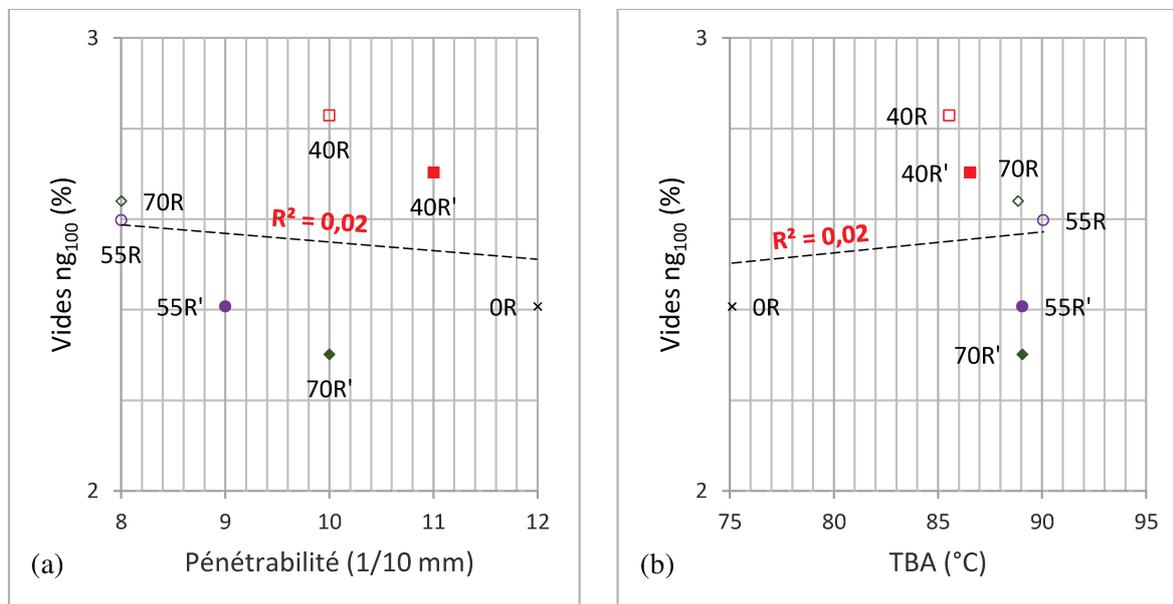


Figure III-7. Dépendance de la compactibilité à la PCG des formules de EME2 avec (a) la pénétrabilité et (b) la TBA du liant recomposé (après enrobage).

À nouveau, l'additif apporte de la compactibilité aux mélanges d'EME2, indépendamment des variations de pénétrabilité et de TBA qu'il produit, effet qui s'avère général pour les trois familles d'enrobés.

2. SENSIBILITÉ À L'EAU (ESSAI DURIEZ)

2.1. PARAMÈTRES D'ESSAI

Les essais de compression simple (Figure III-8) sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de diamètre $\phi=80$ mm pour le BBSG3 (0/10) et $\phi=120$ mm pour la GB4 et l'EME2 (0/14), compactées statiquement dans un moule rigide avec un système à double effet. Conformément à la normalisation, dix éprouvettes sont testées par formule (vitesse 1 mm/mn) : cinq conservées à une humidité de 50 % et cinq autres immergées [36].



Figure III-8. Presse pour l'essai Duriez, laboratoire Le Foll TP.

2.2. RÉSULTATS

L'annexe B présente les tableaux détaillés des résistances à la compression de chaque éprouvette testée et des statistiques sur les résultats. Pour chaque famille de matériaux les valeurs moyennes par formule sont présentées dans le Tableau III-2 et sur les figures suivantes ; sur ces dernières, l'intervalle de dispersion correspond à deux écart-types, soit un écart-type de part et d'autre de la valeur moyenne.

Tableau III-2. Résultats de l'essai Duriez pour l'ensemble des formules.

Enrobé \ Paramètres :		Formules						Référence	
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R		70R'
BBSG3	C _D (MPa)	15,1	18,0	18,9	19,7	19,5	22,2	21,9	≥ 70
	C _w (MPa)	13,2	15,2	17,0	18,7	18,1	20,6	19,6	
	Rapport i/C (%)	88	84	90	95	93	92	89	
	% vides (géométrie)	10,3	9,9	9,1	9,2	9,2	8,7	8,3	
GB4	C _D (MPa)	25,9	19,7	19,7	19,5	19,5	20,5	21,1	≥ 70
	C _w (MPa)	26,2	19,5	19,1	18,8	19,3	19,7	20,5	
	Rapport i/C (%)	101	99	97	96	99	96	97	
	% vides (géométrie)	5,9	7,5	7,1	8,5	8,0	8,1	8,1	
EME2	C _D (MPa)	23,1	22,8	21,5	22,8	24,9	26,7	28,3	≥ 70
	C _w (MPa)	21,1	21,4	20,6	21,4	23,4	23,9	27,4	
	Rapport i/C (%)	91	94	96	94	94	90	97	
	% vides (géométrie)	4,1	4,3	4,2	4,6	4,0	4,3	3,5	

2.2.1. BBSG3

La Figure III-9 présente les résultats des résistances à la compression, du rapport i/C et de la teneur en vides des différentes formules de BBSG3. On observe que les résistances à la compression des éprouvettes sèches et imbibées sont relativement élevées et augmentent toutes deux avec le taux d'AE [108], ce qui s'explique par un durcissement du liant et par la compacité croissante des formules (Figure III-9a). Cependant, le rapport i/C, largement supérieur à la valeur des spécifications, ne montre pas de tendance globale simple avec la teneur en vides, le taux d'AE ou la présence de régénérateur.

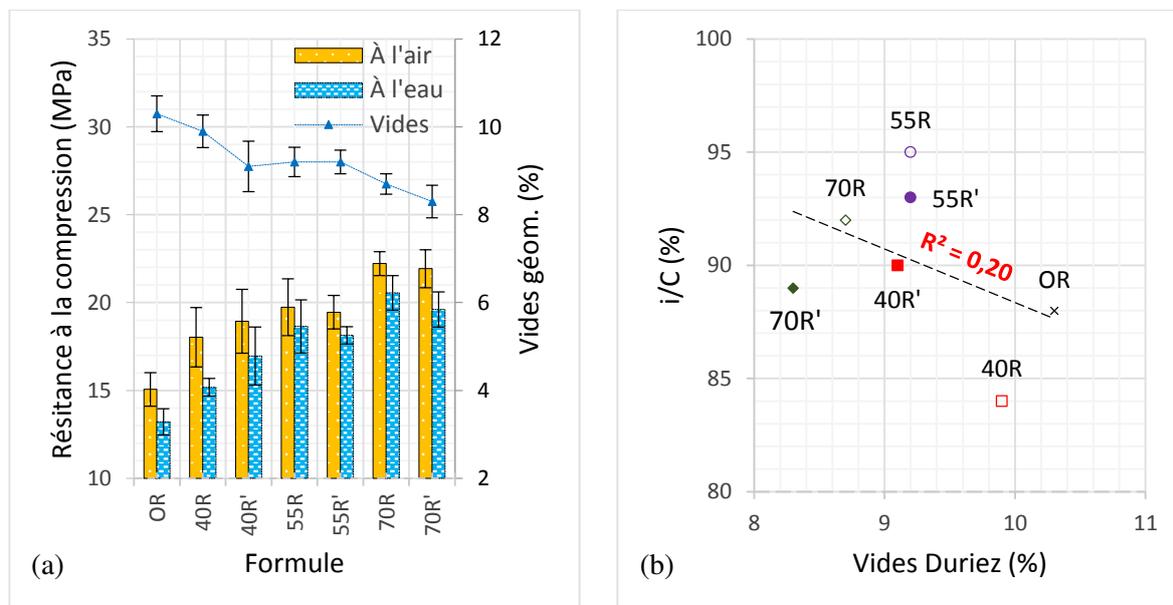


Figure III-9. Sensibilité à l'eau des formules de BBSG3 : (a) résistances à la compression et teneur en vides ; (b) rapport i/C et teneur en vides.

Des corrélations assez significatives sont établies entre résistances à l'air et à l'eau d'une part et entre vides aux essais PCG et Duriez d'autre part, ces derniers étant supérieurs aux premiers (Figure III-10).

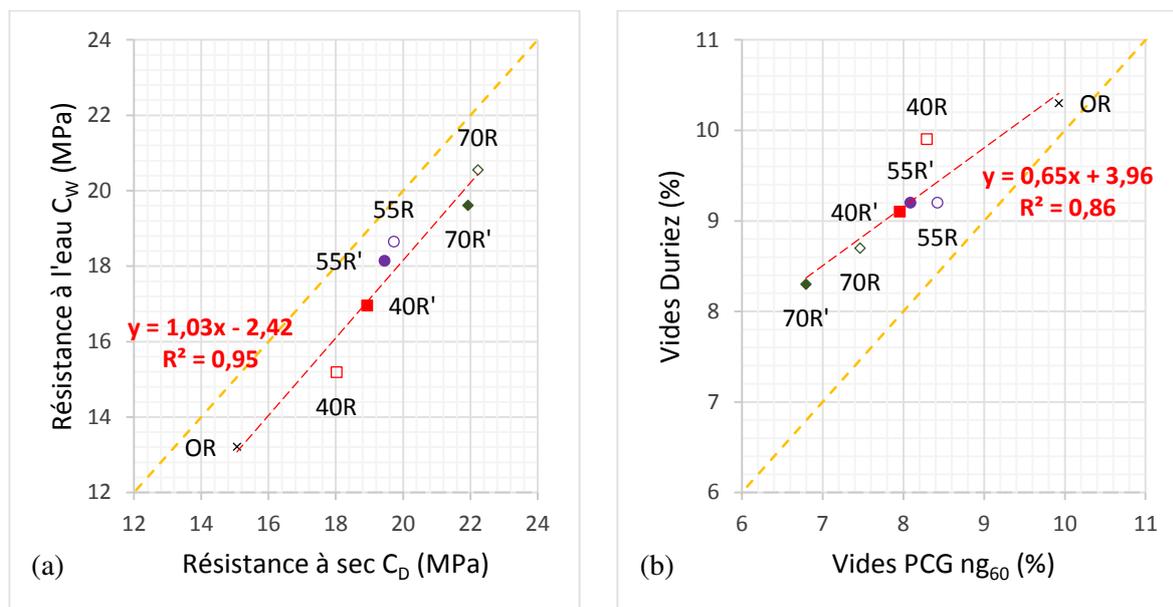


Figure III-10. Relation entre paramètres (BBSG3) : (a) résistances à la compression à l'air et à l'eau ; (b) vides aux essais PCG et Duriez.

2.2.2. GB4

La figure III-11 présente les résultats des résistances à la compression, du rapport i/C et de la teneur en vides des différentes formules de GB4. Comme précédemment, les résistances à la compression des éprouvettes sèches et imbibées sont relativement élevées (Figure III-11a).

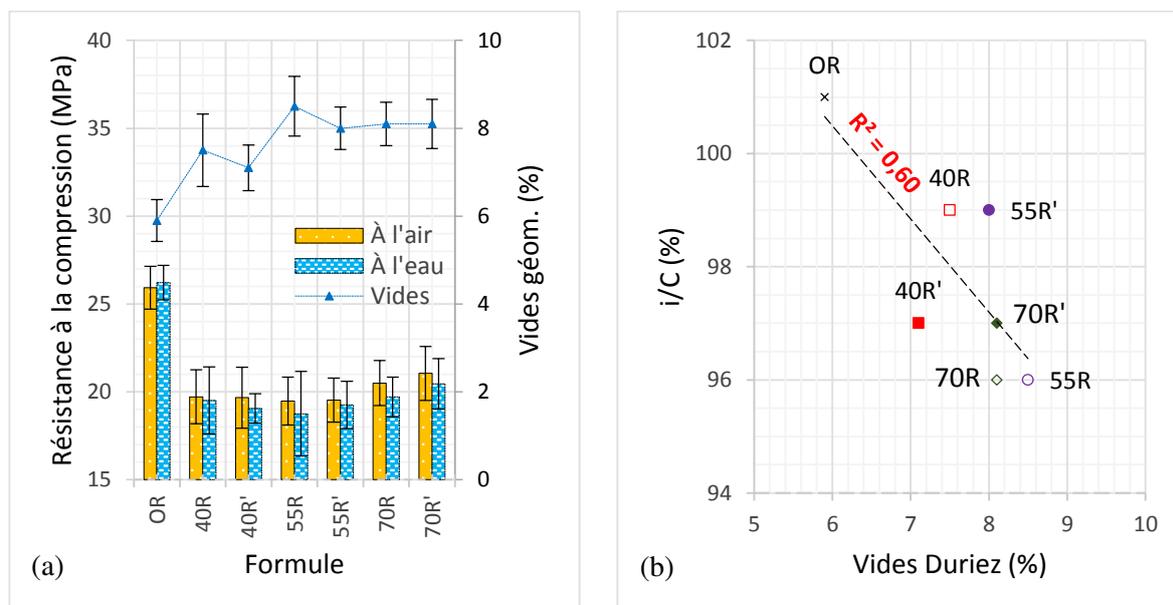


Figure III-11. Sensibilité à l'eau des formules de GB4 : (a) résistances à la compression et teneur en vides ; (b) rapport i/C et teneur en vides.

Comparées à la formule témoin, les résistances des formules avec recyclés s'avèrent inférieures du fait de la plus faible compacité de celles-ci. De même que pour le BBSG3, le

rapport i/C est largement supérieur à la valeur des spécifications ; il apparaît davantage corrélé avec la compacité qu'avec le taux d'AE ou à la présence de régénérant (Figure III-11b).

Les résistances à l'air et à l'eau apparaissent fortement corrélées (Figure III-12a) ce qui n'est pas le cas entre les vides à la PCG et ceux des éprouvettes Duriez (Figure III-12b) ces derniers étant de 1 % à 2 % inférieurs aux premiers.

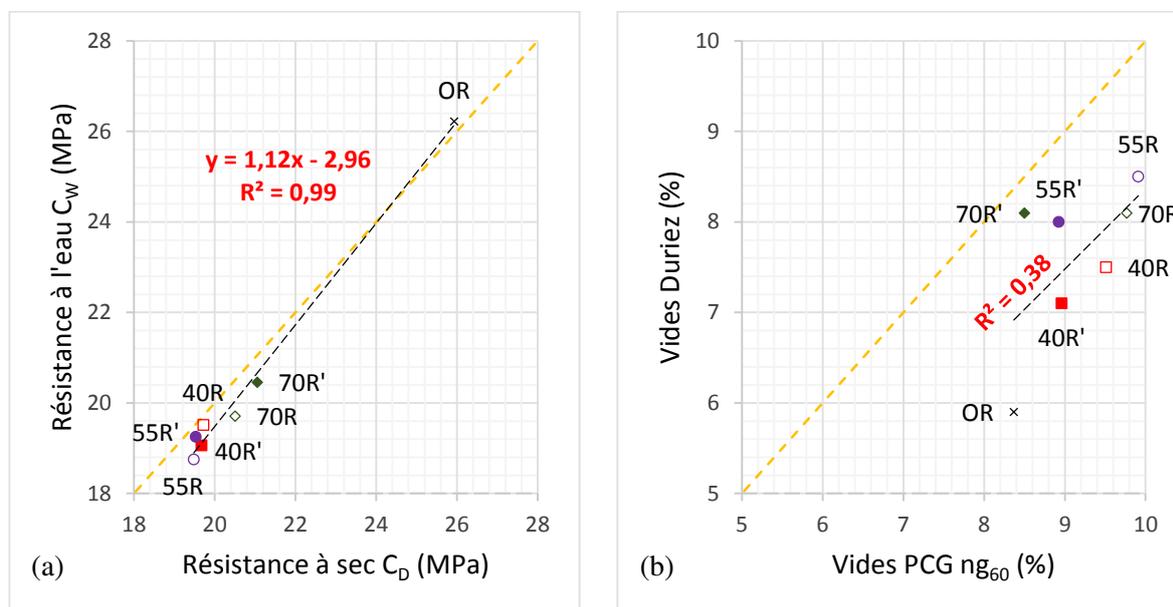


Figure III-12. Relation entre paramètres (GB4) : (a) résistances à la compression à l'air et à l'eau ; (b) vides aux essais PCG et Duriez.

2.2.3. EME2

Comme observé avec les matériaux précédents, les résistances à l'air et à l'eau des formules d'EME2 croissent globalement avec la compacité de celles-ci (Figure III-13a). De même qu'avec les formules de BBSG3, les résistances augmentent avec le taux d'AE et en outre, avec l'ajout de régénérant, lequel a pour effet d'améliorer la compacité. Le rapport i/C , supérieur à 88 %, ne paraît pas dépendant de la teneur en vides, du taux d'AE ni de la présence de régénérant (Figure III-13b).

À nouveau les résistances à l'air et à l'eau apparaissent fortement corrélées (Figure III-14a) en confirmant un effet de l'eau indépendant du taux de recyclage. Les vides PCG et Duriez sont du même ordre entre 3 % et 5 %, sans présenter une forte corrélation (Figure III-14b).

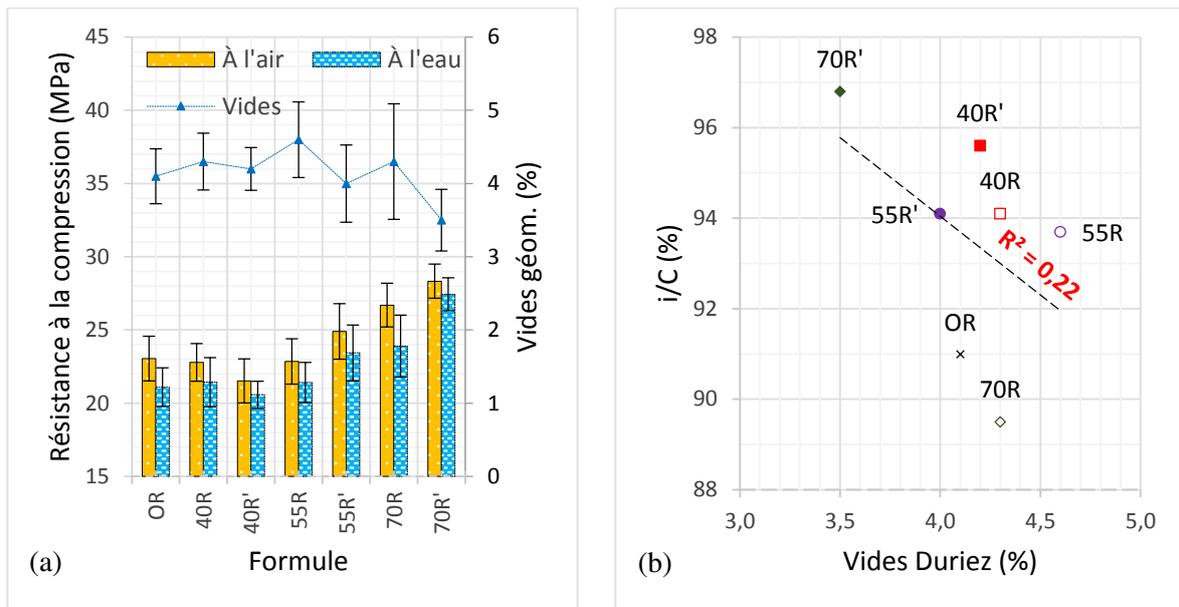


Figure III-13. *Sensibilité à l'eau* des formules de EME2 : (a) résistance à la compression et teneur en vides ; (b) rapport i/C et teneur en vides.

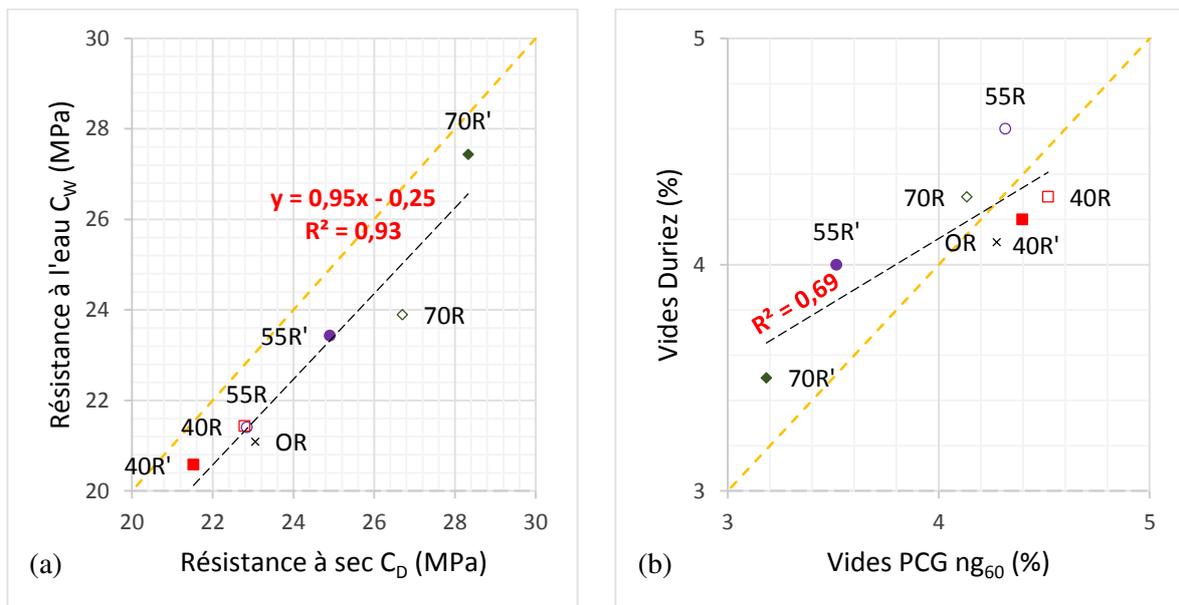


Figure III-14. Relation entre paramètres (EME2) : (a) résistances à la compression à l'air et à l'eau ; (b) vides aux essais PCG et Duriez.

3. RÉSISTANCE À L'ORNIÉRAGE

3.1. PARAMÈTRES D'ESSAI

Les essais d'orniérage ont été effectués au laboratoire de l'entreprise Le Foll TP, à l'aide du simulateur de trafic mlpc[®] (Figure III-15). Les plaques parallélépipédiques (500x180x100 mm) sont compactées à même niveau d'énergie (annexe B) via le compacteur à plaques. L'essai est réalisé à 60°C, sous une charge de 5 kN, appliquée par un pneumatique à la fréquence de 1 Hz. Le nombre de répliques par formule est égal à 2 [37].



Figure III-15. Ornièreuse mlpc, laboratoire Le Foll TP.

3.2. RÉSULTATS

Pour l'ensemble des matériaux et des formules les profondeurs d'ornière (moyenne de deux valeurs) à 30 000 cycles sont présentées sur le Tableau III-3, où sont également rappelés les teneurs en vides des plaques et les teneurs en liant mesurées après enrobage.

Tableau III-3. Résistance à l'orniérage.

Enrobé \ Paramètres :		Formules							Référence
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'	
BBSG3	Vides (%)	5,4	6,2	6,1	6,9	6,4	7,2	7,0	$5 < v < 8$
	$P_{N=30000}$ (%)	4,7	4,5	4,3	4,1	4,5	3,6	3,7	≤ 5
	Teneur en liant (%)	5,64	5,51	5,56	5,49	5,81	5,66	5,70	-
GB4	Vides (%)	6,9	6,4	6,2	7,4	7,0	7,9	7,1	$5 < v < 8$
	$P_{N=30000}$ (%)	3,5	4,2	4,6	3,9	4,3	3,4	4,4	≤ 10
	Teneur en liant (%)	5,09	4,92	5,12	5,04	4,92	5,06	4,83	-
EME2	Vides (%)	3,8	5,3	4,7	6,0	5,9	6,0	5,8	$3 < v < 6$
	$P_{N=30000}$ (%)	6,1	3,4	3,7	1,8	1,8	1,3	1,7	$\leq 7,5$
	Teneur en liant (%)	5,43	5,64	5,27	5,25	5,35	5,23	5,08	-

3.2.1. BBSG3

L'orniérage des formules de BBSG3 à 30 000 cycles est conforme aux spécifications (Figure III-16). Une diminution de l'ornière et une augmentation de la teneur en vides sont observées lorsque le taux d'AE augmente, signifiant que les formules les plus performantes à l'orniérage sont aussi les plus difficiles à compacter (Figure III-16a). Comparés à l'essai PCG, le compactage des plaques et l'essai d'orniérage sont réalisés à une température telle que la viscosité et la rigidité du liant jouent un rôle primordial. En facilitant le compactage, le

régénérant augmente légèrement l'orniérage [83] [162], mais ses effets s'avèrent minimes et peu significatifs, compte tenu de la précision des mesures. Une assez bonne corrélation décroissante est établie entre l'orniérage et la teneur en vides (Figure III-16b).

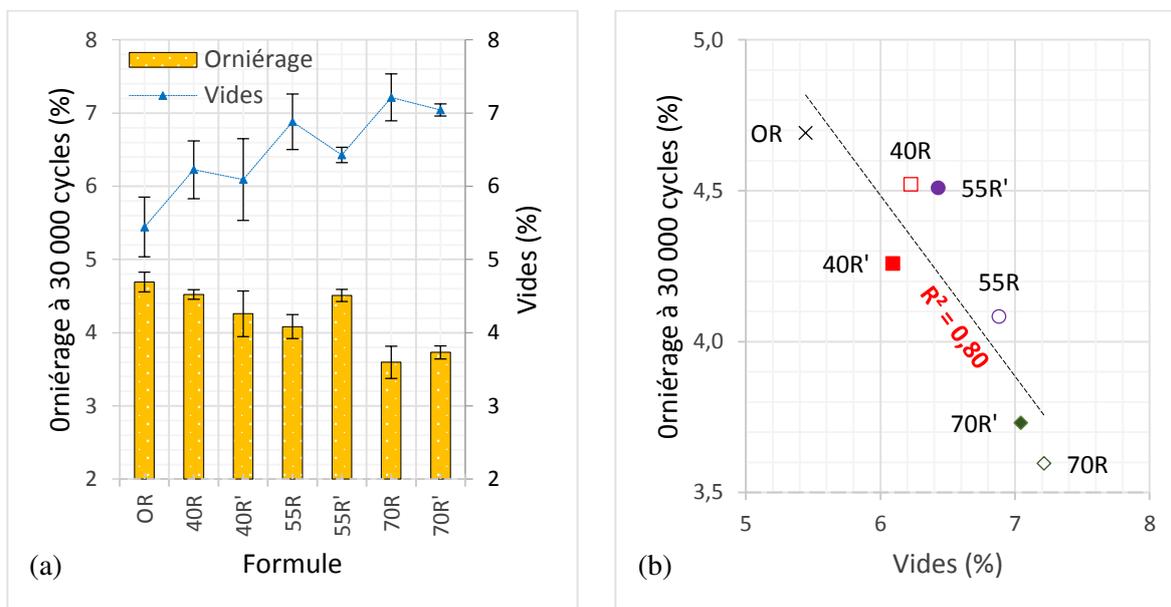


Figure III-16. Résistance à l'orniérage des formules de BBSG3 : (a) valeurs mesurées ; (b) corrélation entre paramètres.

3.2.2. GB4

Comme précédemment, l'orniérage et la teneur en vides des formules de GB4 sont largement conformes aux spécifications (Figure III-17a) et suivent la même tendance envers le taux d'AE, la formule témoin OR mise à part. Le régénérant diminue la teneur en vides et augmente légèrement l'orniérage [166]. La corrélation décroissante entre orniérage et teneur en vides est moins nette que précédemment (Figure III-17b).

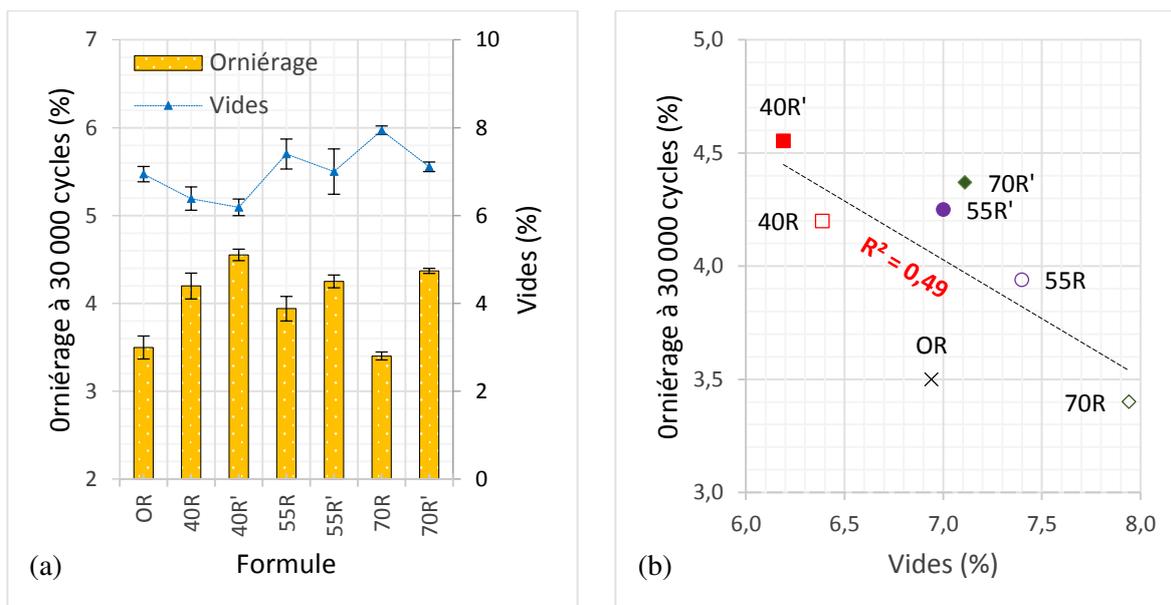


Figure III-17. Résistance à l'orniérage des formules de GB4 : (a) valeurs mesurées ; (b) corrélation entre paramètres.

3.2.3. EME2

L'orniérage et la teneur en vides des formules d'EME2 (Figure III-18a) suivent les mêmes tendances que celles de BBSG3 : les taux croissants d'AE diminuent la compacité des plaques d'enrobé et l'orniérage de ce dernier [78] [119] [154]; le régénérant corrigeant très légèrement les effets des AE. La corrélation entre orniérage et teneur en vides est ici bien marquée (Figure III-18b).

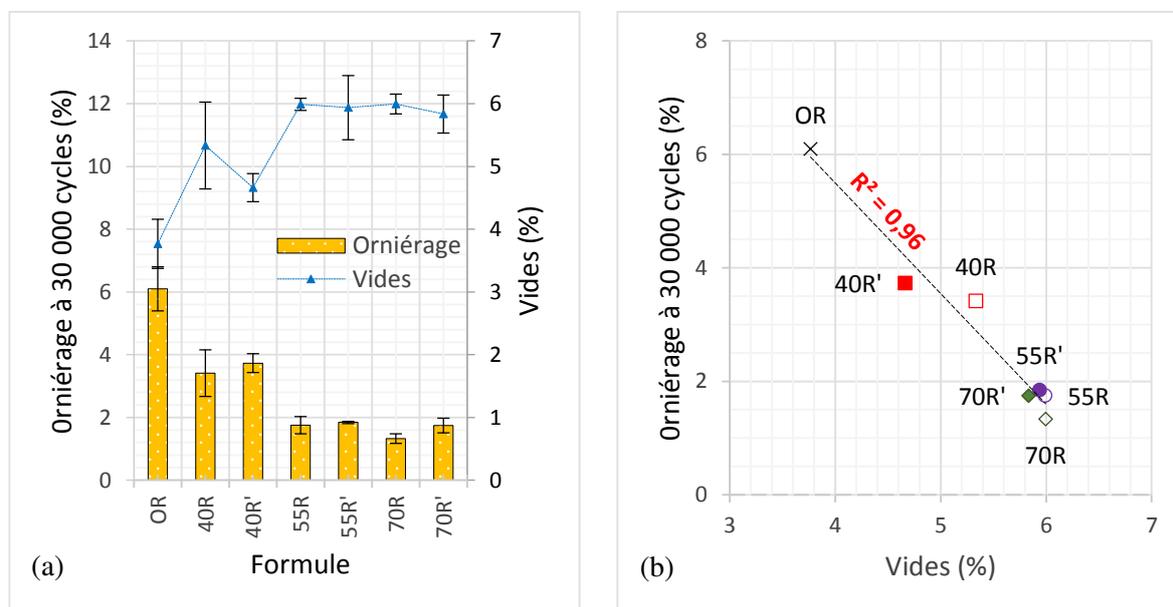


Figure III-18. Résistance à l'orniérage des formules de EME2 : (a) valeurs mesurées ; (b) corrélation entre paramètres.

4. TENDANCES GÉNÉRALES

4.1. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS : EFFET DES AE ET DU RÉGÉNÉRANT

Le Tableau III-4 résume les effets des AE et du régénérant sur les différents paramètres de formulation de niveau N1 et N2.

Les AE réduisent la compactibilité (sauf pour les formules de BBSG3), cette réduction étant partiellement compensée par le régénérant. L'effet des AE sur la résistance à l'eau s'avère globalement favorable, sauf pour les formules de GB4 dont les valeurs d'i/C sont néanmoins très élevées. Le régénérant ayant un impact variable suivant les formules, mais légèrement favorable.

En termes d'orniérage, les AE tendent à réduire les déformations permanentes des formules alors que le régénérant augmente légèrement celles-ci, malgré les variations de la teneur en liant.

Tableau III-4. Influence des AE et du régénérant : synthèse.

Essais \ Paramètre		Effets des AE			Effets du régénérant		
		BBSG3	GB4	EME2	BBSG3	GB4	EME2
% vides PCG	ng = 10	+	-	-	+	+	+
	ng = 60	+	-	-	+	+	+
	ng = 100	+	-	-	+	+	+
Duriez	i/C	+/-	-	+	+/-	+/-	+
	C _D	+	-	+	=	=	+
	C _w	+	-	+	+/-	+/-	+
Orniéragé	% vides	-	-	-	+	+	+
	P _{N=30000}	+	-	+	+/-	-	-

(+) : favorable ; (=) : sans effet ; (-) : défavorable

4.2. CORRÉLATIONS GÉNÉRALES

4.2.1. Entre paramètres de niveaux N1 et N2

Bien que les trois familles de matériaux se différencient et en particulier l'EME2, les différentes teneurs en vides obtenues lors des essais PCG, Duriez et orniéragé (Figure III-19 et Figure III-20), font apparaître globalement une bonne corrélation entre les teneurs en vides PCG et Duriez (Figure III-19a), moins marquée entre les vides PCG et ceux des plaques d'orniéragé (Figure III-19b et Figure III-20a).

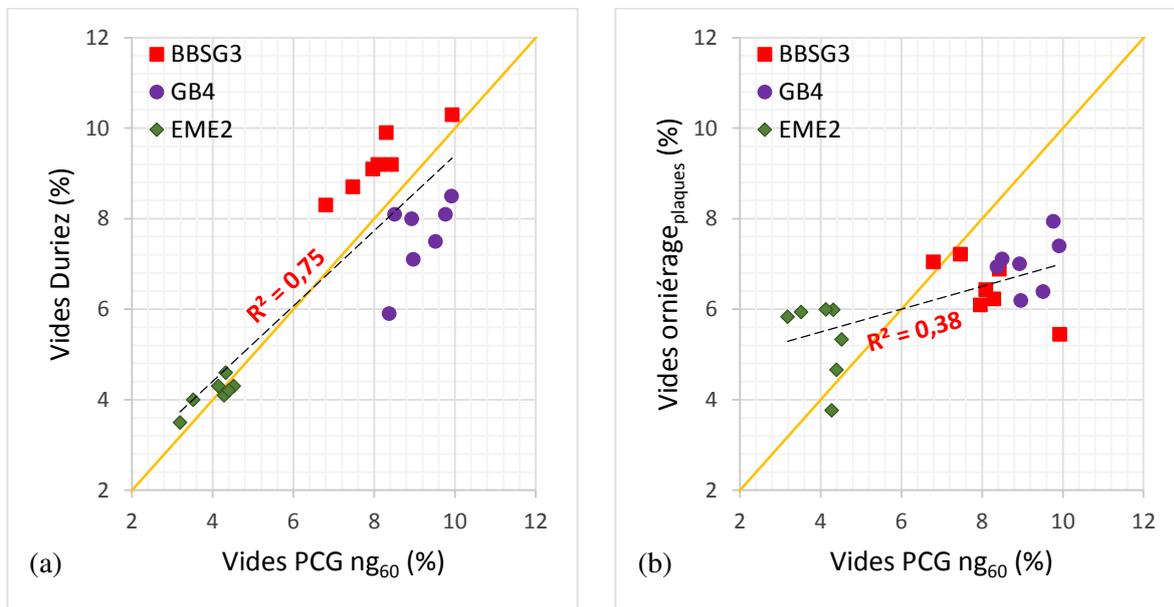


Figure III-19. Corrélation entre teneur en vides PCG et : (a) Duriez, (b) plaques d'orniéragé.

La relation entre la teneur en vides et l'orniéragé à 30 000 cycles de l'ensemble des formules (Figure III-20b) ne fait pas apparaître de corrélation générale mais des corrélations partielles pour l'ensemble BBSG3 et GB4 d'une part et pour l'EME2 d'autre part ; l'étendue des valeurs de l'ornière étant plus importante pour l'EME2.

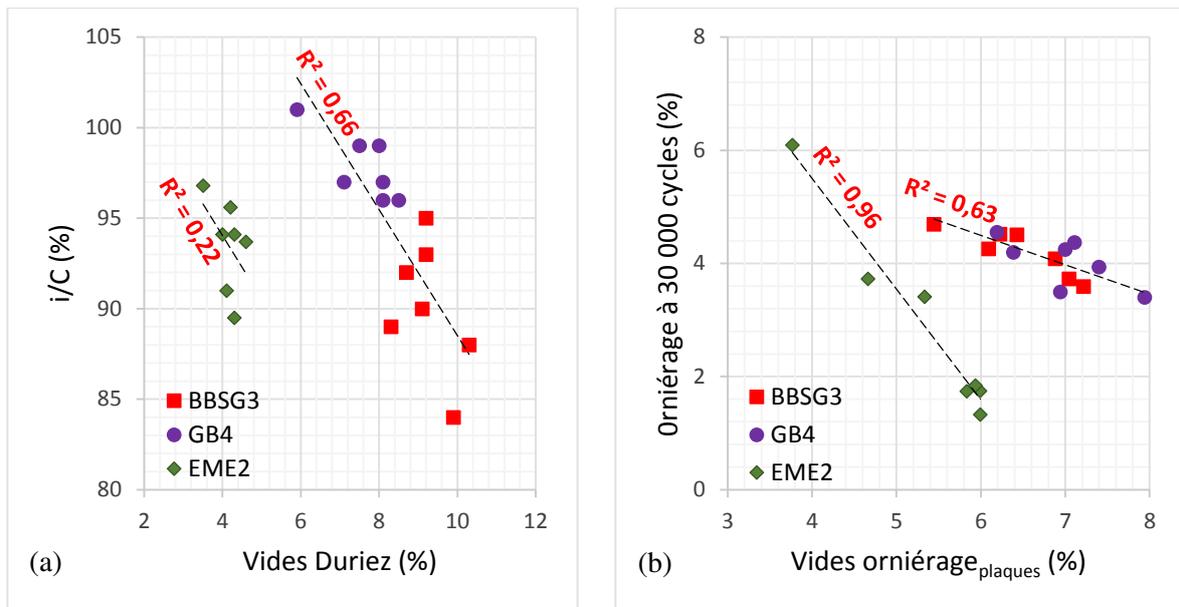


Figure III-20. Relation entre performances et teneur en vides : (a) Duriez ; (b) orniéage.

4.2.2. Avec des paramètres physico-chimiques

a. Pénétrabilité et TBA

La compactibilité à la PCG (Figure III-21) s'avère davantage liée à la TBA des liants (Figure III-21b) qu'à leur pénétrabilité (Figure III-21a), ce qui s'explique par le fait que la TBA est davantage reliée à la nature et à la rhéologie du bitume. À nouveau, l'EME2 se différencie de l'ensemble BBSG3 et GB4.

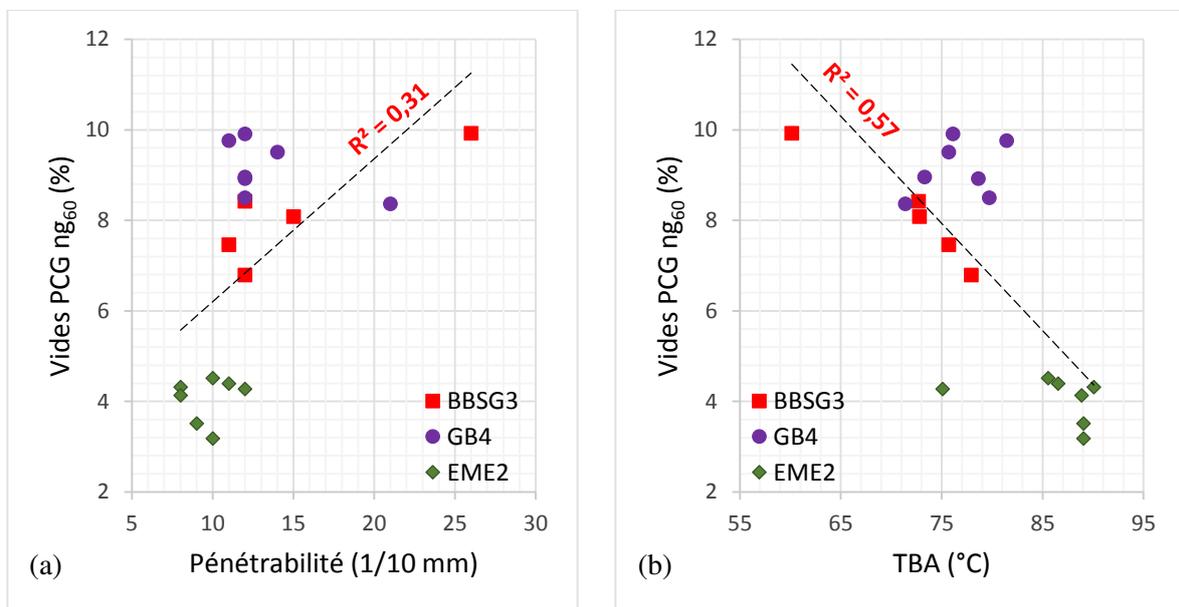


Figure III-21. Corrélations entre compactibilité PCG et : (a) pénétrabilité, (b) TBA.

L'orniéage de l'ensemble des matériaux, est davantage lié à la température de ramollissement (Figure III-22b) qu'à la pénétrabilité des liants (Figure III-22a), ce qui s'explique comme précédemment par le fait que l'essai d'orniéage est effectué à une température proche de celle du ramollissement.

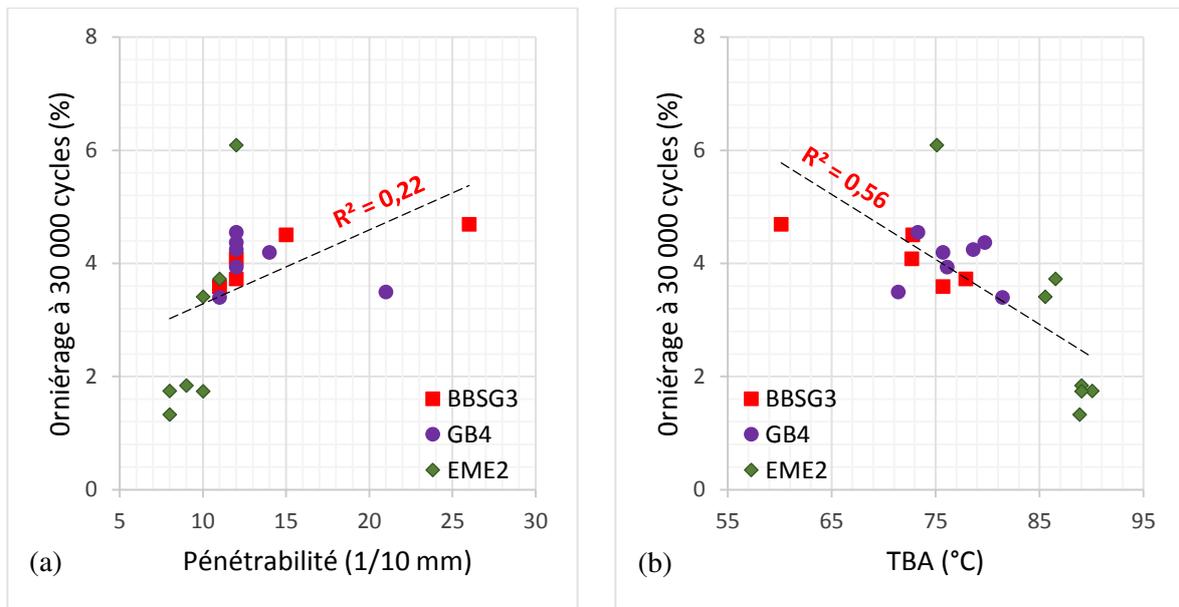


Figure III-22. Corrélations *entre profondeur d'orniére et* : (a) pénétrabilité, (b) TBA.

b. Fractions SARA

Bien qu'au sein de chaque famille de matériaux, la corrélation entre compactibilité à la PCG et fractions SARA en termes d'indice colloïdal et de taux d'asphaltènes (Figure III-23), s'avère inexistante (sauf pour le BBSG3), une croissance globale de la compactibilité avec l'indice colloïdal et avec le taux d'asphaltènes apparaît pour l'ensemble des matériaux, avec toutefois des coefficients de corrélation assez moyens.

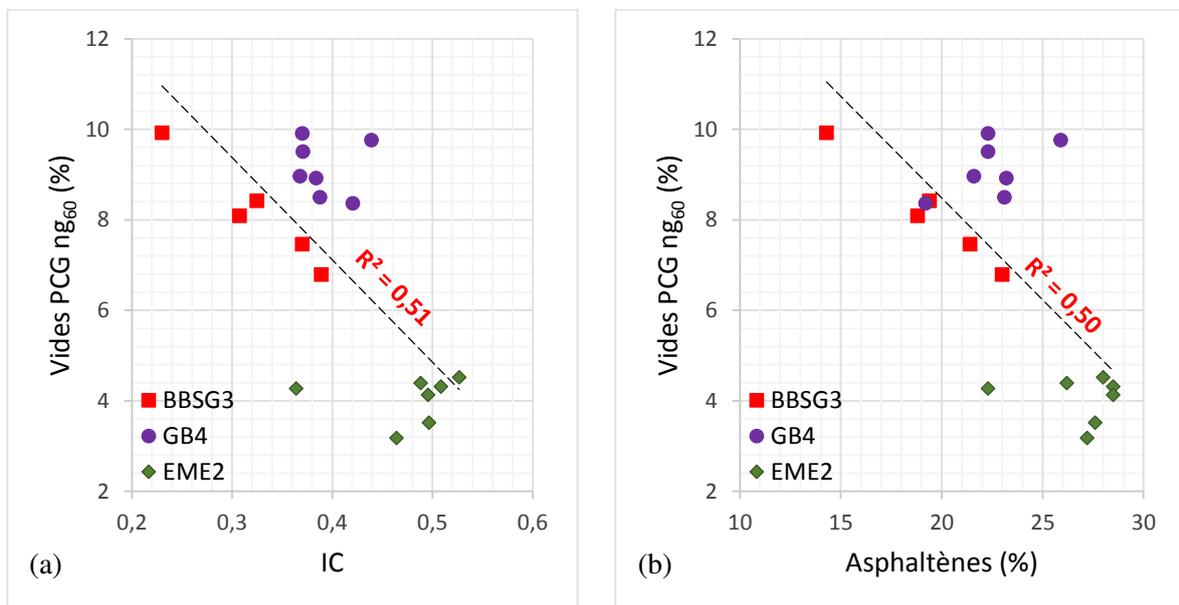


Figure III-23. Corrélations *entre compactibilité PCG et* : (a) indice colloïdal, (b) taux d'asphaltènes.

Comme la compactibilité PCG, l'orniéage présente une décroissance globale avec l'indice colloïdal et avec le taux d'asphaltènes (Figure III-24) lorsqu'on considère l'ensemble des trois familles de matériaux.

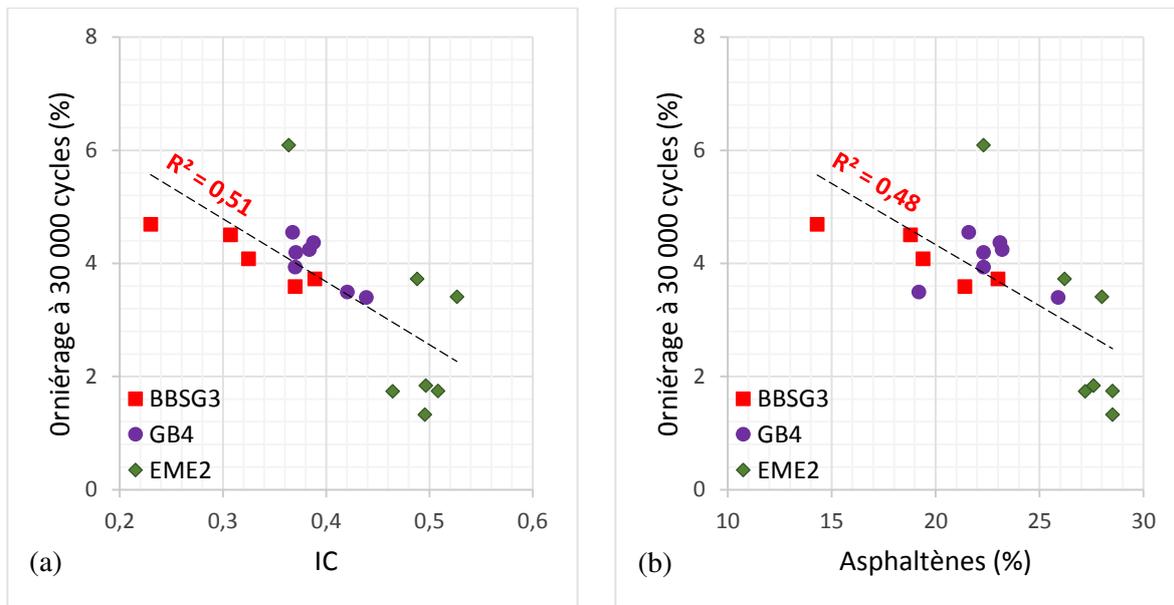


Figure III-24. Corrélations entre profondeur d'ornièrre et : (a) indice colloïdal ; (b) taux d'asphaltènes.

5. CONCLUSIONS

Les essais de formulation de niveaux N1 et N2 effectués sur un ensemble vaste de formules de trois familles d'enrobés à fort taux d'AE, avec ou sans régénérant ont donné de nombreux résultats synthétisés ci-après.

La compactibilité à la PCG se trouve généralement réduite lorsque le taux d'AE et le taux d'asphaltènes (ou l'indice colloïdal) augmentent, mais les valeurs restent conformes aux spécifications dans tous les cas. L'ajout de régénérant a un effet favorable sur la compactibilité.

La sensibilité à l'eau exprimée par le rapport i/C , s'avère davantage corrélée avec la teneur en vides qu'avec le taux d'AE, la présence de régénérant ou les paramètres physico-chimiques.

L'orniéage suit des tendances similaires à la compactibilité, c'est-à-dire qu'il subit une diminution lorsque le taux d'AE, la TBA ou le taux d'asphaltènes augmentent. L'ajout de régénérant augmente très légèrement l'orniéage, sans pour autant diminuer significativement le niveau des performances.

Les tendances générales ci-dessus peuvent s'avérer exceptionnellement non respectées par certaines familles ou formules, dont la justification mériterait des essais supplémentaires en particulier sur la rhéologie des liants.

CHAPITRE IV. MODULE COMPLEXE, RÉSISTANCE À LA FATIGUE

1. PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

1.1. PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Après mélange et malaxage des différents composants, l'enrobé bitumineux est versé dans un moule parallélépipédique (L = 600 mm ; B = 400 mm ; H = 150 mm), installé sur le compacteur de plaques BBPAC mlpc® (Figure IV-1). Le compactage est réalisé sous une charge roulante (pneumatique) conforme aux recommandations de la norme NF EN 12697-33 [188] jusqu'à ce que le pourcentage de vides visé pour chaque plaque soit atteint (annexe C).

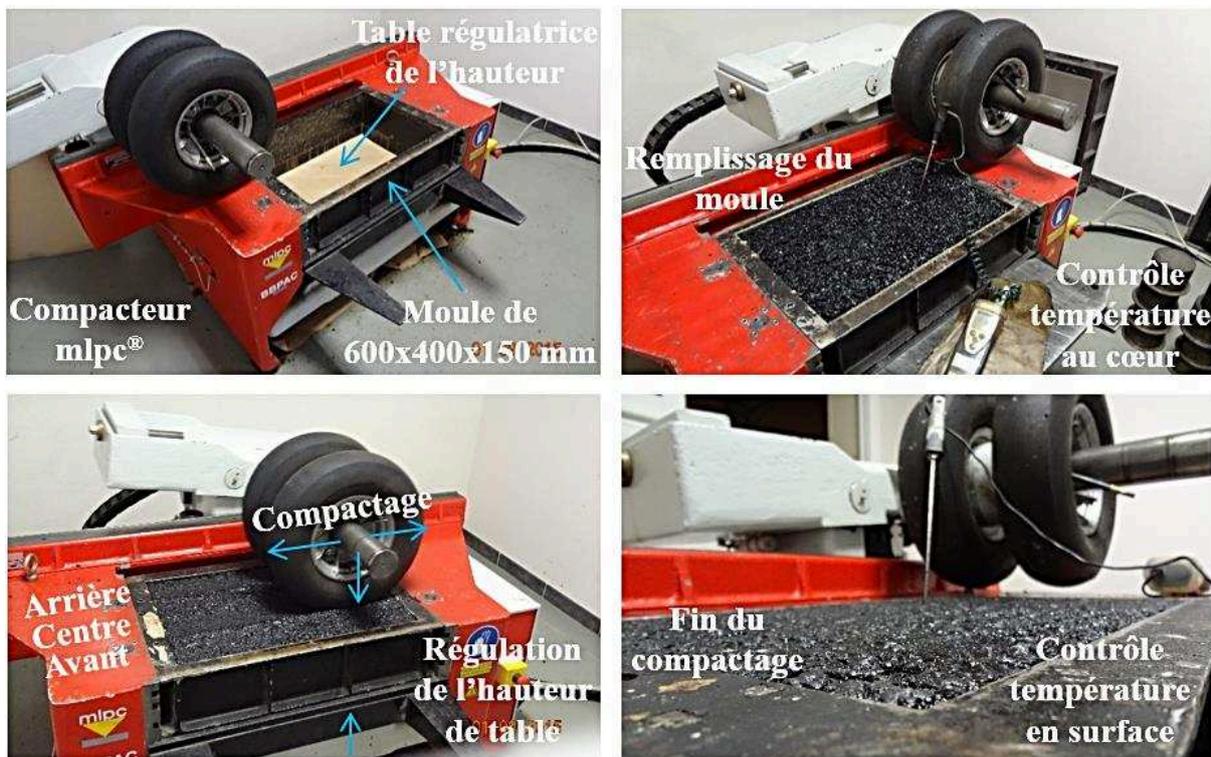


Figure IV-1. Procédure de compactage des plaques.

La pression des pneumatiques et la force du vérin varient de 0,1 MPa et 2 kN dans la phase initiale à 0,6 MPa et 10 kN en phase finale. La température de l'enrobé est mesurée au début et à la fin du compactage ; la valeur moyenne pour l'ensemble des plaques, est présentée sur la Figure IV-2.

Conformément à la normalisation européenne [40] [44], des éprouvettes trapézoïdales ($B = 56 \pm 1$ mm ; $b = 25 \pm 1$ mm ; $e = 25 \pm 1$ mm ; $h = 250 \pm 1$ mm) sont découpées à partir des plaques (Figure IV-3) entre 2 et 8 jours après fabrication et testées après un mûrissement de 14 à 42 jours.

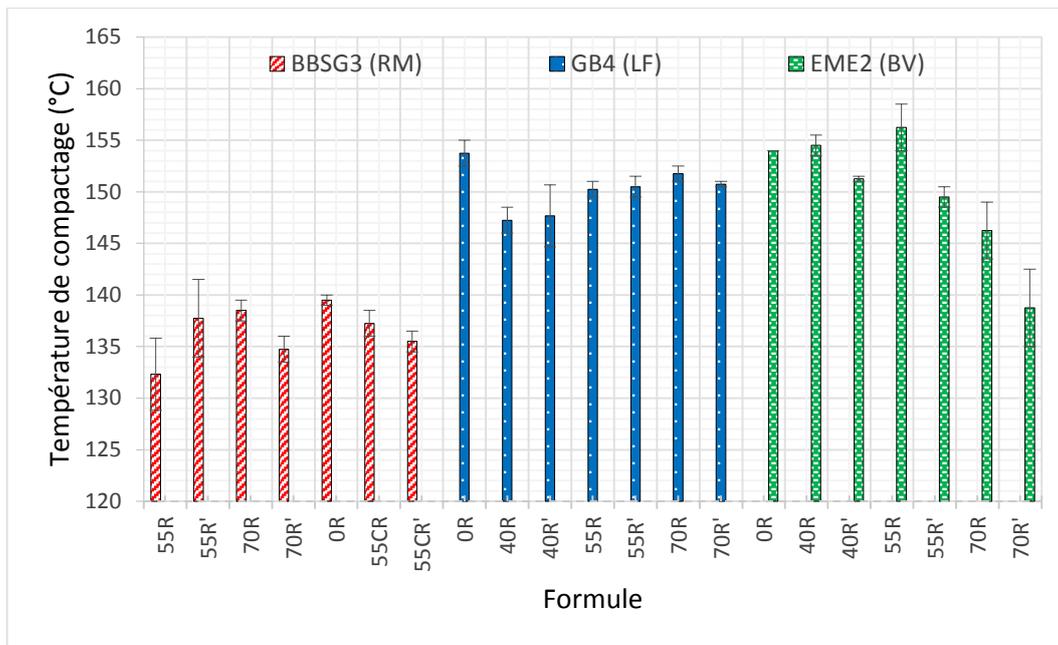


Figure IV-2. Température moyenne de compactage des plaques.

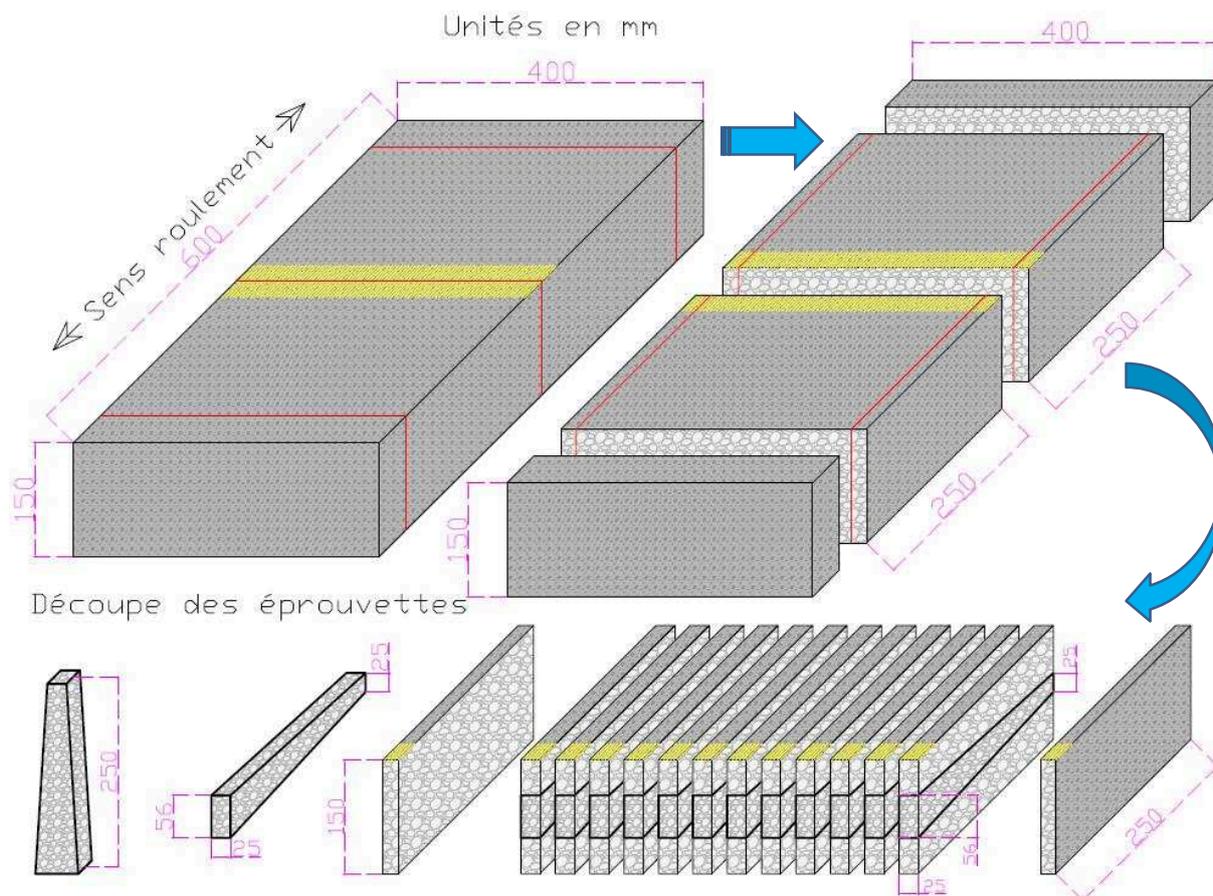


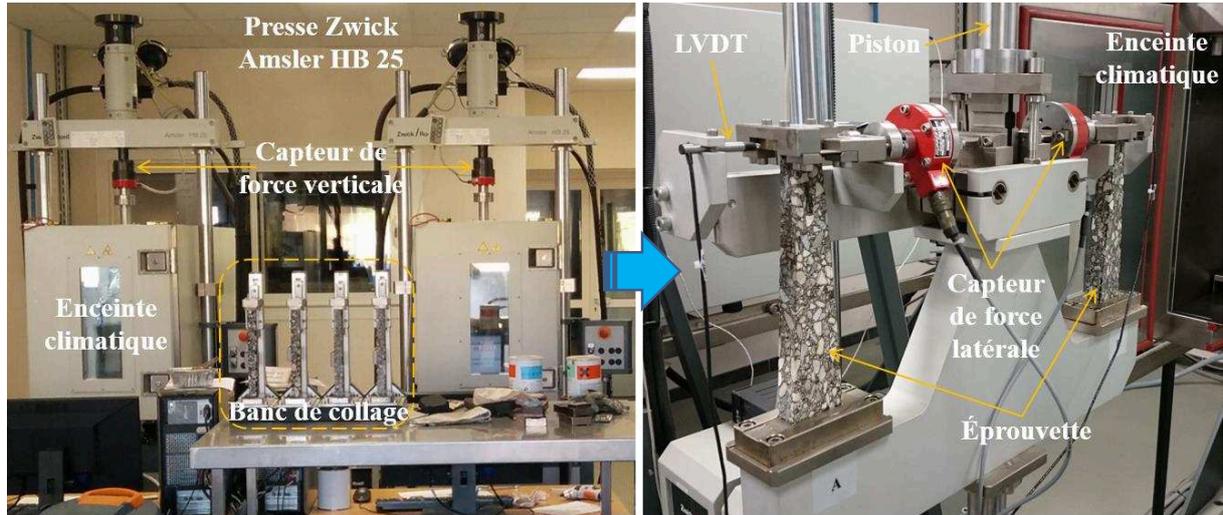
Figure IV-3. Découpe des éprouvettes trapézoïdales (TR).

Compte tenu de la position des éprouvettes dans la plaque (grande base vers le centre), des différences de compacité sont généralement constatées (annexe C). En raison de la dispersion des vides des échantillons, au moins deux blocs sont nécessaires pour chaque enrobé.

1.2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Le dispositif expérimental employé pour les mesures du module complexe et de la résistance à la fatigue (flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales ; 2PB-TR) est présenté dans la Figure IV-4. Pour un essai, deux éprouvettes de propriétés similaires sont montées.

Les éprouvettes sont collées aux platines d'acier à l'aide d'une colle à prise lente (Araldite), avec un temps de durcissement d'au moins 12h. Le conditionnement en température est réalisé dans une enceinte climatique durant 4h au moins.



2. MODULE COMPLEXE

2.1. PARAMÈTRES D'ESSAI

Les essais de module complexe sont réalisés à +10 et +15 °C avec une déformation imposée de 39 $\mu\text{m}/\text{m}$ et différentes fréquences : 0,1 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 ; 30. L'endommagement de chaque échantillon, limité à 4 %, est vérifié en répétant la mesure à 0,1 Hz.

Conformément aux spécifications européennes, au moins 4 éprouvettes de propriétés similaires sont nécessaires pour chaque température [40]. Étant donné que le pourcentage de vides influence la rigidité des enrobés [176], ce paramètre est fixé constant et contrôlé pour tous les taux de recyclage (dispersion $< \pm 1 \%$). Avec ces précautions, on obtient des précisions d'environ $\pm 500 \text{ MPa}$ sur la norme du module complexe et $\pm 0,5$ degré sur l'angle de phase.

Dans la méthode française de dimensionnement des chaussées [3], c'est la norme du module complexe à 15 °C et 10 Hz qui est considérée, associée à la température moyenne annuelle de la chaussée et à une vitesse conventionnelle de déplacement des poids lourds.

2.2. ANALYSE DES RÉSULTATS

2.2.1. Béton Bitumineux (BBSG3)

Le Tableau IV-1 présente les paramètres de rigidité pour les formules de BBSG3. Les résultats pour l'ensemble des fréquences, sont consignés dans l'annexe C. Les parties réelle (E_1) et imaginaire (E_2) du module complexe sont calculées à l'aide des expressions I-10 et I-11.

Tableau IV-1. Paramètres de rigidité du BBSG3 (10 et 15 °C ; 10 Hz).

Paramètres	Formules						
	OR	55R	55R'	55CR	55CR'	70R	70R'
Vides moyens (%)	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Écart-type (%)	0,4	0,5	0,7	0,6	0,3	0,4	0,2
$ E^* $ (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	12178	16019	16028	13256	13026	16996	17320
ϕ (10 °C ; 10 Hz) (degrés)	12,3	7,2	7,2	10,0	9,8	6,1	6,0
E_1 (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	11897	15892	15903	13055	12834	16901	17226
E_2 (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	2599	2018	1997	2300	2225	1795	1805
$ E^* $ (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	9435	13633	13637	10732	10531	14764	15139
ϕ (15 °C ; 10 Hz) (degrés)	17,0	9,5	9,4	13,3	13,2	7,9	7,7
E_1 (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	9025	13444	13452	10443	10253	14625	15001
E_2 (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	2752	2261	2236	2472	2402	2025	2035

Contrairement à Navaro [5], on constate une augmentation systématique de la norme du module complexe $|E^*|$ avec le taux de recyclage également observée par [83] [129] [130] [152] [177], tandis que l'angle de phase ϕ décroît (Figure IV-5) [75] [158] [171]. Toutes les valeurs de $|E^*|$ sont largement supérieures aux exigences normatives pour ce type d'enrobé (formule « Std ») [32]. L'ajout du régénérant n'entraîne pas de variations significatives des paramètres [41].

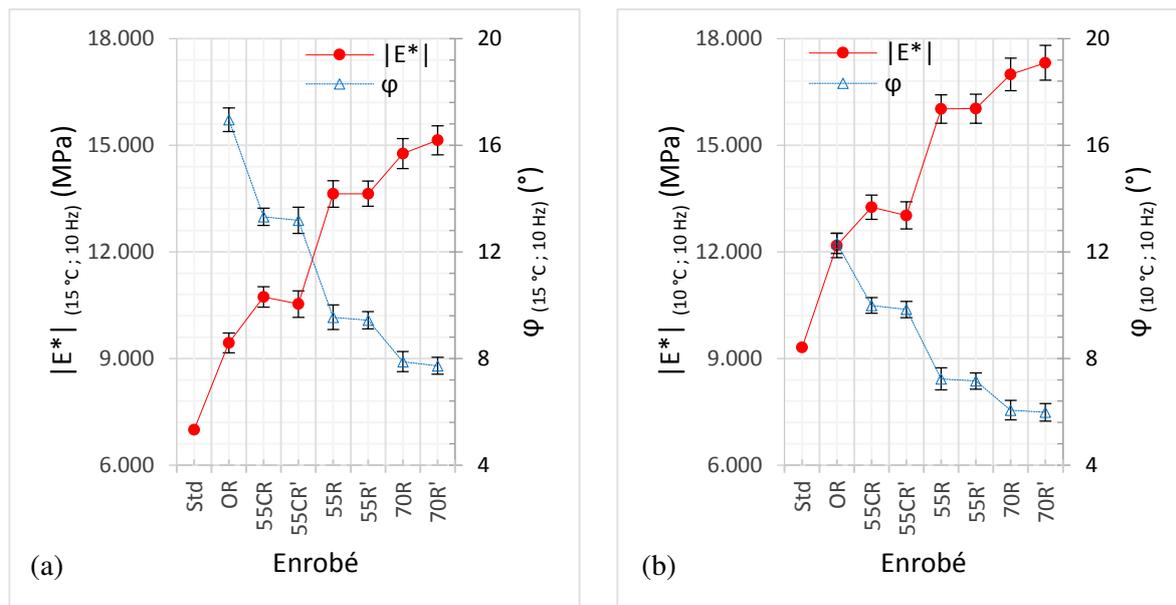


Figure IV-5. Norme du module complexe et angle de phase du BBSG3 : (a) 15 °C, 10 Hz ; (b) 10 °C, 10 Hz.

Les différences de rigidité entre les enrobés à 55 % d'AE (55CR/CR' et 55R/R') s'expliquent par les écarts de pénétrabilité et la nature distincte des bitumes utilisés dans les liants recomposés [41]. On rappelle qu'en fonction de la pénétrabilité, les formules de BBSG3 sont rassemblées en deux groupes : (0R, 55CR, 55CR') d'une part et (0CR, 55R, 55R', 70R, 70R') d'autre part. La formule témoin corrigée (0CR) n'a pas été évaluée en rigidité et en fatigue.

Les effets du taux d'AE et du régénérant sur les variations relatives de la norme du module complexe et sur l'angle de phase sont quantifiés sur la Figure IV-6. Par rapport à la formule de contrôle (0R), on constate que le taux d'AE augmente jusqu'à 50 % la rigidité et diminue entre 21 et 54 % le déphasage. À même taux de recyclage, le régénérant entraîne des variations négligeables des paramètres : jusqu'à 4 % sur la norme du module complexe et 1 % sur l'angle de phase.

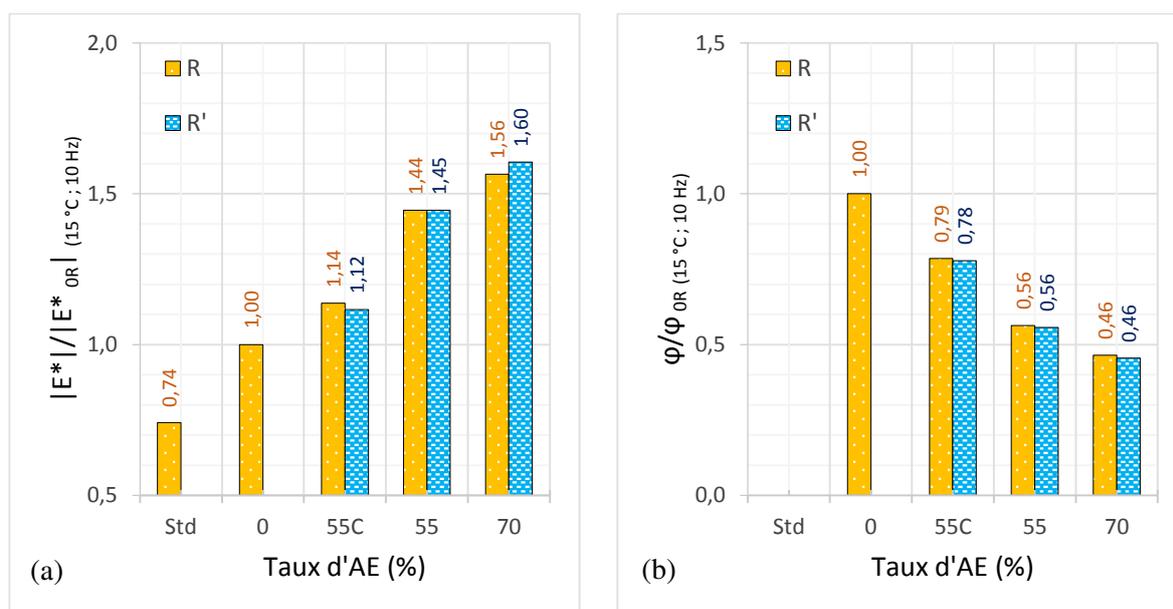


Figure IV-6. Variations relatives des paramètres de rigidité des formules de BBSG3 sous l'effet du taux d'AE et du régénérant : (a) module complexe et (b) angle de phase.

La variation de la norme du module complexe et de l'angle de phase avec la fréquence de sollicitation (à 15 °C) est présentée dans la Figure IV-7. On observe des courbes de forme similaire, classées de manière croissante ($|E^*|$) ou décroissante (φ) en fonction du taux d'AE et une susceptibilité cinétique (pente des courbes) des formules avec AE inférieure à celle de la formule témoin.

L'ensemble des résultats à 10 °C et 15 °C est représenté dans l'espace de Black et le plan de Cole-Cole (Figure IV-8) qui situent la formule témoin au-dessus des formules avec AE. En particulier dans le plan de Cole-Cole on constate une diminution de la composante visqueuse (E_2) avec l'accroissement du taux d'AE, indiquant une moindre dissipation d'énergie pour les enrobés recyclés. Cette diminution de E_2 est compensée par l'augmentation de la composante élastique (E_1) en particulier à haute fréquence (ou aux basses températures).

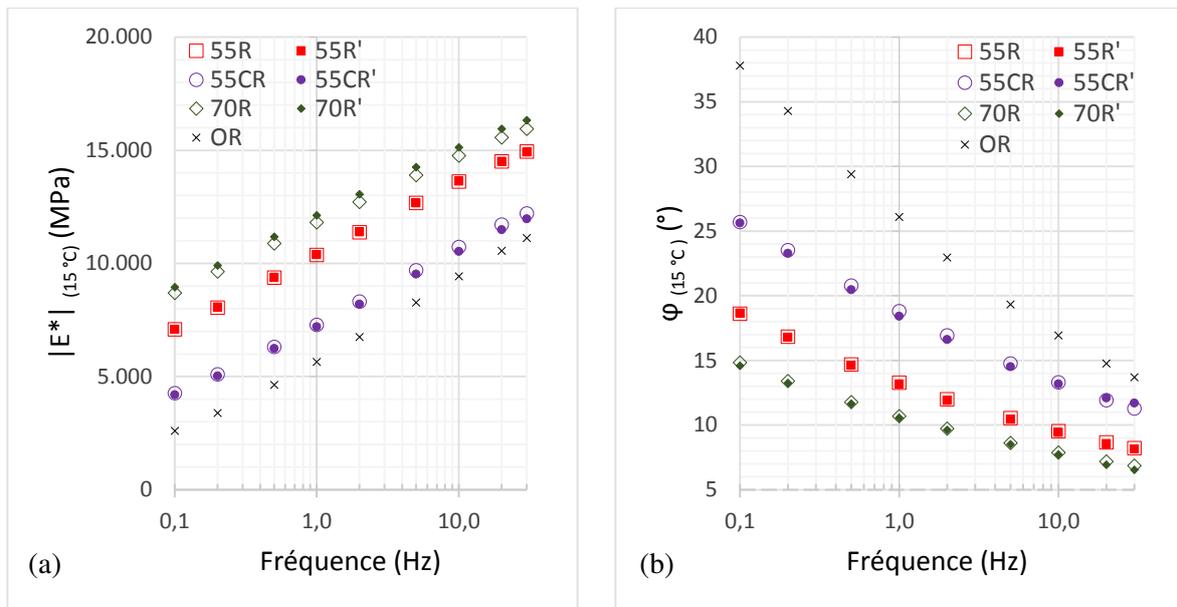


Figure IV-7. Module complexe à 15 °C (BBSG3) : (a) norme du module ; (b) angle de phase.

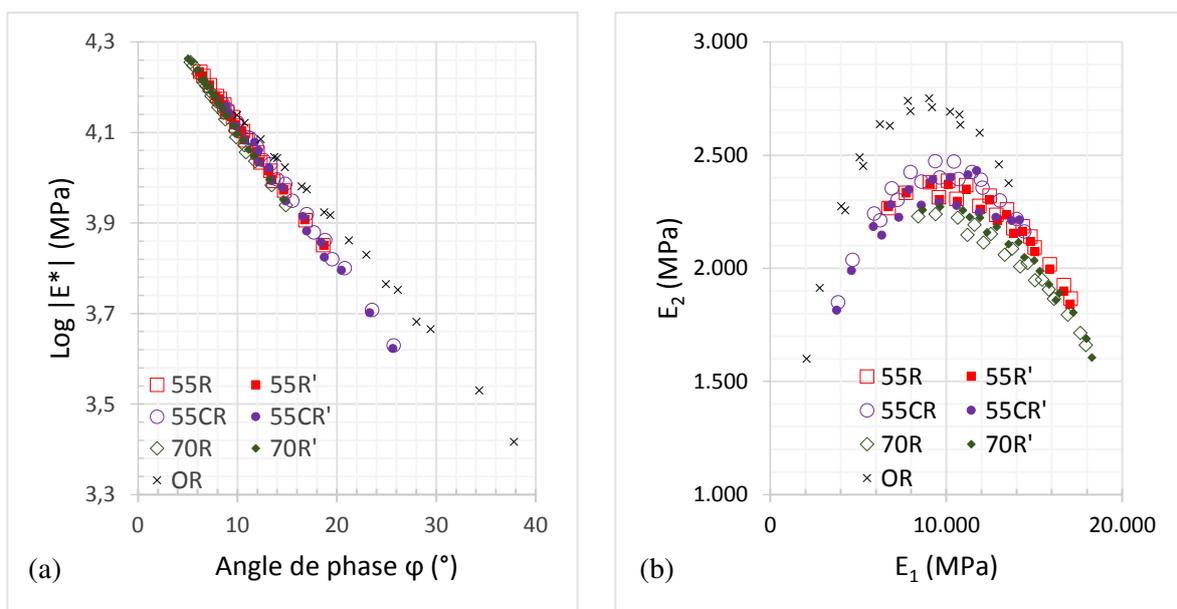


Figure IV-8. Rigidités complexes des formules de BBSG3 dans : (a) l'espace de Black et (b) le plan de Cole-Cole.

2.2.2. Grave-Bitume (GB4)

Les écarts entre la compacité visée pour les plaques et celle mesurée sur les éprouvettes (annexe C), nous ont conduit à déterminer le module complexe sur des échantillons à 4,5 % de vides (Tableau IV-2), valeur légèrement inférieure aux spécifications (entre 5 et 8 % de vides) [32] [186]. Des essais complémentaires ont également été effectués sur des éprouvettes à 6 % de vides (Tableau IV-3).

Tableau IV-2. Rigidité des formules de GB4 à 4,5 % de vides (10 °C & 15 °C ; 10 Hz).

Paramètres	Formules						
	OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Vides moyens (%)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,6	4,5
Écart-type (%)	0,3	0,7	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2
$ E^* $ (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	15584	20468	20236	20730	19922	21783	21455
φ (10 °C ; 10 Hz) (degrés)	9,8	6,9	7,0	6,7	6,8	5,7	5,7
E_1 (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	15358	20321	20086	20587	19780	21676	21348
E_2 (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	2645	2451	2458	2428	2371	2162	2139
$ E^* $ (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	12285	17548	17332	17751	17105	19093	18844
φ (15 °C ; 10 Hz) (degrés)	13,1	9,1	9,2	8,9	8,9	7,3	7,3
E_1 (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	11965	17325	17108	17535	16898	18936	18689
E_2 (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	2785	2787	2781	2757	2657	2439	2410

Tableau IV-3. Rigidité des formules de GB4 à 6 % de vides (10 °C et 15 °C ; 10 Hz).

Paramètres	Formules						
	OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Vides moyens (%)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Écart-type (%)	0,3	0,7	0,3	0,3	0,4	0,3	0,2
$ E^* $ (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	14924	19727	19620	19292	19128	20721	20712
φ (10 °C ; 10 Hz) (degrés)	9,8	6,8	7,0	6,7	6,8	5,7	5,8
E_1 (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	14707	19588	19475	19159	18993	20619	20607
E_2 (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	2535	2341	2382	2262	2267	2054	2084
$ E^* $ (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	11965	16850	16749	16535	16189	18202	18028
φ (15 °C ; 10 Hz) (degrés)	12,9	9,1	9,3	8,9	9,1	7,4	7,5
E_1 (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	11661	16635	16530	16334	15988	18052	17876
E_2 (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	2679	2679	2700	2567	2547	2330	2339

La variation relative des paramètres de rigidité des formules de GB4 avec la compacité (Figure IV-9) montre une légère augmentation (jusqu'à 5 %) de la norme du module complexe quand le pourcentage de vides diminue, comme dans [42] [176]. La faible variation de l'angle de phase n'est pas significative.

Pour des raisons de cohérence avec les résultats de fatigue, on limite ici l'analyse des résultats aux échantillons à 4,5 % de vides ; l'ensemble des courbes pour la teneur en vides de 6 % est présenté dans l'annexe C.

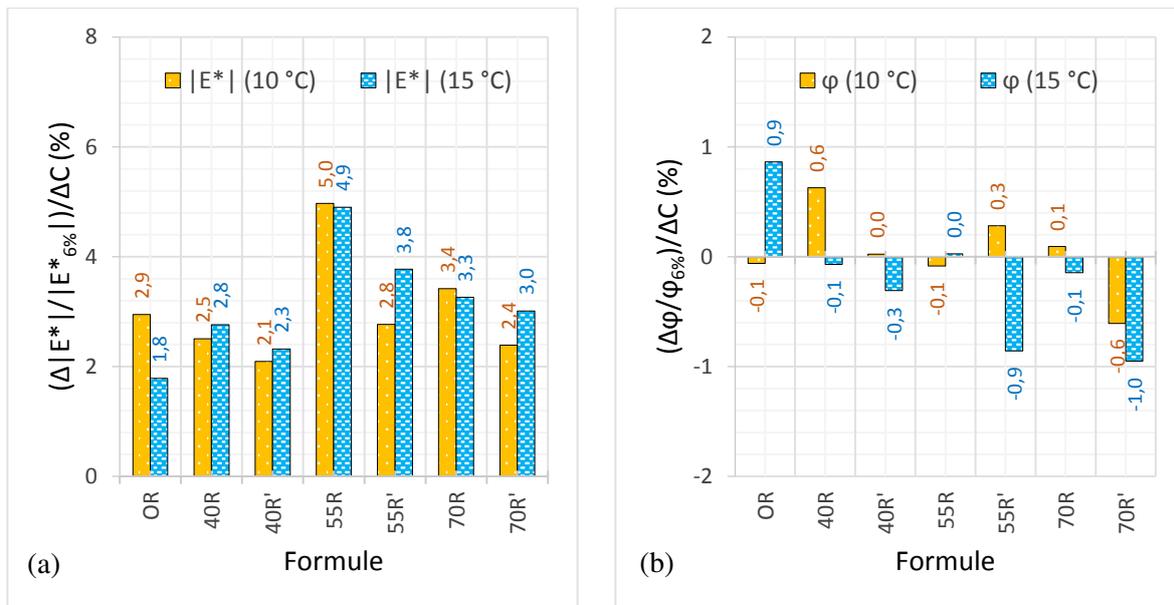


Figure IV-9. Variation des paramètres de rigidité avec la compacité : (a) norme du module complexe ; (b) angle de phase.

De même que pour le BBSG3, les AE produisent une augmentation significative de la norme du module complexe et une diminution couplée de l'angle de phase comparées aux valeurs conventionnelles et à celles de la formule témoin (Figure IV-10). Sous l'effet du régénérant une légère diminution de la norme du module complexe est observée, de l'ordre de la précision de mesure.

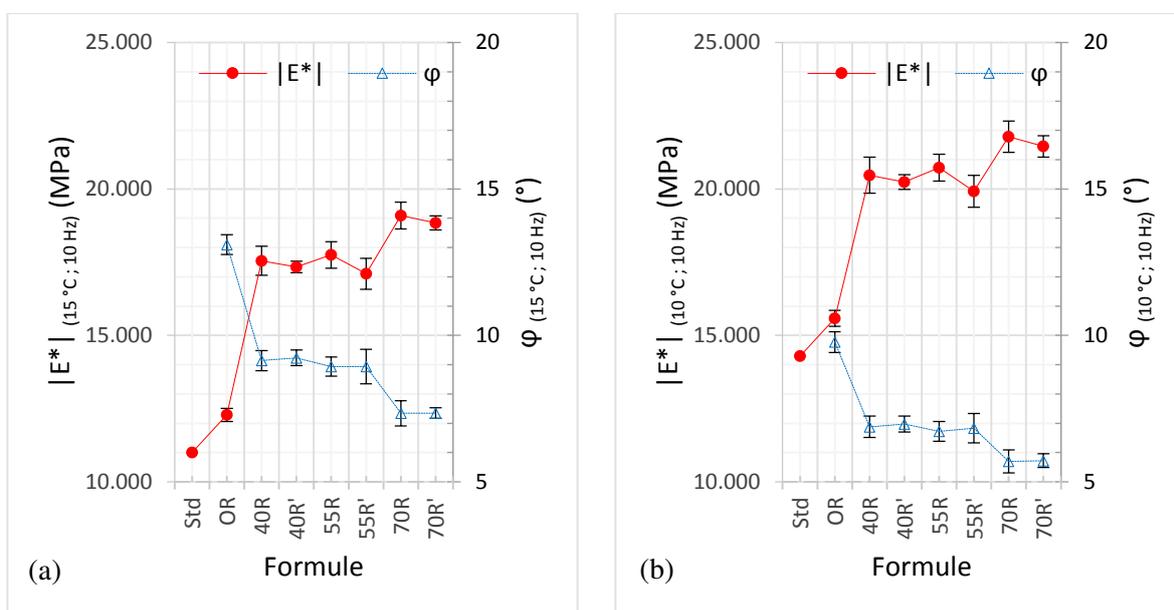


Figure IV-10. Norme du module complexe et angle de phase des formules de GB4 (4,5 % de vides) : (a) 15 °C et 10 Hz ; (b) 10 °C et 10 Hz.

En termes de variations relatives (Figure IV-11) l'augmentation de la norme du module complexe due aux AE atteint +55 % et la réduction de l'angle de phase -44 %. En comparaison, la diminution du module complexe due au régénérant est négligeable (entre 2 et 5 %), comme déjà observé ailleurs [83] [166].

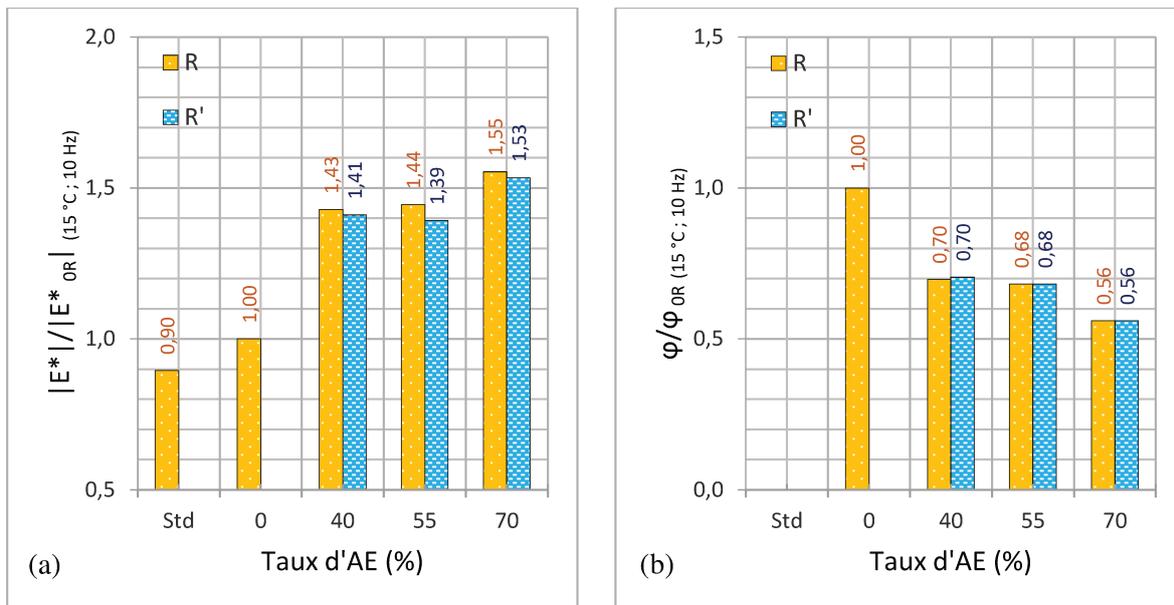


Figure IV-11. Variations relatives des paramètres de rigidité des formules de GB4 sous l'effet du taux d'AE et du régénérant : (a) module complexe et (b) angle de phase.

La Figure IV-12 présente la variation de la norme du module complexe et de l'angle de phase avec la fréquence de sollicitation (4,5 % de vides). On observe comme précédemment un classement des différentes courbes selon le taux d'AE, avec ici des valeurs très proches des formules à 40 et 55 %.

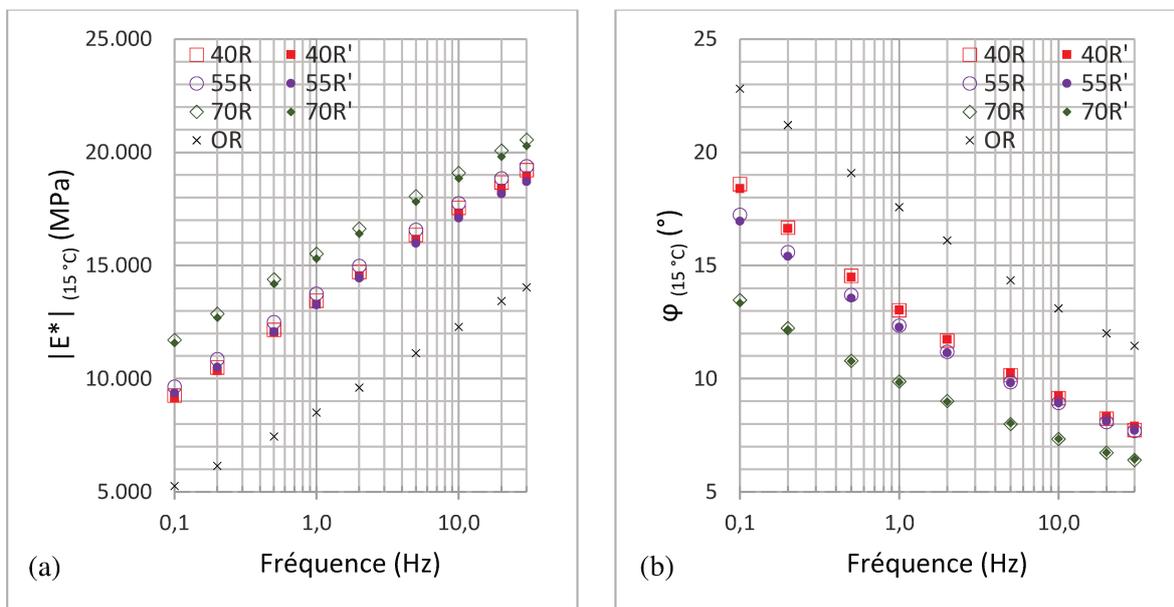


Figure IV-12. Rigidité complexe à 15 °C (GB4) : (a) norme du module ; (b) angle de phase.

Dans les plans de Black et de Cole-Cole, à l'inverse des formules de BBSG3, les courbes des formules avec recyclés se situent ici majoritairement au-dessus de celle de la formule témoin (Figure IV-13). Dans le plan de Cole-Cole des formules avec recyclés (Figure IV-13b) une diminution de la composante visqueuse avec l'accroissement du taux d'AE est constatée, accompagnée d'une augmentation de la composante élastique apportée par la rigidité des AE tel qu'observé dans [41]. Le régénérant entraîne principalement une diminution de la composante visqueuse.

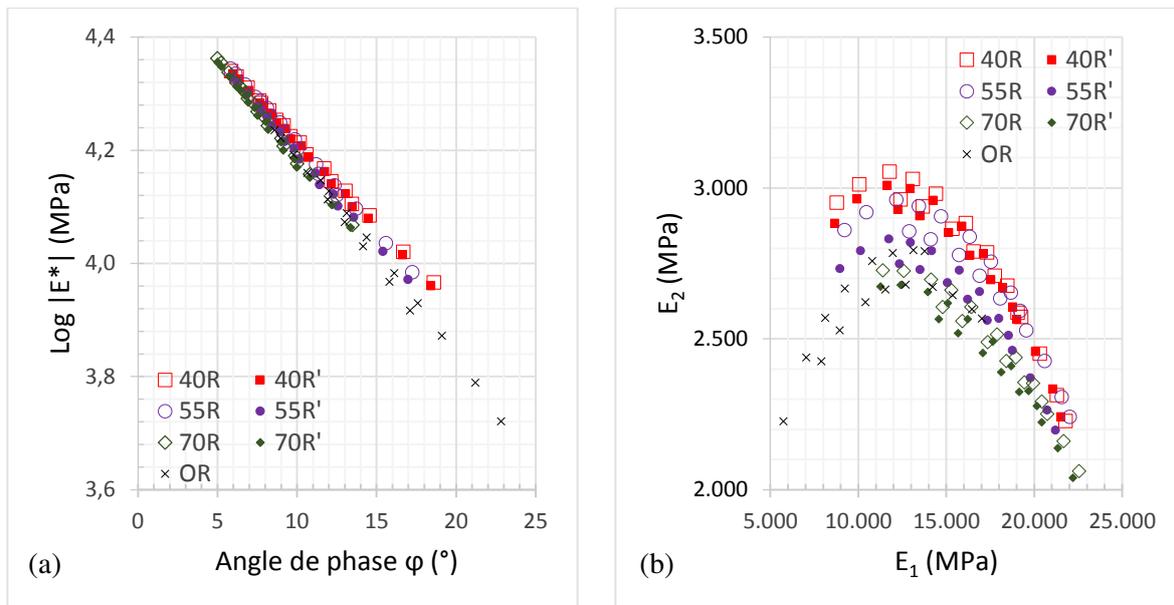


Figure IV-13. Rigidités complexes des formules de GB4 dans : (a) l'espace de Black et (b) le plan de Cole-Cole.

2.2.3. Enrobé à Module Élevé (EME2)

Les paramètres de rigidité des formules d'EME2 sont présentés dans le Tableau IV-4 ; les résultats pour l'ensemble de fréquences sont consignés dans l'annexe C. Le pourcentage de vides des éprouvettes est conforme aux exigences pour ce type de matériau (3 à 6 %) [32].

De même que pour le BBSG3, on constate, pour les deux températures testées, une augmentation de la norme du module complexe et une diminution de l'angle de phase avec le taux croissant d'AE (Figure IV-5) en particulier aux taux de 55 % et 70 % [152] [169] [177]. L'ajout du régénérant réduit légèrement la rigidité apportée par les AE [83] [166].

Tableau IV-4. Paramètres de rigidité de l'EME2 (10 et 15 °C ; 10 Hz).

Paramètres	Formules						
	OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Vides moyens (%)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Écart-type (%)	0,2	0,5	0,4	0,8	0,3	0,4	0,2
$ E^* $ (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	18392	18859	18728	20666	20164	21374	20998
ϕ (10 °C ; 10 Hz) (degrés)	7,2	6,1	6,3	4,9	5,1	4,2	4,8
E_1 (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	18245	18753	18616	20591	20084	21316	20926
E_2 (10 °C ; 10 Hz) (MPa)	2319	1993	2043	1756	1791	1583	1741
$ E^* $ (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	15544	16443	16178	18480	17976	19252	18836
ϕ (15 °C ; 10 Hz) (degrés)	9,7	7,7	8,0	6,1	6,4	5,3	5,9
E_1 (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	15322	16297	16020	18375	17865	19170	18736
E_2 (15 °C ; 10 Hz) (MPa)	2621	2189	2254	1968	2002	1777	1940

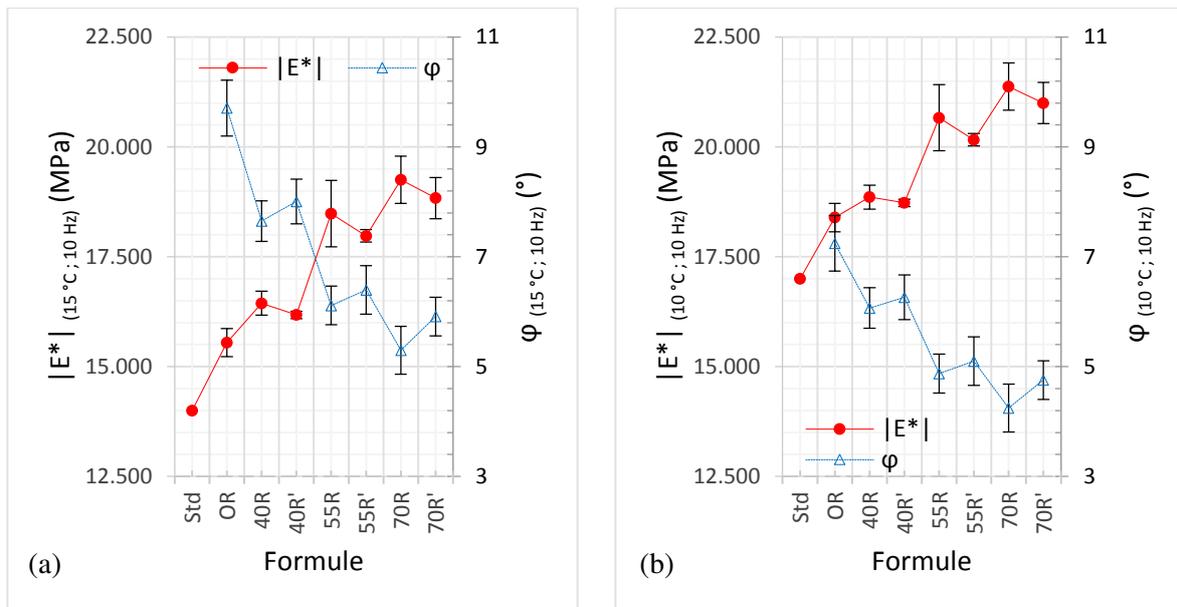


Figure IV-14. Norme du module complexe et angle de phase des formules d'EME2 : (a) 15 °C & 10 Hz ; (b) 10 °C & 10 Hz.

En termes relatifs (Figure IV-15) les AE augmentent la rigidité complexe des mélanges jusqu'à 24 %, et réduisent l'angle de phase jusqu'à 45 %. Le régénérant produit de faibles variations de la norme du module complexe (-2 à -3 %), et de l'angle de phase (+3 à +6 %).

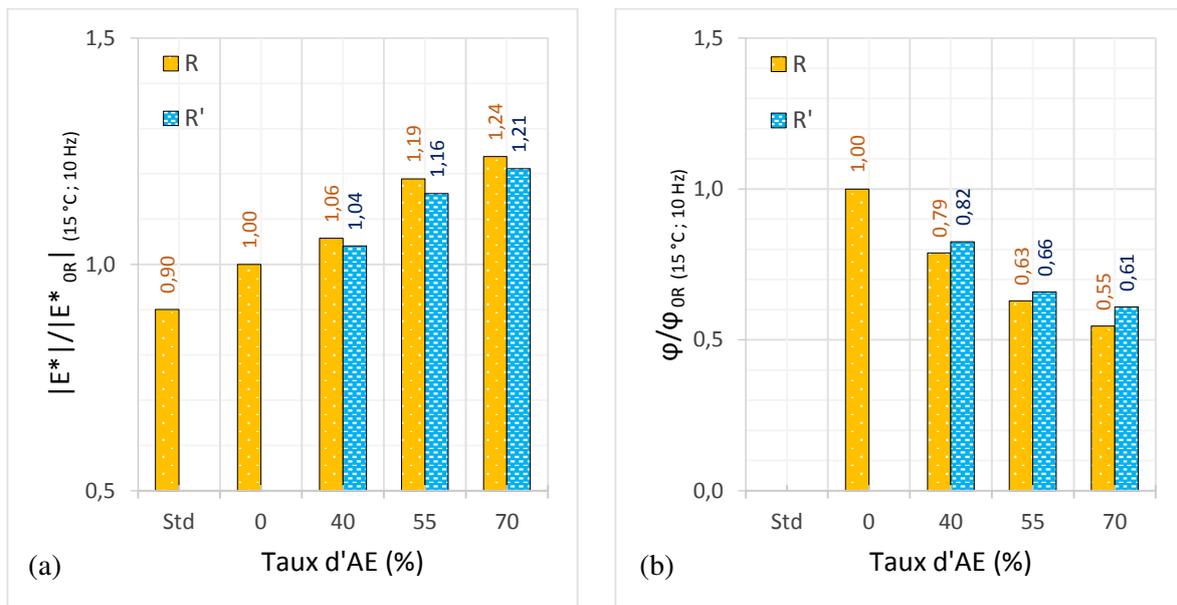


Figure IV-15. Variations relatives des paramètres de rigidité des formules d'EME2 sous l'effet du taux d'AE et du régénérant : (a) module complexe et (b) angle de phase.

Les variations de la norme du module complexe et de l'angle de phase avec la fréquence de sollicitation (Figure IV-16) suivent les mêmes tendances que celles du BBSG3, avec une susceptibilité cinétique (variation avec la fréquence de sollicitation) des formules avec AE inférieure à celle de la formule témoin. La variation de l'angle de phase avec la fréquence de sollicitation est beaucoup moins importante que dans le cas du BBSG3 et de la GB4, ce qui peut être expliqué par les consistances assez proches des liants recomposés des formules d'EME2.

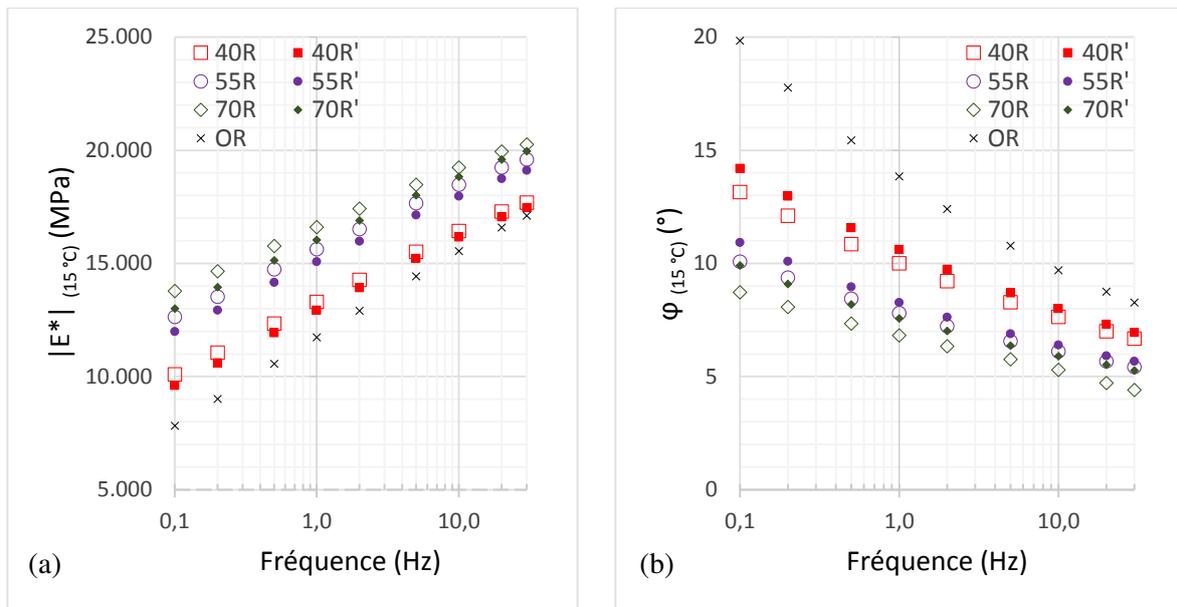


Figure IV-16. Rigidité complexe à 15 °C (EME2) : (a) norme du module ; (b) angle de phase.

Dans l'espace de Black (Figure IV-17a) et le plan Cole-Cole (Figure IV-17b), les tendances observées sont identiques à celles du BBSG3, avec des valeurs de la norme du module complexe plus élevées et de l'angle de phase plus faibles, c'est-à-dire avec un caractère élastique plus marqué.

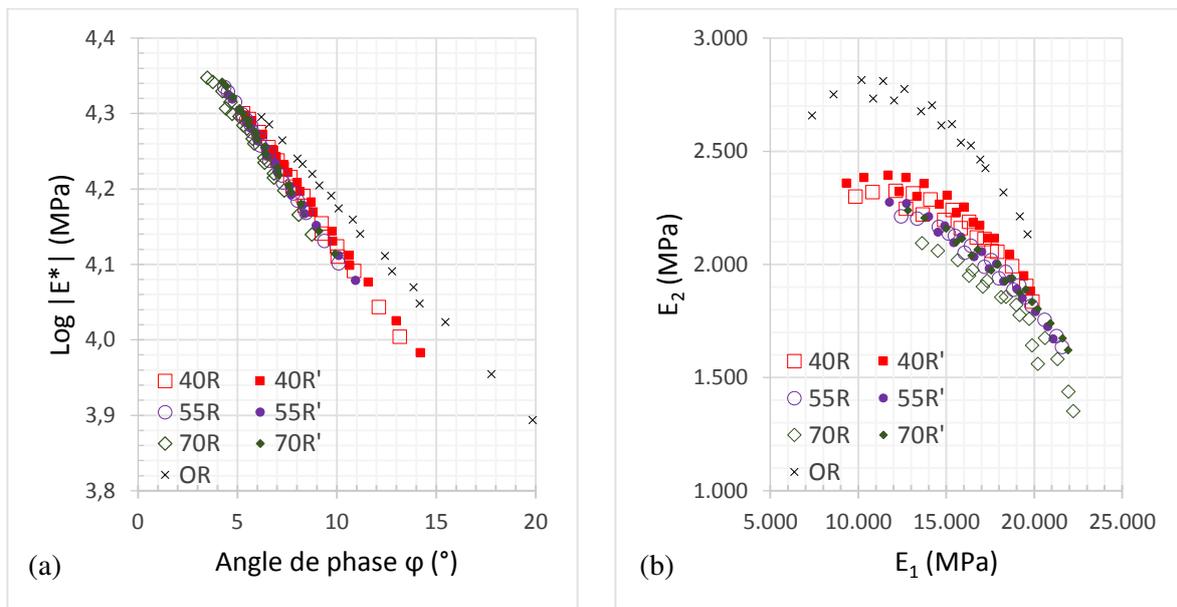


Figure IV-17. Rigidités complexes des formules d'EME2 dans : (a) l'espace de Black et (b) le plan de Cole-Cole.

3. RÉSISTANCE À LA FATIGUE

3.1. PARAMÈTRES D'ESSAI

La résistance à la fatigue a été déterminée à une température de 10 °C et à une fréquence de 25 Hz. Les essais sur chaque formule d'enrobé sont réalisés sur 3 lots de 6 éprouvettes, testées en flexion deux points (2PB-TR) à déformation imposée [40].

3.2. ANALYSE DES RÉSULTATS

3.2.1. Béton Bitumineux (BBSG3)

Le Tableau IV-5 présente les paramètres de résistance à la fatigue pour le BBSG3, calculés à partir des mesures réalisées sur l'ensemble des éprouvettes (Figure IV-18).

Tableau IV-5. Paramètres de résistance à la fatigue du BBSG3 (10 °C ; 25 Hz).

Paramètres de fatigue	Formules						
	OR	55R	55R'	55CR	55CR'	70R	70R'
Vides moyens (%)	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Écart-type (%)	0,5	0,3	0,5	0,6	0,5	0,3	0,3
ε_6 (10 °C ; 25 Hz) ($\mu\text{m}/\text{m}$)	115,2	141,1	152,4	133,5	136,1	154,2	162,8
Indice de qualité $\Delta\varepsilon_6$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	4,3	5,3	5,6	6,0	6,1	5,0	6,1
Pente régression 1/b	-5,1	-5,1	-6,0	-6,5	-6,4	-5,6	-6,3
Pente Wöhler (b)	-0,20	-0,20	-0,17	-0,15	-0,16	-0,18	-0,16
Écart-type résiduel S_N	0,140	0,136	0,194	0,262	0,266	0,162	0,178

Les droites de fatigue, exprimées ici sous la forme $N = f(\varepsilon)$, présentées sur la Figure IV-18, montrent une augmentation systématique de la résistance à la fatigue avec le taux de recyclage, comme constaté dans [42] et [45], laquelle est améliorée par la régénération, tel qu'indiqué dans [148].

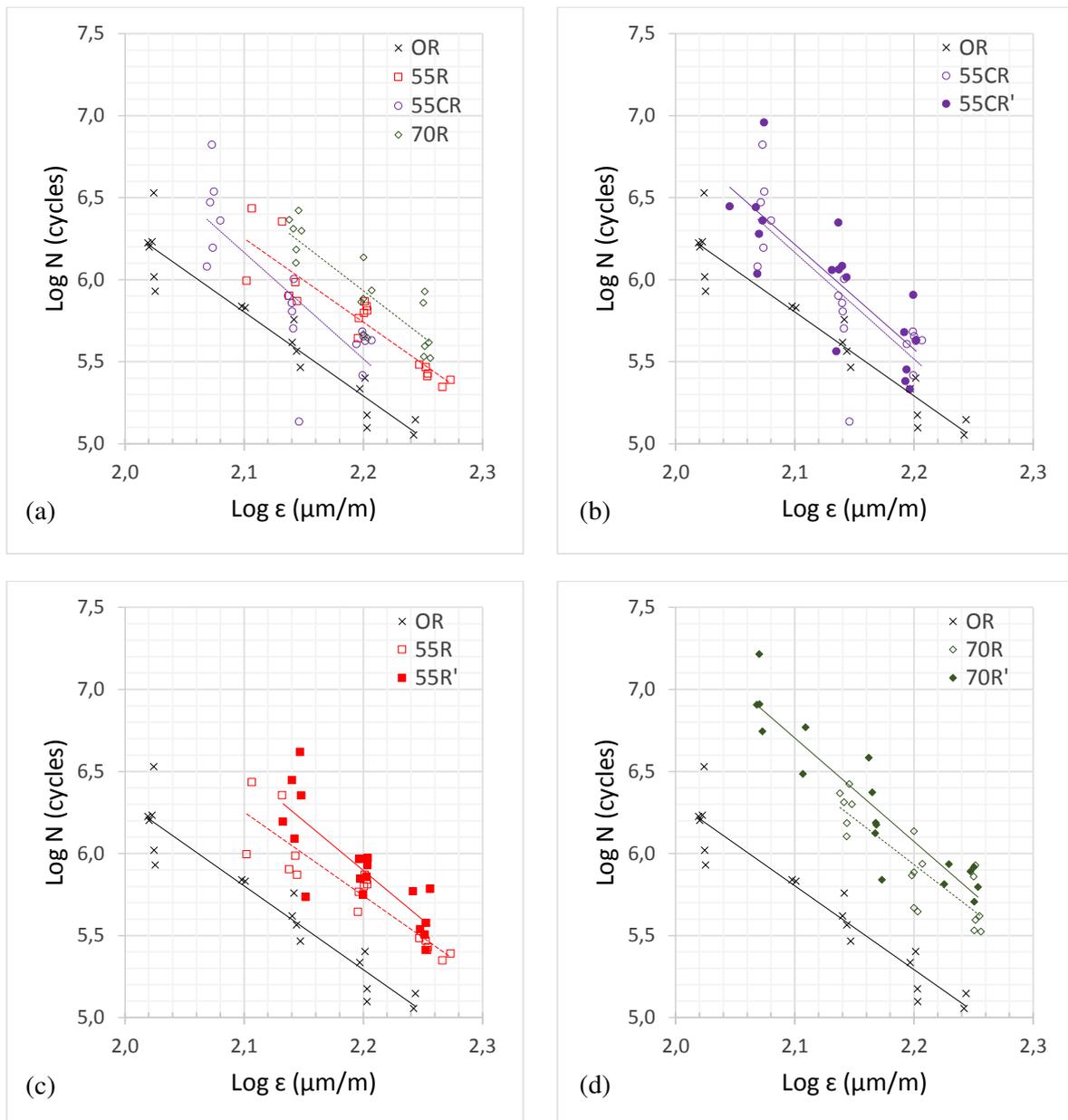


Figure IV-18. Courbes de fatigue des formules de BBSG3. (a) : *effet du taux d'AE* ; (b), (c) & (d) : *effet du régénérant (en trait plein)*.

L'effet favorable de l'incorporation d'AE (hors régénérant) sur les valeurs de ϵ_6 (Figure IV-19) déjà montré dans [108] [168] [169] [181], est lié au procédé de fabrication des enrobés qui favorise l'homogénéité du mélange [5] [93] [104] [120]. Contrairement aux observations de Renken [182], les formules à très fort taux s'avèrent ici les plus performantes en fatigue. Par ailleurs, les valeurs de la pente b des formules avec recyclés s'avèrent supérieures à celles des formules témoin et standard. Ces résultats rejoignent ceux de Copeland [115], et ceux de [41] [163] [171] [178].

Le régénérant produit une amélioration systématique de ϵ_6 liée au processus chimico-réactionnel, tel que reporté dans [41] [83] [165] [166], et une augmentation globale de la pente b qui se traduit par une courbe de fatigue plus plate dans la représentation de Wöhler ($\epsilon = f(N)$).

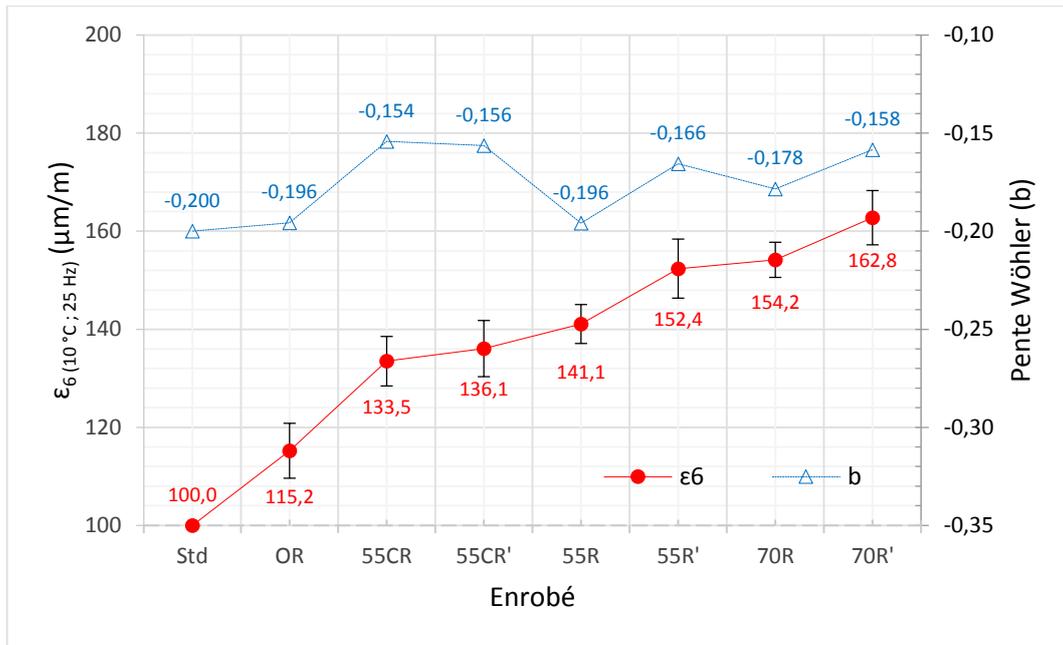


Figure IV-19. Paramètres conventionnels de la résistance à la fatigue (BBSG3).

En termes de variation relative des paramètres de fatigue par rapport à la formule témoin (Figure IV-20), le recyclage augmente la valeur de ϵ_6 jusqu'à 34 % et réduit celle de b (en valeur absolue) jusqu'à 21 %. Dans le cas des formules régénérées, par rapport à la formule de contrôle, on constate un gain sur ϵ_6 de l'ordre de 18 à 41 % et une variation de la pente b jusqu'à 20 %.

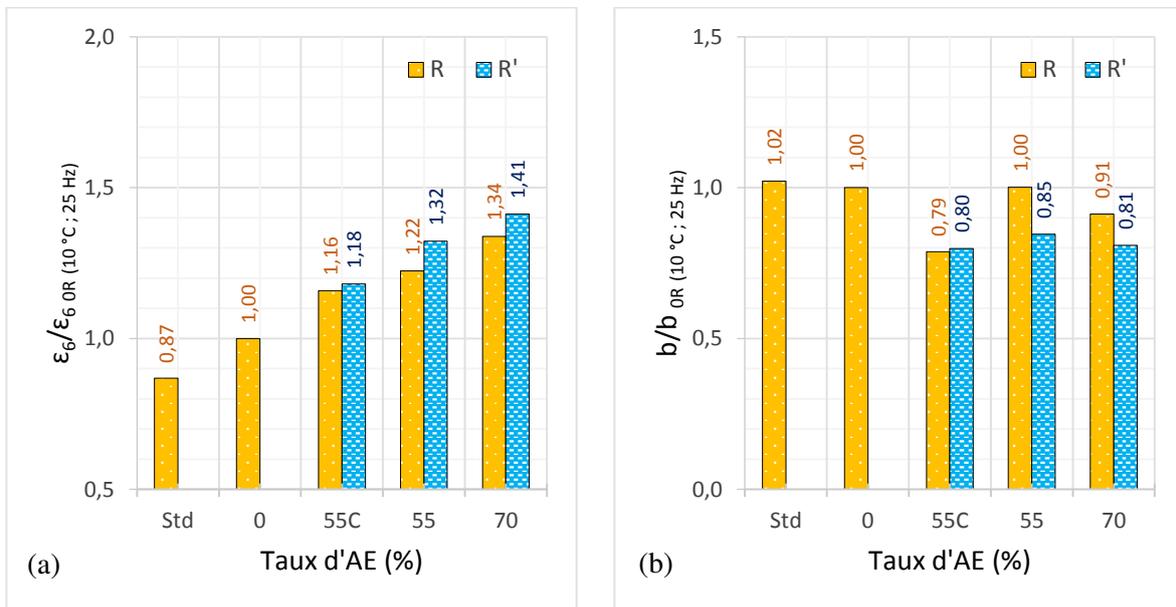


Figure IV-20. Effets des AE et du régénérant sur les formules de BBSG3 : (a) ϵ_6 et (b) pente b .

3.2.2. Grave-Bitume (GB4)

La résistance à la fatigue des formules de GB4 a été déterminée sur des éprouvettes avec une teneur en vides assez faible (4,5 %), mais une évaluation de la valeur de ϵ_6 a été également effectuée à une teneur en vides de 6 %, conforme aux normes européennes [32]. (Tableau IV-6). À cette fin, des essais supplémentaires ont été réalisés sur une série de 6 éprouvettes à 6 % de vides, avec une déformation imposée égale à celle de ϵ_6 obtenue sur les échantillons à 4,5 % de

vides. Une nouvelle valeur ε_6 à 6 % de vides est alors calculée à partir de l'équation de la droite de fatigue de type $N = f(\varepsilon)$ obtenue à 4,5 % de vides, en supposant que la pente b ne varie pas avec la compacité.

Tableau IV-6. Paramètres de résistance à la fatigue de la GB4 (10 °C ; 25 Hz).

Paramètres de fatigue	Formules						
	OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Vides moyens (%)	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Écart-type (%)	0,3	0,5	0,4	0,3	0,3	0,2	0,2
ε_6 (10 °C ; 25 Hz) ($\mu\text{m}/\text{m}$)	154,8	135,9	139,0	145,4	149,5	150,4	163,0
Indice de qualité $\Delta\varepsilon_6$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	5,6	5,0	5,7	4,0	6,0	3,6	5,6
Pente régression $1/b$	-7,0	-6,7	-6,9	-6,6	-5,6	-8,3	-6,0
Pente Wöhler (b)	-0,14	-0,15	-0,15	-0,15	-0,18	-0,12	-0,17
Écart-type résiduel S_N	0,214	0,187	0,209	0,135	0,186	0,156	0,182
Vides (%)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Écart-type (%)	0,6	0,3	0,2	0,5	0,4	0,2	0,7
ε_6 (10 °C ; 25 Hz) ($\mu\text{m}/\text{m}$)	147,5	131,9	130,5	138,6	137,1	148,0	160,0

On observe une bonne corrélation entre ε_6 à 4,5 % et à 6 % de vides (Figure IV-21a) ; la variation relative de ε_6 par rapport à la compacité est de 1 à 6 % selon la formule (Figure IV-21b), ce qui n'obéit pas à la relation linéaire proposée par Moutier [42].

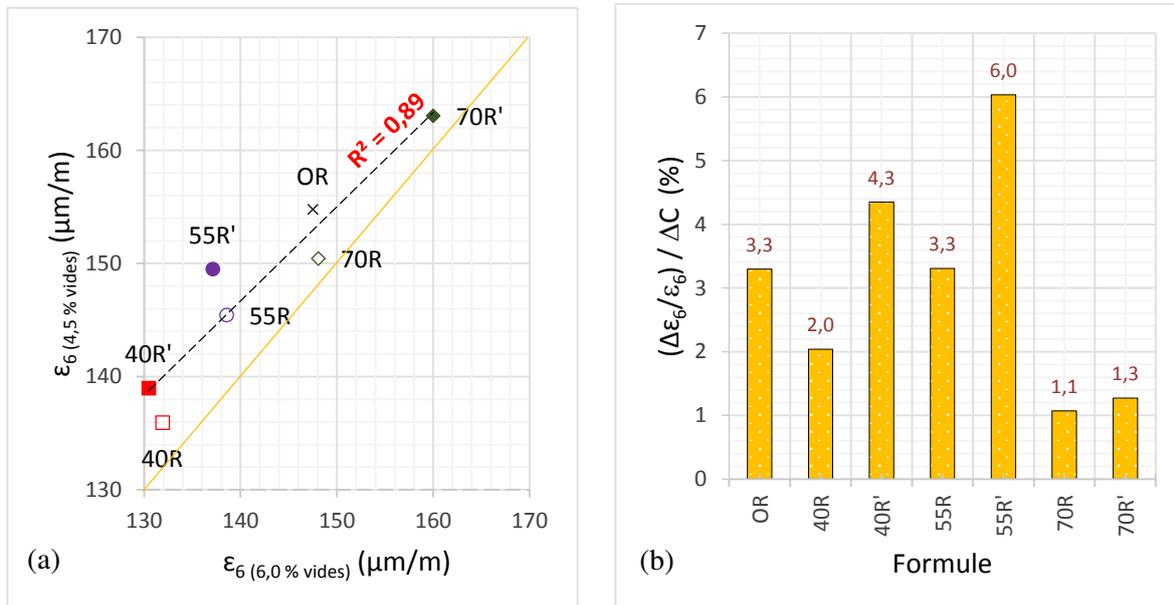


Figure IV-21. Variation de ε_6 avec la compacité (GB4) : (a) valeurs mesurées ; (b) variations relatives.

Les courbes de fatigue de l'ensemble des éprouvettes à 4,5 % de vides sont présentées sur la Figure IV-22. Bien que la résistance à la fatigue des formules avec recyclés soit améliorée avec le taux d'AE, la formule de contrôle reste la plus performante. De même que pour le BBSG3, le régénérant améliore les performances en fatigue, surtout à très fort taux d'AE (70R').

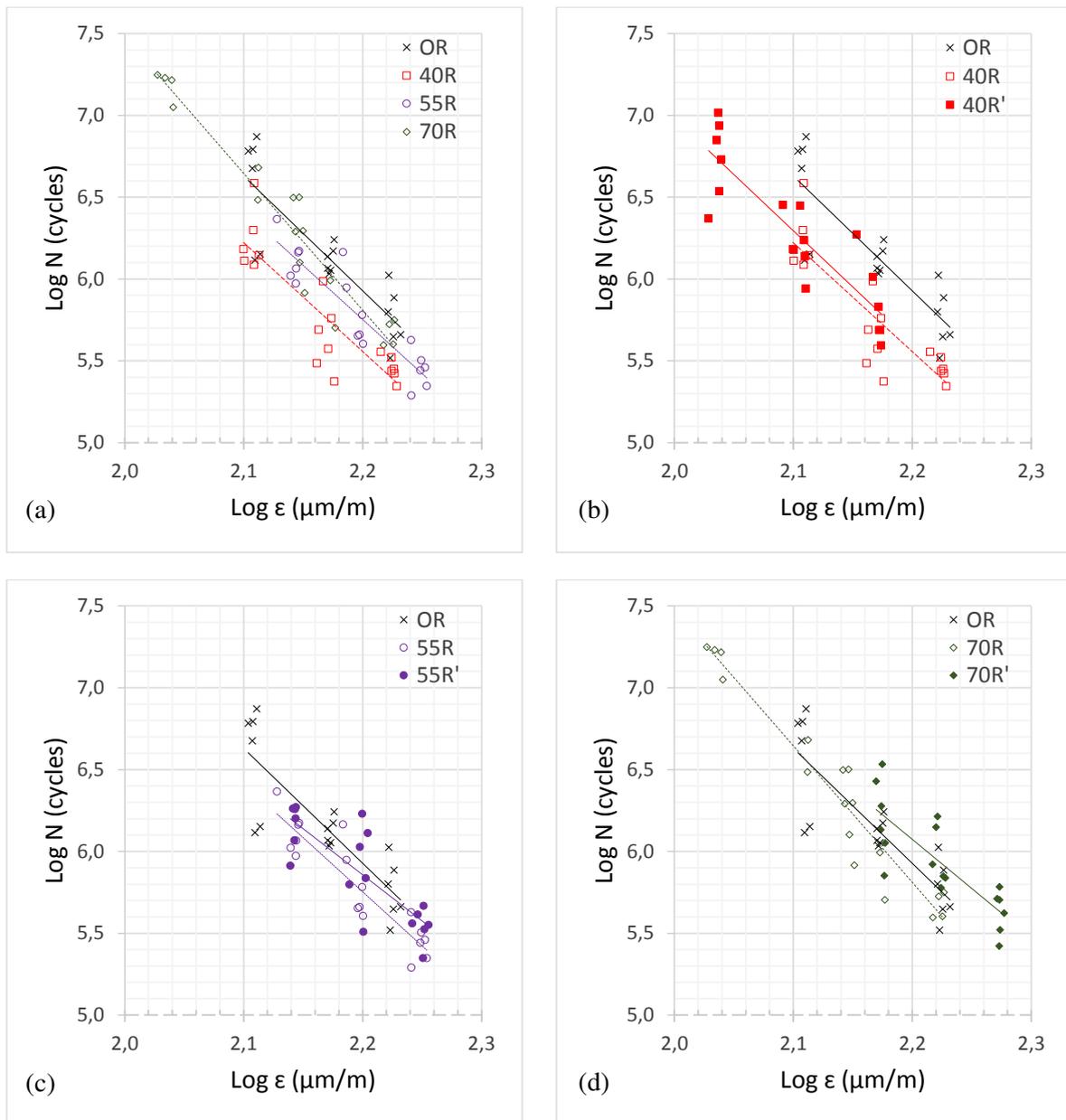


Figure IV-22. Courbes de fatigue des formules de GB4. (a) : *effet du taux d'AE* ; (b), (c) & (d) : effet du régénérant (en trait plein).

Les valeurs inférieures du paramètre ϵ_6 des formules avec recyclés, comparées à celles de la formule témoin (Figure IV-23) sont probablement liées à l'origine du bitume d'apport [42] qui présente un taux élevé de fractions cristallisables [45]. Globalement la pente b est indépendante du taux de recyclage ($b_{\text{moyen}} = -0,15$) mais pour chacune des formules, elle est supérieure à celle d'une GB4 conventionnelle ($b = -0,2$).

L'ajout de régénérant améliore ϵ_6 , particulièrement à 70 % d'AE : + 12,6 $\mu\text{m/m}$ par rapport à la formule non régénérée [148] et rapproche la pente b de la valeur conventionnelle.

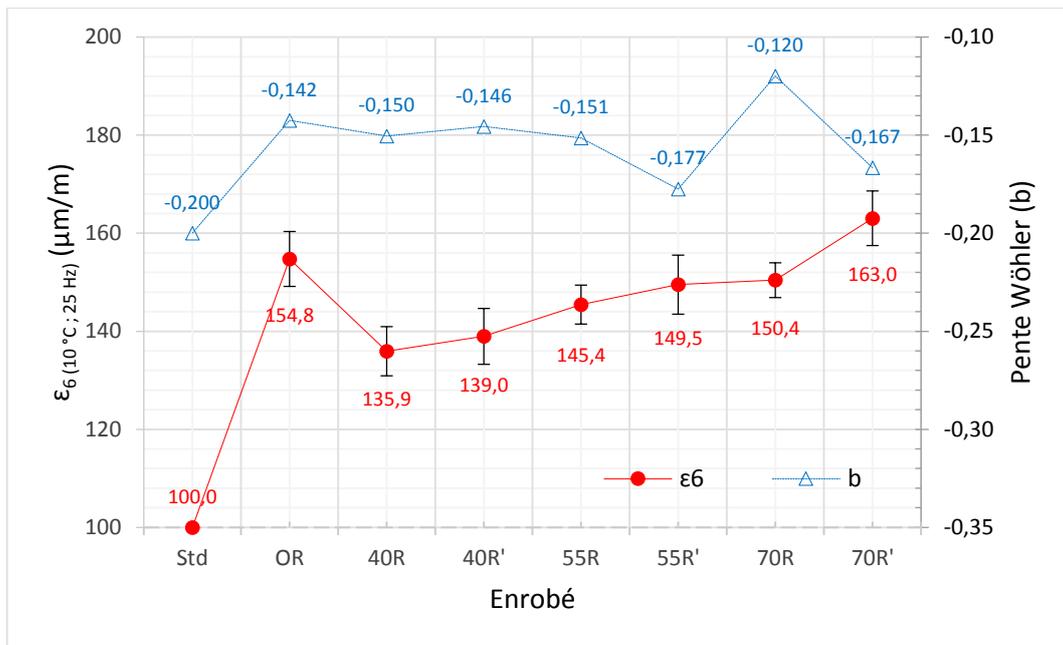


Figure IV-23. Paramètres conventionnels de la résistance à la fatigue (GB4).

Par rapport à la formule témoin (OR), les enrobés avec AE non régénérés présentent des valeurs de ϵ_6 entre 3 et 12 % plus faibles (Figure IV-24a), mais le régénérant compense partiellement les pertes de ϵ_6 (gain de 2 à 8 %). Les effets des AE sur la pente b restent variables entre 6 % d'augmentation et 16 % de réduction ; tandis que le régénérant augmente la pente b (en valeur absolue) jusqu'à 33 % pour la formule à 70 % d'AE.

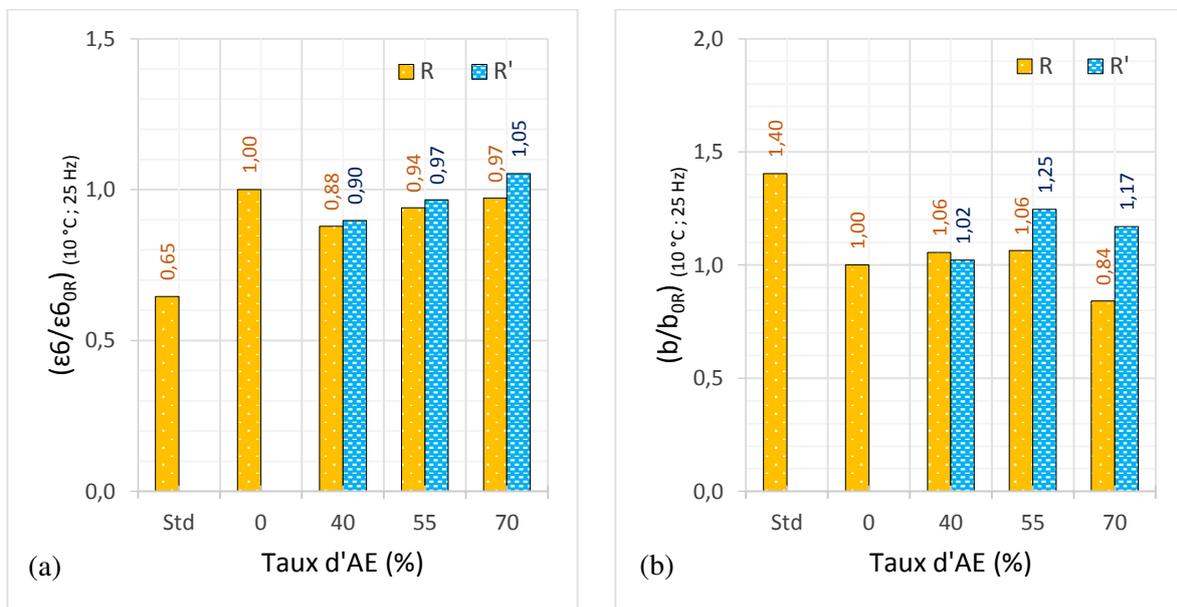


Figure IV-24. Effets du taux d'AE et du régénérant sur les formules de GB4 : (a) ϵ_6 et (b) pente b.

3.2.3. Enrobé à Module Élevé (EME2)

Les paramètres de résistance à la fatigue pour les formules d'EME2 sont résumés dans le Tableau IV-7 [189]. Les droites de fatigue de type $N = f(\epsilon)$ sont présentées dans la Figure IV-25.

Tableau IV-7. Paramètres de résistance à la fatigue de l'EME2 (10 °C ; 25 Hz).

Paramètres de fatigue	Formules						
	OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Vides moyens (%)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Écart-type (%)	0,3	0,3	0,3	0,7	0,2	0,4	0,3
ϵ_6 (10 °C ; 25 Hz) ($\mu\text{m}/\text{m}$)	149,0	172,2	173,3	158,1	172,1	164,2	172,2
Indice de qualité $\Delta\epsilon_6$ ($\mu\text{m}/\text{m}$)	9,3	5,1	5,7	5,7	4,9	5,8	5,9
Pente régression 1/b	-5,5	-6,9	-7,3	-7,7	-7,6	-9,0	-8,4
Pente Wöhler (b)	-0,18	-0,14	-0,14	-0,13	-0,13	-0,11	-0,12
Écart-type résiduel S_N	0,315	0,184	0,219	0,257	0,189	0,270	0,253

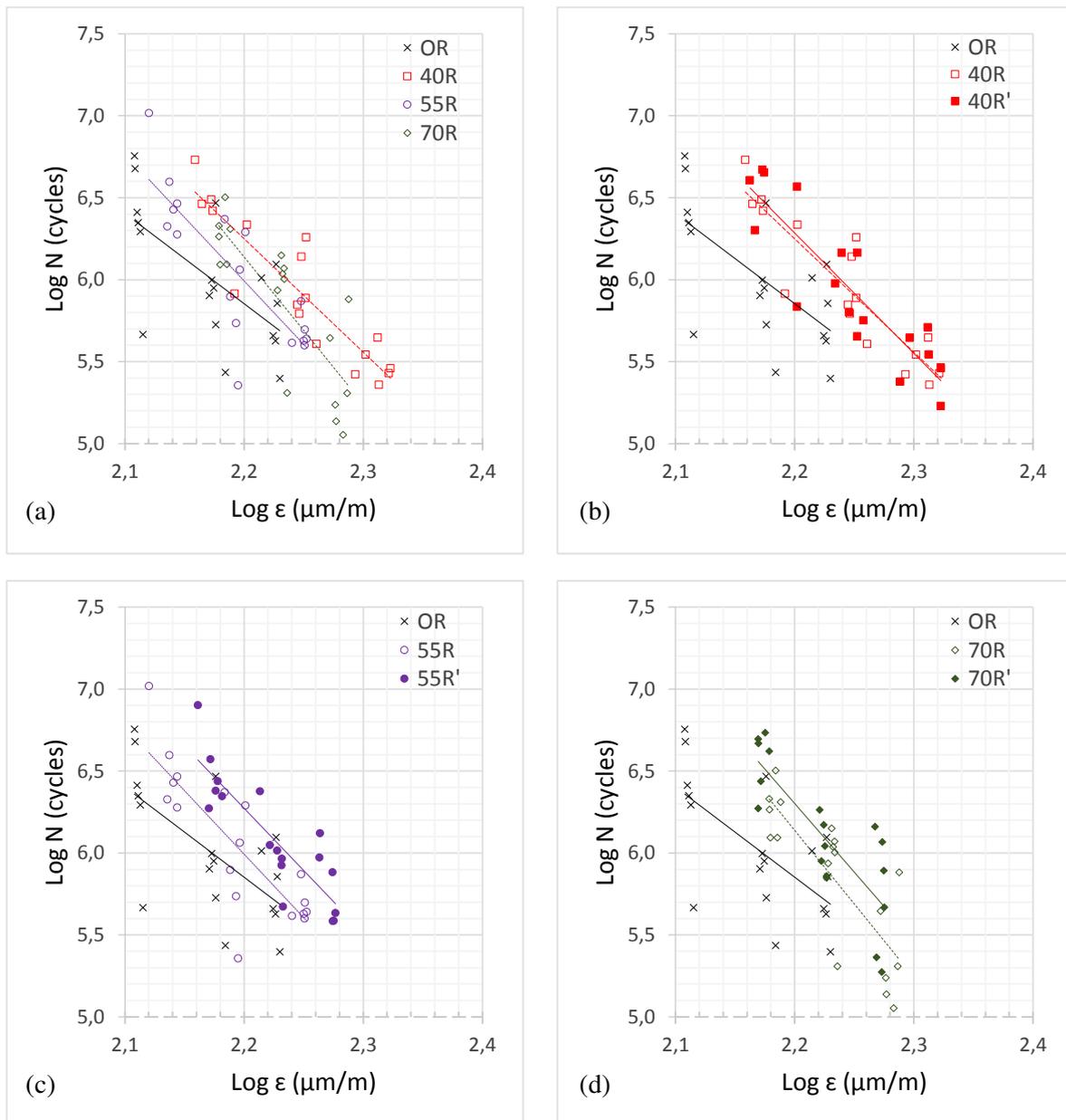


Figure IV-25. Courbes de fatigue des formules d'EME2. (a) : effet du taux d'AE ; (b), (c) & (d) : effet du régénérant (en trait plein).

On constate une dispersion importante des résultats pour la formule de contrôle (0R), malgré une faible dispersion de la teneur en vides [44]. Contrairement aux tendances observées sur les formules avec recyclés de BBSG3 et de GB4, la résistance à la fatigue ne s'améliore pas avec le taux croissant des AE [41] ; cependant, comme avec les formules de BBSG3, les formules d'EME2 avec AE restent plus performantes que la formule témoin. Bien que pour 40 % d'AE le régénérant n'ait pas d'impact, il s'avère favorable à 55 et 70 % de recyclage.

La Figure IV-26 présente les paramètres conventionnels de la résistance à la fatigue pour l'ensemble des formules, y compris un EME2 conventionnel (formule « Std »). On observe que la valeur de ϵ_6 des enrobés recyclés est toujours supérieure à celle de la formule de contrôle et de la valeur conventionnelle [32]. Le taux de croissant de recyclage produit une augmentation de la pente b équivalent à un aplatissement de la courbe de Wöhler $\epsilon = f(N)$ [41] [163] [171] [178].

Le régénérant a un effet positif sur le paramètre ϵ_6 , en augmentant sa valeur jusqu'à 14 $\mu\text{m/m}$ (formule 55R' comparée à 55R) ; ses effets sur la pente b restent faibles.

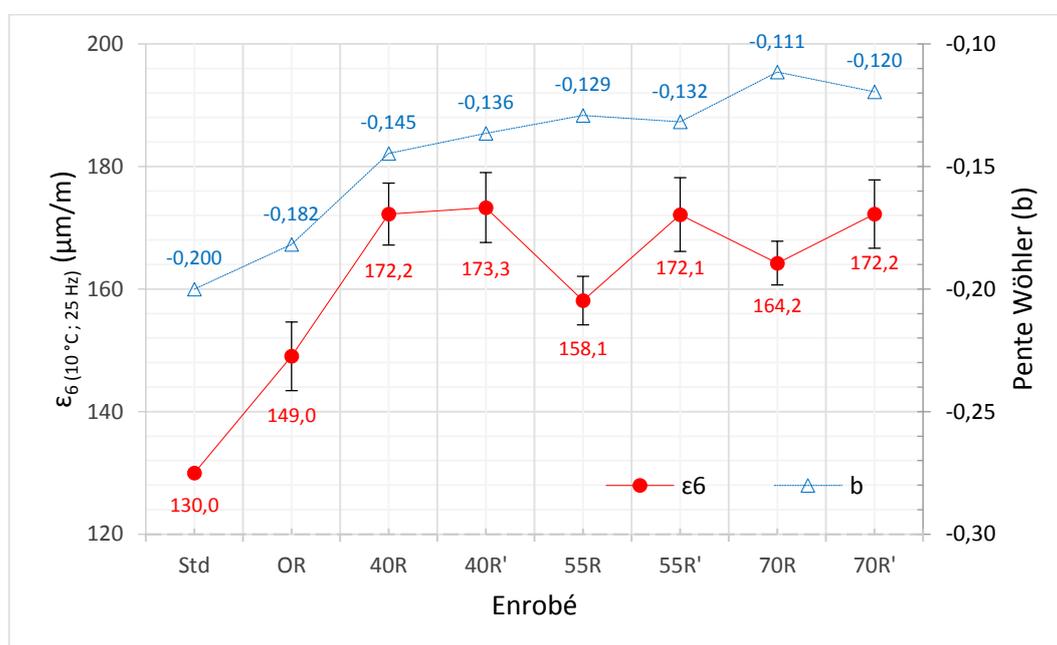


Figure IV-26. Paramètres conventionnels de la résistance à la fatigue (EME2).

En termes de variation relative par rapport à la formule de contrôle (Figure IV-27), les AE augmentent le paramètre ϵ_6 jusqu'à 16 % et diminuent la pente b (en valeur absolue) jusqu'à 39 %. Le régénérant apporte aux formules à 55 et 70 % d'AE un gain sur ϵ_6 de l'ordre de 15 à 16 %, sans variations significatives sur la pente b (inférieures à 5 %).

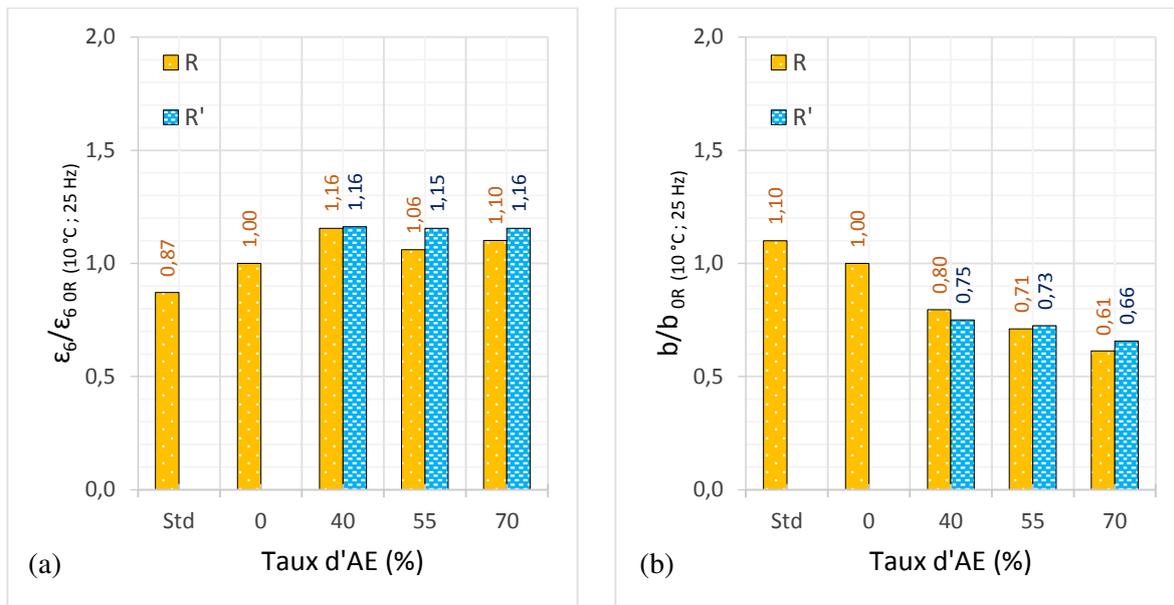


Figure IV-27. Effets des AE et du régénérant sur les formules d'EME2 : (a) ϵ_6 et (b) pente b.

4. TENDANCES GÉNÉRALES

4.1. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS : EFFET DES AE ET DU RÉGÉNÉRANT

Le Tableau IV-8 résume les effets des AE et du régénérant sur les paramètres de rigidité et de fatigue des différentes familles d'enrobés.

Tableau IV-8. Influence des AE et du régénérant : synthèse.

Paramètre		Effets des AE			Effets du régénérant		
		BBSG3	GB4	EME2	BBSG3	GB4	EME2
Rigidité Complexe	$ E^* $	+			=		
	φ	-			=		
Résistance à la Fatigue	ϵ_6	+	-	+	+		
	Pente (b)	+	+/-	+	+	-	+/-

(+) : augmentation ; (=) : négligeable ; (-) : réduction

L'ajout d'AE augmente systématiquement la norme du module complexe et réduit l'angle de phase des mélanges. La valeur de ϵ_6 est aussi améliorée (sauf EME2), avec en général une augmentation de la pente b traduisant un aplatissement de la courbe de Wöhler. Le régénérant impacte peu les valeurs du module complexe et de l'angle de phase, mais améliore le paramètre de fatigue ϵ_6 avec un effet variable sur la pente b des courbes de Wöhler.

4.2. CORRÉLATIONS GÉNÉRALES

4.2.1. Entre paramètres de niveaux N3 et N4

Les fortes corrélations (Figure IV-28) qui relient les modules complexes et les angles de phase aux deux températures d'essai, s'avèrent uniques quelles que soient les formules et les familles d'enrobés, du fait de la rhéologie des liants, et en dépit des propriétés des granulats.

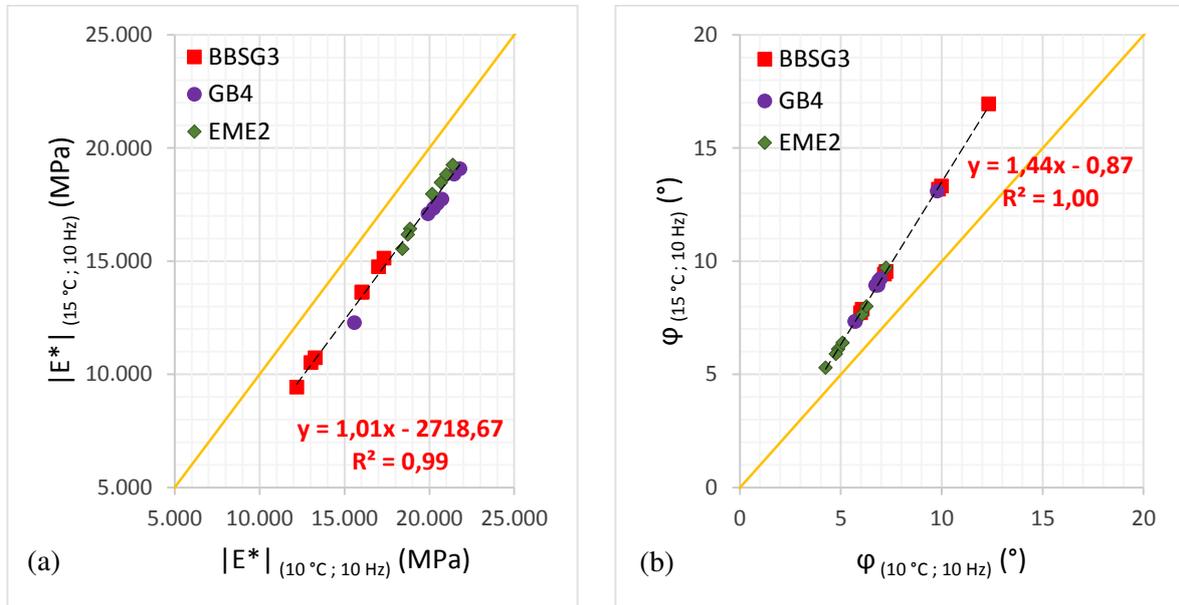


Figure IV-28. Corrélations entre paramètres de rigidité aux deux températures d'essai : (a) norme du module complexe ; (b) angle de phase.

De même, les corrélations du module complexe $|E^*|$ et du paramètre de fatigue ε_6 avec l'angle de phase (Figure IV-29) s'avèrent assez générales quelle que soit la famille d'enrobés : on note que ε_6 augmente lorsque le caractère visqueux (déphasage) décroît (Figure IV-29b).

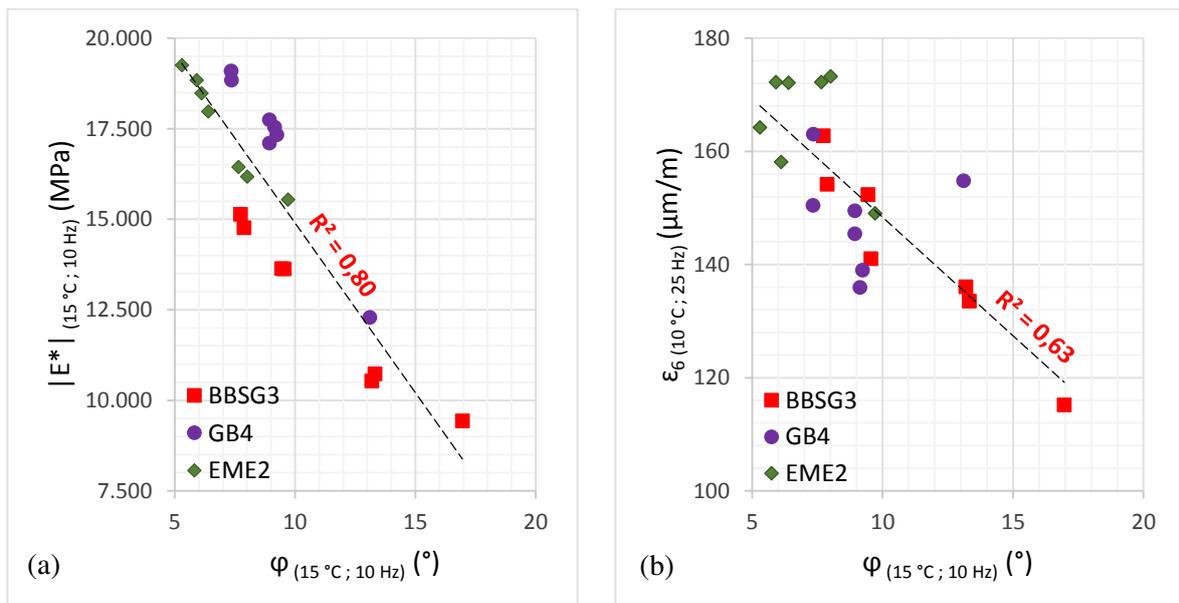


Figure IV-29. Corrélations entre l'angle de phase et : (a) la norme du module complexe ; (b) le paramètre de fatigue ε_6 .

En revanche, le paramètre ε_6 est peu corrélé avec la norme du module complexe (Figure IV-30a). Cependant le produit $\varepsilon_6/E^*/0.5$ utile pour le dimensionnement des couches, différencie bien les trois familles de matériaux et augmente nettement avec le taux de recyclage (Figure IV-30b).

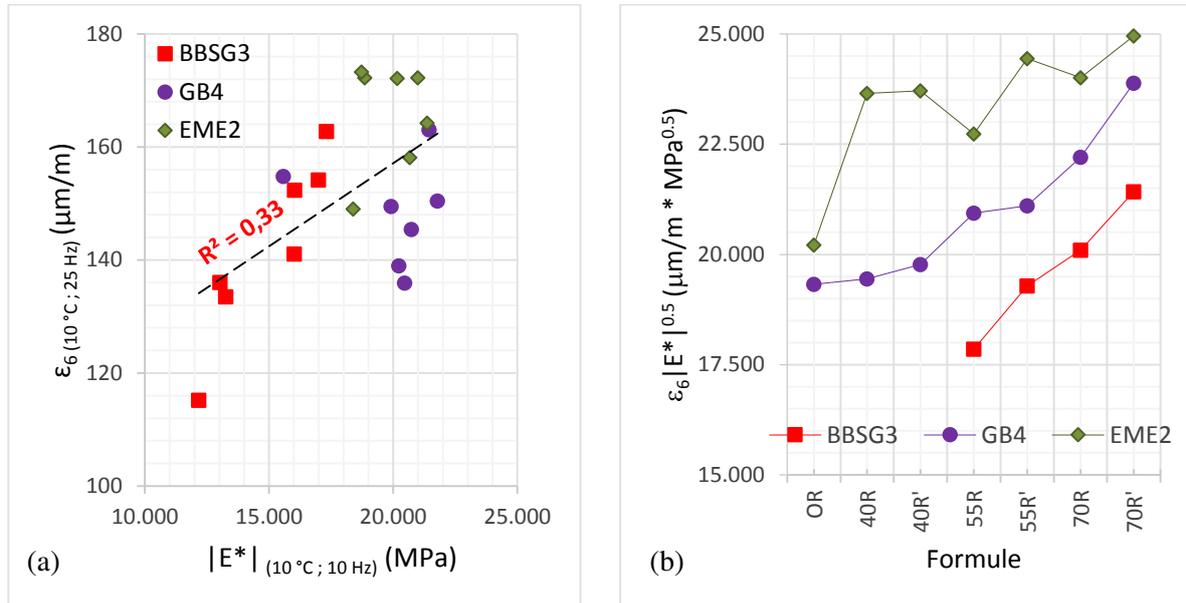


Figure IV-30. (a) corrélation entre ε_6 et module complexe ; (b) valeurs du produit $\varepsilon_6/E^*/0.5$.

4.2.2. Avec des paramètres physico-chimiques

a. Pénétrabilité et TBA

La norme du module complexe s'avère liée à la pénétrabilité et la TBA des liants (Figure IV-31), la corrélation est assez bonne dans les deux cas. Un durcissement du liant de l'enrobé (diminution de la pénétrabilité et augmentation de la TBA) améliore la rigidité du mélange [41].

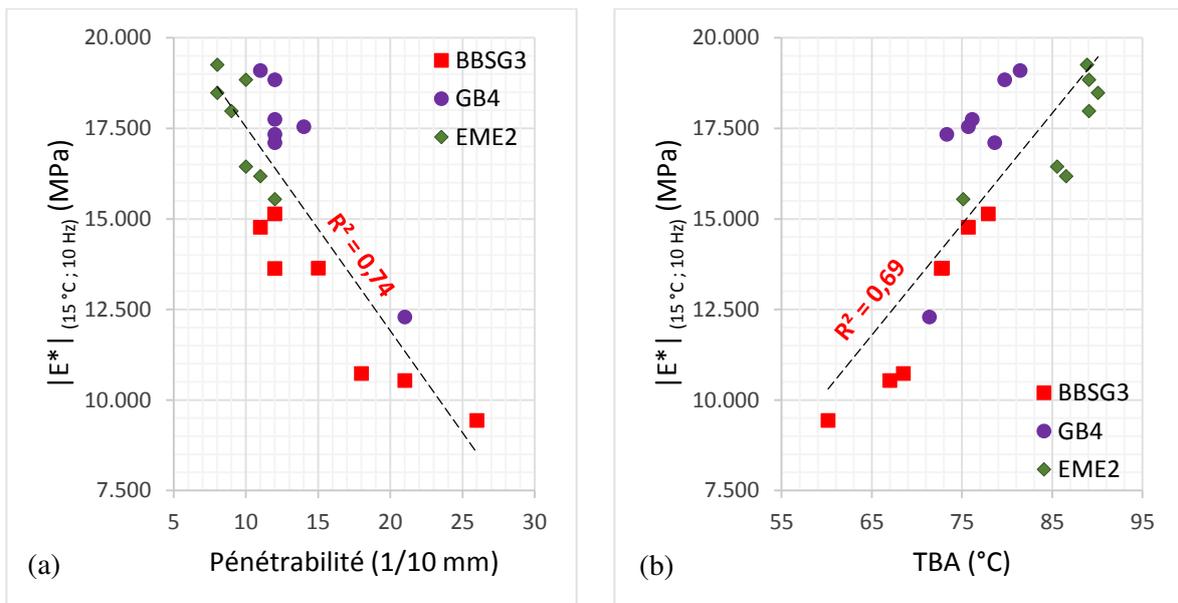


Figure IV-31. Relation de la norme du module complexe avec : (a) la pénétrabilité ; (b) la TBA.

Le paramètre de fatigue ϵ_6 se corrèle d'avantage avec la TBA (Figure IV-32b) qu'avec la pénétrabilité du liant (Figure IV-32a) mais globalement, la résistance à la fatigue s'avère augmenter avec la dureté de celui-ci.

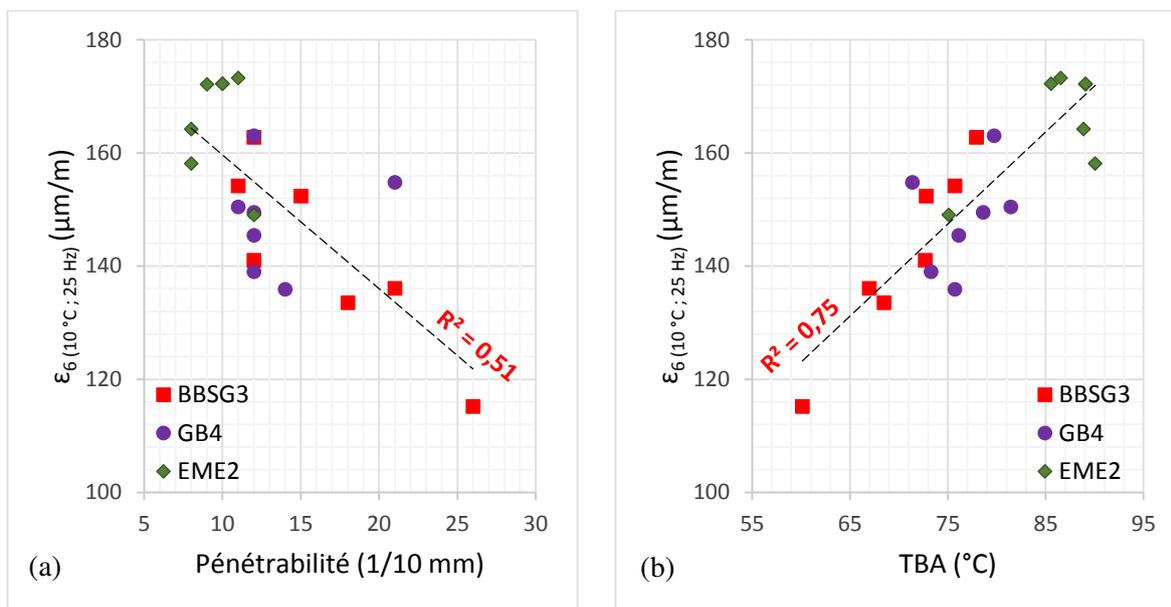


Figure IV-32. Corrélations entre ϵ_6 et : (a) pénétrabilité ; (b) TBA.

b. *Corrélation avec l'indice carbonyle*

Les relations entre la norme du module complexe et le paramètre de fatigue ϵ_6 des différents enrobés avec l'indice carbonyle I_{CO} des liants recomposés (Figure IV-33) montrent une corrélation croissante du module complexe avec l' I_{CO} (Figure IV-33a), non constatée entre I_{CO} et ϵ_6 .

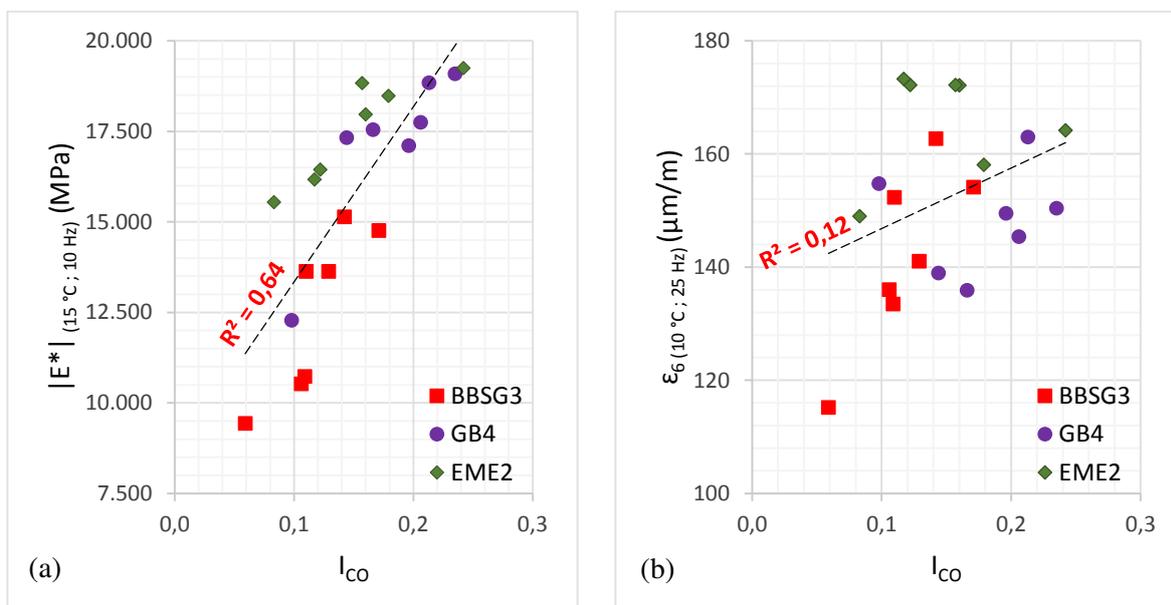


Figure IV-33. Corrélation de l'indice carbonyle avec (a) la norme du module complexe et (b) la résistance à la fatigue.

c. Corrélations avec les fractions SARA

La corrélation entre la rigidité du mélange et l'indice colloïdal s'avère faible (Figure IV-34a) ; celle avec le groupe asphaltènes + résines s'avère nettement croissante (Figure IV-34b) du fait de l'apport connu de ce groupe sur le plan structurel (rigidité, résistance).

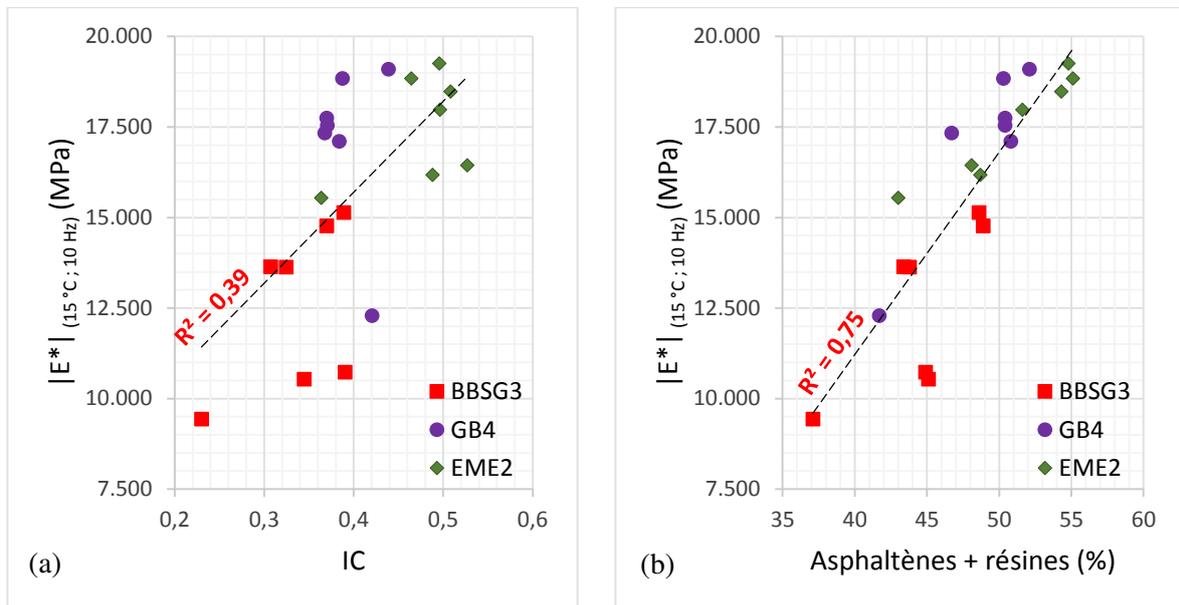


Figure IV-34. Relation de la norme du module complexe avec : (a) *indice d'instabilité colloïdale* ; (b) *asphaltènes + résines*.

Le paramètre de fatigue ε_6 croît avec l'indice colloïdal et le taux d'asphaltènes (Figure IV-35), avec des coefficients de corrélation assez moyens. Pour mémoire, les taux d'asphaltènes et de résines augmentent généralement avec la présence des AE dans le mélange.

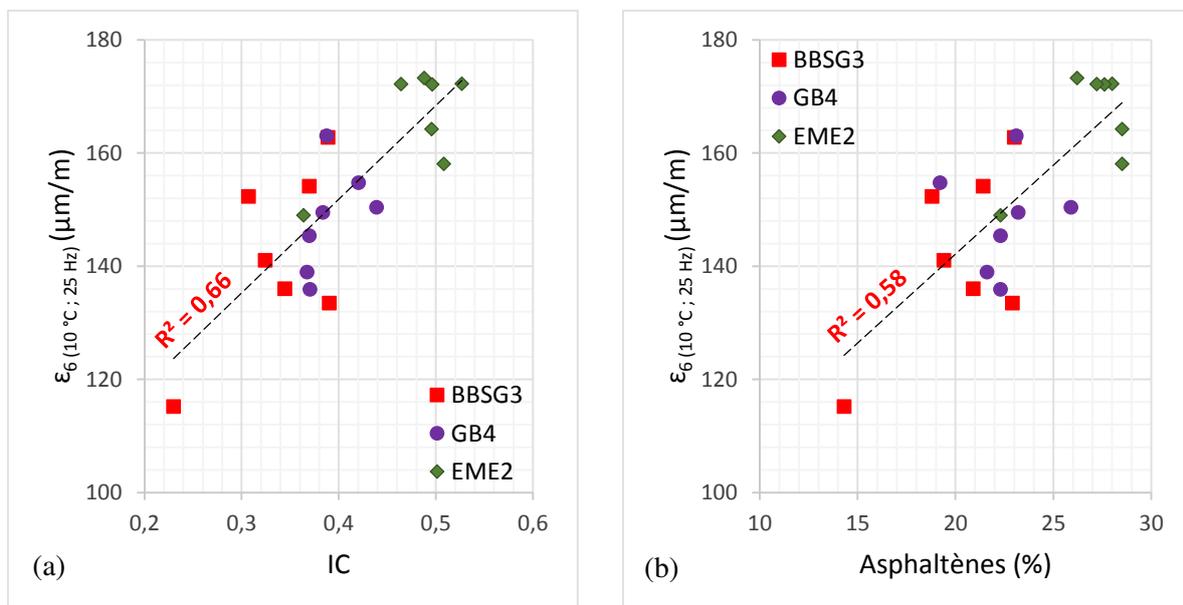


Figure IV-35. Relation du paramètre de fatigue ε_6 avec : (a) *l'indice d'instabilité colloïdale* ; (b) *le taux d'asphaltènes*.

5. APPLICATION AU DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉE

À titre d'exemple, nous présentons ci-dessous l'application des résultats des essais de module complexe et de résistance à la fatigue au dimensionnement des structures de chaussée. La structure adoptée, de type souple (Figure IV-36), comporte les différentes couches et matériaux ci-dessous [190] :

- une couche de surface de BBSG3 de 4 cm d'épaisseur, constituée des matériaux standard ou 0R,
- une couche d'assise d'EME2 de 7 cm d'épaisseur, constituée par les différentes formules testées en module et en fatigue,
- une plateforme de type PF1.



Figure IV-36. Structure adoptée pour le dimensionnement.

5.1. HYPOTHÈSES DE CALCUL

La détermination des sollicitations créées par le trafic dans les différentes couches de chaussée est faite à l'aide du logiciel ALIZÉ-LCPC basé sur le modèle élastique multicouche de Burmister. Le module de Young des couches bitumineuses est issu des résultats des essais de module complexe aux températures de 10 °C et $\theta_{eq} = 15$ °C, présentés plus haut ; le coefficient de Poisson est pris égal à 0,35 pour tous les matériaux. Un collage parfait entre les différentes couches est supposé.

À partir des déformations calculées, le trafic admissible pour chacune des couches est exprimé en nombre d'essieux standards (130 kN) équivalents, à l'aide des relations présentées ci-dessous :

- pour les couches bitumineuses (déformation critique horizontale de traction ε_t) :

$$NE_{adm}(\varepsilon_t) = \left(\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_6(10^\circ\text{C}; 25\text{ Hz}) \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})} k_r k_c k_s}} \right)^{\frac{1}{b}} \times 10^6 \quad (\text{IV-1})$$

avec les coefficients k_r , k_c et k_s pris égaux à ceux des spécifications [191] [192] (annexe C). S'agissant d'une structure souple, on se place dans le cadre des Voies du Réseau Non Structurant (VRNS) avec un coefficient d'agressivité structurelle moyen $CAM = 0,5$. L'évaluation du coefficient k_r considère un risque variable en fonction du trafic (Tableau IV-9) et une dispersion de la loi de fatigue pour l'EME2, S_N dépendante des résultats des essais pour chacune des formules.

Tableau IV-9. Facteurs de risque

Trafic	TC1	TC2	TC3	TC4	TC5	TC6	TC7	TC8
NE (10 ⁶) (CAM=0,5)	< 0,1	< 0,2	< 0,6	< 1,3	< 3,2	< 8,6	< 21	> 21
Risque r (%)	30	30	18	10	5	2	1	1

- pour la plateforme (déformation critique verticale de compression ε_z) :

$$NE_{adm}(\varepsilon_z) = \left(\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_1}\right)^{-\frac{1}{0,222}} \quad (\text{IV-2})$$

avec le paramètre ε_1 donné par le Tableau IV-10.

Tableau IV-10. Valeurs du paramètre ε_1 .

NE	≤250 000	>250 000
ε_1	0,016	0,012

Le trafic équivalent admissible pour la structure est alors la valeur minimale de celles calculées par les relations ci-dessus, soit :

$$NE_{adm} = \min[NE_{adm}(\varepsilon_t), NE_{adm}(\varepsilon_z)] \quad (\text{IV-3})$$

5.2. ANALYSE DES RÉSULTATS

5.2.1. Déformations transversales et verticales

Les déformations horizontales de traction à la base de la couche d'EME2, et les déformations verticales de compression sur la plateforme sont présentées dans le Tableau IV-11 et sur la Figure IV-37. On considère les deux hypothèses prises pour la couche de surface en BBSG3, laquelle se trouve comprimée dans tous les cas, et les différentes formules d'EME2. Avec les conventions de signe du programme ALIZE-LCPC, la compression est positive.

Est mise d'abord en évidence la réduction de l'intensité des déformations horizontales et verticales des couches inférieures (EME2, PF1) lorsque la rigidité de la couche de surface augmente, OR étant une formule plus rigide que la formule standard. En outre la rigidité croissante de la couche d'EME2 avec le taux croissant d'AE (régénérés ou non) réduit également l'intensité des déformations ci-dessus. Finalement, à même taux d'AE, la plus grande souplesse élastique des formules d'EME2 régénérées produit des déformations d'intensité légèrement inférieure à celles des formules correspondantes non régénérées.

Tableau IV-11. Déformations maximales transversales (EME2) et verticales (PF1)

Couche de surface (IE* MPa)	ϵ_t ; ϵ_z ($\mu\text{m}/\text{m}$)	Formules							Standard EME2
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'	
BBSG3-0R (9435)	ϵ_t / EME2	-249,3	-241,0	-243,4	-224,8	-228,6	-219,4	-222,3	-265,5
	ϵ_z / PF1	1339,8	1314,3	1321,6	1262,9	1274,9	1245,3	1254,6	1388,8
BBSG3-Std (7000)	ϵ_t / EME2	-276,5	-267,6	-270,2	-250,0	-254,1	-244,1	-247,2	-293,8
	ϵ_z / PF1	1534,5	1504,7	1513,3	1444,1	1458,3	1423,2	1434,3	1590,9

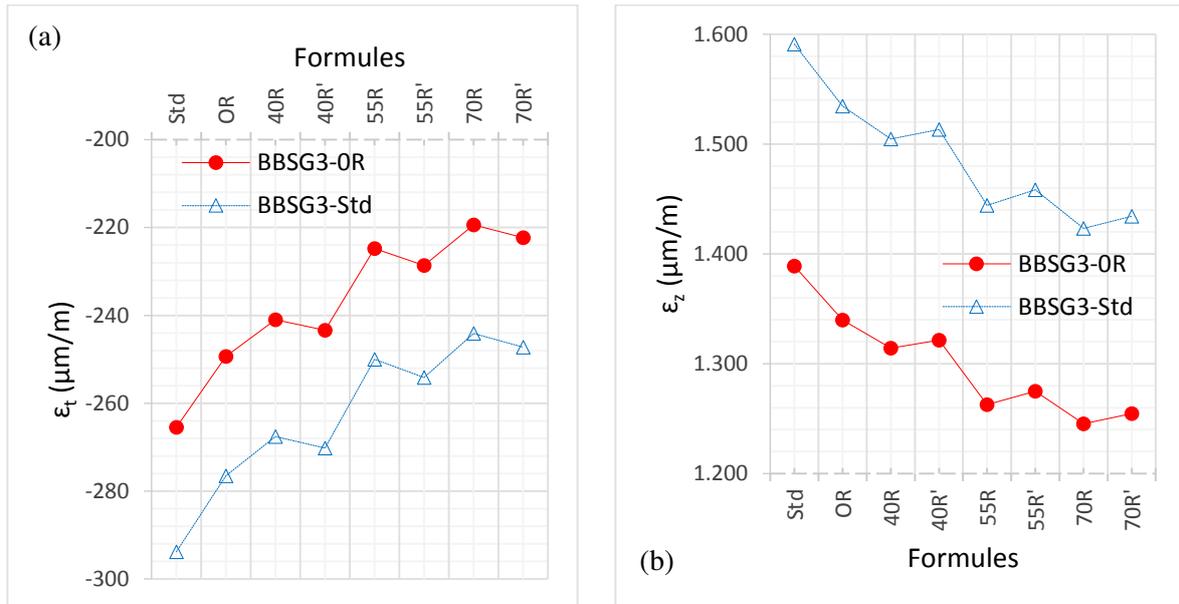


Figure IV-37. Déformations maximales calculées : (a) transversales de l'EME2 et (b) verticales de la PF1.

5.2.2. Trafic équivalent admissible (couche de surface BBSG3-0R)

L'impact direct du recyclage et de la régénération sur le trafic équivalent admissible de la structure de chaussée selon la composition de la couche d'EME2 est présenté sur le Tableau IV-12 et la Figure IV-38. Deux hypothèses sont considérées sur la valeur de la pente de fatigue b : les valeurs mesurées lors des essais et la valeur standard conventionnelle attribuée par les spécifications aux enrobés bitumineux ($b = -0,2$).

Quelle que soit l'hypothèse ci-dessus sur b , on observe que la classe de trafic (TC1) et les risque (30 %) restent inchangés, ce qui nous permet de comparer les résultats en termes de performances mécaniques exclusivement. Le trafic admissible de la structure composée avec l'EME2 standard est inférieur à ceux des structures composées avec les formules d'EME2 testées. Deux paramètres contribuent à ce constat : la diminution ci-dessus des déformations produites par le trafic et l'amélioration des performances en fatigue en présence d'AE.

Cependant, lorsque les formules de l'EME2 sont affectées des valeurs de b mesurées (Figure IV-38a), inférieures en intensité à la valeur conventionnelle, les trafics admissibles correspondants sont également inférieurs à ceux déterminés avec une pente conventionnelle (Figure IV-38b). La pénalisation des faibles trafics par des courbes de Wöhler plus « plates » a été mise en évidence par Mom [190] ; en revanche les trafics forts se trouvent améliorés.

Tableau IV-12. Trafic équivalent admissible (couche de surface BBSG3-0R).

Pente de fatigue b	Paramètres	Formules étudiées						Standard EME2	
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R		70R'
Variable (mesurée)	Couche critique	EME2						EME2	
	NE _{adm}	22839	33453	28011	17452	33361	15449	27773	13280
	Classe du trafic	TC1						TC1	
	Risque (%)	30						30	
Standard (b = -0,2)	Couche critique	EME2	PF1		EME2	PF1	EME2	PF1	EME2
	NE _{adm}	31146	77500	75591	65341	88889	86582	95553	13280
	Classe du trafic	TC1						TC1	
	Risque (%)	30						30	

De par les performances améliorées en fatigue des formules d'EME2 régénérées, et malgré des rigidités légèrement réduites, l'effet de l'additif apparaît favorable sur le trafic admissible, en particulier aux taux d'AE élevés (55 % et 70 %) et ceci quelle que soit l'hypothèse faite sur les pentes.

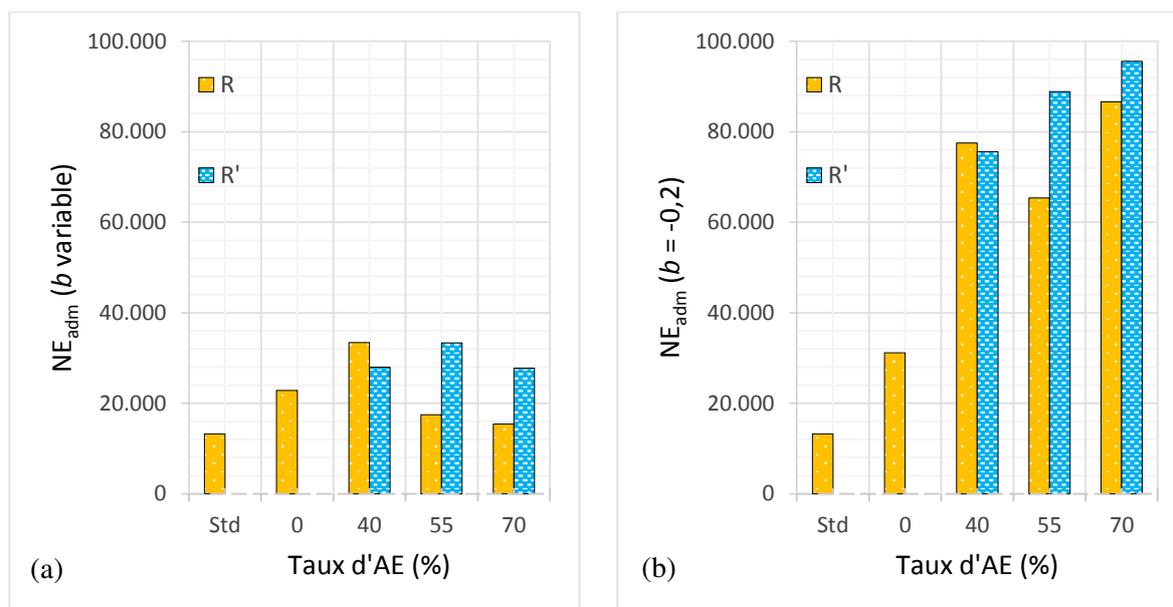


Figure IV-38. Trafic équivalent admissible (couche de surface BBSG3-0R) : (a) b variable et (b) b = -0,2.

Enfin on notera que dans certains cas, la couche critique se trouve être la plateforme ; la couche bitumineuse « travaille » en dessous de ses capacités, traduisant une structure non optimisée sur le plan mécanique et dont l'optimisation conduirait à modifier la qualité de la plateforme et/ou l'épaisseur des couches bitumineuses.

5.2.3. Influence de la rigidité de la couche de surface

Afin d'analyser l'effet de la rigidité de la couche de surface en termes de trafic admissible, les valeurs de ce dernier ont été également déterminées dans le cas d'un BBSG3 standard, de rigidité moindre que celle mesurée sur la formule 0R, les autres paramètres géométriques et mécaniques restant inchangés.

Les résultats (Tableau IV-13 et Figure IV-39) mettent en évidence l'impact très défavorable de la moindre rigidité de la couche de surface sur le trafic admissible de la structure. Cependant dans les deux cas, le classement relatif des différentes formules reste identique et la régénération s'avère favorable pour les taux élevés d'AE (55 % et 70 %).

Tableau IV-13. Trafic équivalent admissible : BBSG3-0R & BBSG3-Std.

Couche de surface ($E \cdot I$ MPa)	Paramètres ($b = -0,2$)	Formules étudiées						Standard EME2	
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R		70R'
BBSG3-0R (9435)	Couche critique	EME2	PF1		EME2	PF1	EME2	PF1	EME2
	NE_{adm}	31146	77500	75591	65341	88889	86582	95553	13280
	Classe du trafic	TC1						TC1	
	Risque (%)	30						30	
BBSG3-Std (7000)	Couche critique	EME2	PF1		EME2	PF1	EME2	PF1	EME2
	NE_{adm}	18558	42135	41067	38412	48519	50789	52285	8003
	Classe du trafic	TC1						TC1	
	Risque (%)	30						30	

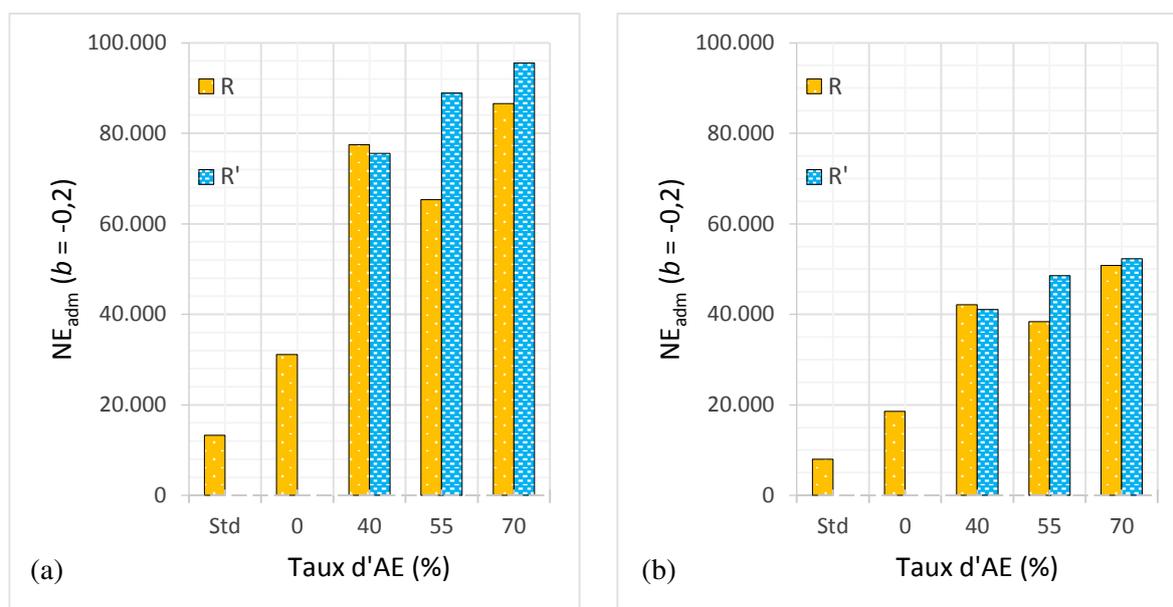


Figure IV-39. Trafic équivalent admissible ($b = -0,2$) : (a) couche de surface BBSG3-0R et (b) couche de surface BBSG3-Std

L'impact favorable d'un module complexe élevé de la couche de surface sur le trafic admissible, est un élément positif pour l'utilisation de forts taux d'AE (apport de la rigidité). Cependant, lors de la conception d'une structure de chaussée, il y a lieu de considérer également d'autres aspects mécaniques, comme la fissuration thermique de surface, les contrastes de rigidité entre couches adjacentes, le comportement des interfaces entre celles-ci...

6. CONCLUSIONS

Les essais de module complexe et de tenue à la fatigue réalisés sur les différentes compositions de trois matériaux types (BBSG3, GB4 et EME2) à taux variable d'AE, avec et sans régénérant, permettent d'énoncer les conclusions principales suivantes.

En l'absence de régénérant, l'influence des AE se traduit principalement par une augmentation très significative de la norme du module complexe et par une diminution de l'angle de phase pour toutes les formules des différentes familles d'enrobé.

Les performances en fatigue des formules de BBSG3 et de GB4 sont améliorées avec le taux croissant d'AE, cependant, la formule de contrôle sur cette dernière famille reste la plus performante. Dans le cas de l'EME2 l'ajout d'AE s'avère très favorable, indépendamment du taux de recyclage. Les courbes de fatigue s'avèrent en général plus plates en présence d'AE.

L'ajout de régénérant améliore le paramètre ε de la résistance à la fatigue sans impact notable sur la norme du module complexe. La variation des pentes de fatigue des enrobés régénérés est légèrement réduite par l'ajout de régénérant.

Les corrélations entre paramètres de niveau N3 et N4 indiquent une dépendance de la rigidité et de la résistance à la fatigue avec le caractère visqueux de l'enrobé. Une amélioration des performances en fatigue se produit quand la viscosité (angle de phase) de l'enrobé diminue.

Le module complexe des enrobés s'avère assez bien corrélé avec la TBA, l'indice carbonyle et le groupe asphaltènes + résines du liant recomposé. La résistance à la fatigue est surtout améliorée avec l'accroissement de la TBA et de l'indice colloïdal.

L'application des valeurs de module complexe et de résistance à la fatigue au dimensionnement structurel montre qu'un taux élevé d'AE augmente le trafic admissible, surtout dans le cas des formules régénérées. Les calculs ont également mis en évidence le rôle important joué par une pente variable de la droite de fatigue.

CHAPITRE V. PERFORMANCES À BASSE TEMPÉRATURE

1. PRÉPARATION DES ÉPROUVETTES

Une fois que l'enrobé est malaxé, le compactage se fait suivant le même mode opératoire utilisé pour la fabrication des plaques destinées aux essais de niveau N3-N4 (module et fatigue). La température de l'enrobé est systématiquement mesurée au début (cœur) et à la fin du compactage (surface). La valeur moyenne pour l'ensemble des plaques destinées aux essais à basse température est présentée dans la Figure V-1.

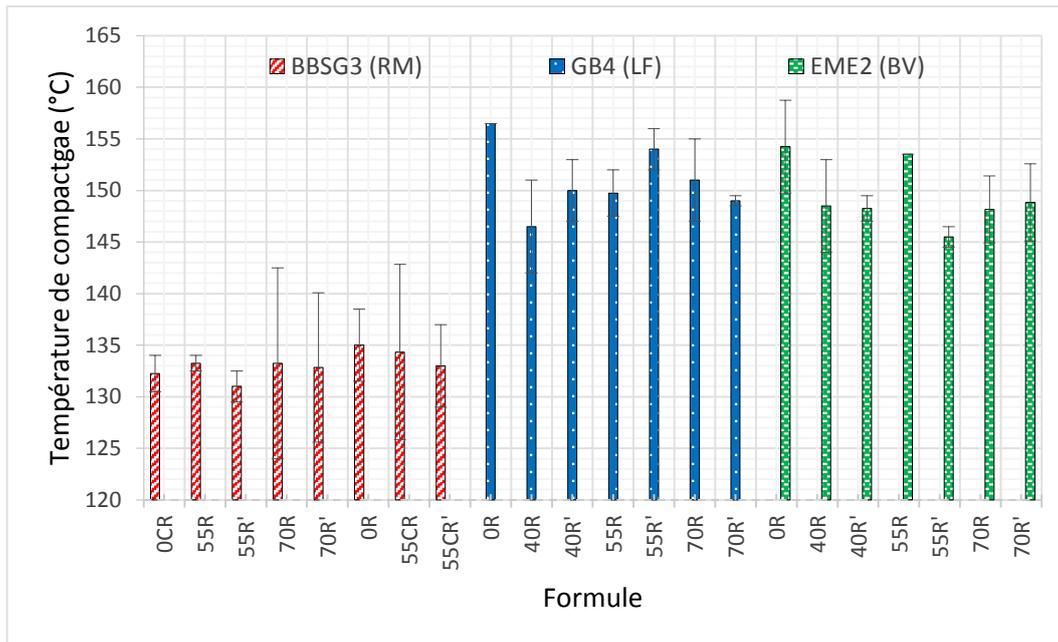


Figure V-1. Température moyenne de compactage des plaques.

Conformément à la normalisation européenne [54], des éprouvettes cylindriques ($\phi = 50$ mm) sont carottées dans les plaques dans un plan orthogonal à la direction de compactage (Figure V-2) afin de mieux reproduire lors des essais de traction les sollicitations en place dans les couches de chaussées. Les extrémités des éprouvettes sont découpées et rectifiées jusqu'à une longueur comprise entre 160 et 162 mm.

Par ailleurs, les effets de bord à proximité des parois du moule de compactage produisent une hétérogénéité de la compacité des échantillons, ce qui conduit à ne retenir que les éprouvettes dont le pourcentage de vides s'écarte de moins de 1,2 % de la valeur de référence visée. Afin de garantir la représentativité des résultats, trois éprouvettes sont testées pour chaque modalité d'essai, ce qui augmente le nombre de plaques nécessaires pour l'ensemble des formules.

Les essais sont réalisés en respectant un délai de maturation de 14 à 42 jours après fabrication. La colle utilisée est à prise lente (Sikadur 31 EF), tandis que des casques en aluminium ont été choisis pour fixer l'éprouvette sur la presse (coefficient de contraction thermique très proche de celui des enrobés).

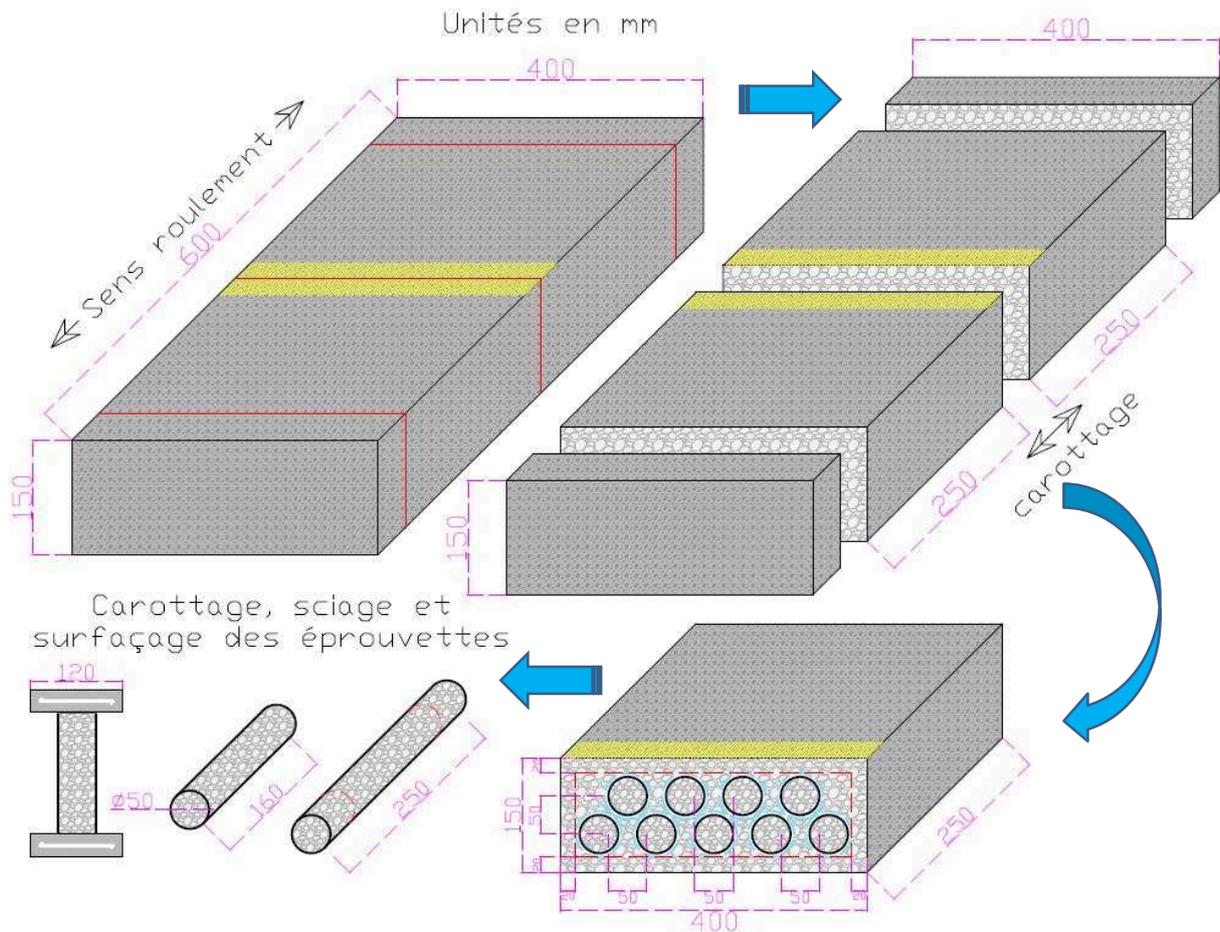


Figure V-2. Plan de carottage des éprouvettes des essais à froid

2. MATÉRIELS ET PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

Pour cette recherche, deux essais normalisés [54] de laboratoire sont réalisés afin d'évaluer les performances à froid des enrobés bitumineux : l'essai de traction uniaxiale (Uniaxial Tension Stress Test, UTST) et l'essai de retrait thermique empêché (Thermal Stress Restrained Specimen Test, TSRST).

Le matériel utilisé pour la réalisation de ces essais comporte les éléments principaux suivants (Figure V-3) :

- une enceinte climatique (INSTRON 3119-605) régulée, alimentée par de l'azote liquide,
- une presse de traction-compression (INSTRON 3360) pilotée par ordinateur (logiciel Bluehill®),
- trois capteurs de déplacement à variation d'induction (LVDT) placés à 120 degrés autour de l'éprouvette,
- une chaîne d'acquisition des mesures (déplacements et température).

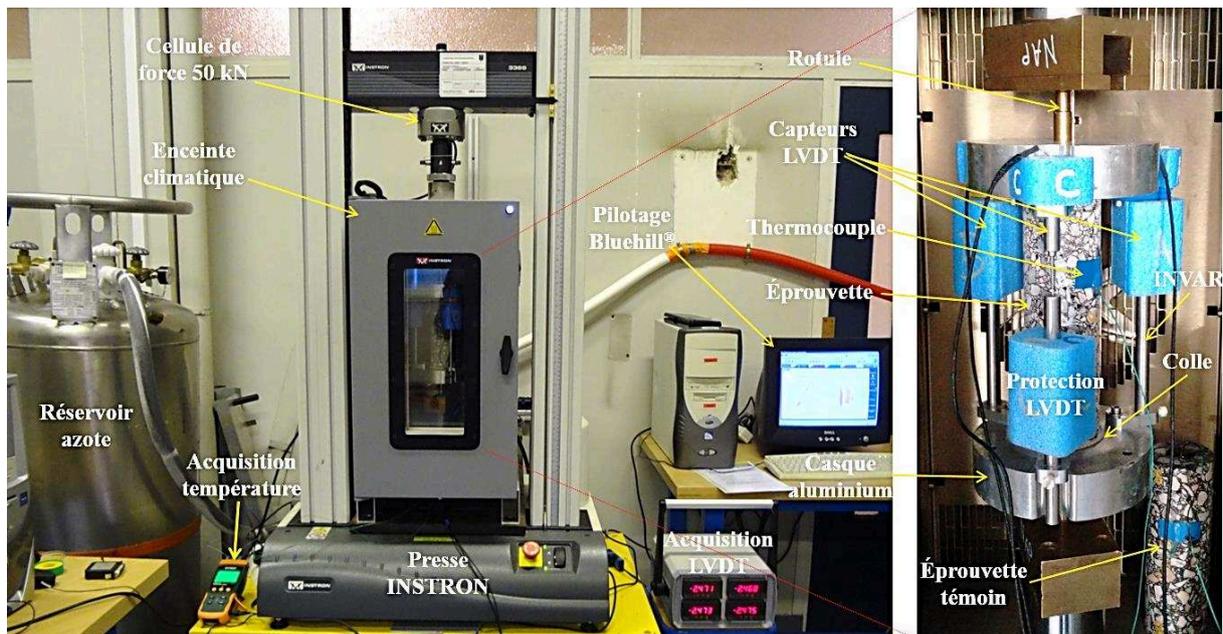


Figure V-3. Dispositifs des essais à basse température

Afin d'exercer les efforts de traction, les éprouvettes sont collées sur les casques en aluminium munis de têtes sphériques (rotules) et de plaquettes de fixation des capteurs de déplacement. La température est mesurée par trois thermocouples : un thermocouple fixé sur la surface de l'éprouvette d'essai et deux thermocouples fixés sur une éprouvette témoin (un interne et un en surface).

Les palpeurs des capteurs LVDT s'appuient sur des tiges en INVAR ; cependant, compte tenu de la sensibilité thermique du système de mesure, une correction est apportée à la mesure des déplacements lors de l'essai de retrait empêché.

2.1. ESSAI DE TRACTION UNIAXIALE (UTST)

Les essais de traction uniaxiale ont été effectués à quatre températures différentes (+20 °C, +5 °C, -10 °C et -25 °C) à une vitesse de déformation relativement rapide mais conforme aux spécifications européennes ($\dot{\epsilon} = 104 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, soit 1 mm/mn pour une longueur d'éprouvette de 160 mm) [54]. Préalablement à l'essai de traction, les éprouvettes sont conditionnées jusqu'à stabilisation et homogénéisation de la température d'essai. La durée de la phase de conditionnement est variable selon la température à atteindre et peut prendre plusieurs heures (> 3h).

La Figure V-4 présente, à titre d'exemple, les courbes contrainte-déformation obtenues lors des tests effectués sur le BBSG3-55CR' (trois éprouvettes par température), montrant une assez bonne répétabilité.

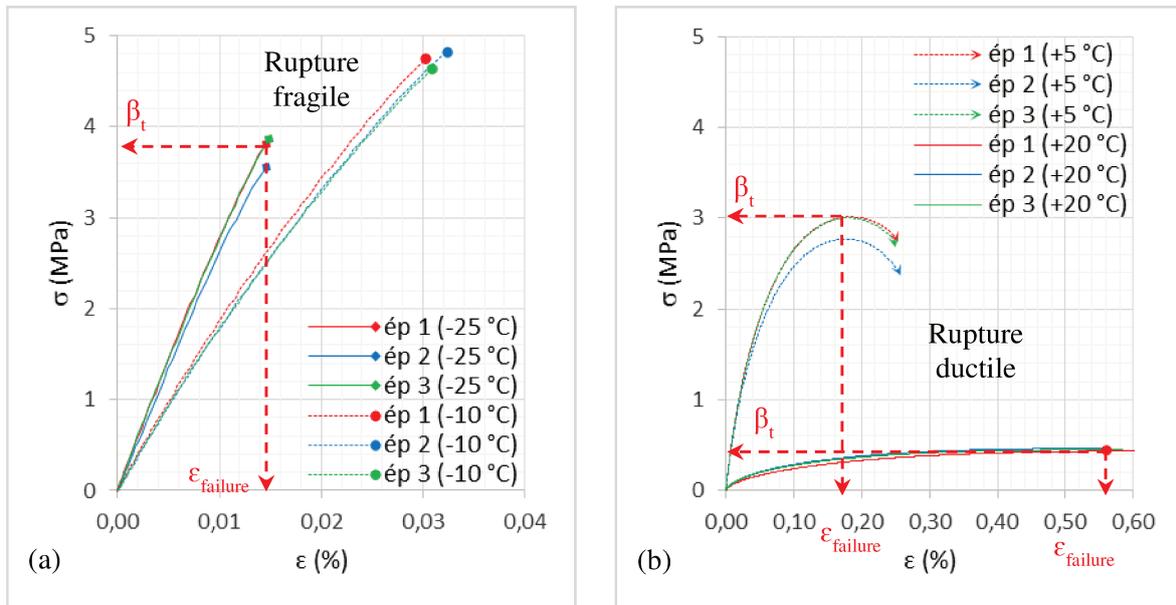


Figure V-4. Courbes contrainte-déformation lors d'essais de traction (BBSG3-55CR') : (a) rupture fragile à -25 et -10 °C ; (b) rupture ductile à +5 et +20 °C.

Ces courbes contrainte-déformation montrent une rupture de type fragile dans le cas des températures négatives (-25 °C et -10 °C) et de type ductile dans le cas des températures positives (+5 °C et +20 °C). Conventionnellement, on considère la limite de rupture β_t comme la contrainte maximale atteinte pendant l'essai et la déformation correspondante comme la déformation de rupture $\epsilon_{\text{failure}}$. Un matériau est d'autant plus performant sur le plan mécanique que la contrainte de rupture et la déformation correspondante sont élevées.

On observe une différence importante entre les contraintes de rupture atteintes aux trois températures les plus froides (β_t de l'ordre de 4 à 5 MPa) et celle à +20 °C (environ 0,5 MPa). Cette différence s'explique par un comportement majoritairement élastique dans le premier cas et majoritairement visqueux dans le deuxième permettant une relaxation des contraintes plus importante [34].

Pour un matériau donné, la courbe de la résistance à la traction en fonction de la température (Figure V-5) permet de définir une température de transition fragile-ductile T_{fd} correspondant au maximum de la contrainte $\beta_{t \text{ max}}$ [34]. Une régression polynômiale de degré 3 est utilisée [54].

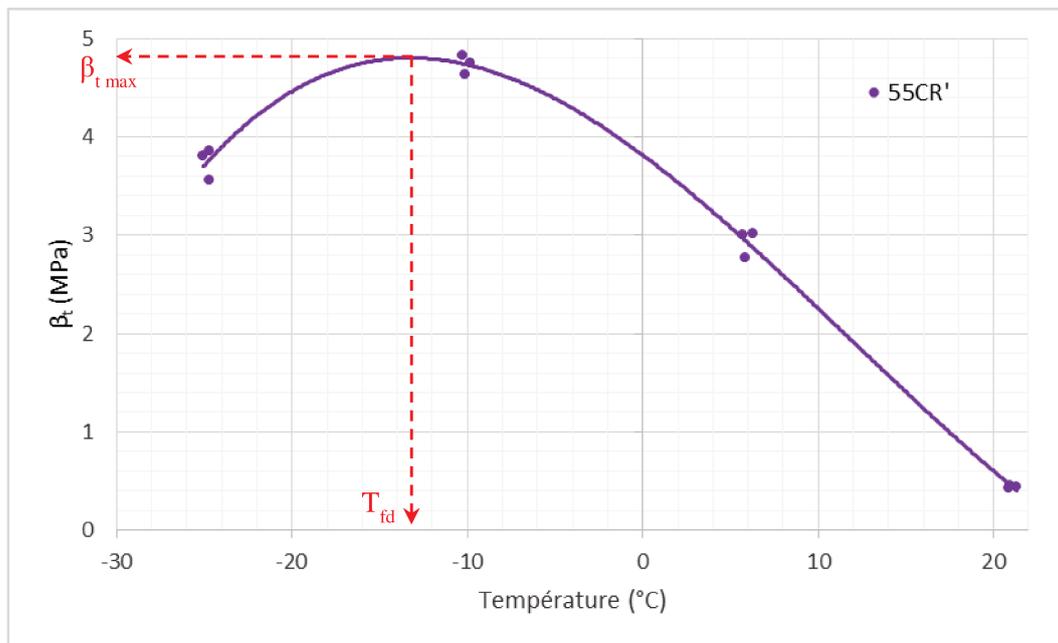


Figure V-5. Température de transition fragile-ductile T_{fd} en UTST (BBSG3-55CR').

2.2. ESSAI DE RETRAIT THERMIQUE EMPÊCHÉ (TSRST) ET RÉSERVE DE TRACTION

Les essais de retrait thermique empêché sont effectués en baissant la température de l'enceinte avec un gradient constant de -10 °C/h [54], à partir d'une température initiale de $+10\text{ °C}$ [72] [193]. Le blocage de la déformation axiale pendant l'essai est obtenu par l'asservissement de la presse de traction à l'aide du logiciel de pilotage Bluehill®. La Figure V-6a illustre à titre d'exemple la répétabilité des résultats obtenus sur trois éprouvettes similaires [33] [54] [59] [73]. Les différents paramètres caractérisant les résultats des essais TSRST sont rappelés sur la Figure V-6b. Leur signification physique a été donnée dans l'étude bibliographique (§ 1.5.2).

On rappelle que lors de l'essai de retrait thermique empêché le couplage thermomécanique conduit à l'expression suivante de la contrainte cryogénique lors d'une variation ΔT de la température :

$$\Delta\sigma_{cry} = \alpha(T) E(T) \Delta T \quad (\text{V-1})$$

où $\alpha(T)$ et $E(T)$ sont respectivement le coefficient de dilatation-contraction thermique et la rigidité viscoélastique, tous deux dépendants de la température.

Dans la plupart des essais de retrait empêché, la rupture est progressive : au-delà du pic, la contrainte diminue progressivement sans rupture immédiate, ce qui est probablement lié au niveau du vieillissement des enrobés et à la présence du régénérant [33] [34] [60].

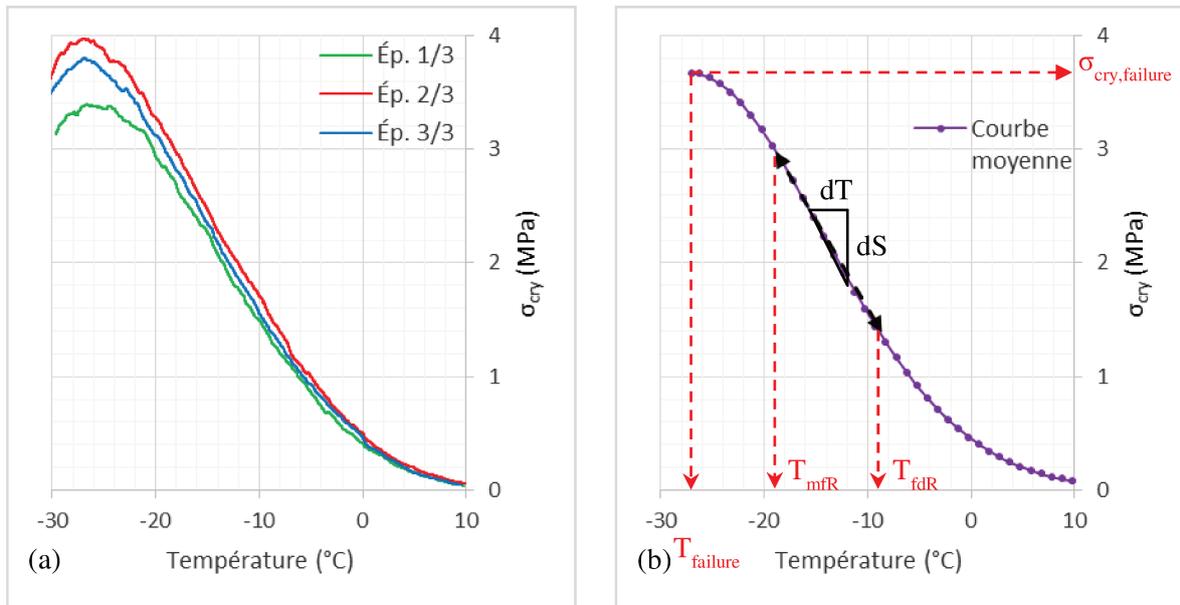


Figure V-6. Résultats d'essais de retrait thermique empêché (BBSG3-55CR') : (a) répétabilité des essais ; (b) paramètres caractéristiques.

Par ailleurs, l'essai de retrait thermique empêché est souvent associé à l'essai de traction directe, pour déterminer, par différence, la résistance de l'enrobé bitumineux sous l'action mécanique de trafic lorsqu'il est préalablement mis en tension sous une baisse de la température. Cette différence est appelée réserve de traction $\Delta\beta_t$ (Figure V-7).

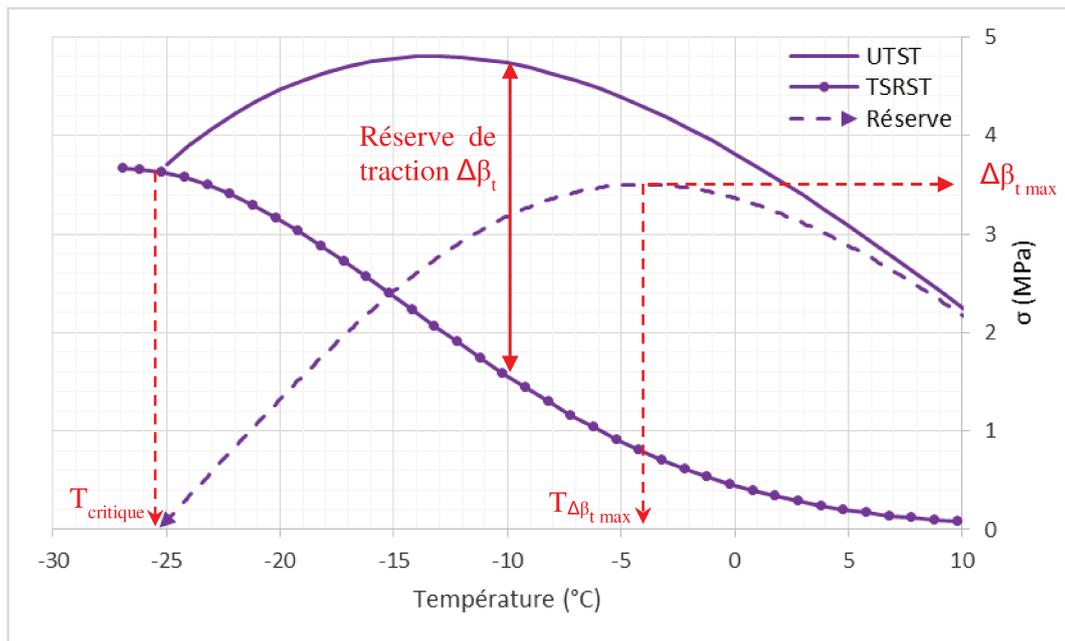


Figure V-7. Réserve de traction (BBSG3-55CR').

Les résultats des essais à froid obtenus pour les différents matériaux sont présentés dans les paragraphes suivants.

3. BBSG3

L'ensemble des résultats obtenus lors des essais à froid sur le Béton Bitumineux de classe 3 (BBSG3) sont rassemblés sur le Tableau V-1.

Tableau V-1. Résultats des essais à basse température du BBSG3.

Essai \ Paramètres		Formules							
		OR	0CR	55R	55R'	55CR	55CR'	70R	70R'
UTST	% de Vides	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5
	β_t (-25 °C) (MPa)	3,68	3,06	3,65	3,88	3,57	3,74	3,91	4,41
	Température (°C)	-25,1	-24,9	-24,9	-25,0	-24,7	-24,8	-24,6	-24,8
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (-25 °C) (%)	0,014	0,012	0,015	0,016	0,015	0,015	0,016	0,020
	β_t (-10 °C) (MPa)	4,89	4,94	5,24	5,39	4,34	4,74	5,33	6,23
	Température (°C)	-10,1	-10,1	-10,2	-10,1	-10,0	-10,1	-10,0	-9,9
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (-10 °C) (%)	0,031	0,025	0,026	0,028	0,027	0,031	0,026	0,031
	β_t (+5 °C) (MPa)	1,68	4,31	4,64	4,55	2,92	2,93	5,73	5,97
	Température (°C)	6,5	5,5	5,1	5,1	5,5	5,9	5,1	5,1
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (+5 °C) (%)	0,272	0,179	0,141	0,152	0,168	0,179	0,118	0,116
	β_t (+20°C) (MPa)	0,13	0,93	1,20	1,15	0,58	0,45	1,62	1,73
	Température (°C)	22,3	19,8	19,7	19,9	20,8	21,0	20,6	20,1
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (+20 °C) (%)	1,137	0,567	0,428	0,432	0,541	0,560	0,328	0,332
	T_{fd} (°C)	-15,1	-5,6	-5,9	-7,5	-13,1	-13,2	0,3	-3,3
β_t max (MPa)	5,19	5,06	5,34	5,42	4,39	4,80	5,91	6,49	
TSRST	% de Vides	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,5	3,5
	T_0 (°C)	9,8	9,9	9,9	9,4	9,8	9,8	9,9	9,9
	T_{failure} (°C)	-28,7	-22,8	-23,4	-26,4	-26,0	-26,9	-23,7	-24,8
	$\sigma_{\text{cry, failure}}$ (MPa)	4,22	4,21	4,73	5,75	3,56	3,72	5,41	5,44
	T_{fdR} (°C)	-13,0	-6,4	-6,6	-9,2	-8,3	-8,7	-6,5	-7,5
	$\sigma_{\text{cry, TfdR}}$ (MPa)	1,74	1,67	2,42	2,32	1,33	1,38	2,25	2,34
	T_{mfR} (°C)	-21,0	-15,2	-16,8	-19,6	-18,5	-18,9	-17,6	-18,2
	$\sigma_{\text{cry, TmfR}}$ (MPa)	3,44	3,35	3,88	4,64	2,87	2,98	4,56	4,66
	Pente dS/dT (MPa/°C)	-0,220	-0,199	-0,203	-0,227	-0,158	-0,161	-0,213	-0,220
Réserve	$T_{\Delta\beta_t \text{ max}}$ (°C)	-8,3	1,7	1,9	1,0	-2,8	-4,1	5,0	2,9
	$\Delta\beta_t \text{ max}$ (MPa)	3,69	4,17	4,33	4,34	3,22	3,50	5,19	5,53
	T_{critique} (°C)	-24,2	-19,5	-19,8	-19,4	-25,1	-25,3	-17,2	-20,1

On rappelle qu'en termes de consistance (pénétrabilité du liant recomposé après enrobage), les formules comparables sont 0R, 55CR et 55CR' (18-26 dmm) d'une part et d'autre part 0CR, 55R, 55R', 70R et 70R' (11-15 dmm).

3.1. ANALYSE DES RÉSULTATS DE TRACTION UNIAXIALE

3.1.1. Contrainte de rupture

Les valeurs des contraintes de rupture obtenues pour chaque mélange et chaque température d'essai sont présentées sur les Figure V-8a (températures négatives) et Figure V-8b (températures positives). Globalement, on observe une augmentation de la contrainte de rupture avec le pourcentage d'AE, quelle que soit la température. Cependant les formules 55CR et 55CR' ne suivent pas cette tendance du fait d'une pénétration plus élevée du liant du mélange.

Par ailleurs, on constate un effet favorable de l'additif sur la contrainte de rupture, en particulier pour les températures négatives.

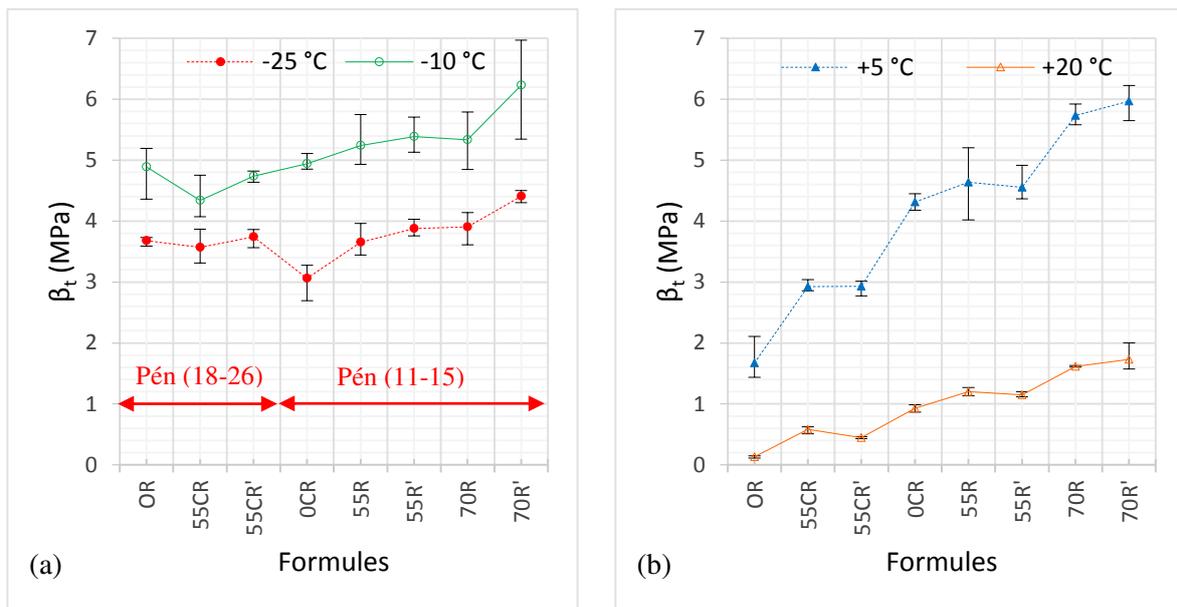


Figure V-8. Résistance à la traction directe à l'essai UTST (BBSG3) : (a) -25 et -10 °C ; (b) +5 et +20 °C.

La dispersion des résultats est directement liée à celle du pourcentage de vides des échantillons (3 éprouvettes par température). Dans le cas des formules 70R' (-10 °C) et 55R (+5 °C), le pourcentage de vides des échantillons présente une différence de 1,9 %.

3.1.2. Température de transition fragile-ductile

Les résultats des résistances à la traction directe en fonction de la température, permettant de déterminer la température de transition fragile-ductile T_{fd} correspondant au maximum de la résistance $\beta_{t \max}$, sont présentés sur la Figure V-9 en termes de résultats individuels pour chaque éprouvette et de courbe de tendance.

L'effet des AE (Figure V-9a) apparaît favorable sur la résistance maximale (gain jusqu'à 1 MPa pour 70% d'AE) mais défavorable sur la température de transition (augmentation d'environ +5 °C). L'effet de l'additif se traduit à la fois par une légère augmentation de la résistance maximale (jusqu'à 0,5 MPa) et par une diminution plus significative de la température correspondante (jusqu'à -3 °C), c'est-à-dire par un impact doublement favorable.

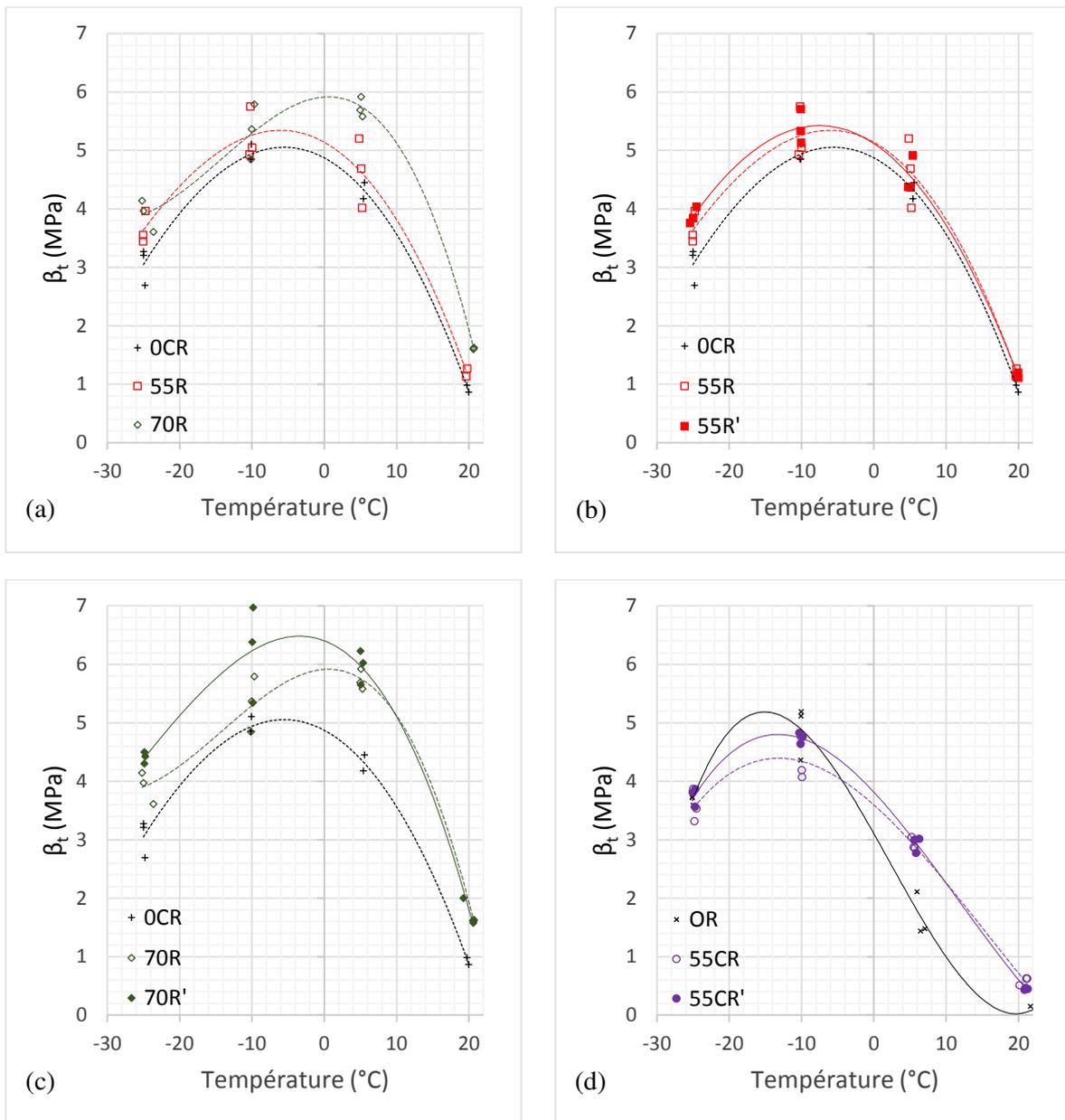


Figure V-9. Résistance en traction directe vs température pour les formules de BBSG3. (a) : *effet du % d'AE* ; (b), (c), & (d) : *effet de l'additif*.

Les tendances ci-dessus sont présentées sous une forme différente sur la Figure V-10 où l'on observe en outre une corrélation croissante entre la température de transition ductile-fragile et la résistance maximale en traction directe.

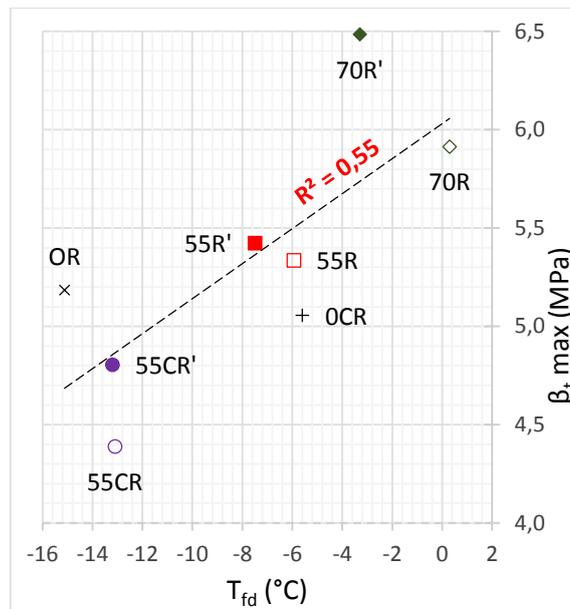


Figure V-10. Résistance maximale à la traction directe et température de transition fragile-ductile pour les formules de BBSG3.

3.1.3. Déformation à la rupture

Les déformations conventionnelles à la rupture sont présentées sur la Figure V-11 pour les différentes formules et les différentes températures. Aux températures négatives on ne constate pas de variation significative de la déformation de rupture selon les formules ou selon la dureté du liant. Aux températures positives on constate globalement une décroissance de la déformation de rupture lorsque le taux d'AE augmente (effet fragilisant) et un impact négligeable du régénérant.

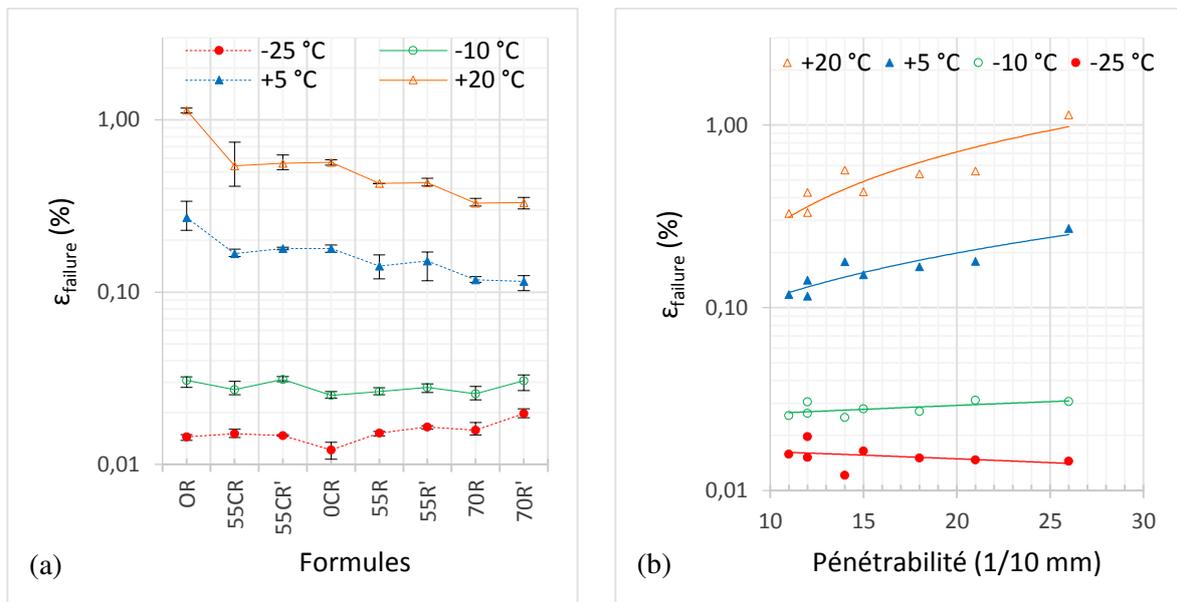


Figure V-11. Déformation conventionnelle à la rupture à l'essai UTST (BBSG3) : (a) selon les formules ;(b) selon la dureté du liant recomposé.

La résistance à la traction et la déformation à la rupture correspondante sont représentées sur la Figure V-12 pour les températures $T = -25\text{ °C}$ et $T = +5\text{ °C}$. Dans le premier cas on

observe une relation croissante entre résistance et déformation de rupture et un effet favorable sur ceux-ci à la fois du taux d'AE et de l'additif. Dans le deuxième cas la relation est décroissante et les effets des AE et de l'additif peu marqués.

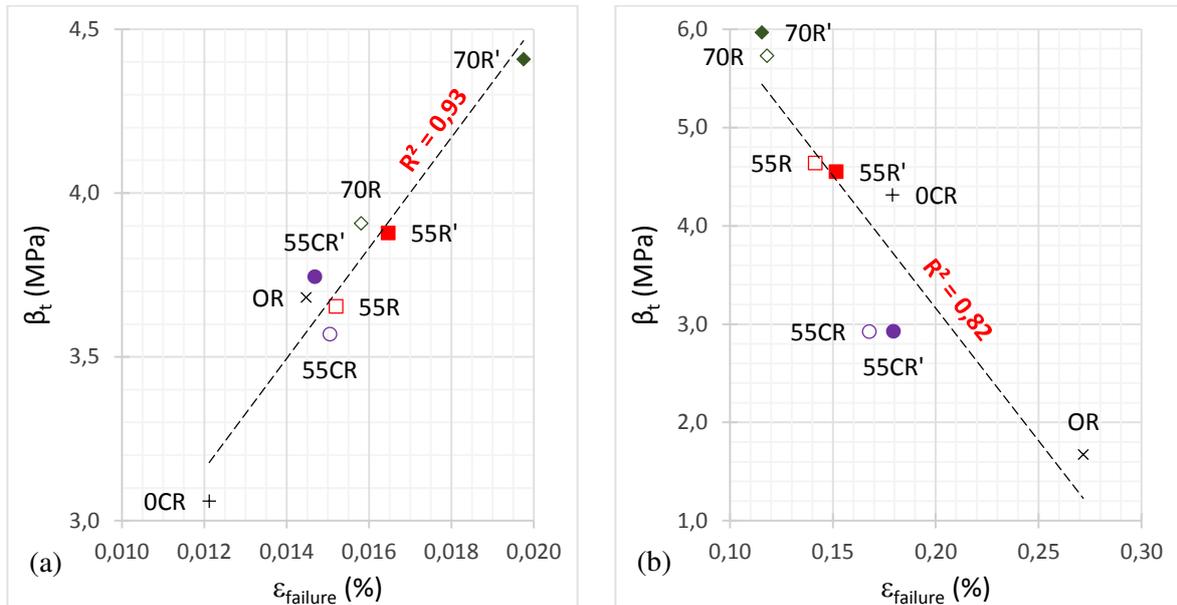


Figure V-12. Résistance à la traction et déformation conventionnelle de rupture (BBSG3) : (a) $-25\text{ }^\circ\text{C}$; (b) $+5\text{ }^\circ\text{C}$.

3.2. ANALYSE DES RÉSULTATS DE RETRAIT EMPÊCHÉ

La température de rupture T_{faillure} et les températures de transition T_{fdr} (fin de relaxation) et T_{mfr} (micro-fissuration) sont présentées sur la Figure V-13a pour les différentes formules de béton bitumineux. On note des tendances similaires pour ces trois températures en fonction des formules, ou autrement dit, des écarts du même ordre entre les différentes températures quelque soient les formules. Cela traduit une relation entre les différentes températures, ainsi, par exemple, les formules ayant la température de fin de relaxation la plus faible présentent également les températures de rupture les plus faibles.

Contrairement aux observations de Pedraza [176], la présence d'AE a tendance à augmenter les différentes températures (effet défavorable) [184] mais l'ajout de régénérant compense partiellement cette dégradation (entre -1 et $-3\text{ }^\circ\text{C}$) [166].

La contrainte de rupture et la pente dS/dT sont représentées sur la Figure V-13b pour l'ensemble des formules de béton bitumineux. On note des tendances similaires entre les valeurs absolues de ces deux paramètres en fonction des formules. Comparées aux formules témoin, les formules avec AE produisent des contraintes de rupture plus élevées, encore améliorées par l'ajout de régénérant. La valeur absolue de la pente dS/dT , traduisant une sensibilité des efforts générés par la diminution de température à l'égard de celle-ci, en suivant les mêmes tendances que la contrainte de rupture, montrent une plus grande sensibilité à la température des formules avec AE, encore amplifiée par l'ajout de régénérant.

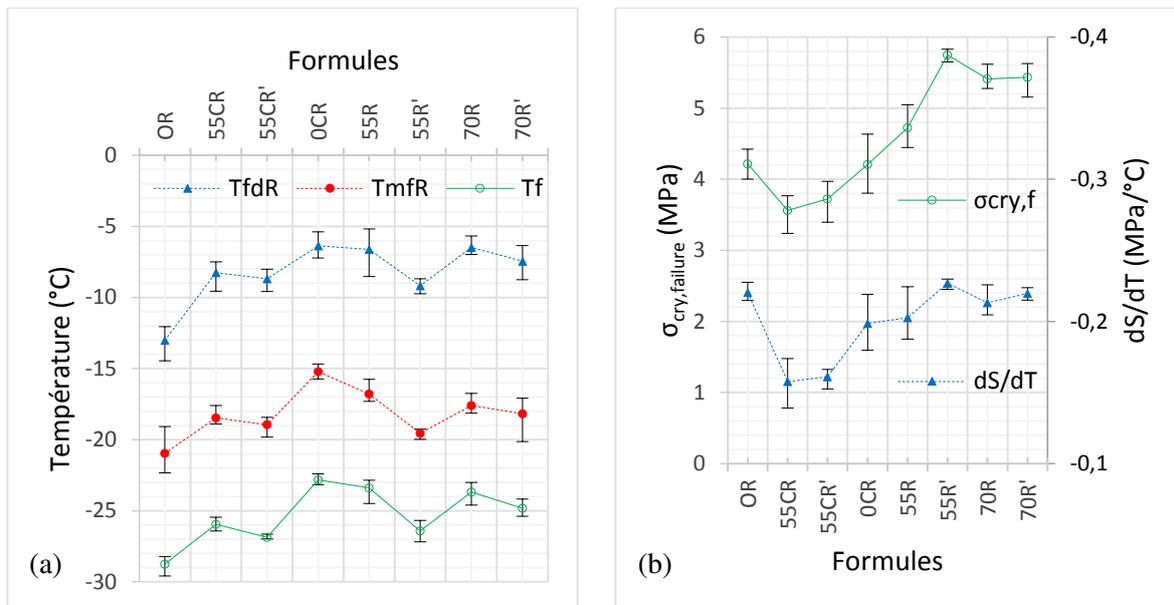


Figure V-13. Résultats de l'essai de retrait empêché (BBSG3) : (a) températures de rupture et de transition ; (b) contrainte de rupture et pente dS/dT .

En matière de précision, les résultats sont conformes aux spécifications [54] : la température de rupture montre une bonne répétabilité (différences de moins de 2 °C) tandis que la contrainte de rupture est un peu plus dispersée (jusqu'à 0,4 MPa).

3.3. RÉSERVE DE TRACTION

On rappelle que la réserve de traction pour une température donnée est définie comme la différence entre la contrainte de rupture en traction directe (essai UTST) et la contrainte générée par le retrait empêché (essai TSRST). Les courbes correspondantes sont présentées sur la Figure V-14.

On observe globalement un effet favorable des AE sur la réserve en traction surtout marqué dans la zone des températures de transition (autour de 0 °C) ainsi qu'un impact positif du régénérant dans cette même gamme de températures. En revanche les températures critiques de rupture, correspondant à une réserve de traction nulle, ne semblent pas influencées par les paramètres ci-dessus.

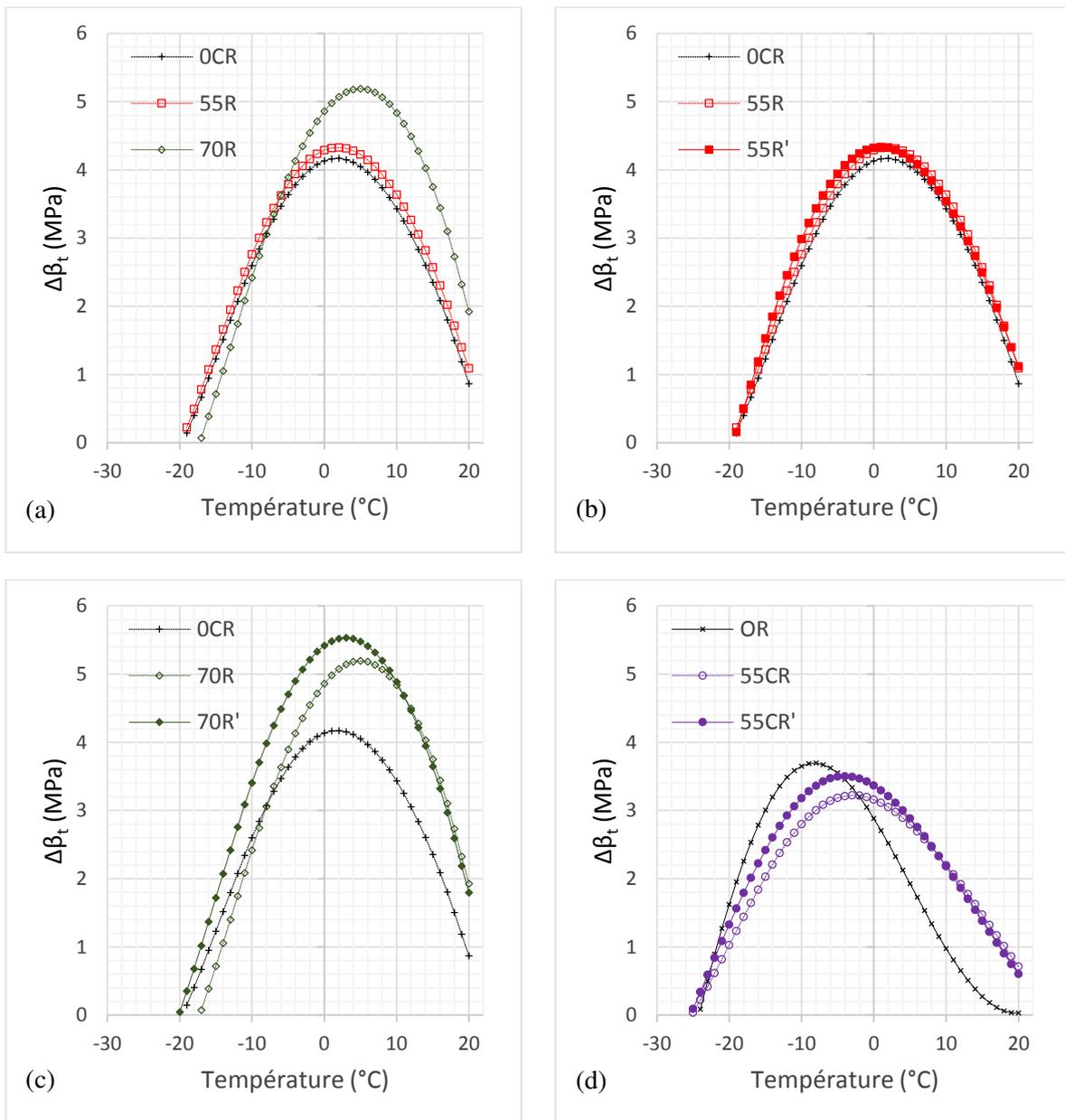


Figure V-14. Réserve de traction d'après les essais de traction directe et de retrait empêché (BBSG3) : (a) effet des AE ; (b), (c), (d) effet du régénérant.

4. GB4

L'ensemble des résultats obtenus lors des essais à froid sur la Grave-Bitume classe 4 (GB4) sont rassemblés sur le Tableau V-2 [186] [194].

Tableau V-2. Résultats des essais à basse température de la GB4.

Essai \ Paramètres		Formules						
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
UTST	% de Vides	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
	β_t (-25 °C) (MPa)	4,28	3,52	3,62	3,51	4,01	3,66	3,92
	Température (°C)	-25,0	-25,0	-24,8	-25,0	-24,7	-25,1	-25,1
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (-25 °C) (%)	0,017	0,013	0,014	0,013	0,015	0,015	0,016
	β_t (-10 °C) (MPa)	5,32	5,46	5,34	4,80	5,60	4,99	5,61
	Température (°C)	-9,8	-10,1	-10,0	-10,2	-10,0	-10,1	-10,1
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (-10 °C) (%)	0,038	0,027	0,027	0,023	0,027	0,022	0,026
	β_t (+5 °C) (MPa)	2,57	5,07	4,19	4,99	4,88	5,60	4,92
	Température (°C)	5,2	5,1	5,5	4,9	5,0	4,9	5,1
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (+5 °C) (%)	0,193	0,105	0,186	0,117	0,131	0,080	0,108
	β_t (+20 °C) (MPa)	0,57	1,19	1,03	1,39	1,21	1,87	1,65
	Température (°C)	20,2	20,5	20,0	19,5	20,3	19,9	20,0
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (+20 °C) (%)	0,485	0,360	0,424	0,326	0,373	0,230	0,297
	T_{fd} (°C)	-15,2	-4,4	-8,7	-0,9	-6,6	1,2	-6,6
$\beta_{\text{t max}}$ (MPa)	5,64	5,64	5,35	5,23	5,67	5,71	5,67	
TSRST	% de Vides	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
	T_0 (°C)	9,7	10,0	9,1	9,8	9,9	9,4	9,9
	T_{failure} (°C)	-26,2	-22,8	-25,0	-22,5	-22,9	-19,9	-22,2
	$\sigma_{\text{cry, failure}}$ (MPa)	7,05	6,84	7,06	6,73	7,25	7,05	7,74
	T_{fdR} (°C)	-17,2	-13,4	-13,1	-11,5	-13,0	-10,5	-11,6
	$\sigma_{\text{cry, TfdR}}$ (MPa)	4,03	4,15	3,52	3,39	4,09	4,07	4,36
	T_{mfR} (°C)	-24,4	-21,2	-21,6	-19,2	-21,2	-16,4	-19,5
	$\sigma_{\text{cry, TmfR}}$ (MPa)	6,52	6,45	6,13	5,85	6,81	6,31	7,02
	Pente dS/dT (MPa/°C)	-0,352	-0,309	-0,314	-0,321	-0,340	-0,338	-0,345
Réserve	$T_{\Delta\beta_{\text{t max}}}$ (°C)	-6,3	3,1	0,4	4,1	2,2	6,1	3,6
	$\Delta\beta_{\text{t max}}$ (MPa)	3,48	4,58	4,11	4,56	4,46	4,92	4,30
	T_{critique} (°C)	-20,4	-15,8	-17,3	-14,5	-16,1	-12,3	-14,4

4.1. ANALYSE DES RÉSULTATS DE TRACTION UNIAXIALE

4.1.1. Contrainte de rupture

Les valeurs des contraintes de rupture obtenues pour chaque mélange et chaque température d'essai sont présentées sur la Figure V-15. Pour les températures négatives (Figure V-15a) on observe une légère diminution de la résistance à la traction pour les formules avec

AE sans régénérant, comparée à celle de la formule témoin [116]. Le régénérant a un effet favorable en compensant partiellement ou totalement cette perte de résistance.

Dans le cas des températures positives (Figure V-15b), on constate une meilleure résistance à la traction des formules avec AE, comparée à celle de la formule témoin, alors que le régénérant a pour effet de modérer cette augmentation.

En substance, quelle que soit la température (positive ou négative), le régénérant a pour effet de compenser les variations positives ou négatives produites par les AE par rapport à la formule témoin.

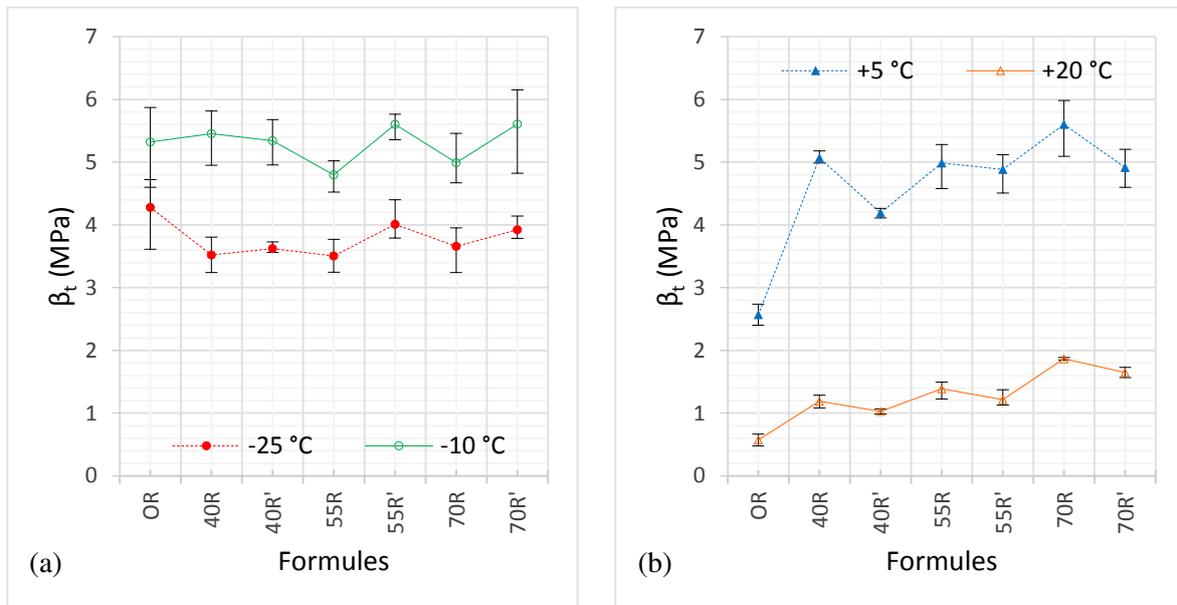


Figure V-15. Résistance à la traction directe à l'essai UTST (GB4) : (a) -25 et -10 °C ;(b) +5 et +20 °C.

4.1.2. Température de transition fragile-ductile

Les courbes des résistances à la traction directe en fonction de la température permettant de déterminer la température de transition fragile ductile T_{fd} (correspondant au maximum de la résistance $\beta_{t \max}$), sont présentées sur la Figure V-16 en termes de résultats individuels pour chaque éprouvette et de courbe moyenne de tendance.

Au-delà d'environ -5 °C l'effet des AE (Figure V-16a) apparaît favorable sur la résistance maximale (doublement de la résistance pour +5 °C) mais défavorable pour les températures inférieures à -5 °C. L'impact des AE est également défavorable sur la température de transition fragile-ductile (augmentation d'environ +15 °C).

L'effet du régénérant (Figure V-16b à Figure V-16d) se traduit principalement par une diminution de la température de transition fragile-ductile (jusqu'à -8 °C), c'est-à-dire par un impact favorable.

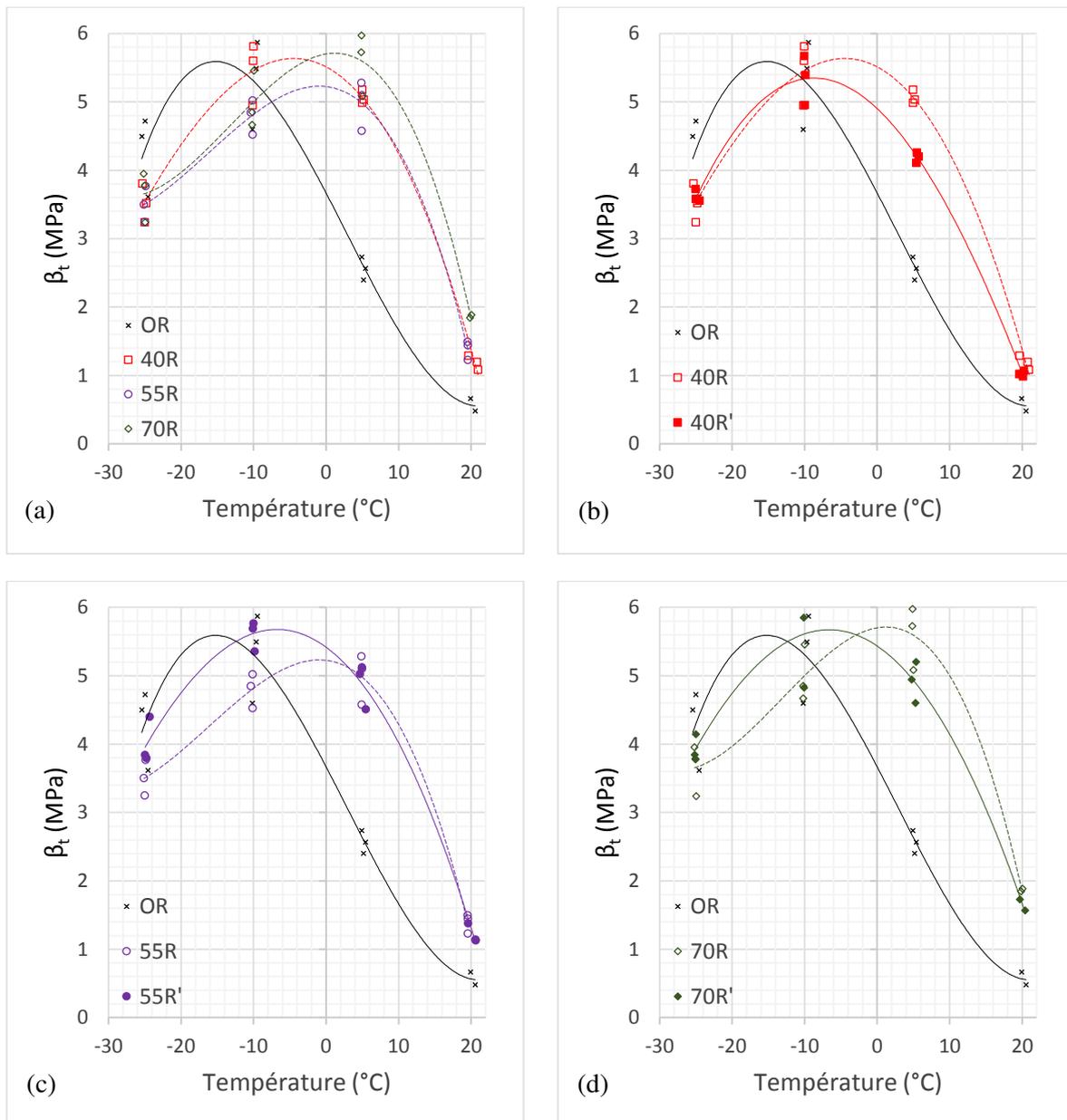


Figure V-16. Résistance en traction directe vs température pour les formules de GB4. (a) : effet du % d'AE ; (b), (c), & (d) : effet de l'additif.

4.1.3. Déformation à la rupture

Les déformations conventionnelles à la rupture sont présentées sur la Figure V-17a pour les différentes formules et les différentes températures. Globalement, on constate une légère décroissance de la déformation à la rupture pour les formules avec des AE par rapport à la formule témoin ; cette diminution étant d'autant plus marquée que la température est élevée. Le régénérant a pour effet favorable de compenser partiellement ou parfois totalement cette variation.

La Figure V-17b présente la relation entre la déformation conventionnelle à la rupture en traction directe (à +5 °C) et la température de transition fragile-ductile. On observe une amélioration systématique des deux paramètres avec l'ajout du régénérant (jusqu'à 0,08 % et -8 °C respectivement).

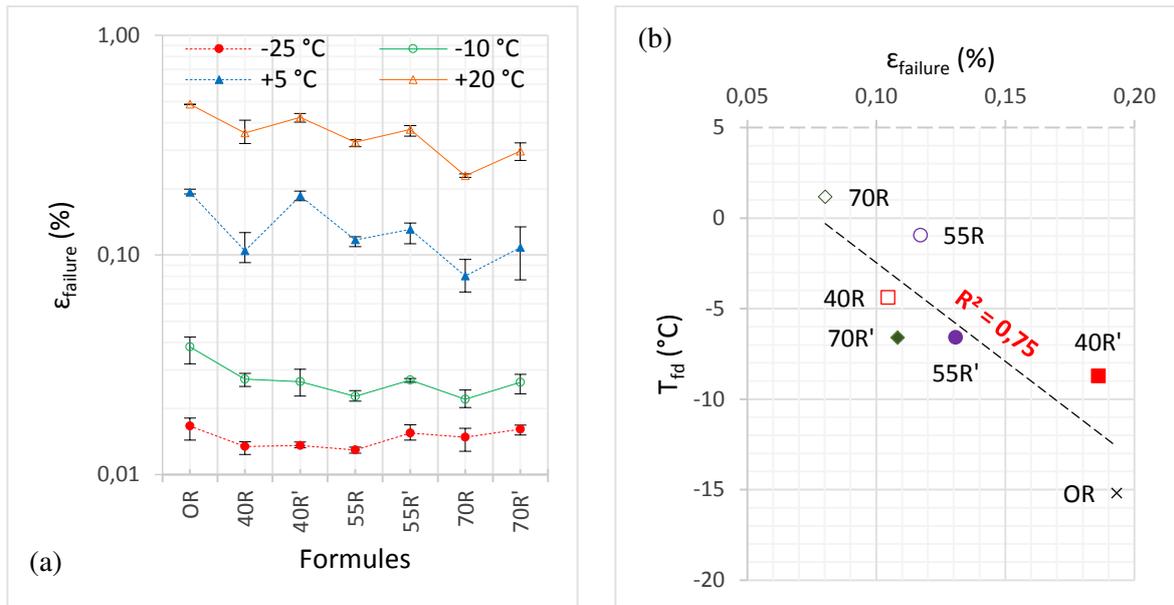


Figure V-17. Déformation conventionnelle à la rupture à l'essai UTST (GB4) : (a) toutes les températures ; (b) Corrélation avec T_{fd} ($T = +5 \text{ }^\circ\text{C}$)

La résistance à la traction et la déformation à la rupture correspondante sont représentées sur la Figure V-18 pour les températures $T = -25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $T = +5 \text{ }^\circ\text{C}$. Comme pour le Béton Bitumineux ci-dessus, on observe une relation croissante entre les deux grandeurs dans le premier cas et décroissante dans le deuxième. Par rapport à la formule témoin, on constate dans tous les cas une moins bonne déformation à la rupture pour les formules avec AE, partiellement compensée par le régénérateur.

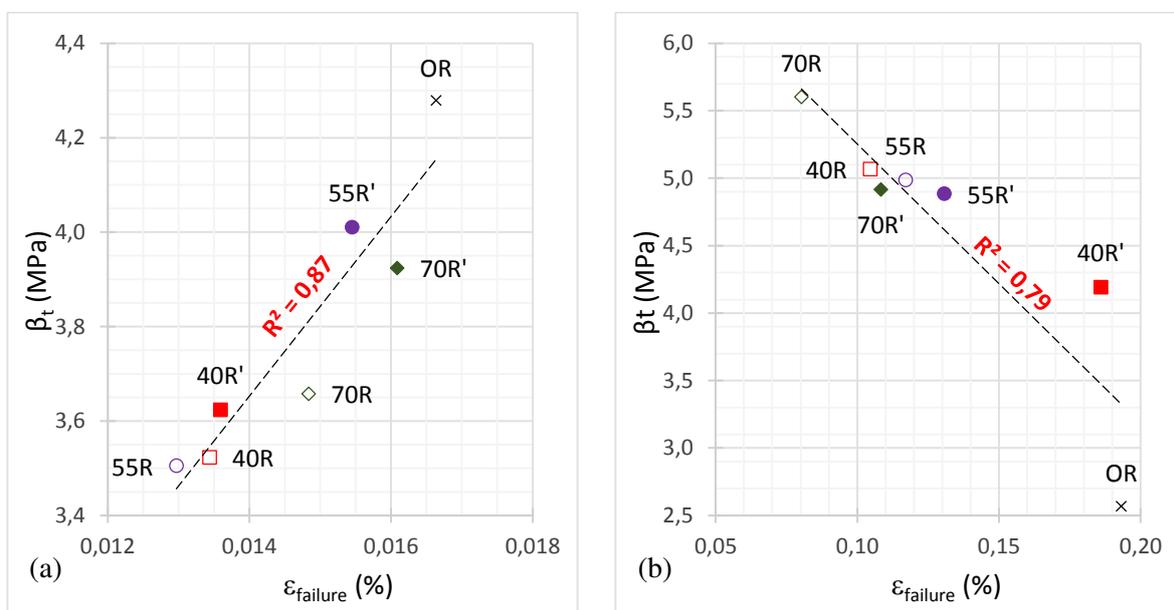


Figure V-18. Résistance à la traction et déformation conventionnelle de rupture (GB4) : (a) $-25 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) $+5 \text{ }^\circ\text{C}$.

4.2. ANALYSE DES RÉSULTATS DE RETRAIT EMPÊCHÉ

La température de rupture T_{failure} et les températures de transition T_{fdr} (fin de relaxation) et T_{mfr} (micro-fissuration) sont présentées sur la Figure V-19a pour les différentes formules de grave bitume. Comme précédemment avec le béton bitumineux, on note des tendances similaires pour ces trois températures en fonction des formules, ce qui traduit une relation entre les différentes températures.

Comme précédemment, on observe que la présence d'AE a tendance à augmenter les différentes températures (effet défavorable) mais l'ajout de régénérant compense partiellement cette dégradation (jusqu'à près de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

La contrainte de rupture et la pente dS/dT sont représentées sur la Figure V-19b pour l'ensemble des formules de grave bitume : elle montre également des tendances similaires entre les valeurs absolues de ces deux paramètres en fonction des formules. On constate que, comparées à la formule témoin, les formules avec AE diminuent légèrement la contrainte de rupture, la valeur de celle-ci étant restituée par un effet favorable du régénérant. La valeur absolue de la pente dS/dT , traduisant la sensibilité des efforts de retrait à l'égard de la température, subit des influences des AE et du régénérant similaires à celles ci-dessus.

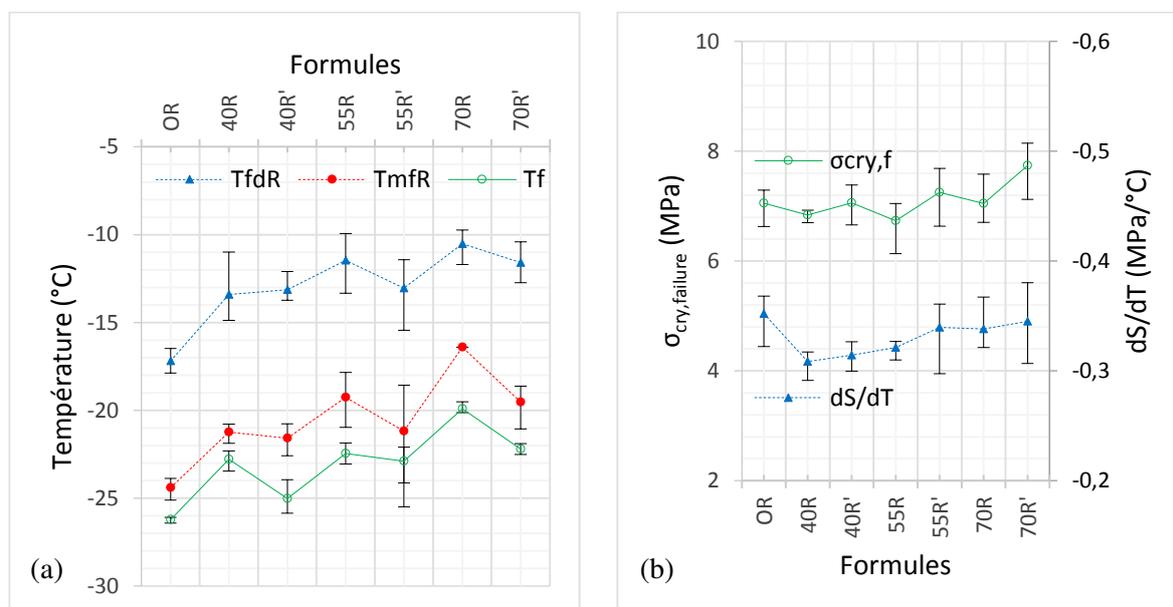


Figure V-19. Résultats de l'essai de retrait empêché (GB4) : (a) températures de rupture et de transition ; (b) contrainte de rupture et pente dS/dT .

4.3. RÉSERVE DE TRACTION

Les courbes de la réserve de traction en fonction de la température sont présentées sur la Figure V-20 pour l'ensemble des formules de grave-bitume. On observe (Figure V-20a) un effet très favorable des AE sur la réserve en traction (gain pouvant atteindre 1,5 MPa) dans la zone des températures positives mais un impact défavorable dans le domaine des températures négatives. En particulier les AE ont pour effet défavorable d'augmenter la température critique (jusqu'à $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$) correspondant à une réserve de traction nulle.

Par rapport aux formules sans additif, le régénérant corrige les effets des AE dans les deux domaines de température ci-dessus (Figure V-20b à Figure V-20d) et a notamment pour

impact favorable l'augmentation de la réserve de traction dans le domaine des températures négatives ainsi qu'une légère diminution de la température critique.

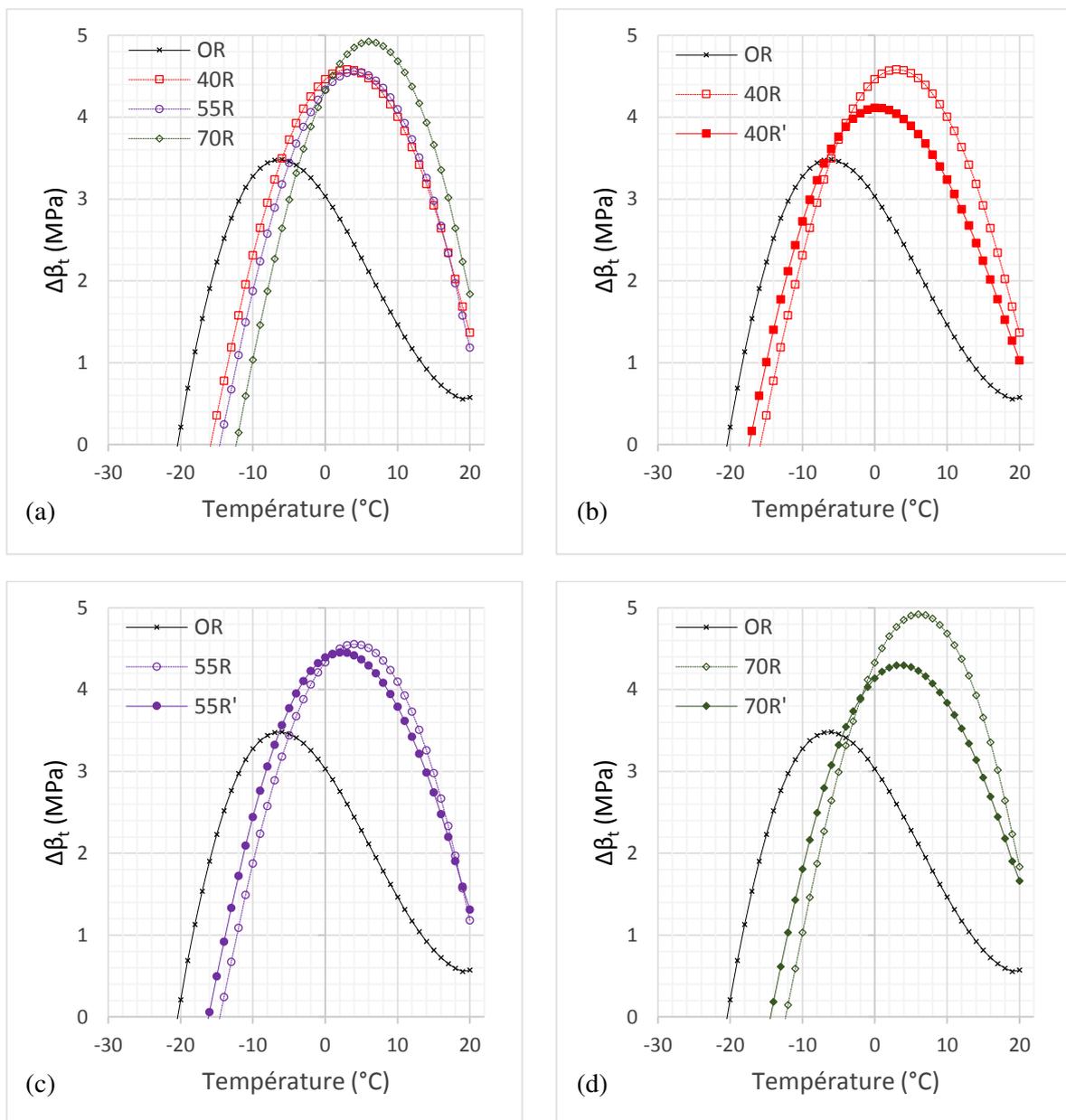


Figure V-20. Réserve de traction d'après les essais de traction directe et de retrait empêché (GB4) : (a) effet des AE ; (b), (c), (d) effet du régénérant.

5. EME2

L'ensemble des résultats obtenus lors des essais à froid sur l'enrobé à module élevé classe 2 (EME2) sont rassemblés sur le Tableau V-3 [195].

Tableau V-3. Résultats des essais à basse température de l'EME2.

Essai \ Paramètres		Formules						
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
UTST	% de Vides	3,3	3,3	3,3	3,2	3,3	3,3	3,3
	β_t (-25 °C) (MPa)	3,46	3,10	3,55	3,24	3,59	3,14	3,34
	Température (°C)	-25,0	-24,9	-24,7	-25,0	-25,2	-24,7	-24,9
	$\epsilon_{\text{faillure}}$ (-25 °C) (%)	0,014	0,012	0,015	0,014	0,015	0,014	0,015
	β_t (-10 °C) (MPa)	4,31	4,81	5,08	4,35	5,29	4,11	4,83
	Température (°C)	-10,1	-10,0	-10,1	-10,1	-10,2	-10,1	-9,9
	$\epsilon_{\text{faillure}}$ (-10 °C) (%)	0,023	0,024	0,026	0,020	0,025	0,017	0,022
	β_t (+5 °C) (MPa)	4,24	4,83	4,70	4,90	5,21	5,25	5,11
	Température (°C)	5,2	4,9	5,0	4,8	5,0	4,8	4,9
	$\epsilon_{\text{faillure}}$ (+5 °C) (%)	0,157	0,090	0,096	0,064	0,068	0,041	0,052
	β_t (+20 °C) (MPa)	1,00	1,72	1,69	2,29	2,24	2,75	2,52
	Température (°C)	20,2	19,7	19,6	19,8	19,8	19,8	20,2
	$\epsilon_{\text{faillure}}$ (+20 °C) (%)	0,538	0,217	0,241	0,158	0,174	0,122	0,162
	T_{fd} (°C)	-2,3	-2,1	-4,7	1,8	-2,8	4,7	-0,1
$\beta_{t \text{ max}}$ (MPa)	4,54	5,12	5,21	4,95	5,56	5,25	5,25	
TSRST	% de Vides	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
	T_0 (°C)	9,7	10,2	10,1	10,0	10,1	10,0	9,9
	T_{faillure} (°C)	-25,2	-22,0	-23,7	-17,4	-20,0	-16,7	-17,3
	$\sigma_{\text{cry,faillure}}$ (MPa)	5,45	4,71	5,78	6,16	7,28	4,44	4,99
	T_{fdR} (°C)	-10,1	-7,1	-7,1	-4,5	-5,6	0,6	-1,7
	$\sigma_{\text{cry,TfdR}}$ (MPa)	2,49	1,99	2,49	2,91	3,50	1,45	2,01
	T_{mfR} (°C)	-18,7	-16,1	-17,0	-12,8	-12,8	-10,6	-11,9
	$\sigma_{\text{cry,TmfR}}$ (MPa)	4,53	3,86	4,76	5,24	5,86	3,59	4,25
	Pente dS/dT (MPa/°C)	-0,242	-0,216	-0,238	-0,287	-0,337	-0,198	-0,224
	$T_{\Delta\beta_t \text{ max}}$ (°C)	3,8	3,9	3,7	8,0	6,7	8,6	7,4
Réserve	$\Delta\beta_{t \text{ max}}$ (MPa)	3,91	4,42	4,15	4,17	4,31	4,73	4,40
	T_{critique} (°C)	-16,1	-17,2	-16,1	-9,5	-10,8	-11,8	-13,3

5.1. ANALYSE DES RÉSULTATS DE TRACTION UNIAXIALE

5.1.1. Contrainte de rupture

Les valeurs des contraintes de rupture obtenues pour chaque mélange et chaque température d'essai sont présentées sur la Figure V-21. Pour les températures négatives (Figure V-21a) on n'observe pas de variation notable de la résistance à la traction avec le taux d'AE.

Le régénérant joue un rôle favorable qui se traduit par une augmentation de la résistance pouvant atteindre 1 MPa.

Dans le cas des températures positives (Figure V-21b), on constate une légère augmentation de la résistance à la traction avec le taux d'AE, le régénérant n'ayant pas dans ce cas d'impact significatif.

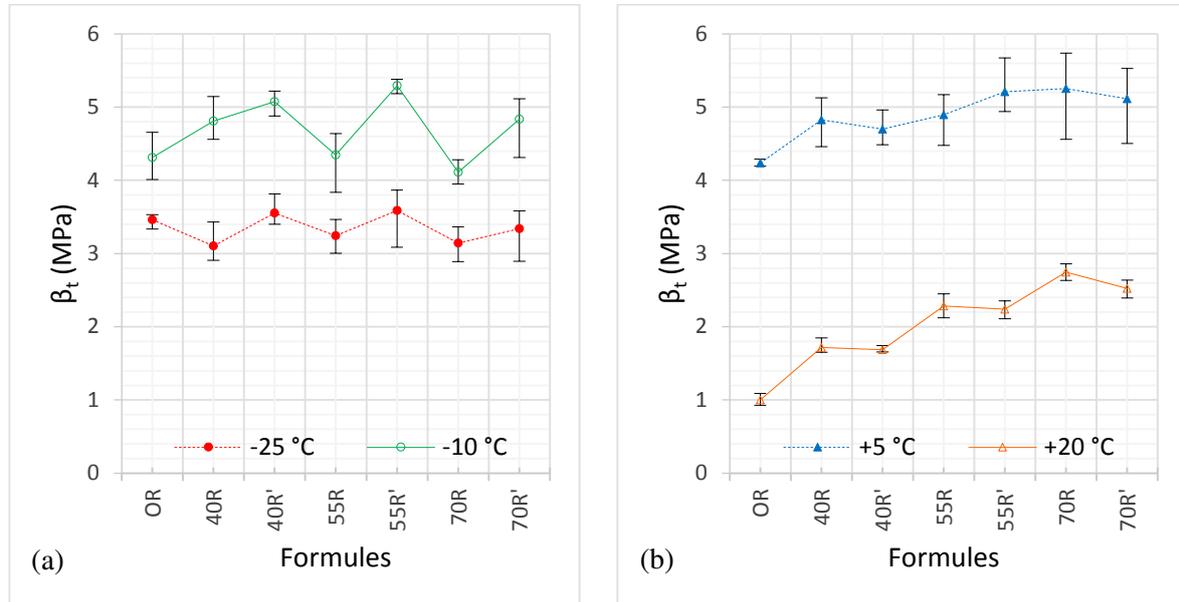


Figure V-21. Résistance à la traction directe à l'essai UTST (EME) : (a) -25 et -10 °C ;(b) +5 et +20 °C.

5.1.2. Température de transition fragile-ductile

Les résultats des résistances à la traction directe en fonction de la température et la température de transition fragile ductile correspondant au maximum de la résistance sont présentés sur la Figure V-22 en termes de résultats individuels pour chaque éprouvette et de courbe moyenne.

En termes de résistance, au-delà d'environ -5 °C l'effet des AE (Figure V-22a) apparaît favorable mais légèrement défavorable pour les températures inférieures à -5 °C. L'impact des AE est également défavorable sur la température de transition fragile-ductile.

Le régénérant a un impact favorable sur les résistances dans le domaine des températures négatives (Figure V-22b à Figure V-22d) et également sur les températures de transition fragile-ductile en corrigeant ces dernières de l'effet défavorable des AE pour les rapprocher de celles de la formule témoin.

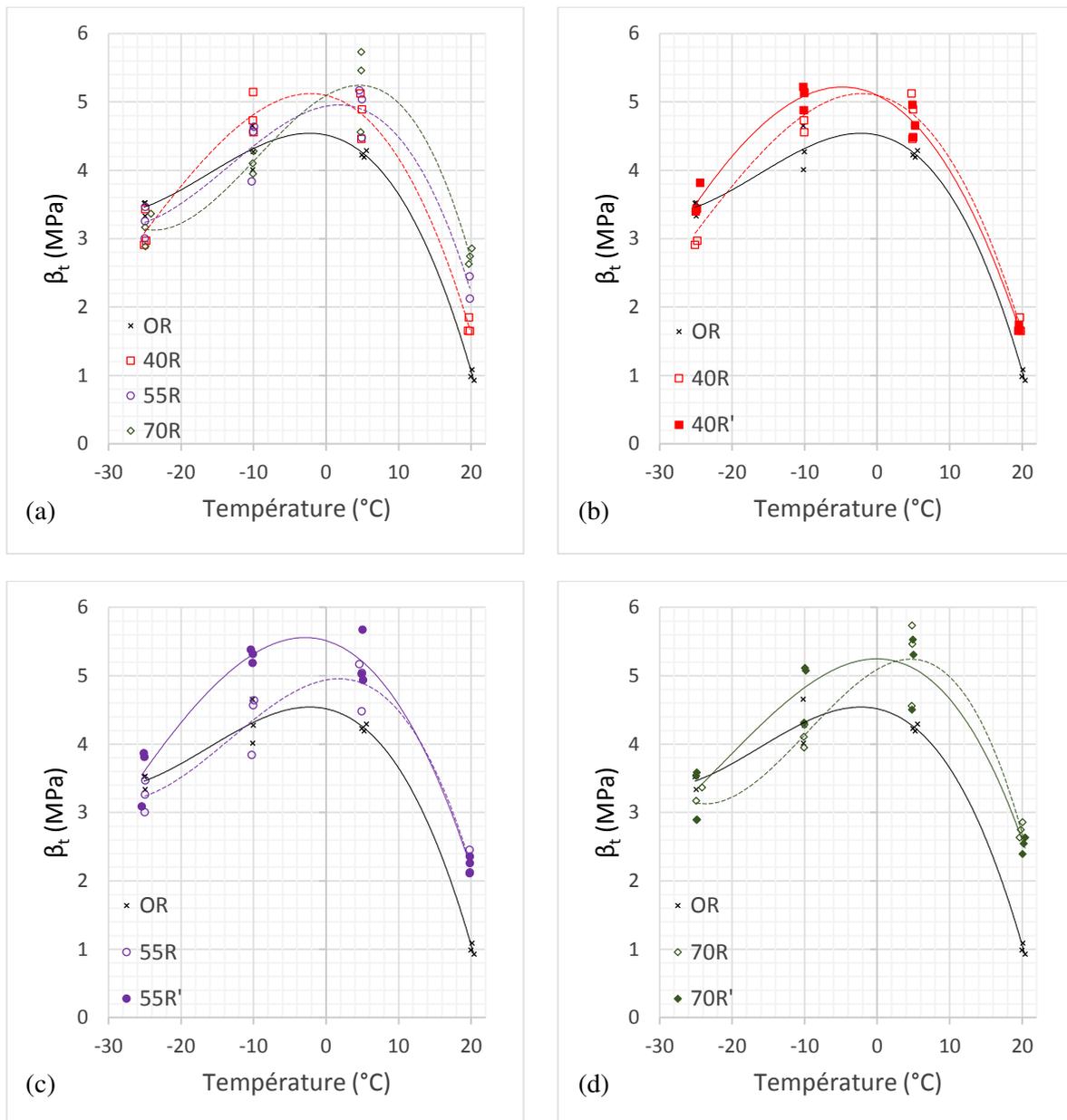


Figure V-22. Résistance en traction directe vs température pour les formules d'EME2. (a) : effet du % d'AE ; (b), (c), & (d) : effet de l'additif.

5.1.3. Déformation à la rupture

Les déformations conventionnelles à la rupture sont présentées sur la Figure V-23a pour les différentes formules et les différentes températures. Globalement, on constate une légère décroissance de la déformation à la rupture pour les formules avec des AE par rapport à la formule témoin ; cette diminution étant d'autant plus marquée que la température est élevée. Le régénérant a pour effet favorable de compenser partiellement ou parfois totalement cette diminution.

La Figure V-23b présente la relation entre la déformation conventionnelle à la rupture en traction directe (à +5 °C) et la température de transition fragile-ductile. Contrairement au cas de la GB4 il n'y a pas une tendance bien définie entre les deux paramètres, cependant, l'ajout du régénérant améliore significativement T_{fd} (jusqu'à -5 °C).

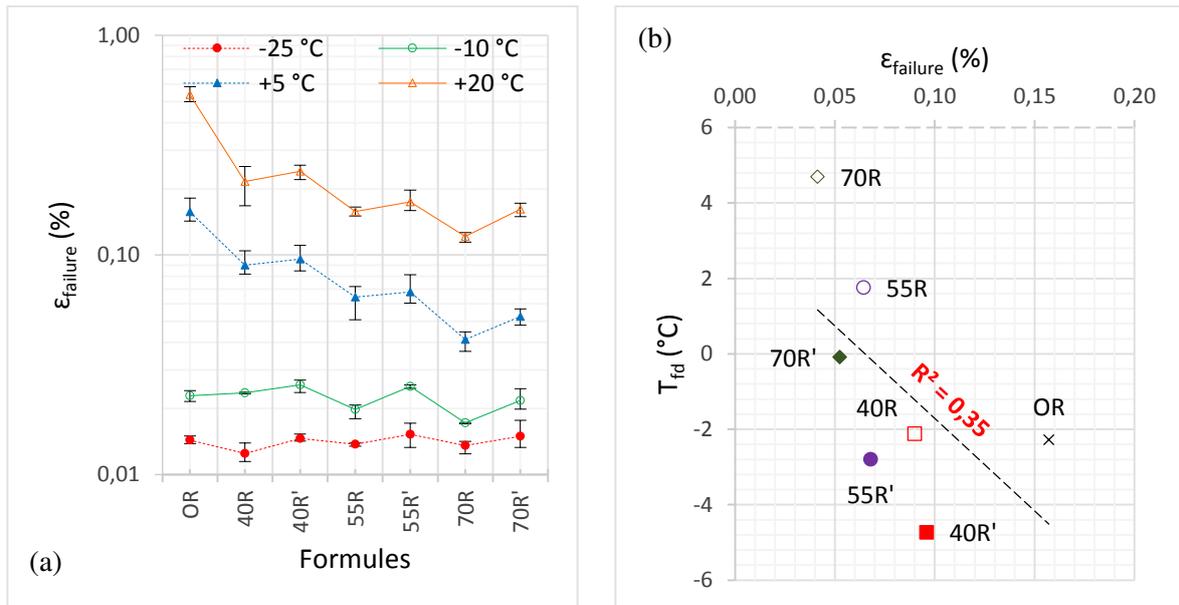


Figure V-23. Déformation conventionnelle à la rupture à l'essai UTST (EME2) : (a) toutes les températures ; (b) corrélation avec T_{fd} ($T = +5^\circ\text{C}$).

La résistance à la traction et la déformation à la rupture correspondante sont représentées sur la Figure V-24 pour les températures $T = -25^\circ\text{C}$ et $T = +5^\circ\text{C}$. Comme pour les deux matériaux précédents (BBSG3, GB4) on observe une relation croissante entre les deux grandeurs dans le premier cas et décroissante dans le deuxième. Par rapport à la formule témoin, on constate dans tous les cas une moins bonne déformation à la rupture pour les formules avec des AE, partiellement compensée par le régénérant.

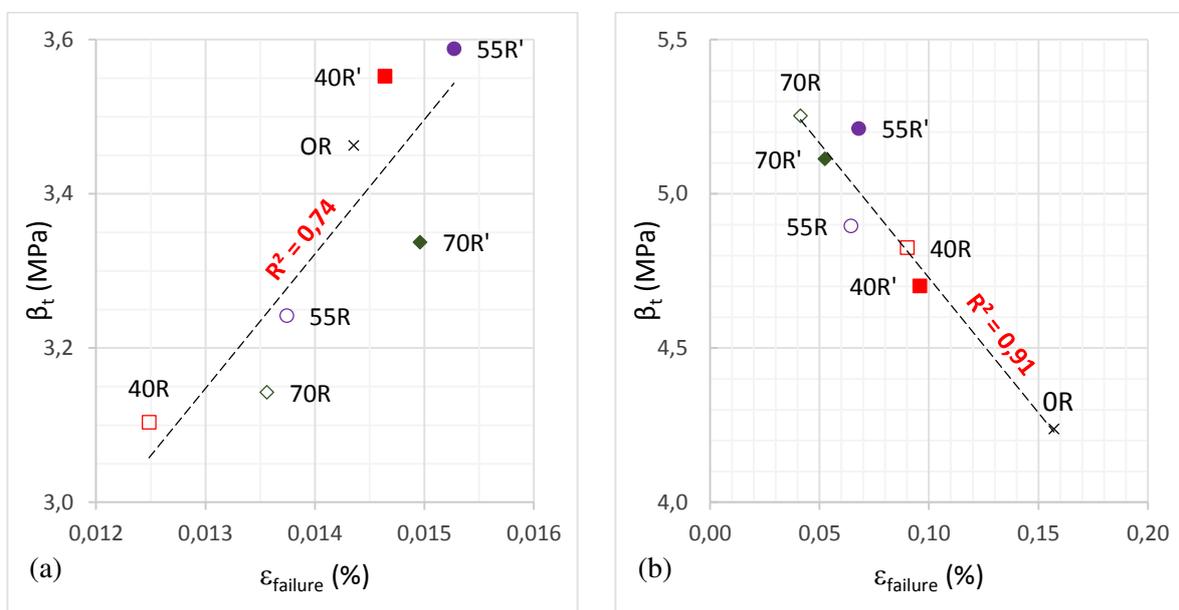


Figure V-24. Résistance à la traction et déformation conventionnelle de rupture (EME2) : (a) -25°C ; (b) $+5^\circ\text{C}$.

5.2. ANALYSE DES RÉSULTATS DE RETRAIT EMPÊCHÉ

La température de rupture T_{failure} et les températures de transition T_{fdr} (fin de relaxation) et T_{mfr} (micro-fissuration) sont présentées sur la Figure V-25a pour les différentes compositions d'enrobés à module élevé. De même qu'avec le béton bitumineux et la grave-bitume, on note des tendances similaires pour ces trois températures en fonction des formules, ce qui traduit une relation entre les différentes températures.

Comme précédemment, on observe que la présence d'AE a tendance à augmenter les différentes températures (effet défavorable) mais l'ajout de régénérant compense partiellement cette dégradation.

La contrainte de rupture et la pente dS/dT sont représentées sur la Figure V-25b pour l'ensemble des formules laquelle montre également des tendances similaires entre les valeurs absolues de ces deux paramètres, comme déjà observé sur les deux matériaux-types précédents. On constate que, comparées à la formule témoin, les formules avec AE dégradent globalement la contrainte de rupture, la valeur de celle-ci étant restituée par un effet favorable du régénérant. La valeur absolue de la pente dS/dT , traduisant la sensibilité des efforts de retrait à l'égard de la température, subit les mêmes influences des AE et du régénérant que la contrainte de rupture ci-dessus.

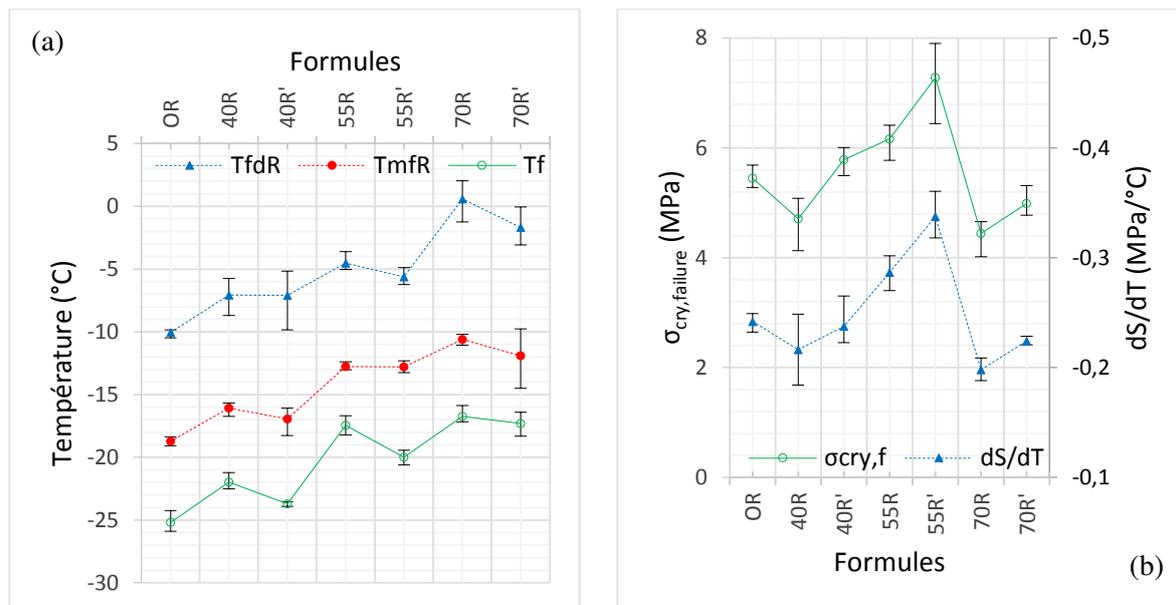


Figure V-25. Résultats de l'essai de retrait empêché (EME2) : (a) températures de rupture et de transition ; (b) contrainte de rupture et pente dS/dT .

5.3. RÉSERVE DE TRACTION

Les courbes de la réserve de traction en fonction de la température sont présentées sur la Figure V-26 pour l'ensemble des formules d'enrobé à module élevé. Comme pour la grave-bitume ci-dessus, mais avec des variations moindres, on observe (Figure V-26a) un effet favorable des AE sur la réserve en traction dans la zone des températures positives et un impact défavorable dans le domaine des températures négatives (diminution de la réserve et augmentation de la température critique).

Par rapport aux formules sans additif, le régénérant corrige les effets des AE dans les deux domaines de température ci-dessus (Figure V-26b à Figure V-26d) mais dans une moindre mesure qu'avec la grave-bitume ci-dessus.

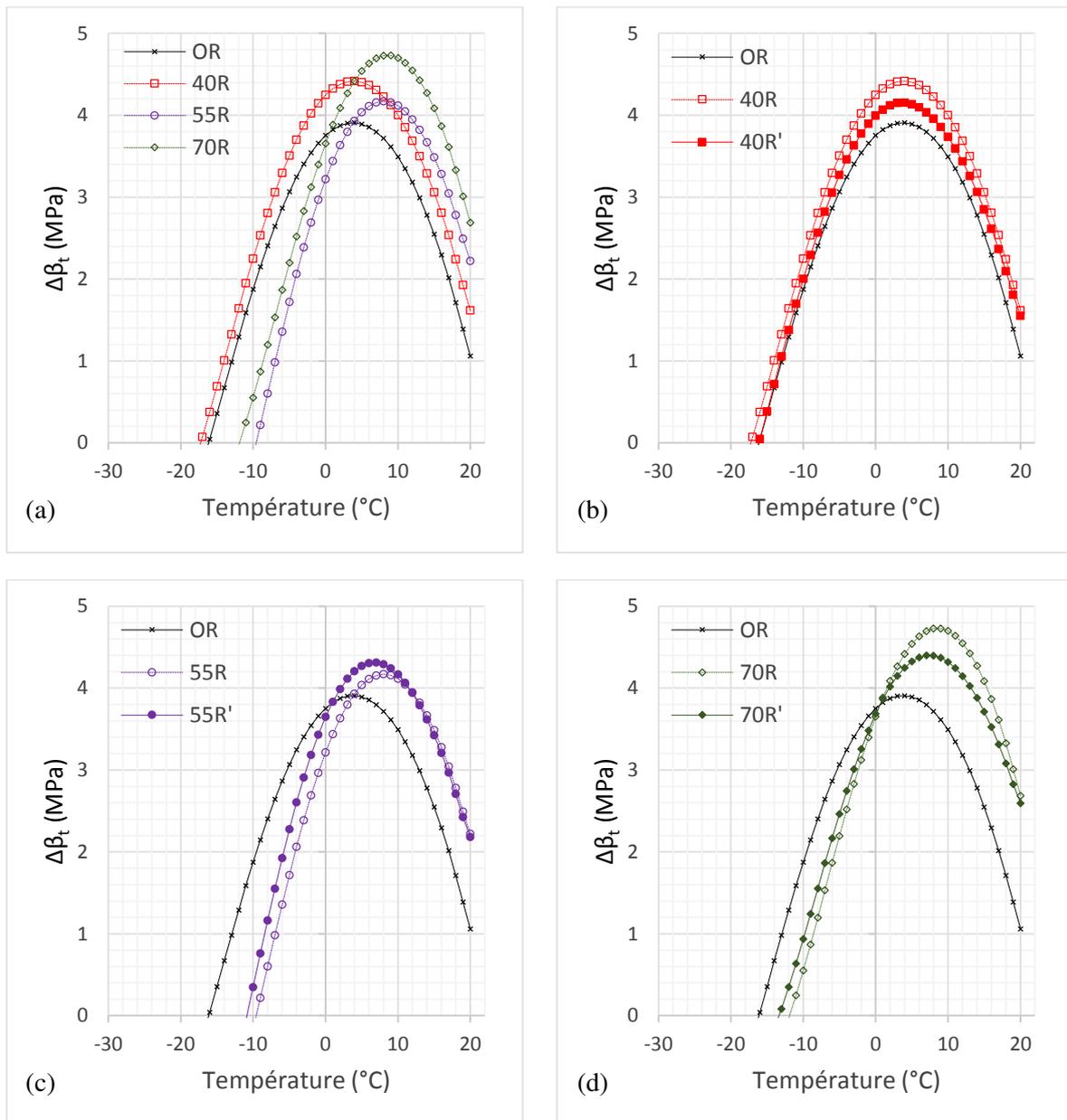


Figure V-26. Réserve de traction d'après les essais de traction directe et de retrait empêché (EME2) : (a) effet des AE ; (b), (c), (d) effet du régénérant.

6. TENDANCES COMMUNES ET GÉNÉRALES

6.1. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS : EFFET DES AE ET DU RÉGÉNÉRANT

Le Tableau V-4 résume les influences des Agrégats d'Enrobés et du régénérant sur l'ensemble des matériaux. Globalement, les AE ont pour effet de traduire les courbes $\beta_t(T)$ et de réserve de traction $\Delta\beta_t(T)$ vers le domaine des températures positives et donc de diminuer les performances à froid des formules, alors que le régénérant a pour effet de compenser

partiellement cette dégradation par une translation de ces courbes vers les températures négatives.

Tableau V-4. Influence des AE et du régénérant : synthèse.

Essai \ Paramètre		Impact des AE			Impact du régénérant		
		BBSG3	GB4	EME2	BBSG3	GB4	EME2
UTST	β_t	+	+/-	+/-	+	+/-	+/=
	T_{fd}	-	-	-	+	+	+
	$\epsilon_{\text{failure}}$	-	-	-	=	+	+
TSRST	$\sigma_{\text{cry, failure}}$	+	-	+/-	+	+	+
	T_{failure}	-	-	-	+	+	+
Réserve	$\Delta\beta_t \text{ max}$	+	+/-	+/-	+	+	+
	T_{critique}	=	-	-	=	+	+

(+) : favorable ; (=) : sans effet ; (-) : défavorable

6.2. CORRÉLATIONS GÉNÉRALES ENTRE PARAMÈTRES

6.2.1. Entre paramètres thermomécaniques

La Figure V-27 représente des corrélations entre diverses températures caractéristiques des essais à froid : température de transition fragile-ductile en traction directe, température de rupture en retrait empêché et température critique correspondant à une réserve de traction nulle. On constate que la température de transition fragile-ductile et la température de rupture varient dans le même sens (Figure V-27a), la différence entre les deux étant comprise entre 15 et 20 °C.

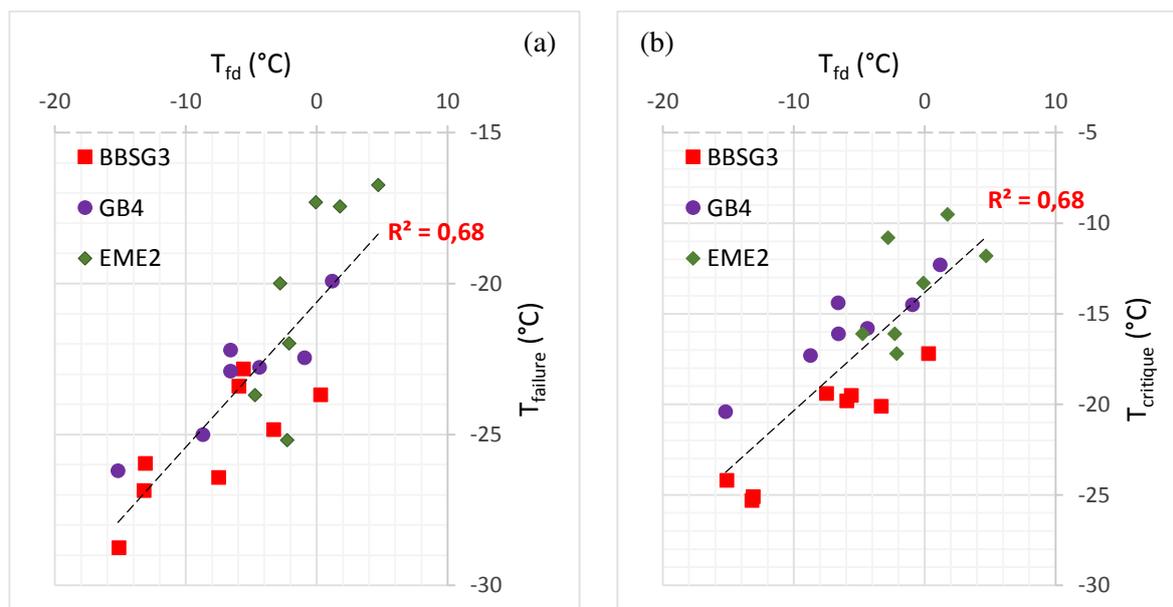


Figure V-27. Corrélation entre températures : (a) température de transition fragile-ductile et température de rupture (TSRST) ; (b) température de transition fragile-ductile et température critique (réserve nulle).

Il en est de même entre température de transition fragile-ductile et température critique (Figure V-27b), la différence entre les deux étant de l'ordre de 10 °C. Ces corrélations permettent de conduire une première hiérarchisation des formules d'après les seuls essais de traction directe sans effectuer systématiquement les essais de retrait empêché, lesquels demandent un matériel d'essais asservi plus sophistiqué.

Les corrélations entre des températures caractéristiques des essais à froid et la déformation conventionnelle à la rupture des matériaux ($T = +5\text{ °C}$) sont présentées sur la Figure V-28. On observe que les formules dont les valeurs de déformation à la rupture sont les plus élevées sont celles qui ont les températures caractéristiques les plus basses.

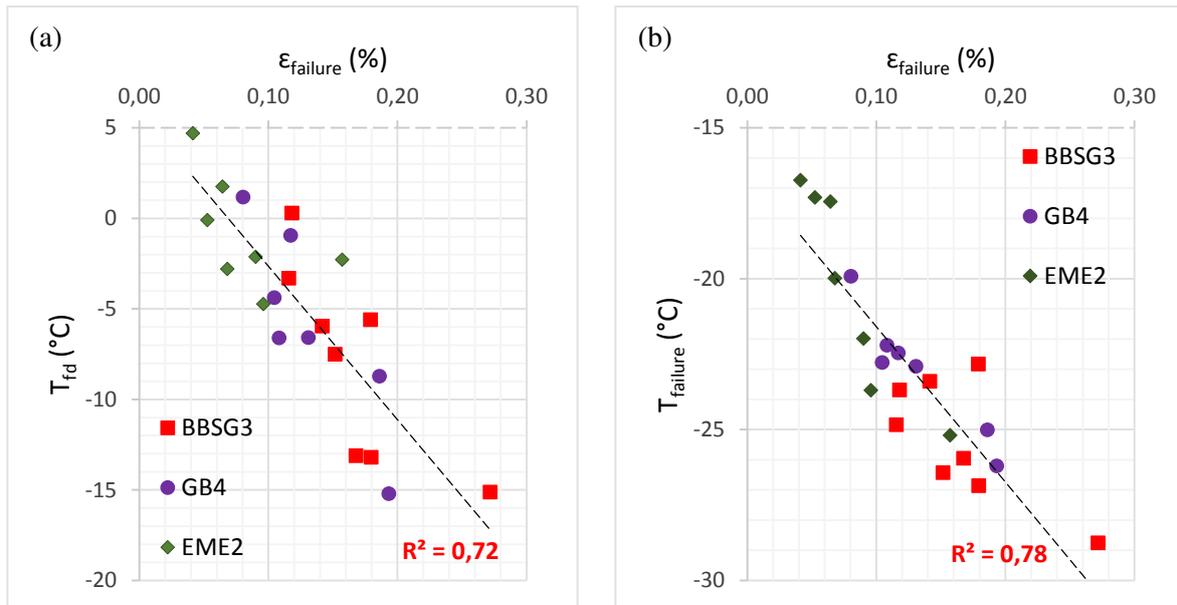


Figure V-28. Corrélation entre températures caractéristiques et déformation à la rupture à +5 °C : (a) température de transition fragile-ductile ; (b) température de rupture.

La Figure V-29 met en relation les paramètres conventionnels de rigidité et de fatigue avec des paramètres caractéristiques à basse température. On observe que les formules qui ont les rigidités viscoélastiques les plus faibles sont celles qui résistent aux températures les plus basses (Figure V-29a). Ce résultat est cohérent avec l'expression V-1 de la contrainte cryogénique : un module de rigidité plus faible génère une contrainte moins élevée, permettant d'atteindre une température de rupture plus basse.

La Figure V-29b montre qu'une performance élevée en fatigue se traduit par une déformation à la rupture en traction directe plus faible, et compte tenu de la Figure V-28, par des températures T_{fd} et $T_{failure}$ plus élevées. L'obtention de compositions performantes à la fois en fatigue et à basses températures sera le résultat d'un compromis.

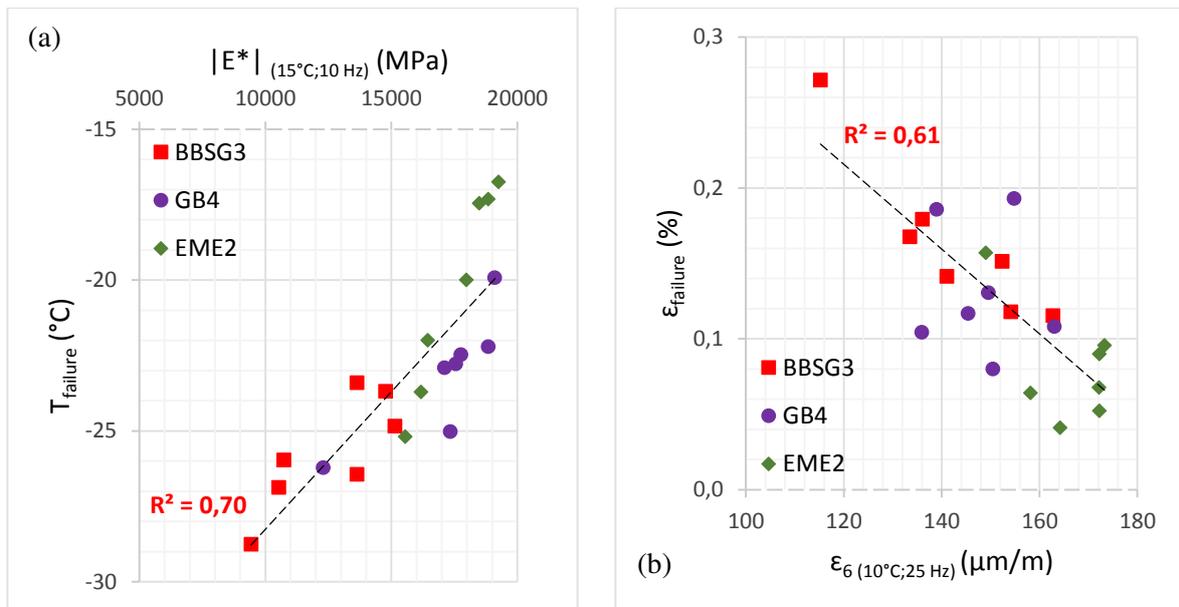


Figure V-29. Corrélation entre paramètres de rigidité et de fatigue avec des paramètres à basse température : (a) module de rigidité complexe vs température de rupture (TSRST) ; (b) résistance conventionnelle à la fatigue vs déformation à la rupture (UTST ; $T = +5^\circ\text{C}$).

6.2.2. Avec des paramètres physico-chimiques

a. Corrélation avec la température de transition vitreuse

Des comparaisons entre les températures caractéristiques T_{fd} et T_{faillure} des essais à froid sur enrobés avec la température de transition vitreuse T_g déterminée sur les liants sont représentées sur la Figure V-30, laquelle montre une absence de corrélation entre chacune des températures T_{fd} et T_{faillure} avec T_g .

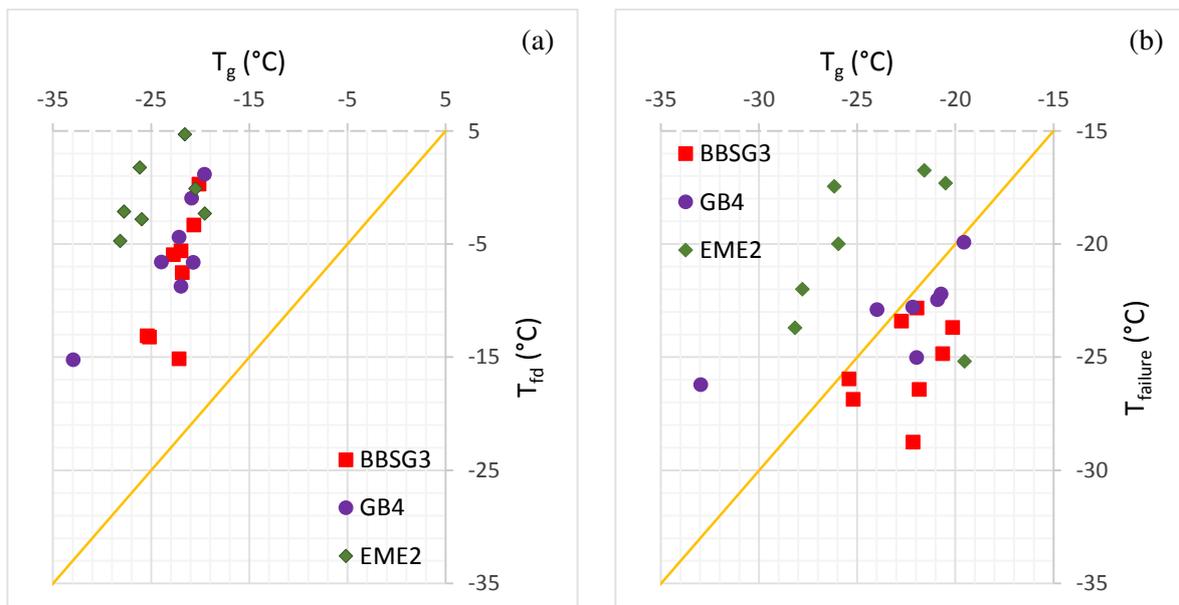


Figure V-30. Corrélation entre températures caractéristiques des essais à froid et température de transition vitreuse : (a) température de transition fragile-ductile ; (b) température de rupture en retrait empêché.

On notera que la gamme des températures T_{fd} est très supérieure à celle de T_g (Figure V-30a) alors que T_{faillure} et T_g varient dans le même domaine (Figure V-30a et Figure V-30b).

b. Corrélation avec l'indice carbonyle

Les corrélations entre les températures caractéristiques des essais à froid et l'indice carbonyle pour l'ensemble des formules sont représentées sur la Figure V-31. Malgré des coefficients de corrélation faibles, elles montrent globalement que les formules ayant les indices carbonyle les plus bas conduisent à des températures de rupture et de transition les plus basses.

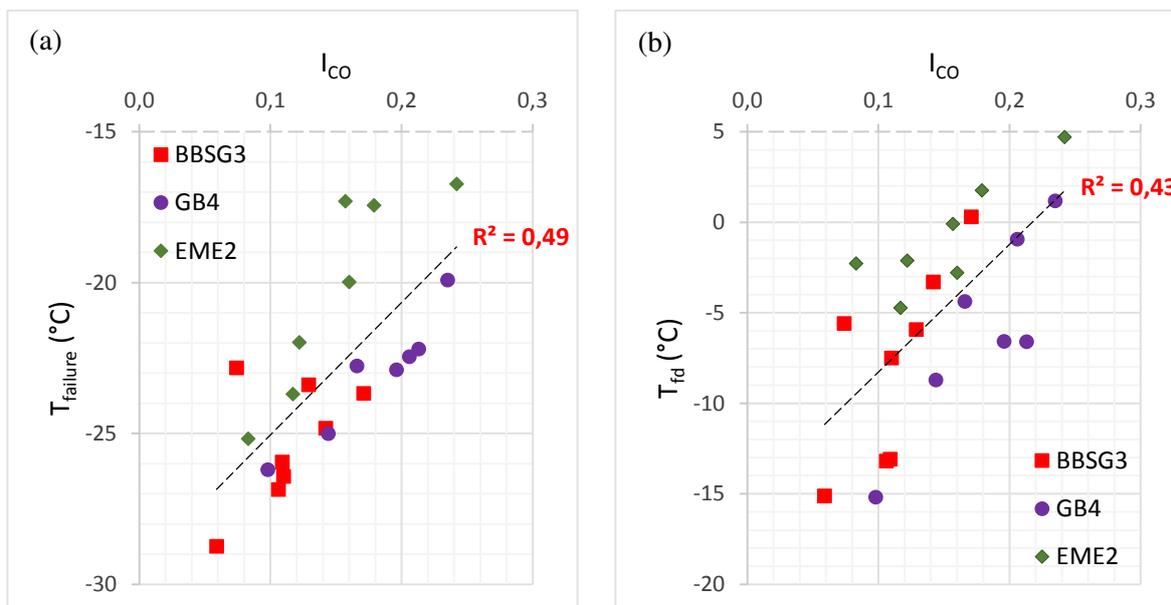


Figure V-31. Corrélation entre températures caractéristiques des essais à froid et indice carbonyle : (a) température de rupture en retrait empêché ; (b) température de transition fragile-ductile.

c. Corrélation avec SARA

Si l'on considère les relations entre les températures ci-dessus et l'indice colloïdal déterminé par l'essai SARA (Figure V-32), alors qu'une faible corrélation apparaît avec la température de rupture en retrait empêché T_{faillure} (Figure V-32a) il n'est pas de même pour la température de transition fragile ductile T_{fd} (Figure V-32b).

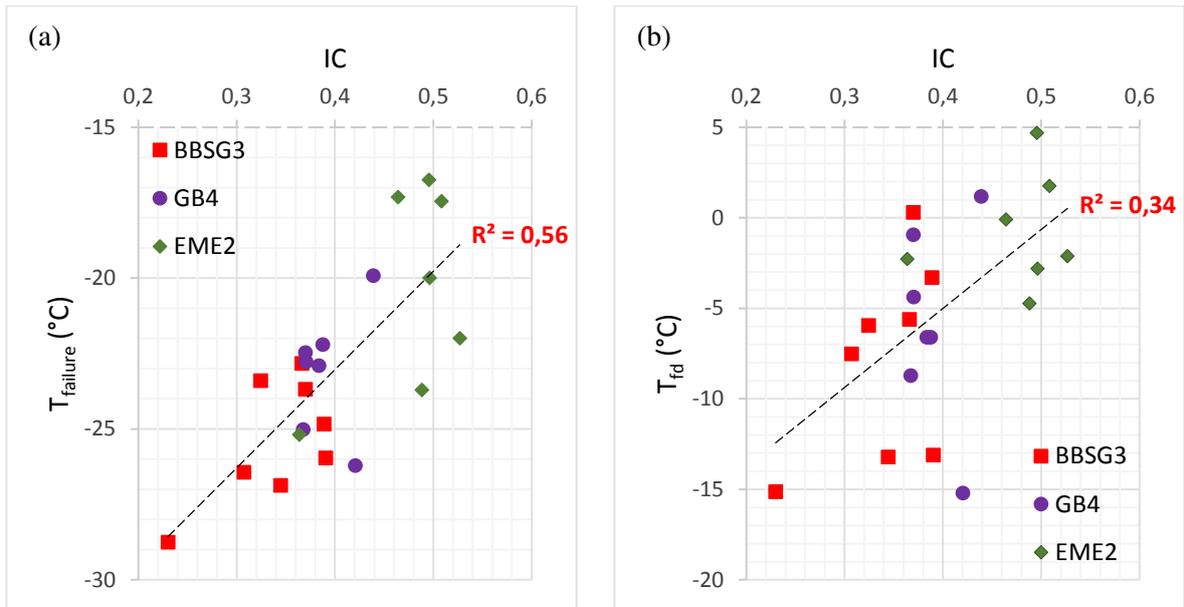


Figure V-32. Corrélation entre températures caractéristiques des essais à froid et indice colloïdal : (a) température de rupture en retrait empêché ; (b) température de transition fragile-ductile.

Bien que l'IC donne une idée globale des fractions SARA, il ne montre pas de corrélation significative avec les températures caractéristiques des essais à froid. Tenant compte des observations d'Isacson et al. [68], des corrélations sont mises en évidence entre la température de rupture et le groupement asphaltènes + résines d'une part et le rapport asphaltènes / aromatiques d'autre part (Figure V-33).

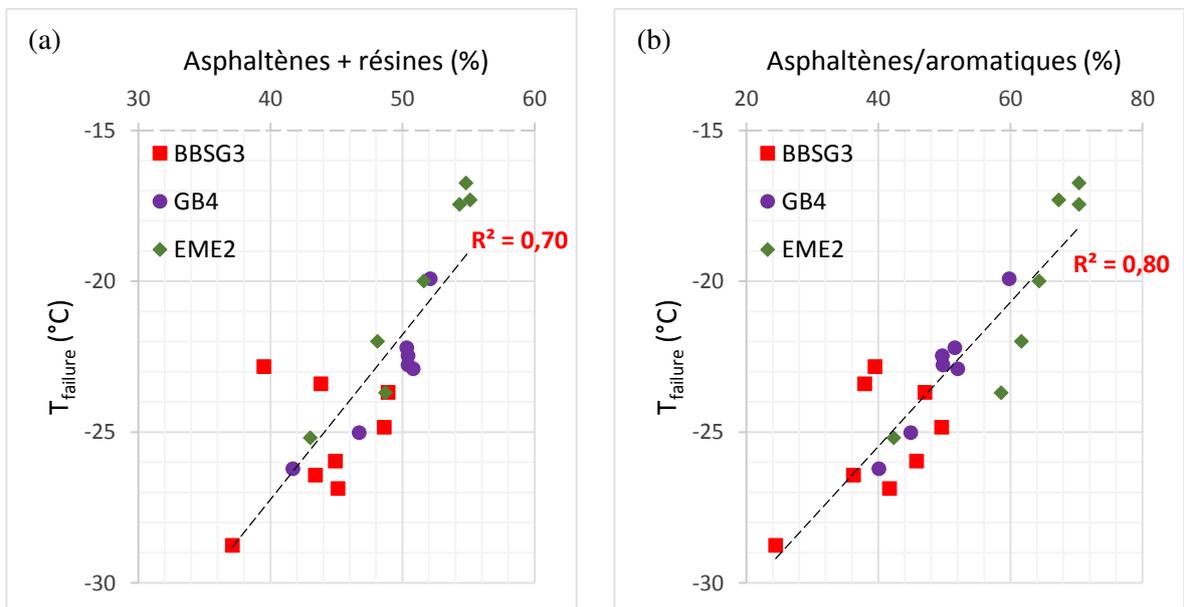


Figure V-33. Corrélation entre la température de rupture en TSRST et SARA : (a) Asphaltènes + résines ; (b) Asphaltènes / aromatiques.

7. EXPÉRIMENTATION SUR CHAUSSÉE EN SERVICE (RD 996)

Cette étude porte sur la couche de roulement en BBSG3 mise en œuvre en juillet 2011 sur la RD 996 (département de la Côte d'Or), par la société Roger Martin, avec un suivi assuré par le CEREMA dans le cadre du programme national d'Innovation Routes et Rues. Trois formules ont été utilisées : une formule témoin avec 10 % d'AE (formule « RD-10R »), et deux formules à 40 % d'AE, régénérées l'une avec Regefalt® (« RD-40R' »), l'autre avec Regemac® (« RD-40R'' ») aux propriétés polymériques.

7.1. ÉTUDE DE FORMULATION (2011)

Les caractéristiques des formules, transmises par l'entreprise, sont rassemblées dans le Tableau V-5. On note des teneurs en liant identiques pour les trois formules et une dureté logiquement supérieure pour les liants des formules avec recyclés.

Tableau V-5. Caractéristiques des formules de BBSG3 de la RD 996.

Essai \ Paramètres		Formules BBSG3 - RD 996			Référence
		RD-10R	RD-40R'	RD-40R''	
Recomposition	Taux d'AE (%)	10	40	40	-
	Régénérant	-	Regefalt	Regemac	-
	Dosage (kg/tonne d'enrobé)	-	0,72	2,50	-
	MVR _E (kg/m ³)	2431	2407	2407	-
	tl _{int} (%)	5,49	5,48	5,48	-
	M. richesse (K)	3,5	3,4	3,4	-
	Pén _{mix} (mm/10)	38	30	30	-
	T _{BA mix} (°C)	-	-	-	-
PCG	Vides à 10 girations (%)	15,4	15,3	15,6	> 11
	Vides à 60 girations (%)	8,1	8,0	8,4	5 < v < 10
	Vides à 100 girations (%)	6,3	6,2	6,5	-
Duriez	R (MPa)	10,6	12,1	12,5	-
	r (MPa)	10,4	9,7	10,2	-
	Rapport r/R (%)	98	80	81	≥ 70
	% vides (géométrie)	10,1	10,3	10,3	-
Orniérage	Vides (%)	-	7,1	7,1	5 < v < 8
	P _{N=30000} (%)	-	2,2	1,5	≤ 7,5

La recomposition granulométrique des trois formules est identique (Figure V-34), avec un pourcentage des fines de 7 % pour la formule témoin et 7,5 % pour les formules régénérées.

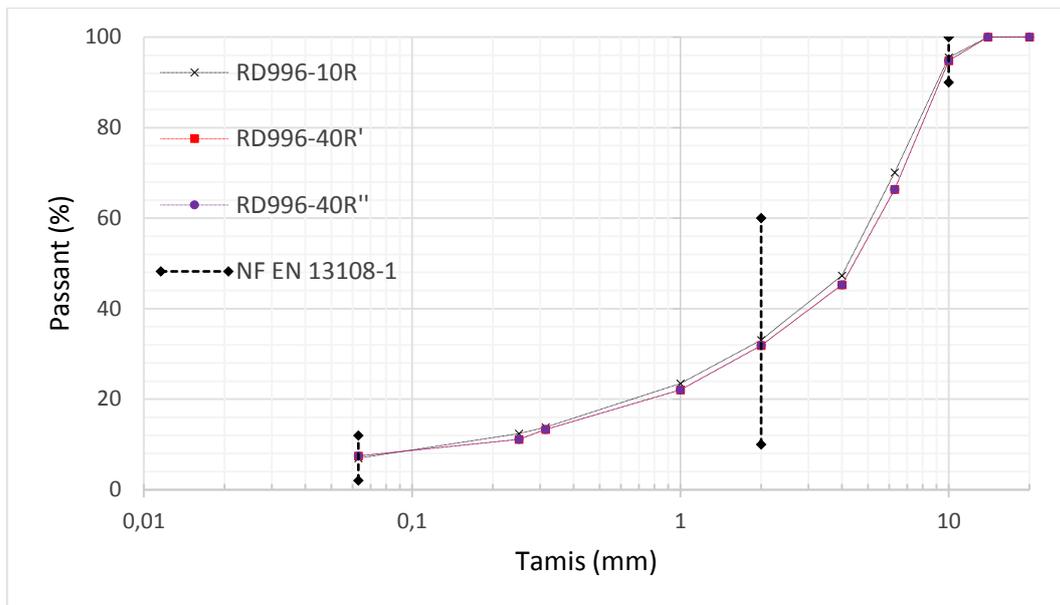


Figure V-34. Recomposition granulométrique des enrobés de la RD 996.

Malgré un taux d'AE plus élevé, la compactibilité à la PCG des formules régénérées est très proche de celle de la formule témoin (Figure V-35a) ce qui tend à montrer que l'augmentation du taux d'AE n'a pas affecté la compactibilité des enrobés, probablement du fait de l'impact positif des régénérants, observé au chapitre III. En outre, la compacité des éprouvettes Duriez s'avère du même ordre pour les trois formules et, par ailleurs, celle des plaques d'orniérage des formules régénérées identique. La formule RD-10R n'a pas fait l'objet d'essais d'orniérage.

Lors de l'essai Duriez (conservation des éprouvettes à 40 °C) la résistance R à la compression des éprouvettes conservées à l'air des mélanges régénérés est supérieure à celle de la formule témoin, alors que la résistance immergée r est du même ordre (Figure V-35b). Par conséquent, le rapport r/R des formules régénérées, est inférieur à celui de la formule témoin, sans que cela traduise cependant une moindre résistance de celles-ci après imbibition.

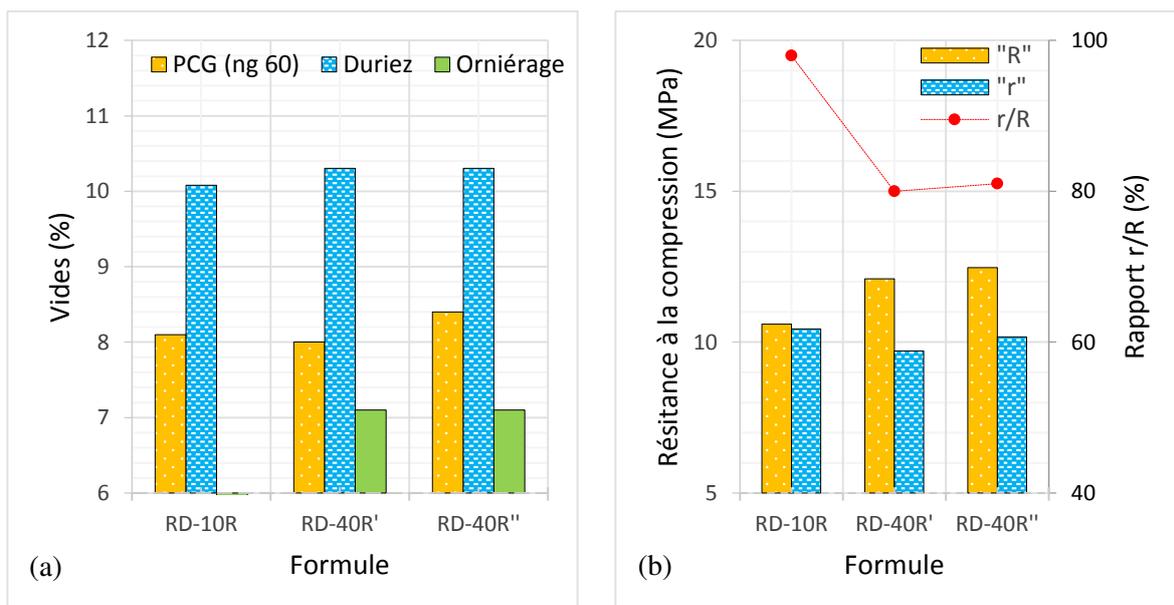


Figure V-35. Résultats des épreuves de formulation de la RD 996 : (a) teneur en vides PCG, Duriez et plaques d'orniérage ; (b) résistances à la compression et rapport r/R.

Le niveau d'orniérage est très faible pour les deux formules régénérées : à mêmes teneurs en vides (7,1 %), l'orniérage de la formule RD-40R'' (1,5 %) est légèrement inférieur à celui de la formule RD-40R' (2,2 %) du fait de l'effet polymère du régénérant.

Les formules ci-dessus ont fait l'objet d'une campagne expérimentale en 2017, soit après six ans de service, dont les résultats sont exposés ci-dessous.

7.2. CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES LIANTS (2017)

Six carottes ($\phi=300$ mm ; $h>150$ mm) verticales de chaque enrobé ont été prélevées de la RD 996 : le liant extrait a subi des essais de pénétrabilité et TBA, ainsi que des analyses DSC, FTIR et SARA (Tableau V-6).

Tableau V-6. Résultats des essais sur le liant extrait (RD 996).

Propriété		Formules		
		RD-10R	RD-40R'	RD-40R''
Pén _{mix +6 ans de service} (mm/10)		20	17	18
T _{BA mix +6 ans de service} (°C)		61,3	65,8	69,1
DSC	T _g (°C)	-24,0	-24,3	-27,8
	FC (%)	3,3	3,2	4,2
FTIR	I _{CO}	0,11	0,11	0,13
SARA	Asphaltènes (%)	19,2	22,4	19,4
	Saturés (%)	6,1	6,6	6,0
	Aromatiques (%)	52,3	49,0	51,9
	Résines (%)	22,4	22,0	22,7
	IC	0,34	0,41	0,34

Après six ans de service, on constate une diminution attendue de la pénétrabilité du liant recomposé, avec des valeurs résiduelles du même ordre pour l'ensemble des formules (Figure V-36a). Compte tenu des valeurs initiales, le durcissement subi en service par les formules régénérées est identique et il s'avère inférieur à celui de la formule témoin. La température de ramollissement des différents liants extraits est cohérente avec les valeurs de la pénétrabilité, avec toutefois une valeur plus élevée pour le liant de la formule RD-40''.

La température de transition vitreuse T_g et le taux des fractions cristallisables FC ont des valeurs conformes au classement déjà observé (§ II-3.2.2) : la valeur inférieure de T_g (formule RD-40R'') correspond au taux supérieur de FC (Figure V-36b).

Par ailleurs, on observe que les formules régénérées présentent des indices I_{CO} et IC du même ordre que ceux de la formule témoin (Figure V-37a). De même, on constate des valeurs proches des fractions SARA entre les différentes formules, avec toutefois des valeurs de IC et du taux d'asphaltènes légèrement supérieures pour le liant de la formule RD-40R' (Figure V-37b).

Les résultats ci-dessus tendent à montrer qu'au cours des six années de service de la chaussée, les régénérants ont lissé les différences éventuelles entre les valeurs initiales des paramètres physico-chimiques, contribuant ainsi à limiter les effets du taux plus élevé de recyclés.

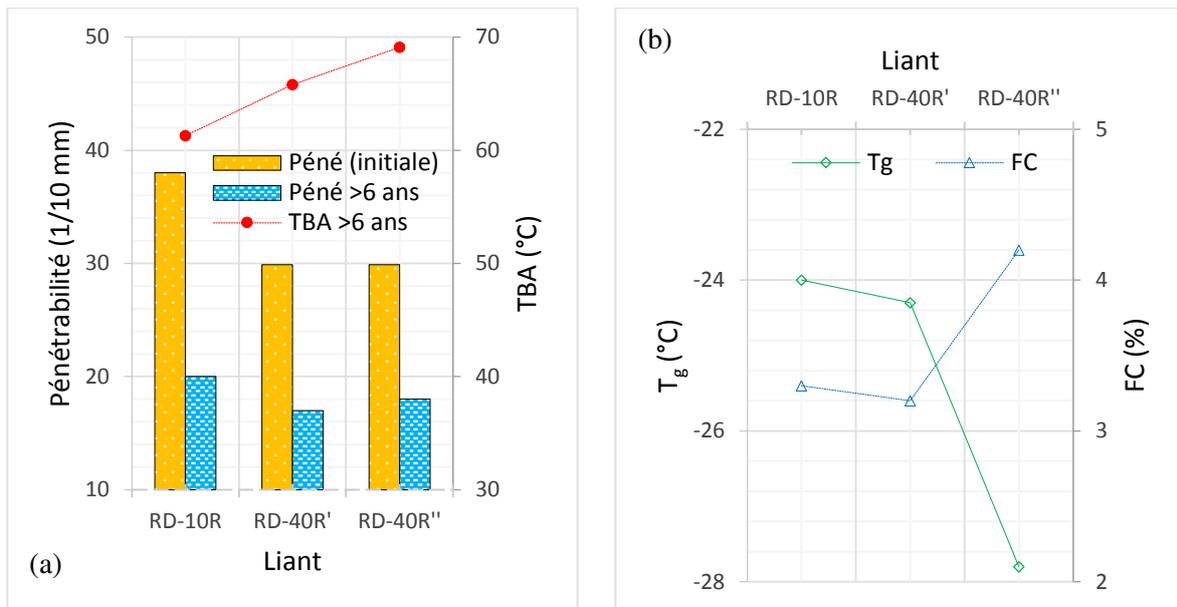


Figure V-36. Caractéristiques des liants de la RD 996 après 6 ans de service : (a) pénétrabilité et TBA ; (b) T_g et FC.

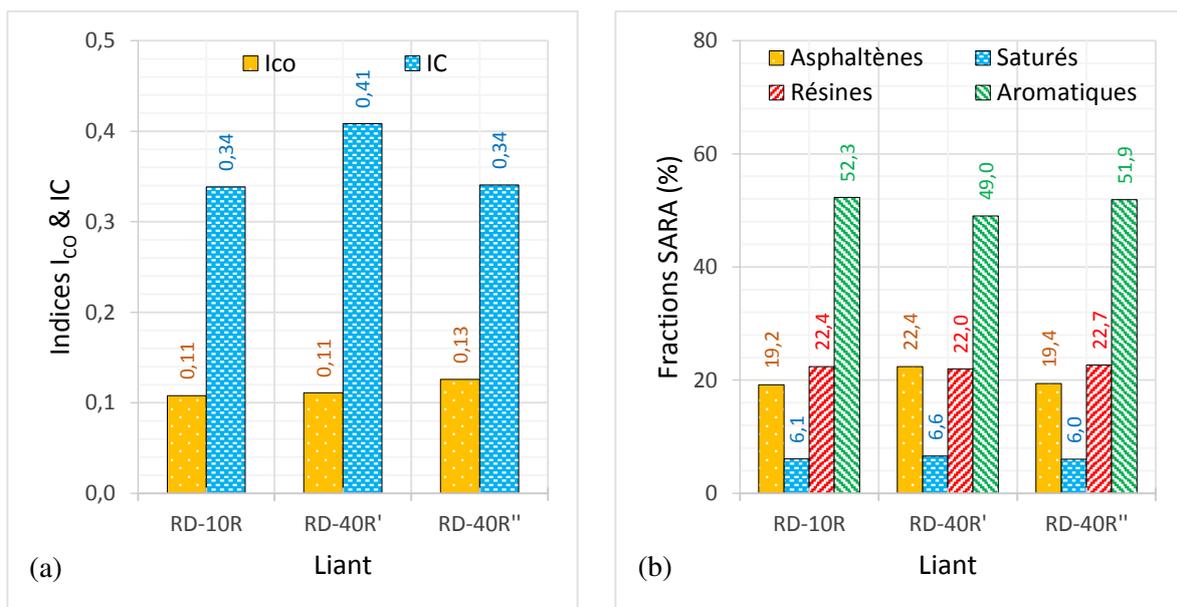


Figure V-37. Essais FTIR et SARA sur les liants de la RD 996 : (a) indice carbonyle I_{co} et d'instabilité colloïdale IC ; (b) Teneur en asphaltènes, saturés, résines et aromatiques.

7.1. ESSAIS DE FISSURATION À BASSE TEMPÉRATURE

Les carottes verticales prélevées dans la chaussée ont fait l'objet d'un deuxième carottage horizontal ($\phi=50$ mm ; $h = 160$ mm) dans la couche de roulement, destiné aux essais de fissuration à basse température (annexe D). Pour des raisons d'homogénéité de la compacité, seules les éprouvettes ayant des teneurs en vide voisines de 5,5 % ont subi ces essais.

Compte tenu du nombre réduit d'éprouvettes, les essais de traction directe ont été effectués à la seule température de -10 °C, d'une part sur des éprouvettes vierges et d'autre part

sur des éprouvettes endommagées par l'essai de retrait empêché, et laissées non chargées pendant 20h (Tableau V-7).

Tableau V-7. Caractérisation à basse température des formules de la RD 996.

Essai	Paramètres	BBSG3 – RD 996		
		RD-10R	RD-40R'	RD-40R''
UTST (éprouvettes vierges)	% de Vides	5,6	5,5	5,3
	β_t (-10 °C) (MPa)	3,42	2,94	3,46
	Température (°C)	-10,1	-10,0	-10,0
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (-10 °C) (%)	0,028	0,025	0,031
	$E_{0,5}$ (-10 °C) (MPa)	15095	13880	13619
UTST (éprouvettes après TSRST)	% de Vides	5,5	5,6	5,5
	β_t (-10 °C) (MPa)	3,13	2,75	3,07
	Température (°C)	-10,2	-10,1	-10,0
	$\epsilon_{\text{failure}}$ (-10 °C) (%)	0,027	0,025	0,028
	$E_{0,5}$ (-10 °C) (MPa)	14696	13382	13255
Variation relative	$(\beta_t - \beta_t \text{ après TSRST}) / \beta_t$	0,09	0,07	0,11
	$(\epsilon_{\text{failure}} - \epsilon_{\text{failure après TSRST}}) / \epsilon_{\text{failure}}$	0,03	0,00	0,08
	$(E_{0,5} - E_{0,5 \text{ après TSRST}}) / E_{0,5}$	0,03	0,04	0,03
TSRST	% de Vides	5,5	5,6	5,5
	T_0 (°C)	9,9	10,0	10,0
	T_{failure} (°C)	-18,1	-19,5	-19,7
	$\sigma_{\text{cry, failure}}$ (MPa)	1,56	1,66	1,19
	T_{fdR} (°C)	-8,2	-6,1	-5,0
	$\sigma_{\text{cry, TfdR}}$ (MPa)	0,77	0,65	0,44
	T_{mfR} (°C)	-15,9	-15,3	-16,8
	$\sigma_{\text{cry, TmfR}}$ (MPa)	1,47	1,46	1,10
Pente dS/dT (MPa/°C)	-0,101	-0,093	-0,059	
Réserve	$\Delta\beta_t$ (-10 °C) (MPa)	2,49	1,98	2,73
	$\Delta\beta_t$ (-10 °C après TSRST) (MPa)	2,20	1,79	2,34

Les résultats de traction directe s'avèrent assez proches, compte tenu de la dispersion (Figure V-38) ; même si parmi les formules régénérées, la formule RD-40R'' présente des performances (contrainte et déformation de rupture) équivalentes à celles la formule témoin, alors que celles de la formule RD-40R' s'avèrent légèrement inférieures. Par ailleurs, comparées aux valeurs des formules de BBSG3 testées plus haut à la même température (§ 3.1.1), les résistances s'avèrent ici inférieures du fait d'un endommagement probable de l'enrobé.

Malgré un taux d'AE plus élevé, la rigidité viscoélastique des formules régénérées, quantifiée à l'aide du module sécant à 50 % lors de l'essai de traction directe, s'avère inférieure à celle de la formule témoin (Figure V-38b), du fait de la souplesse déjà signalée, apportée par les régénérants.

Tous les paramètres ci-dessus ont subi une diminution suite à l'endommagement produit par l'essai TSRST dont la valeur relative est faible (inférieure à 11 %), probablement due à la

capacité d'autoréparation des matériaux hydrocarbonés. Le paramètre d'endommagement conventionnel, quantifié par la diminution relative de rigidité, est de l'ordre de 3 % à 4 %.

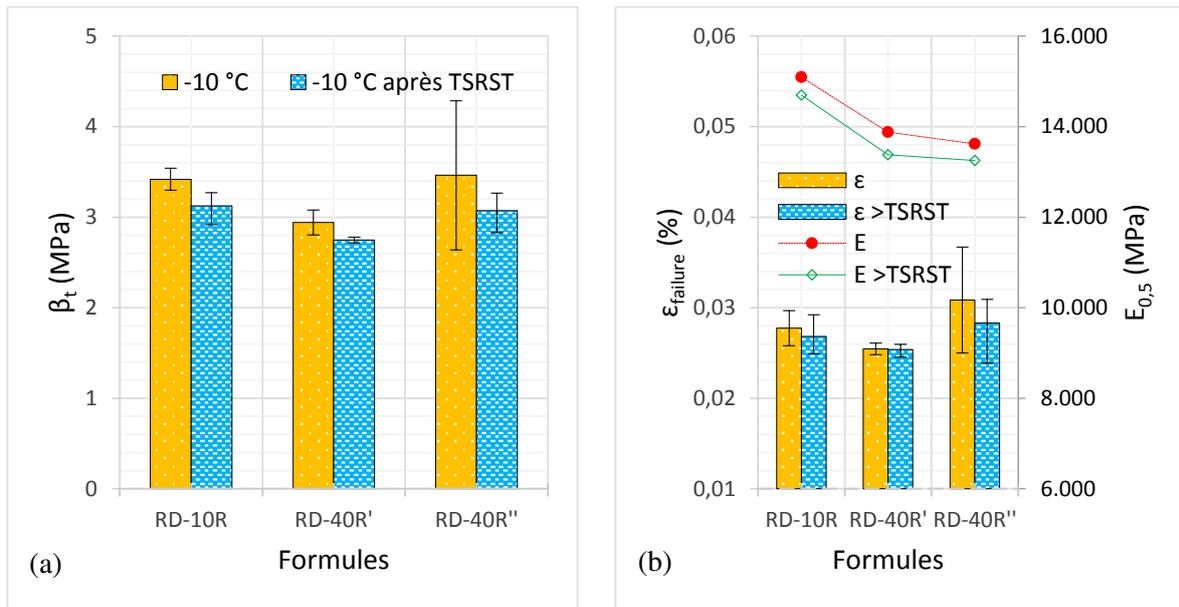


Figure V-38. Résultats des essais UTST à -10 °C : (a) contrainte conventionnelle de rupture ; (b) déformation conventionnelle de rupture et rigidité.

L'évolution de la contrainte cryogénique de chaque formule lors des essais de retrait empêché est présentée sur la Figure V-39a. Les résultats révèlent des températures de rupture des formules régénérées légèrement inférieures à celle de la formule témoin (Figure V-39b) et des températures de fin de relaxation légèrement supérieures.

Les différentes températures sont supérieures à celles des formules comparables de BBSG3 testées au début du chapitre (§ 3.2) traduisant le vieillissement de la couche de surface [53] [65] [68] [70].

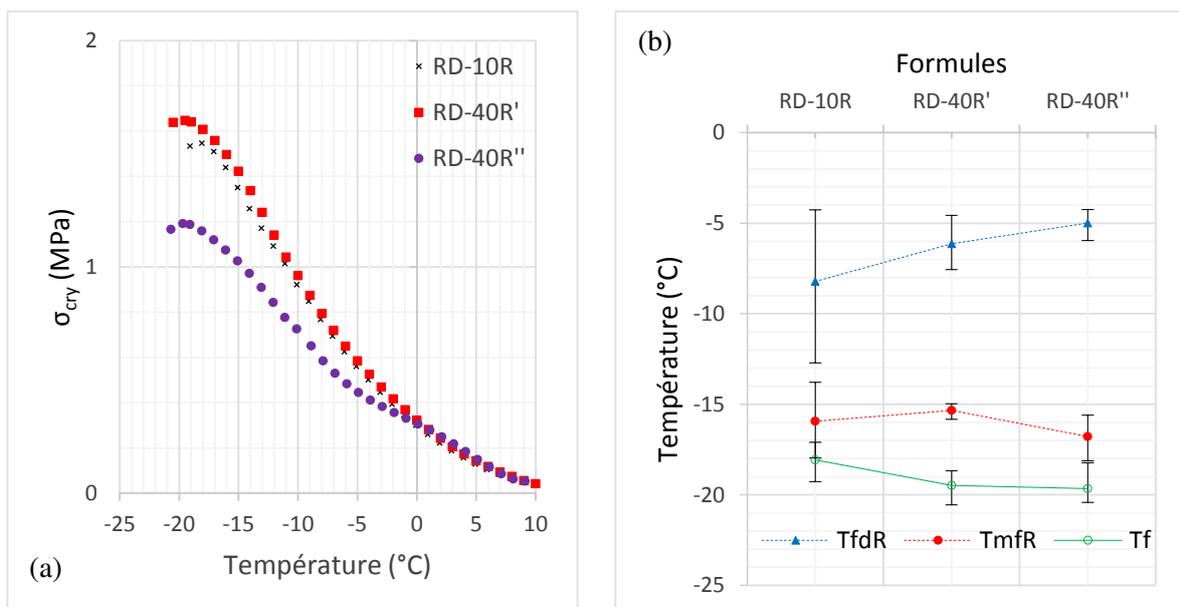


Figure V-39. Résultats de l'essai TSRST : (a) contrainte cryogénique moyenne (3 répliques par courbe) ; (b) températures de rupture et de transition.

Comme déjà observé, la contrainte de rupture et la pente dS/dT suivent les mêmes tendances (Figure V-40a) ; en outre, les valeurs des formules témoin et RD-40R' sont du même ordre ; la formule RD-40R'' ayant des valeurs inférieures. Les valeurs de toutes les formules sont inférieures à celles du BBSG3 étudié plus haut, confirmant un endommagement.

Par ailleurs, le classement relatif des formules, en termes de réserve de résistance à la traction (Figure V-40b) est conforme à l'ordre observé lors de l'essai de traction directe : des formules témoin et RD-40R'' aux performances comparables et une formule RD-40R' légèrement inférieure.

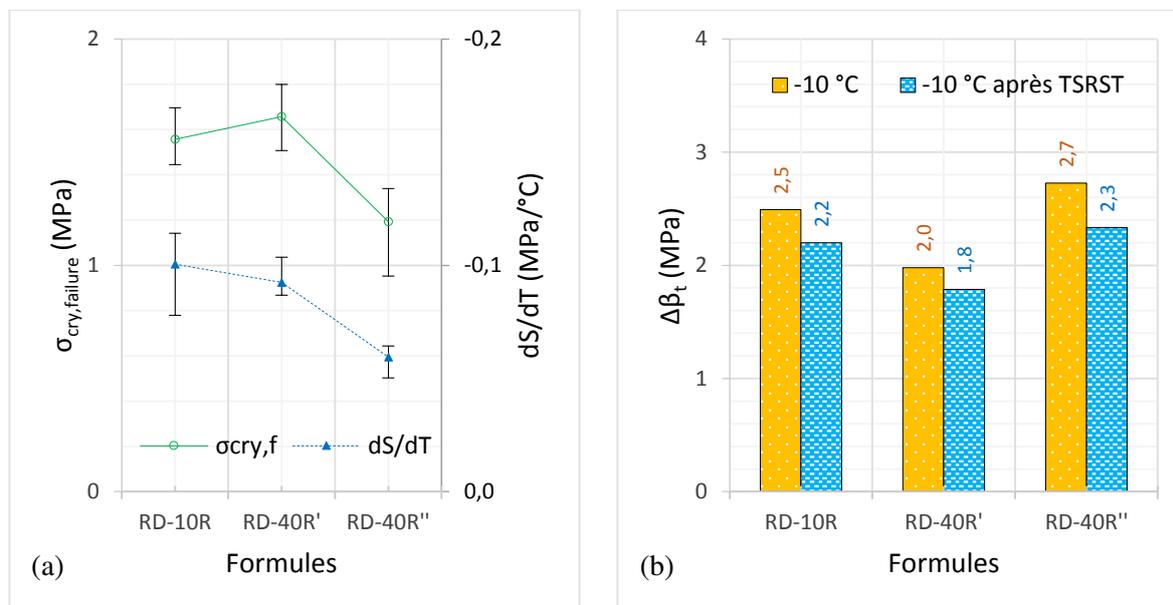


Figure V-40. Résultats de l'essai TSRST : (a) contrainte de rupture et pente dS/dT ; (b) réserve de traction à -10 °C.

Globalement, les trois formules de BBSG3 de la RD 996 présentent des propriétés physico-chimiques et thermomécaniques assez proches après six ans de service, ces dernières étant inférieures à celles du BBSG3-RM étudiée antérieurement (§ 3). Malgré des taux d'AE notablement plus élevés, les formules régénérées semblent avoir subi une moindre évolution en service comparée à la formule témoin, suite à l'effet bénéfique de l'additif [33] [34] [52].

8. CONCLUSIONS

Des essais à froid (traction directe et retrait thermique empêché) ont été réalisés sur les différentes compositions de trois matériaux types (BBSG3, GB4 et EME2) avec différents taux d'AE, avec et sans présence de régénérant, soit 22 compositions d'enrobés bitumineux au total. Les résultats, analysés en termes de températures caractéristiques, de résistances et de déformations à la rupture, permettent d'énoncer les conclusions principales suivantes.

En l'absence de régénérant, l'influence des AE se traduit principalement par une augmentation des températures caractéristiques (de transition fragile-ductile, de rupture en retrait empêché) et par une diminution de la ductilité (déformation à la rupture) ce qui est défavorable, même si cela s'accompagne parfois d'un accroissement des résistances dans le domaine des températures positives.

L'ajout de régénérant a pour effet de compenser partiellement ou totalement les pertes de performances produites par les AE, en particulier en diminuant les températures caractéristiques et en augmentant les déformations à la rupture, sans réduire les résistances.

En considérant l'ensemble des formules, des corrélations ont été établies entre les températures caractéristiques des essais à froid ainsi qu'avec d'autres paramètres mécaniques : rigidité viscoélastique (module complexe), déformation à la rupture et résistance conventionnelle à la fatigue.

Pour ce qui est des paramètres à basse température, ces corrélations permettent de hiérarchiser les performances à froid par exemple en retrait empêché, à partir d'essais de traction directe, plus simples. Les corrélations avec la rigidité viscoélastique et la résistance à la fatigue constatent un lien direct entre la souplesse de l'enrobé et la température de rupture tandis qu'une bonne tenue à la fatigue ne se traduit pas par des performances à basse température élevées.

Des corrélations ont également été mises en évidence entre certaines températures caractéristiques des essais à froid sur enrobés et des paramètres physico-chimiques des bitumes tels que l'indice carbonyle et des fractions SARA. Cependant il n'a pas été trouvé de relation entre celles-ci et la température de transition vitreuse.

Les trois formules de BBSG3 de la RD 996 présentent des propriétés physico-chimiques et thermomécaniques assez proches après six ans de service. Les formules régénérées semblent avoir subi une moindre évolution en service que la formule témoin, montrant un effet favorable de l'additif.

CONCLUSIONS & PERSPECTIVES

1. CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Une vaste recherche expérimentale a été effectuée dans un cadre industriel CIFRE sur trois familles d'enrobés bitumineux (BBSG3, GB4, EME2) réunissant au total vingt-quatre mélanges différents avec des taux d'agrégats d'enrobés variables et la présence ou non de régénérant. Afin de réduire les variables, la composition des mélanges (granulats, teneur et grade du liant recomposé) et le procédé de fabrication, adapté au recyclage à très fort taux, ont été mis au point de manière à les conserver identiques pour toutes les formules au sein d'une même famille d'enrobés.

Les résultats des nombreux essais effectués conduisent aux conclusions générales ci-dessous en termes d'effets des AE à fort et très fort taux et d'impacts du régénérant sur les propriétés physico-chimiques des liants et sur le comportement thermomécanique des enrobés.

Effets des agrégats d'enrobés, hors régénérant

Dans un premier temps, les évolutions des liants lors de l'enrobage ont révélé des variations significatives de la consistance des bitumes recomposés dans les enrobés avec recyclés, en particulier en présence de bitumes d'apport de grade élevé, lesquels apparaissent plus évolutifs que les liants déjà durcis.

Les analyses physico-chimiques (DSC, FTIR) ont montré une diminution inattendue de la température de transition vitreuse ainsi qu'une augmentation logique des fractions cristallisables et de l'indice carbonyle des liants recomposés suite à l'enrobage. De même, l'analyse SARA, a mis en évidence une diminution du taux d'aromatiques et une augmentation de la teneur en asphaltènes.

La compactibilité à la PCG et l'orniérage des mélanges suivent des tendances similaires : ils subissent tous deux une diminution lorsque le taux d'AE augmente. Cependant quelques formules dérogent à la règle générale ci-dessus, du fait de la diversité des liants utilisés dont une caractérisation rhéologique complémentaire pourrait expliquer les résultats.

Les AE produisent une augmentation très significative de la rigidité de toutes les formules et une amélioration de la tenue en fatigue des formules de BBSG3 et d'EME2. Cependant, dans le cas de la GB4, la formule témoin reste plus performante que les formules avec recyclés. Dans la plupart des cas, les courbes de Wöhler des formules avec AE s'avèrent plus plates que celles des formules témoins, sans AE.

L'amélioration des performances en fatigue s'avère corrélée avec l'accroissement de la TBA et de l'indice colloïdal du liant ainsi qu'avec la diminution de la composante visqueuse (angle de phase) de l'enrobé.

L'application des propriétés ci-dessus (module complexe, résistance à la fatigue) au dimensionnement d'une structure souple tri-couche BBSG3/EME2/PF1 a montré l'impact favorable d'un taux élevé d'AE sur le trafic admissible, via l'apport de rigidité et de résistance à la fatigue. Les calculs ont également mis en évidence le rôle important joué par une pente variable de la droite de fatigue.

En termes de fissuration à basse température, en l'absence de régénérant les AE produisent une augmentation des températures négatives caractéristiques et une diminution de

la ductilité, accompagnées parfois d'un accroissement des résistances dans le domaine des températures positives.

Les corrélations entre performances à froid, rigidité viscoélastique et résistance à la fatigue montrent que la température de rupture en retrait empêché est améliorée avec la souplesse de l'enrobé mais qu'elle n'est pas associée à des performances en fatigue élevées.

Impacts du régénérant

Pendant la fabrication des enrobés, le régénérant a eu pour premier effet de réduire le durcissement du liant recomposé. Son impact sur les paramètres physico-chimiques des bitumes a été en général de limiter l'évolution de ceux-ci suite à l'élévation de la température lors de la fabrication.

Le régénérant favorise la compactibilité, augmente légèrement l'orniérage et réduit légèrement la rigidité des enrobés. Il améliore le paramètre de fatigue ϵ_6 et réduit la variation des pentes de Wöhler produite par les AE. L'impact positif du régénérant sur le dimensionnement des structures se manifeste principalement via l'amélioration de la résistance à la fatigue.

En matière de comportement à basse température, le régénérant a pour effet de compenser partiellement ou parfois totalement les pertes de performances produites par les AE en termes de température et de déformation à la rupture.

La campagne expérimentale menée sur une route départementale (RD 996) avec une couche de roulement constituée par trois formules de BBSG3 différenciées par le taux d'AE et le type de régénérant, présente des propriétés physico-chimiques et thermomécaniques des formules assez proches après six ans de service. Malgré des taux d'AE notablement plus élevés, les formules régénérées semblent avoir subi une moindre évolution en service que la formule témoin, suite à l'effet bénéfique de l'additif.

2. PERSPECTIVES DE RECHERCHE

L'ensemble très volumineux des résultats obtenus au cours de cette recherche, se prête à différentes perspectives sous un angle d'application pratique et sur un plan fondamental.

Sous l'angle des applications pratiques des résultats, une mise en oeuvre sur chantier de certaines formules étudiées, en particulier aux taux supérieurs d'AE, permettrait de tester la transposition en centrale des procédés et des paramètres de fabrication développés au laboratoire et de les adapter aux contraintes industrielles.

En outre, un suivi des chaussées dans le temps, comprenant notamment des auscultations visuelles et des prélèvements de matériaux pour des analyses physico-chimiques et thermomécaniques, permettrait de valider les performances thermomécaniques obtenues au laboratoire et d'évaluer leur évolution dans le temps sur la route en service, sous l'effet des sollicitations de trafic et environnementales.

Sur le plan fondamental, une étude paramétrique expérimentale portant sur le dosage du régénérant en fonction du type de matériaux s'avérerait utile pour l'optimisation des formules. En outre, des essais de rhéologie sur les liants recomposés à différentes températures et fréquences permettraient de mieux justifier les différents comportements thermomécaniques observés des enrobés.

Par ailleurs, la modélisation des essais de retrait empêché, en particulier ceux du BBSG3, à l'aide de modèles visco-élastiques existants, permettrait, en validant ceux-ci, de prédire le comportement des mélanges à basse température, afin d'éviter la réalisation systématique, assez complexe, de cet essai. À cet égard, le modèle 2S2P1D s'avère particulièrement intéressant dans la mesure où la plupart de ses paramètres sont indépendants de la température.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] EAPA & NAPA. (2011). The Asphalt Paving Industry – A Global Perspective (3rd ed.). Retrieved from <https://store.asphaltpavement.org/index.php?productID=725>
- [2] Routes de France. (2018). Bilan environnemental 2017. Paris, France.
- [3] DI BENEDETTO, H., CORTÉ, J.-F., DELORME, J.-L., GRISARD, A., PIAU, J.-M., & DE LA ROCHE, C. (2005). Mécanique et ingénierie des matériaux - Matériaux routiers bitumineux 2 - Constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges. Paris, France: Hermes Sciences.
- [4] POUTEAU, B. (2004). Durabilité mécanique du collage blanc sur noir dans les chaussées. Thèse de Doctorat: École Centrale de Nantes.
- [5] NAVARO, J. (2011). Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques. Thèse de Doctorat: École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ParisTech.
- [6] BARCO, C. (2007). Influence de la température de compactage des plaques d'enrobés sur la résistance à l'orniérage. Thèse de Doctorat: École de Technologie Supérieure - Université du Québec, Montreal.
- [7] SOMÉ, S. C. (2012). Comportement thermomécanique des enrobés tièdes et de l'interface bitume-granulat. Thèse de Doctorat: École Polytechnique de l'Université de Nantes.
- [8] EL BEZE, L. (2008). *Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux : Identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport*. Thèse de doctorat: Université Paul Cézanne Aix-Marseille III.
- [9] MEEDDAT. (2009, Mars). Convention d'engagement volontaire des acteurs de conception, réalisation et maintenance des infrastructures routières, voirie et espace public urbain. FNTP, USIRF, SYNTEC-INGÉNIERIE, MEEDDAT, ADF.
- [10] CORTÉ, J.-F., DI BENEDETTO, H., CHAMBARD, R., DUMONT, A.-G., FRANCKEN, L., LESAGE, J., . . . SUCH, C. (2005). Mécanique et ingénierie des matériaux - Matériaux routiers bitumineux 1 - Description et propriétés des constituants. Paris, France: Hermes Sciences.
- [11] NGUYEN, M. L. (2009). Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux. Thèse de Doctorat: INSA de Lyon.
- [12] LOMBARDI, B. (2007). Liants hydrocarbonés. Paris, France : Techniques de l'ingénieur.
- [13] BÉGHIN, A. (2003). Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants bitumineux. Thèse de Doctorat: Université de Paris 6.
- [14] LESUEUR, D. (2002). La Rhéologie des Bitumes: Principes et Modifications. Rhéologie, 2, 1-30.
- [15] MOUAZEN, M. (2011). Évolution des propriétés rhéologiques des enrobés bitume, vers une loi vieillissement/viscosité. Thèse de Doctorat: École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- [16] Groupement Professionnel des Bitumes (GPB). (2005, Juin). Numéro Spécial 1. Bitume.info, (S1), 35.

- [17] TACHON, N. (2008). Nouveaux types de liants routiers à hautes performances, à teneur en bitume réduite par addition de produits organiques issus des agroressourcés. Thèse de Doctorat: Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [18] HUNTER, R. N. (Ed.). (2000). Asphalt in Road Construction. London, UK: Thomas Telford Limited.
- [19] RAMOND, G., & SUCH, C. (1990, Juillet-Août). Bitumes et bitumes modifiés – Relations structures, propriétés, composition. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (168), 65-88.
- [20] WITIER, P., PLATRET, G., HUYNH, H.-T., FARCAS, F., BOUTEILLER, V., ANDRÉ, D., . . . ANTOINE, J.-M. (1999). Analyse et caractérisation de matériaux de construction. Paris, France : Techniques de l'ingénieur.
- [21] LOPEZ, E., GARCÍA-SERRADA, C., ARGÜELLO-MARTÍN, J. T., & CALVO-CABEZÓN, B. (2006, Septiembere-Octubre). La regeneración del betún envejecido de aglomerados usados, una apuesta económico-ecológica (I). Carreteras, (148), 49-67.
- [22] LOPEZ, E., GARCÍA SERRADA, C., ARGÜELLO MARTÍN, J. T., & CALVO CABEZÓN, B. (2006, Noviembre-Diciembre). La regeneración del betún envejecido de aglomerados usados, una apuesta económico-ecológica (II). Carreteras, (149), 69-81.
- [23] LESUEUR, D., PLANCHE, J. P., & DUMAS, P. (2000, Novembre-Décembre). Détermination de la teneur en paraffines des bitumes. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (229), 3-11.
- [24] CLAUDY, P., LÉTOFFÉ, J.-M., KING, G. N., & PLANCHE, J.-P. (1992, Janvier-Février). Caractérisation des bitumes routiers par Analyse Calorimétrique Différentielle (ACD): Analyse thermo-Optique (ATO). Corrélation entre propriétés physiques et résultats ACD. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (177), 45-51.
- [25] LÉTOFFÉ, J., PLANCHE, J.-P., CHAMPION-LAPALU, L., & MARTIN, D. (2002, Septembre-Octobre). Rôle du traitement thermique sur la détermination par DSC des caractéristiques thermiques des bitumes routiers . Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (240), 3-13.
- [26] LÉTOFFÉ, J.-M., CHAMPION-LAPALU, L., MARTIN, D., PLANCHE, J.-P., GÉRARD, J.-F., & CLAUDY, P. (2000, Novembre-Décembre). Analyse thermique de bitumes routiers modifiés par des polymères. Bulletin de liaison des Laboratoire des Ponts et Chaussées, (229), 13-20.
- [27] CLAUDY, P., KING, G. N., BRÛLÉ, B., & PLANCHE, J.-P. (1990, Janvier-Février). Caractérisation des bitumes routiers par analyse calorimétrique différentielle. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, (165), 85-92.
- [28] BAGLIERI, O., DALMAZZO, D., BARAZIA, M., TABATABAEE, H. A., & BAHIA, H. U. (2012, October). Influence of Physical Hardening on the Low-Temperature Properties of Bitumen and Asphalt Mixtures. SIIV - 5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures, 53, (pp. 504-513). Rome, Italy: Procedia Social and Behavioral Sciences.

- [29] CLOPOTEL, C., VELASQUEZ, R., & BAHIA, H. (2012). Measuring Physico-Chemical Interaction in Mastics Using Glass Transition. *Road Materials and Pavement Design*, 13(S1), 304-320.
- [30] LESUEUR, D. (2009). The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification. *Advances in Colloid and Interface Science*, 145(1-2), 42-82.
- [31] DELORME, J.-L., DE LA ROCHE, C., & WENDLING, L. (2007). *Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés*. Paris, France: LCPC.
- [32] Norme française NF EN 13108-1. (2007, Février). *Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux. Partie 1: Enrobés bitumineux*.
- [33] PUCCI, T. (2001). *Approche prévisionnelle de la fissuration par sollicitation thermique des revêtements bitumineux*. Thèse de Doctorat: École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [34] OLARD, F. (2003). *Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures: relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé*. Thèse de Doctorat: INSA de Lyon.
- [35] Norme française NF EN 12697-31. (2007, Août). *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 31: Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire*.
- [36] Norme française NF EN 12697-12. (2008, Septembre). *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 12: Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses*.
- [37] Norme française NF EN 12697-22+A1. (2007, Septembre). *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 22: Essai d'orniérage*.
- [38] LEFEUVRE, Y. (2001). *Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux - Etude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus - Expérimentation - Modélisation*. Thèse de Doctorat: École Nationale des Ponts et Chaussées.
- [39] OLARD, F., DI BENEDETTO, H., & ECKMANN, B. (2004, Septembre-Octobre-Novembre-Décembre). *Rhéologie des bitumes: Prédiction des résultats des tests de fluage BBR à partir des résultats de module complexe*. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (252-253), 3-15.
- [40] Norme française NF EN 12697-26. (2012, Juin). *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 26: Module de rigidité*.
- [41] MANGIAFICO, S. (2014). *Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends*. Thèse de Doctorat: École Nationale des Travaux Publics de l'État.
- [42] MOUTIER, F. (1991, Mars-Avril). *Etude statistique de l'effet de la composition des enrobés bitumineux sur leur comportement en fatigue et module complexe*. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (172), 33-42.
- [43] MERBOUH, M. (2010). *Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux : Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue*. Thèse de Doctorat: Université de Bordeaux 1.
- [44] Norme française NF EN 12697-24. (2012, Août). *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 24: Résistance à la fatigue*.

- [45] BAAJ, H. (2002). Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés. Thèse de Doctorat: INSA de Lyon.
- [46] SAID, S. F. (1988). Fatigue characteristics of asphalt concrete mixtures. Linköping, Sweden: VTI meddelande (583A).
- [47] CARTER, A. (2002). Rhéologie en petite déformation des enrobés bitumineux et mesure de leur résistance à basse température à partir de l'essai TSRSTS. Mémoire de Mastér en Génie de la Construction: École de Technologie Supérieure, Montréal.
- [48] KANERVA, H. K., VINSON, T. S., & ZENG, H. (1994). Low-Temperature Cracking: Field Validation of the Thermal Stress Restraint Specimen Test. (SHRP-A-401). Washington DC, United States: Strategic Highway Research Program.
- [49] EPPS, A. L. (1999). An approach to examine thermal fatigue in asphalt concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 68, 319-348.
- [50] TUŠAR, M., HRIBAR, D., & HOFKO, B. (2014, April). Impact of characteristics of asphalt concrete wearing courses on crack resistance at low temperatures. TRA2014, 5th European Transport Research Conference. Paris, France: Transport Research Arena.
- [51] ARAND, W. (1990). Behaviour of asphalt aggregate mixes at low temperatures. In *Mechanical Tests for Bituminous Mixes. Characterization, Design and Quality Control. Proceedings of the 4th RILEM Symposium* (pp. 67-81). Budapest, Hungary.
- [52] FORTIER, R., & VINSON, T. (1998). Low-Temperature Cracking and Aging Performance of Modified Asphalt Concrete Specimens. *Journal of the Transportation Research Board: 77th annual meeting*, 1630, 77-86.
- [53] JUNG, D. H., & VINSON, T. S. (1994). Low-Temperature Cracking: Test Selection. (SHRP-A-400). Washington DC, United States: Strategic Highway Research Program.
- [54] Norme française NF EN 12697-46. (2013, Avril). Mélanges bitumineux - Essais pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 46: Fissuration et propriétés à basse température par des essais de traction uniaxiale.
- [55] HRIBAR, D., & TUŠAR, M. (2012, October). Properties of asphalt concrete at low temperatures. *Gradevinar*, 64, 825-831.
- [56] BOLZAN, P. E., & HUBER, G. (1993). Direct Tension Test Experiments (SHRP-A-641). Washington DC, United States: Strategic Highway Research Program.
- [57] STEINER, D., HOFKO, B., DIMITROV, M., & BLAB, R. (2016, June). Impact of loading rate and temperature on Tensile Strength of Asphalt Mixtures at Low Temperatures. 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements (pp. 69-74). Nantes, France: Springer.
- [58] LINDER, R. (1977, Octobre). Comportement en traction simple des enrobés hydrocarbonés (Rapport de recherche LPC N°71). Paris, France : LCPC.
- [59] VINSON, T. S., JACKSON, N. M., & JUNG, D. H. (1992). Thermal Cracking resistance of asphalt concrete: an experimental approach. 7th International Conference on Asphalt Pavements (Vol. 3, pp. 395-409). Nottingham, UK.
- [60] PUCCI, T., DUMONT, A.-G., & DI BENEDETTO, H. (2004). Thermomechanical and Mechanical Behaviour of Asphalt Mixtures at Cold Temperature. *Road Materials and Pavements Design*, 5(1), 45-72.

- [61] LU, X., & ISACSSON, U. (2001). Effect of Binder Rheology on the Low-Temperature Cracking of Asphalt Mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 2(1), 29-47.
- [62] PIAU, J. M. (1988, Septembre-Octobre). Modélisation thermomécanique du comportement des enrobés bitumineux. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (163), 41-54.
- [63] MAIA, A. F., MARCIANO, Y., ACHIMASTOS, L., CORTÉ, J.-F., GOURDON, L., & PIAU, J.-M. (1997, May). Low-temperature behaviour of hard bitumens : experiments and modelling. *Mechanical Test for Bitumineux Mixes (MTBM)*, proceeding of the 5th International RILEM Symposium. Lyon, France: RILEM.
- [64] HAJJ, E. Y. (2010, September). Thermal Cracking Testing of Asphalt Mixtures. Presentation at ARC Seminar. Madison, United States.
- [65] ISACSSON, U., & ZENG, H. (1998). Cracking of asphalt at low temperatures related to bitumen rheology. *Journal of Materials Science*, 33(8), 2165-2170.
- [66] SOENEN, H., & VANELSTRAETE, A. (2003, April). Performance indicators for low temperature cracking. *Proceedings of the 6th International RILEM Symposium on Performance Testing and Evaluation of Bituminous Materials* (pp. 458-464). Zurich, Switzerland: RILEM Publications SARL.
- [67] LARGEAUD, S., FAUCON-DUMONT, S., ECKMANN, B., HUNG, Y., LAPALU, L., & GAUTHIER, G. (2015, Juin). Caractérisation du comportement à basse température des liants bitumineux. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (928), 70-77.
- [68] ISACSSON, U., & ZENG, H. (1997). Relationships between bitumen chemistry and low temperature behaviour of asphalt. *Construction and Building Materials*, 11(2), 83-91.
- [69] HOARE, T. E., & HESP, S. A. (2000). Low-temperature fracture testing of asphalt binders : regular and modified systems. *Journal of the Transportation Research Board: annual meeting*, 1278, 36-42.
- [70] HUNG, Y., LAPALU, L., GAUTHIER, G., LARGEAUD, S., FAUCON-DUMONT, S., & ECKMANN, B. (2015, Juillet-Août). Caractérisation du comportement à basse température des liants bitumineux (sensibilité des méthodes d'essai vis-à-vis du vieillissement des liants bitumineux). *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (929), 50-55.
- [71] LU, X., ISACSSON, U., & EKBLAD, J. (2003). Influence of polymer modification on low temperature behaviour of bituminous binders and mixtures. *Materials and Structures*, 36(10), 652-656.
- [72] HRIBAR, D., TUŠAR, M., & HOFKO, B. (2013, November). Influence of start temperature on tensile stress testing of restrained asphalt concrete specimens. *Gradevinar*, 65, 987-992.
- [73] TAPSOBA, N., BAAJ, H., SAUZÉAT, C., DI BENEDETTO, H., & ECH, M. (2016). 3D Analysis and Modelling of Thermal Stress Restrained Specimen Test (TSRST) on Asphalt Mixes with RAP and Roofing Shingles. *Construction and Building Materials*, 120, 393-402.
- [74] Association mondiale de la route (AIPCR/PIARC), Comité technique des Chaussées routières (C7/8). (2003). *Recyclage des chaussées, le recyclage en centrale à chaud des mélanges bitumineux*, pp. 123-160.

- [75] DANIEL, J. S., GIBSON, N., TARBOX, S., COPELAND, A., & ANDRIESCU, A. (2013). Effect of long-term ageing on RAP mixtures: laboratory evaluation of plant-produced mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 14(S2), 173-192.
- [76] EAPA. (2016). Asphalt in figures 2016. European Asphalt Pavement Association. Retrieved from <https://eapa.org/asphalt-in-figures>
- [77] CELAURO, C., CELAURO, B., & GABRIELE, B. (2010). Production of innovative, recycled and high-performance asphalt for road pavements. *Resources, Conservation and Recycling*, 54, 337-347.
- [78] VALDÉS, G., PÉREZ JIMÉNEZ, F., MIRÓ, R., MARTÍNEZ, A., & BOTELLA, R. (2011). Experimental study of recycled asphalt mixtures with high percentages of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*, 25(3), 1289-1297.
- [79] HASSAN, R. (2009, October). Feasibility of using high rap contents in hot mix asphalt. 13th International Flexible Pavements Conference. Australian Asphalt Pavement Association. Queensland, Australia.
- [80] VISLAVICIUS, K., & SIVILEVICIUS, H. (2013). Effect of reclaimed asphalt pavement gradation variation on the homogeneity of recycled hot-mix asphalt. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 13(3), 345-353.
- [81] PEREIRA, P. A., OLIVEIRA, J. R., & PICADO-SANTOS, L. G. (2004). Mechanical characterisation of hot mix recycled materials. *International Journal of Pavement Engineering*, 5(4), 211-220.
- [82] OLIVEIRA, J. R., SILVA, H. M., ABREU, L. P., & GONZALEZ-LEON, J. A. (2012). The role of a surfactant based additive on the production of recycled warm mix asphalts - Less is more. *Construction and Building Materials*, 35, 693-700.
- [83] SILVA, H. M., OLIVEIRA, J. R., & JESUS, C. M. (2012). Are totally recycled hot mix asphalts a sustainable alternative for road paving? *Resources, Conservation and Recycling*, 60, 38-48.
- [84] ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B., & FRANK, R. (2016, April). 100% hot mix asphalt recycling: challenges and benefits. TRA2016, 6th European Transport Research Conference (pp. 3493-3502). Warsaw, Poland: Transport Research Arena.
- [85] POROT, L., DI NOLFO, M., POLASTRO, E., & TULCINSKY, S. (2016, June). Life cycle evaluation for reusing Reclaimed Asphalt with a bio-rejuvenating agent. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, Czech Republic.
- [86] ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B., & FRANK, R. (2014). 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 92, 230-245.
- [87] MOGHADDAM, T. B., & BAAJ, H. (2016). The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction and Building Materials*, 114, 805-816.
- [88] LOPEZ, E., WILLEM, M., & MABILLE, C. (2015, Juin). Bétons bitumineux recyclés et régénérés à fort taux de fraisats. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (928), 22-27.
- [89] COTITA Normandie Centre, & SPRIR Routes du Centre. (2012, Décembre). *Les enrobés recyclés à chaud: Utilisation des agrégats d'enrobés*. Présentation: La route durable. Orléans, France.

- [90] Projet RE-ROAD. (2012, November). Re-Road - end of life strategies of asphalt pavements (Re-Road Final Seminar FEHRL). Brussel, Belgium.
- [91] LE GUERN, M., CHAILLEUX, E., FARCAS, F., DREESSEN, S., & MABILLE, I. (2010). Physico-chemical analysis of five hard bitumens: Identification of chemical species and molecular organization before and after artificial aging. *Fuel*, 89(11), 3330-3339.
- [92] LAMONTAGNE, J., DUMAS, P., MOUILLET, V., & KISTER, J. (2001). Comparison by Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy of different ageing techniques: application to road bitumens. *Fuel*, 8(4), 483-488.
- [93] NGUYEN, V. H. (2009). Effects of Laboratory Mixing Methods and RAP Materials on Performance of Hot Recycled Asphalt Mixtures. Phd Thesis: University of Nottingham.
- [94] RAMOND, G., BONONI, A., & PASTOR, M. (1990, Juillet-Août). Modification des caractéristiques rhéologiques des bitumes au cours de leur évolution à l'enrobage. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (168), 47-56.
- [95] BP FRANCE. (1993). *Le bitume*. Editions BP France.
- [96] SUCH, C., & RAMOND, G. (1995, Novembre-Décembre). Les spécifications SHRP et la température de ramollissement bille-et-anneau. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (200), 3-12.
- [97] SÁ-DA-COSTA, M., CORREIA DIOGO, A., & FARCAS, F. (2016, June). Life cycle of bitumen: ageing-regeneration-ageing. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, Czech Republic.
- [98] LAMONTAGNE, J. (2002). Vieillessement des bitumes modifiés polymères à usage routier par simulations et techniques spectroscopiques. Thèse de Doctorat: Université d'Aix - Marseille III.
- [99] LAMONTAGNE, J., DURRIEU, F., MOUILLET, V., PLANCHE, J.-P., & KISTER, J. (2002, Septembre-Octobre). Application de la microspectroscopie infrarouge à l'étude du vieillissement de bitumes-polymères. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (240), 15-26.
- [100] MORIAN, N., HAJJ, E. Y., GLOVER, C. J., & SEBAALY, P. E. (2011). Oxidative Aging of Asphalt Binders in Hot Mix Asphalt Mixtures. *Journal of the Transportation Research Board: 90th Annual Meeting*, 2207, 107-116.
- [101] BÉGHIN, A., NICOLAÏ, A., DAYDÉ, R., & JAKUBOWSKI, M. (2015, Mai). Régénération du bitume issu du recyclage - Partie 2: Evaluation du vieillissement du bitume. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (927), 54-60.
- [102] Projet National MURE. (2017, Mars). Apport des régénérants dans le recyclage des enrobés. Journée d'information et d'échanges. Paris, France.
- [103] MARTIN, A. E., ZHOU, F., ARAMBULA, E., PARK, E. S., CHOWDHURY, A., KASEER, F., . . . GLOVER, C. (2015). The effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios (Phase I, Interim Report NCHR Projet 9-58). College Station, United States: National Cooperative Highway Research Program.
- [104] RICARDI, C., LEANDRI, P., & LOSA, M. (2016). Determining the allowable content of RAP in HMA with regard to Fatigue Resistance. 8th RILEM International

- Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements (pp. 275-281). Nantes, France: Springer.
- [105] CORRIGAN, M., & GOLALIPOUR, A. (2016, April). Long Term Aging & Rheological Parameters. Presentation at the Asphalt Binder ETG meeting. Salt Lake City, United States.
- [106] MARTIN, A. E., ZHOU, F., ARAMBULA, E., PARK, E. S., CHWDHURY, A., KASEER, F., . . . GLOVER, C. (2016). The effects of recycling agents on asphalt mixtures with high RAS and RAP binder ratios (Phase II, Draft Interim Report NCHR Projet 9-58). College Station, United States: National Cooperative Highway Research Program.
- [107] BABADOPULOS, L., LE GUERN, M., CHAILLEUX, E., & DRESSEN, S. (2012, October). Relationships between low temperature properties of asphalt binders. 2nd International Symposium on Asphalt Pavements et Environnement. Fortaleza, Brazil: Transportation Research Board.
- [108] LOPES-GENNESSEUX, M. d. (2015). *Évaluation de la Durabilité des Enrobés Chauds et Tièdes Contenant des Agrégats d'Enrobés*. Thèse de Doctorat: Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier.
- [109] LCPC. (2010, Juillet). Identification et dosage des fonctions oxygénées présentes dans les liants bitumineux. Analyses par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (Méthode d'essai des lcp No. 69).
- [110] MOUILLET, V., LAMONTAGNE, J., DURRIEU, F., PLANCHE, J.-P., & LAPALU, L. (2008). Infrared microscopy investigation of oxidation and phase evolution in bitumen modified with polymers. *Fuel*, 87(7), 1270-1280.
- [111] NAVARO, J., BRUNEAU, D., DROUADAINE, I., COLIN, J., & DONY, A. (2010). *Caractérisation d'un mélange de liants bitumineux par dissolution en couche mince d'un enrobé recyclé*. Communication avec actes de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M).
- [112] IDRRIM. (2013, Juin). Matériels pour le recyclage en installations de production d'enrobés (Note d'information No. 26).
- [113] EBRAHIMI, A., KOOTSTRA, B., EDIL, T., & BENSON, C. (2012). Practical approach for designing flexible pavements using recycled roadway materials as base course. *Road Materials and Pavements Design*, 13(4), 731-748. <https://doi.org/10.1080/14680629.2012.695234>
- [114] UEPG, E. A. (2006, October). Aggregates from construction and demolition waste in Europe. Retrieved from <http://www.uepg.eu/publications/special-editions>
- [115] COPELAND, A. (2011). Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice (Report No. FHWA-HRT-11-021). McLean, United States: U.S. Department of Transportation (FHWA).
- [116] AMBAIOWEI, D., SANCHEZ, X., SAFIUDDIN, M., AURILIO, V., & TIGHE, S. L. (2013, September). Investigating Thermal Cracking Potential of Ontario RAP-HMA Mixtures. Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada - Transportation: Better - Faster - Safe. Ottawa, Canada.
- [117] THØGERSEN, F., GREGOIRE, C., STRYK, J., HORNYCH, P., DESCANTES, Y., CHAZALLON, C., . . . ARM, M. (2013). Recycling of road materials into new unbound road layers - main practice in selected European countries. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), 438-444.

- [118] SOLAIMANIAN, M., & SAVORY, E. (1996). Variability Analysis of Hot-Mix Asphalt Concrete Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of the Transportation Research Board*, 1543, 89-96.
- [119] HAJJ, E. Y., SEBAALY, P. E., & SHRESTHA, R. (2009). Laboratory Evaluation of Mixes Containing Recycled Asphalt Pavement (RAP). *Road Materials and Pavements Desing*, 10(3), 495-517.
- [120] MOHAN, S., & NAUS, R. (2016, June). Fatigue characterization of Enrobés à Module Elevé with high RAP percentages. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, Czech Republic.
- [121] TAPSOBA, N., SAUZÉAT, C., DI BENEDETTO, H., BAAJ, H., & ECH, M. (2014). Behaviour of asphalt mixtures containing reclaimed asphalt pavement and asphalt shingle. *Road Materials and Pavement Design*, 15(2), 330-347.
- [122] Norme française NF EN 13108-8. (2016, Octobre). Mélanges bitumineux - Spécifications pour le matériau. Partie 8: Agrégats d'enrobés.
- [123] Comité Français pour les Techniques Routières (CFTR). (2008). Utilisation des normes enrobés à chaud. Guide technique. Paris: Sétra, Éd.
- [124] ARAVIND, K., & DAS, A. (2007). Pavement desing with central plant hot-mix recycled asphalt mixes. *Construction and Building Materials*, 21(5), 928-936.
- [125] FALLON, E., MCNALLY, C., & GIBNEY, A. (2016). Evaluation of fatigue resistance in asphalt surface layers containing reclaimed asphalt. *Construction and Building Materials*, 128, 77-87.
- [126] SOLAIMANIAN, M., & KENNEDY, T. W. (1995). Production variability analysis of hot-mix asphalt concrete containing reclaimed asphalt pavement (Research Raport Number 2918-1F). Austin, Texas: Center for Transportation Research, University of Texas.
- [127] OLARD, F., LE NOAN, C., BONNEAU, D., DUPRIET, S., & MONNIER, Y. (2008, Avril-Mai). Le recyclage à très fort taux (> 50 %) des enrobés chauds et des enrobés tièdes pour une construction routière durable. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (866), 56-62.
- [128] MIKHAILENKO, P. (2015). Valorization of by-products and products from agro-industry for the development of release and rejuvenating agents for bituminous materials. Thèse de Doctorat: Université de Toulouse.
- [129] SHU, X., HUANG, B., & VUKOSAVLJEVIC, D. (2008). Laboratory evaluation of fatigue characteristics of recycled asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 22(7), 1323-1330. doi:10.1016/j.conbuilmat.2007.04.019
- [130] BROSSEAUD, Y., FARCAS, F., & MOUILLET, V. (2012, October). High modulus asphalt mixes with high rate of RA: what does it happen? Congrès Eurobitume Eurasphalt, EE2012, 13p. Turkey.
- [131] OLIVEIRA, J. R., SILVA, H. M., ABREU, L. P., & PEREIRA, P. A. (2012). Effect of different production conditions on the quality of hot recycled asphalt mixtures. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 266-275.
- [132] EDDHAHAK-OUNI, A., DONY, A., COLIN, J., MENDEZ, S., NAVARO, J., DROUADAIN, I., & BRUNEAU, D. (2012). Experimental investigation of the homogeneity of the blended binder of a high rate recycled asphalt. *Road Materials and Pavement Design*, 13(3), 566-575.

- [133] NADY, R. M. (1997). The quality of random RAP: separating fact from supposition. *HMAT: Hot Mix Asphalt Technology*, 2(2), 14-17.
- [134] OLIVER, J. (2001). The influence of the binder in RAP on recycled asphalt properties. *Road Materials and Pavements Design*, 2(3), 311-325.
- [135] HUANG, B., LI, G., VUKOSAVLJEVIC, D., SHU, X., & EGAN, B. K. (2005). Laboratory Investigation of Mixing Hot-Mix Asphalt with Reclaimed Asphalt Pavement. *Journal of the Transportation Research Board*, 1929, 37-45.
- [136] KRIZ, P., GRANT, D. L., VELOZA, B. A., GALE, M. J., BLAHEY, A. G., BROWNIE, J. H., . . . MACCARRONE, S. (2014). Blending and diffusion of reclaimed asphalt pavement and virgin asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*, 15(S1), 78-112. doi:10.1080/14680629.2014.927411
- [137] AL-QADI, I. L., WU, S., LIPPERT, D. L., OZER, H., BARRY, M. K., & SAFI, F. R. (2017). Impact of high recycled mixed on HMA overlay crack development rate. *Road Materials and Pavement Design*, 18(S4), 311-327.
- [138] RAD, F. Y., SEFIDMAZGI, N. R., & BAHIA, H. (2014). Application of Diffusion Mechanism to Study the Degree of Blending between Fresh and RAP Binder in the DSR. *Journal of the Transportation Research Board: annual meeting*, 2444, 71-77.
- [139] BROWNRIDGE, J. (2010, April). The Role of an Asphalt Rejuvenator in Pavement Preservation: Use and Need for Asphalt Rejuvenation. *Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation* (pp. 351-364). Newport Beach CA, United States.
- [140] ARÁMBULA-MERCADO, E., KASEER, F., EPPS MARTIN, A., YIN, F., & GARCÍA CUCALON, L. (2018). Evaluation of recycling agent dosage selection and incorporation methods for asphalt mixtures with high RAP and RAS contents. *Construction and Building Materials*, 158, 432-442.
- [141] BOCCI, E., GRILLI, A., BOCCI, M., & GOMES, V. (2016, June). Recycling of high percentages of reclaimed asphalt using a bio-rejuvenator - a case study. 6th Eurasphalt & Eurobitume Congress. Prague, Czech Republic.
- [142] YU, X., ZAUMANIS, M., DOS SANTOS, S., & POULIKAKOS, L. D. (2014). Rheological, microscopic, and chemical characterization of the rejuvenating effect on asphalt binders. *Fuel*, 135, 162-171.
- [143] CARPENTER, S. H., & WOLOSICK, J. R. (1980). Modifier Influence in the Characterization of Hot-Mix Recycled Material. *Transportation Research Record*, (777), 15-22.
- [144] DONY, A., COLIN, J., BRUNEAU, D., DROUADAINE, I., & NAVARO, J. (2013). Reclaimed asphalt concretes with high recycling rates: Changes in reclaimed binder properties according to rejuvenating agent. *Construction and Building Materials*, 41, 175-181.
- [145] CHEN, J. S., HUANG, C. C., CHU, P. Y., & LIN, K. Y. (2007). Engineering characterization of recycled asphalt concrete and aged bitumen mixed recycling agent. *Journal of Materials Science*, 42(23), 9867-9876.
- [146] ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B., & FRANK, R. (2015). Evaluation of different recycling agents for restoring aged asphalt binder and performance of 100 % recycled asphalt. *Materials and Structures*, 48(8), 2475-2488.

- [147] ZAUMANIS, M., & MALLICK, R. B. (2015). Review of very high-content reclaimed asphalt use in plant-produced pavements: state of the art. *International Journal of Pavement Engineering*, 16(1), 39-55.
- [148] LOPEZ, E., GASCA-ALLUE, C., CHIFFLET, P., & GARCÍA-SERRADA, C. (2011, Septembre). La nouvelle vie du bitume. Une innovation récente de régénération des bitumes vieillis des enrobés. XXIVe Congrès mondial de la Route (AIPCR). Mexico.
- [149] POROT, L., & VUILLIER, B. (2016, Janvier). SYLVAROAD™ RP1000 Additive, un régénérant BIO pour AE à forts taux. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (933), 54-57.
- [150] TABATABAEE, H. A., & KURTH, T. L. (2017). Analytical investigation of the impact of a novel bio-based recycling agent on the colloidal stability of aged bitumen. *Road Materials and Pavement Design*, 18(S2), 1-10.
- [151] DE LA ROCHE, C., VAN DE VEN, M., PLANCHE, J.-P., VAN DEN BERGH, W., GRENFELL, J., GABET, T., . . . RUOT, C. (2013). Hot Recycling of Bituminous Mixtures. In PARTL et al. (eds). *Advances in Interlaboratory Testing and Evaluation of Bituminous Materials* (Vol. 9, pp. 361-428). Dordrecht, Netherlands: Springer.
- [152] MCDANIEL, R. S., SOLEYMANI, H., ANDERSON, R. M., TURNER, P., & PATERSON, R. (2000). Incorporation of reclaimed asphalt pavement in the Superpave System (Report NCHRP Projet 9-12). Washington DC, United States: National Cooperative Highway Research Program, National Research Council.
- [153] OLARD, F. (2011, Février). *Recyclage d'enrobés bitumineux en enrobés bitumineux*. Présentation: Journées Techniques Routes. Nantes, France.
- [154] OLARD, F., BONNEAU, D., DUPRIET, S., BEDUNEAU, E., & SEIGNEZ, N. (2008-2009). Formulation spécifique en laboratoire des enrobés à très fort taux de recyclés (jusqu'à 70 %), à chaud ou en technique E.B.T.®. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (872), 62-66.
- [155] BÉGHIN, A., NICOLAÏ, A., & JAKUBOWSKI, M. (2015, Mars-Avril). Régénération du bitume issu du recyclage - Partie 1: Evaluation de la remobilisation du bitume par des essais de laboratoire. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (926), 42-46.
- [156] MCDANIEL, R., & ANDERSON, R. M. (2001). Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mixture Design Method: Technician Manual (NCHRP Report 452). Washington DC, United States: TRB, National Research Council.
- [157] Norme française NF EN 12697-35. (2017, Juillet). Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai. Partie 35: Malaxage de laboratoire.
- [158] TARBOX, S., & DANIEL, J. S. (2012). Effects of Long-Term Oven Aging on Reclaimed Asphalt Pavement Mixtures. *Journal of the Transportation Research Board*, 2294, 1-15. doi:10.3141/2294-01
- [159] KARLSSON, R., & ISACSSON, U. (2003). Application of FTIR-ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15(2), 157-165.
- [160] VASSAUX, S. (2017). Mouillabilité et miscibilité des bitumes : application au recyclage. Thèse de Doctorat: Université de Montpellier.

- [161] EL BÉZE, L., ROSE, J., MOUILLET, V., FARCAS, F., MASON, A., CHAURAND, P., & BOTTERO, J.-Y. (2012). Location and evolution of the speciation of vanadium in bitumen and model of reclaimed bituminous mixes during ageing: Can vanadium serve as a tracer of the aged and fresh parts of the reclaimed asphalt pavement mixture? *Fuel*, 102, 423-430.
- [162] MOUAZEN, M., MOGLIA, O., GAUTHIER, G., BRUNON, A., BAPTISTE, V., & MABILLE, C. (2015, Juin). Un réjuvenant pour la régénération des agrégats d'enrobés (AE). *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (928), 79-84.
- [163] TABAKOVIC, A., GIBNEY, A., MCNALLY, C., & GILCHRIST, M. D. (2010). Influence of recycled asphalt pavement on fatigue performance of asphalt concrete base courses. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 22(6), 643-650.
- [164] HUANG, B., KINGERY, W., & ZHANG, A. (2004, June). Laboratory study of fatigue characteristics of HMA mixtures containing RAP. *International Symposium on Design and Construction of Long Lasting Asphalt Pavements* (pp. 501-522). Auburn, United States.
- [165] MIRÓ, R., VALDÉS, G., MARTÍNEZ, A., SEGURA, P., & RODRÍGUEZ, C. (2011). Evaluation of high modulus mixture behaviour with high reclaimed asphalt pavement (RAP) percentage for sustainable road construction. *Construction and Building Materials*, 25(10), 3854-3862.
- [166] MOGAWER, W. S., FINI, E. H., AUSTERMAN, A. J., BOOSHERIAN, A., & ZADA, B. (2015). Performance characteristics of high reclaimed asphalt pavement containing bio-modifier. *Road Materials and Pavement Design*, 17(3), 753-767.
- [167] VISITINE, B., KHOSLA, N. P., & TAYEBALI, A. (2013). Effects of higher percentage of recycled asphalt pavement on pavement performance. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), 432-437.
- [168] HUANG, B., ZHANG, Z., & KINGERY, W. (2004, May). Fatigue Crack Characteristics of HMA Mixtures Containing RAP. *5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements* (pp. 631-638). Limoges, France: RILEM.
- [169] MANGIAFICO, S., SAUZÉAT, C., DI BENEDETTO, H., OLARD, F., POUGET, S., DUPRIET, S., . . . VAN ROOIJEN, R. (2015, Juin). Effet de l'ajout d'agrégat d'enrobé sur le module complexe et la résistance en fatigue des enrobés bitumineux. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (928), 35-40.
- [170] BÉGHIN, A., NICOLAÏ, A., DAYDÉ, R., & JAKUBOWSKI, M. (2015, Juin). Régénération du bitume issu du recyclage - Partie 3: Evaluation de la régénération du bitume par une approche rhéologique. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*, (928), 14-20.
- [171] PEREZ MARTINEZ, M., MARSAC, P., GABET, T., HAMMOUM, F., de MESQUITA LOPES, M., & POUGET, S. (2016, June). Effects of Ageing on Warm Mix Asphalts with High Rates of Reclaimed Asphalt Pavement. *8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements* (pp. 113-118). Nantes, France: Springer.
- [172] ZARGAR, M., AHMADINIA, E., ASLI, H., & KARIM, M. R. (2012). Investigation of the possibility of using waste cooking oil as a rejuvenating agent for aged bitumen. *Journal of Hazardous Materials*, 233-234, 254-258.

- [173] ROMERA, R., SANTAMARÍA, A., PEÑA, J. J., MUÑOZ, M. E., BARRAL, M., GARCÍA, E., & JAÑEZ, V. (2006). Rheological aspects of the rejuvenation of aged bitumen. *Rheologica Acta*, 45(4), 474-478.
- [174] LOPES, M., GABET, T., BERNUCCI, L., & MOUILLET, V. (2015). Durability of hot and warm asphalt mixtures containing high rates of reclaimed asphalt at laboratory scale. *Materials and Structures*, 48(12), 3937-3948.
- [175] STROUP-GARDINER, M., & WAGNER, C. (1999). Use of RAP in superpave HMA applications. *Journal of the Transportation Research Board*, 1681, 10-18.
- [176] PEDRAZA, A. (2018). *Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés*. Thèse de Doctorat: Université de Lyon.
- [177] MCDANIEL, R. S., SOLEYMANI, H., & SLAH, A. (2002). Use of reclaimed asphalt (RAP) under Superpave specifications: a Regional Pooled Fund Study (Final Report FHWA/IN/JTRP-2002/6). West Lafayette, United States: Purdue University.
- [178] BABADOPULUS, L. F. A. L., SOARES, J. B., FERREIRA, J. L. S., & DO NASCIMENTO, L. A. H. (2016, June). Evaluation of Fatigue Behaviour of Aged Asphalt Mixtures Using the simplified Viscoelastic Continuum Damage Model. 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements (pp. 9-15). Nantes, France: Springer.
- [179] SEYTRE-DUPECHER, S. (2002). *Recyclage en centrale des enrobés bitumineux, synthèse bibliographique des recherches menées à Blois entre 1978 et 1982 (Rapport du laboratoire des ponts et chaussées de Blois)*. CETE Normandie Centre.
- [180] Ministry of Construction and Transportation, Republic of Korea. (2005). *Methodology of improving quality of reclaimed mixture for extending service life of recycled asphalt pavement (Final report No. R&D/02F01-02)*. Republic of Korea: Kangwon National University.
- [181] SARGIOUS, M., & MUSHULE, N. (1991). Behaviour of Recycled Asphalt Pavement at Low Temperatures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 18(3), 428-435.
- [182] RENKEN, P. (2004, May). Reuse of higher amounts of reclaimed asphalt in the surface courses - Basics to processing techniques and mechanical properties. 3rd Eurasphalt & Eurobitume Congress (Vol. 1, pp. 302-309). Vienna, Austria : Breukelen Foundation Eurasphalt.
- [183] REYHANEGH, R. R., & DANIEL, J. S. (2016, June). Mixture and Production Parameters Affecting Cracking Performance of Mixtures with. 8th RILEM International Conference on Mechanisms of Cracking and Debonding in Pavements (pp. 307-312). Nantes, France: Springer.
- [184] HAJJ, E. Y. (2010, October). Manitoba – PTH 8 RAP Field Sections. Update on Laboratory Test Results. ARC Seminar. Oklahoma City, United States.
- [185] Norme française NF EN 12697-1. (2012, Août). *Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 1: Teneur en liant soluble*.
- [186] ALVARADO PATINO, N. A., MARTINEZ, J., & LOPEZ, E. (2017, April). Performance evaluation of regenerated HMA with very high RAP content. *Transport Infrastructure and Systems (TIS). Proceedings of the AIIT International Congress on Transport Infrastructure and Systems (pp. 469-476)*. Rome, Italy: CRC Press.

- [187] Norme française NF EN 12697-3. (2013, Août). Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 3: Extraction des bitumes à l'évaporateur rotatif.
- [188] Norme française NF EN 12697-33+A1. (2007, Septembre). Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 33: Confection d'éprouvettes au compacteur de plaque.
- [189] ALVARADO, N., MARTINEZ, J., & LOPEZ, E. (2018, May). Stiffness and fatigue resistance of Hot Mix Asphalt containing high rates of reclaimed asphalt pavement. 5th International Conference on Road and Rail Infrastructure (pp. 403-409). Zadar, Croatia: CETRA 2018.
- [190] MOM, S. (2017). Dimensionnement des structures de chaussées bitumineuses avec utilisation d'agrégats d'enrobés régénérés (Mémoire de Master). INSA Rennes.
- [191] SETRA & LCPC. (1998). Catalogue des structures types de chaussées neuves. Paris: Sétra, Éd.
- [192] SETRA & LCPC. (1994, Décembre). Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique. Paris: Sétra, Éd.
- [193] MONISMITH, C. L., SECOR, G. A., & SECOR, K. E. (1965). Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete. Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists (Vol. 34, pp. 248-285).
- [194] ALVARADO-PATINO, N. A., MARTINEZ, J., LOPEZ, E. (2017, Mai). Thermo-mechanical properties of Hot Mix Asphalt containing high rates of Reclaimed Asphalt Pavement. Paper presented at the 35èmes Rencontres de l'AUGC, ECN/UN, Nantes, France.
- [195] ALVARADO, N. (2018, Février). Propriétés thermomécaniques des enrobés à module élevé (EME) recyclés à très fort taux d'AE. Poster présenté aux Journées Techniques Route. Nantes, France.
- [196] Y, S. (2018). Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux régénérés (Mémoire de Master). INSA Rennes.
- [197] REM, S. (2018). Modélisation du comportement thermomécanique à basse température des enrobés bitumineux recyclés (Mémoire de Master). INSA Rennes.

ANNEXES

ANNEXES	i
FIGURES	iii
TABLEAUX	v
ANNEXE A FORMULATION DES MATÉRIAUX.....	1
1. DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES COMPOSANTS	1
2. FICHES TECHNIQUES PRODUIT	2
3. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES LIANTS APRÈS ENROBAGE.....	9
ANNEXE B COMPACTIBILITÉ, SENSIBILITÉ À L’EAU, ORNIÉRAGE	15
1. VALIDATION DE LA RECOMPOSITION DES MÉLANGES.....	15
2. RÉSULTATS DES ESSAIS PCG ET ORNIÉRAGE.....	17
3. RÉSULTATS DE L’ESSAI DURIEZ	19
ANNEXE C MODULE COMPLEXE, RÉSISTANCE À LA FATIGUE	21
1. RÉSULTATS BBSG3.....	21
2. RÉSULTATS GB4.....	23
3. RÉSULTATS EME2.....	26
4. DIMENSIONNEMENT ALIZÉ-LCPC	28
ANNEXE D PERFORMANCES À BASSE TEMPÉRATURE.....	31
1. DÉRIVE THERMIQUE DU SYSTÈME DE MESURE	31
2. RÉSULTATS BBSG3.....	33
3. RÉSULTATS GB4.....	36
4. RÉSULTATS EME2.....	38
5. RD 996	41

FIGURES

Figure A - 1. Spectre infrarouge après enrobage (BBSG3) : 0R ; 55CR ; 55CR'	9
Figure A - 2. Spectre infrarouge après enrobage (BBSG3) : 0CR ; 55R ; 55R'	10
Figure A - 3. Spectre infrarouge après enrobage (BBSG3) : 0CR ; 70R ; 70R'	10
Figure A - 4. Spectre infrarouge après enrobage (GB4) : 0R ; 40R ; 40R'	11
Figure A - 5. Spectre infrarouge après enrobage (GB4) : 0R ; 55R ; 55R'	11
Figure A - 6. Spectre infrarouge après enrobage (GB4) : 0R ; 70R ; 70R'	11
Figure A - 7. Spectre infrarouge après enrobage (EME2) : 0R ; 40R ; 40R'	12
Figure A - 8. Spectre infrarouge après enrobage (EME2) : 0R ; 55R ; 55R'	13
Figure A - 9. Spectre infrarouge après enrobage (EME2) : 0R ; 70R ; 70R'	13
Figure C - 1. Rigidités complexes des formules de GB4 (6 % de vides) dans : (a) l'espace de Black et (b) le plan de Cole-Cole.	25
Figure D - 1. Déplacement des différents éléments du système de mesure pour l'essai TSRST.	31
Figure D - 2. Montage pour la détermination du coefficient de contraction/dilatation thermique des capteurs LVDT.....	32
Figure D - 3. Spectre infrarouge des liants de la RD 996 après six ans de service.....	41
Figure D - 4. Récapitulatif des échantillons de la RD 996 ($\phi=50$ mm ; h=160 mm) : RD-10R ; RD-40R' ; RD-40R''	42

TABLEAUX

Tableau A - 1. Granulométrie des granulats neufs (moyenne de 10 prélèvements).	1
Tableau A - 2. Granulométrie des AE (12 à 20 prélèvements).	1
Tableau A - 3. Propriétés physico-chimiques des liants de BBSG3 après enrobage.	9
Tableau A - 4. Propriétés physico-chimiques des liants de GB4 après enrobage.	10
Tableau A - 5. Propriétés physico-chimiques des liants d'EME2 après enrobage.	12
Tableau B - 1. Contrôle de la teneur en liant et de la granulométrie (BBSG3).	15
Tableau B - 2. Contrôle de la teneur en liant et de la granulométrie (GB4 & EME2).	16
Tableau B - 3. Plan de compactage des plaques d'orniérage.	17
Tableau B - 4. Résultats complets des essais PCG et orniérage (BBSG3).	17
Tableau B - 5. Résultats complets des essais PCG et orniérage (GB4 & EME2).	18
Tableau B - 6. Résistance à la compression (C_D & C_w) des éprouvettes Duriez.	19
Tableau C - 1. Paramètres du compactage des plaques (BBSG3).	21
Tableau C - 2. Résultats des essais de module complexe (BBSG3 à 6,5 % de vides).	21
Tableau C - 3. Résultats des essais de résistance à la fatigue (BBSG3 à 6,5 % de vides).	22
Tableau C - 4. Paramètres du compactage des plaques (GB4).	23
Tableau C - 5. Résultats des essais de module complexe (GB4 à 4,5 % de vides).	23
Tableau C - 6. Résultats des essais de résistance à la fatigue (GB4 à 4,5 % de vides).	24
Tableau C - 7. Résultats des essais de module complexe (GB4 à 6 % de vides).	25
Tableau C - 8. Paramètres du compactage des plaques (EME2).	26
Tableau C - 9. Résultats des essais de module complexe (EME2 à 3 % de vides).	26
Tableau C - 10. Résultats des essais de résistance à la fatigue (EME2 à 3 % de vides).	27
Tableau C - 11. Paramètres intervenants dans le dimensionnement structural des chaussées.	28
Tableau C - 12. Trafic équivalent des différentes couches de la structure (§ IV-5).	29
Tableau D - 1. Paramètres de compactage des plaques (BBSG3).	33
Tableau D - 2. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-0R.	33
Tableau D - 3. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-0CR.	33
Tableau D - 4. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-55R.	34
Tableau D - 5. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-55R'.	34
Tableau D - 6. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-55CR.	34
Tableau D - 7. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-55CR'.	35
Tableau D - 8. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-70R.	35
Tableau D - 9. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-70R'.	35
Tableau D - 10. Paramètres de compactage des plaques (GB4).	36
Tableau D - 11. Résultats UTST & TSRST de la GB4-0R.	36
Tableau D - 12. Résultats UTST & TSRST de la GB4-40R.	36
Tableau D - 13. Résultats UTST & TSRST de la GB4-40R'.	37
Tableau D - 14. Résultats UTST & TSRST de la GB4-55R.	37
Tableau D - 15. Résultats UTST & TSRST de la GB4-55R'.	37
Tableau D - 16. Résultats UTST & TSRST de la GB4-70R.	38
Tableau D - 17. Résultats UTST & TSRST de la GB4-70R'.	38
Tableau D - 18. Paramètres de compactage des plaques (EME2).	38
Tableau D - 19. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-0R.	39
Tableau D - 20. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-40R.	39
Tableau D - 21. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-40R'.	39
Tableau D - 22. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-55R.	40
Tableau D - 23. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-55R'.	40

Tableau D - 24. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-70R.	40
Tableau D - 25. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-70R'	41
Tableau D - 26. Résultats UTST & TSRST de la RD 996-10R.....	43
Tableau D - 27. Résultats UTST & TSRST de la RD 996-40R'	43
Tableau D - 28. Résultats UTST & TSRST de la RD 996-40R"	43

ANNEXE A **FORMULATION DES MATÉRIAUX**

1. DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES COMPOSANTS

Tableau A - 1. Granulométrie des granulats neufs (moyenne de 10 prélèvements).

Tamis (mm) % passant	Fillocarb OMYA	BBSG3 (RM)		GB4 (LF)				EME2 (BV)			
		0/4	4/10	0/4	4/6	6/10	10/14	0/4	4/6	6/10	10/14
20	-	-	-	-	-	-	99,9	-	-	-	100,0
14	-	-	-	-	-	100,0	81,4	-	-	100,0	90,5
12,5	-	-	100,0	-	100,0	99,9	53,4	-	-	99,9	70,7
10	-	-	92,2	-	99,9	83,1	9,8	-	100,0	91,1	24,3
8	-	100,0	71,4	-	99,7	39,5	3,0	-	99,8	50,3	4,6
6,3	-	99,9	49,9	100,0	85,1	9,3	1,8	100,0	86,8	11,2	1,3
5	-	99,8	29,5	99,3	41,2	3,6	1,5	99,9	47,8	2,8	0,9
4	-	97,9	13,9	93,1	13,6	2,5	1,4	96,3	17,8	1,8	0,9
2	-	70,0	4,0	60,3	2,1	1,4	1,2	68,1	4,4	1,1	0,8
1	-	45,7	2,8	39,1	1,3	1,1	1,1	46,7	3,1	1,0	0,8
0,5	100	30,0	2,3	27,8	1,2	1,1	1,0	32,7	2,5	1,0	0,8
0,315	99,9	22,5	2,0	22,7	1,1	1,0	1,0	25,6	2,2	1,0	0,8
0,25	95	20,1	1,9	20,9	1,1	1,0	1,0	22,4	2,1	0,9	0,8
0,08	82	12,0	1,7	10,5	0,8	0,8	0,8	13,3	1,8	0,9	0,7
0,063	78	11,5	1,7	10,0	0,8	0,8	0,8	12,6	1,8	0,9	0,7

Tableau A - 2. Granulométrie des AE (12 à 20 prélèvements).

Tamis (mm) % passant	AE - RM (BBSG3)		AE - APRR (BBSG3)		AE - LF (GB4)		AE - BV (EME2)	
	Moyen	Écart-type	Moyen	Écart-type	Moyen	Écart-type	Moyen	Écart-type
20	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0	100,0	0,0
14	100,0	0,0	100,0	0,0	99,6	0,3	100,0	0,0
12,5	99,7	0,3	99,5	0,4	98,4	0,5	100,0	0,1
10	95,1	1,1	93,8	1,5	92,1	1,0	98,4	0,5
8	82,9	3,1	82,5	2,0	76,7	2,2	91,1	1,1
6,3	69,4	3,8	69,6	0,9	62,9	2,4	80,2	1,5
5	60,6	3,9	61,2	0,9	55,9	2,5	71,0	1,5
4	54,3	3,7	54,9	0,5	50,6	2,3	63,5	1,7
2	39,0	3,1	41,5	0,3	35,7	1,4	46,3	1,6
1	28,6	2,6	30,6	0,1	26,6	0,9	33,8	1,4
0,5	21,7	1,6	22,9	0,2	21,6	0,7	25,7	1,1
0,315	18,3	1,2	19,0	0,2	19,6	0,6	21,8	1,0
0,25	16,9	1,0	17,4	0,2	18,8	0,5	19,7	0,8
0,08	11,4	0,6	11,3	0,2	10,9	0,2	12,5	0,5
0,063	11,0	0,5	10,4	0,2	10,5	0,2	11,6	0,4
t_{int} (%)	5,50	0,35	5,61	0,10	5,11	0,18	5,26	0,17

2. FICHES TECHNIQUES PRODUIT

Fiche Technique agrégat d'enrobé selon le guide technique SETRA de janvier 2008

PARTIE NORMATIVE

Lieu de stockage/ Centrale d'enrobage	Vaise	Société:	Roger Martin
Diamètre apparent de l'agrégat d'enrobé:	10 mm	Chantier:	diffuseur Dôle fin septembre 2013
Classe des matériaux réceptionnés:	-	Date du rapport d'essais:	09/10/2013
Origine (si classe a):	-		
Quantité stockée:	-		
Teneur en liant moyenne:	5,60 %	Catégorie:	TL1
TBA moyenne du liant:	0		
ou pénétrabilité moyenne du liant:	47	Catégorie:	B₁
D des granulats désenrobés:	10 mm	Catégorie:	G₁
Caractéristiques intrinsèques:	-	Catégorie:	R _{NS}

PARTIE INFORMATIVE

Teneur en liant (en %)	Nombre de mesures ou Doc	9		
	Max:			6,03
	Min:			5,31
	Différence:			0,72
	Catégorie de teneur en liant	TL _{NS}	TL ₂ < 2%	TL ₁ < 1%

TBA ou PENE du liant	Nombre de mesures	0			Nombre de mesures	5		
	TBA max: (≤ 77)			0	Péné min: (> 5)			40
	TBA min:			0	Péné max:			52
	Différence:			0	Différence:			12
	Catégorie de liant	B _{NS}	B ₂	B ₁ < 8	Catégorie de liant	B _{NS}	B ₂	B ₁ < 15

Analyse granulométrique des granulats désenrobés	Passant à:	Nombre de mesures: 12					
	1,58 D	Min: 100,0			NS	> 99	
	D	Max: 98,7			NS	< 99	
		Min: 91,8			NS	≥ 80	≥ 85
		Différence: 6,9			NS	≤ 15	≤ 10
		Max:	Min:	Diff:			
	2 mm	48,2	37,2	11	NS	≤ 20	≤ 15
	0,063 mm	11,7	9,9	1,8	NS	≤ 6	≤ 4
Catégorie de granularité				G _{NS}	G ₂	G ₁	

Caractéristiques intrinsèques des granulats	Classe d/D testée:	Doc		
	LA			
	MDE			
	PSV			
	FS	D:		
Catégorie de caractéristiques intrinsèques			R _{NS}	R ₁

agrégats conformes à la NF EN 13108-8

Usage chaussée: **10% maxi en couche de roulement**
40% maxi en couche de liaison et assise



FICHE TECHNIQUE AGREGAT POUR ENROBES - A28 - Section A13 Bernay - 2013

109 Rue des Douves
27500 Comeville Sur Risle
Tél. : 02.32.57.81.31
Fax. : 02.32.57.18.40

selon Guide technique "Utilisation des normes enrobés à chaud" de janvier 2008

PARTIE NORMATIVE

Lieu de stockage : Plateforme de Malleville sur le Bec	
Diamètre apparent de l'agrégat d'enrobé : 10 à 12,5 mm	
Classe des matériaux réceptionnés : a	
Origine : A28 - Section Bernay - A13	
Quantité à stocker : ?	Date du rapport d'essais : 10/09/13
Teneur en liant moyenne : 5,09 % ou 5,25 ppc	Catégorie : TL ₁
ou pénétrabilité moyenne du liant : 16,4 1/10mm	Catégorie : B1
D des granulats désenrobés : 10mm	Catégorie : G ₁
Caractéristiques intrinsèques : B	Catégorie : R1

PARTIE INFORMATIVE

Teneur en liant	Nombre de mesures ou Doc ¹⁾ <input type="checkbox"/>	8		
	Max :			5,23
	Min :			4,74
	Différence :			0,49
	Catégorie de teneur en liant ²⁾	TL _{NS}	TL ₂ <2%	TL ₁ <1%

TBA ou Péné du liant	Nombre de mesures	2		Nombre de mesures	2	
	TBA max : (≤ 77)		66,7	Péné min : (≥ 5)		16,1
	TBA min :		64,3	Péné max :		16,6
	Différence :		1,8	Différence :		0,5
	Catégorie de liant ²⁾	B _{NS}	B ₂	B ₁ <8	B _{NS}	B ₂

Analyse granulométrique des granulats désenrobés	Passant à :	Nombre de mesures :		8		
	1,58 D	min :	100	NS	>99	
	D	max :	93,8	NS	<99	
		min :	86,7	NS	≥ 80	≥ 85
		différence :	7,1	NS	≤ 15	≤ 10
		max :	min :	différence :		
	2mm	33,3	24,8	8,5	NS	≤ 20
0,08mm	9,9	6,2	3,7	NS	≤ 6	≤ 4
Catégorie de granularité ²⁾				G _{NS}	G ₂	G ₁

Caractéristiques intrasèques des granulats	Classe d/D testée :	Doc ¹⁾		
	LA	18	<input type="checkbox"/>	B
	MDE	12	<input type="checkbox"/>	B
	PSV ou RPA	Non mesuré	<input type="checkbox"/>	
	FS	D :	<input type="checkbox"/>	
Catégorie de caractéristiques intrinsèques ²⁾			R _{NS}	R ₁

COMMENTAIRES :

Le matériau (Fraisats Vignats), d'après le guide est de catégorie :

Teneur en liant : TL1

Pénétrabilité ou TBA : B1

Granularité : G1

Caractéristiques intrinsèques : R1

MVR : 2,67 t/m³

Le Directeur technique
M. WILLEM Michel



Producteur : Poste de Pierrelatte
Agrégat d'enrobé : 12.5 AE 10 - AE RD 941 - Grillon
Type : Agrégat d'enrobé

Lieu de stockage / Centrale d'enrobage : Poste de Pierrelatte

Diamètre apparent de l'agrégat d'enrobé (mm) : 12.5

Quantité stockée (t) : N.R.

Teneur en liant moyenne (%): 4.91

TBA du liant moyenne : 73.0

Pénétrabilité du liant moyenne : 11

D des granulats d'enrobés (mm) : 10

Caractéristiques intrinsèques des granulats

Date du rapport d'essais : 07/11/2013

Catégorie : TL 1

Catégorie : B 2

Catégorie : B 1

Catégorie : G NS

Catégorie : R NS

Teneur en liant

Nombre de résultats	5	Moyenne	4.91
maxi			5.15
mini			4.61
Différence			0.54
Catégorie Teneur en liant %	TL NS	TL ≤2	TL ≤1

TBA du liant

Nombre de résultats	5	Moyenne	73.0
maxi (≤ 77)		78.4	
mini		68.0	
Différence		10.4	
Catégorie Liant	B NS	B 2	B 1 <8 S70

Pénétrabilité du liant

Nombre de résultats	5	Moyenne	11
maxi (≥ 5)			13
mini			7
Différence			7
Catégorie Liant	B NS	B 2	B 1 <15 P15

Analyse granulométrique des granulats

	Nombre de résultats			5			Moyenne
1.4 D	mini	100.0		NS	> 98		100.00
	maxi	99.7		NS	< 99		
D	mini	98.1	98.1	NS	≥ 80	≥ 85	98.72
	Différence	1.6	1.6	NS	≤ 15	≤ 10	
	maxi	mini	Différence				
2 mm	44.2	38.5	5.7	NS	≤ 20	≤ 15	41.90
0.063 mm	10.2	8.6	1.6	NS	≤ 6	≤ 4	9.60
mm							
mm							
Catégorie				G NS	G 2	G 1	

Caractéristiques intrinsèques des granulats

Gravillon et sable silico-calcaire	Classe d/D testée	Doc		
LA				
MDE				
PSV				
FS	D			
			RNS	R1

FICHE PRODUIT

REGEFALT RT

Au sein de la gamme FENIXFALT, REGEFALT est le procédé qui favorise le recyclage partiel à chaud aux taux maximum permis par la centrale de recyclage utilisée. Le processus chimique REGEFALT intervient sur la fraction du bitume vieilli apportée par les matériaux recyclés en le régénérant. Le nouveau bitume résultant du mélange des deux liants, présente des caractéristiques équivalentes voire supérieures à celles d'un bitume neuf.

FONCTION DE REGEFALT RT

REGEFALT RT permet l'incorporation maximale d'agrégats d'enrobés aux enrobés produits. La majorité des unités actuellement disponibles est plafonnée à un taux de recyclage de 50% lié au mode de transmission de la chaleur. Avec l'arrivée de nouvelles installations plus performantes au niveau du mode de transfert de l'énergie calorifique, ce plafond va pouvoir être repoussé à 60/65% avec la garantie d'un haut niveau de qualité pour les enrobés obtenus.

ACTION DE REGEFALT RT

REGEFALT RT provoque un processus chimique irréversible de réduction des composés oxydés du bitume vieilli qui facilite l'interpénétration des milieux ancien et nouveau et conduit à l'intégration harmonieuse des constituants du nouveau bitume.

La morphologie classique des bitumes se trouve modifiée. La hausse naturelle de la rigidité du milieu est accompagnée d'un accroissement du caractère élastique, qui modifie ainsi la spécificité du module complexe des bitumes classiques. Ce niveau de transformation est directement lié à la quantité d'agrégats d'enrobé ajoutée, c'est à dire à la proportion de bitume vieilli contenue dans le liant final régénéré.

BITUMES OBTENUS AVEC REGEFALT RT

Tous les grades de pénétration des bitumes peuvent être obtenus.

A partir des caractéristiques du bitume vieilli, du taux de recyclage envisagé et des grades des bitumes d'apport disponibles, il est possible de reproduire, in situ, toute la gamme des liants routiers conformes aux spécifications. Dans certains cas, l'apport d'un fluidifiant sera nécessaire en particulier à partir de valeurs de pénétration inférieures à 20 du bitume vieilli, du taux de recyclage souhaité, du grade de pénétration maximum du bitume d'apport disponible et de la pénétration du bitume reproduit recherché.

REGEFALT RT offre une solution adaptée à chaque cas rencontré.

MISE EN OEUVRE DE REGEFALT RT

PRESENTATION DE REGEFALT RT

L'additif **REGEFALT RT** se présente sous forme de petits granulés conçus pour s'incorporer aux deux bitumes qui, lors du malaxage, conduisent au liant final reconstitué.

CARACTERISTIQUES DU LIANT D'APPORT

Le bitume complémentaire à employer avec **REGEFALT** est de type conventionnel. Le choix de son grade dépendra des caractéristiques recherchées pour le bitume reproduit, en relation avec celles du bitume vieilli recyclé et de son taux de recyclage.

FORME D'USAGE

L'introduction des additifs **REGEFALT RT** est à réaliser soit :

- dans le malaxeur d'enrobage au moment de l'entrée des agrégats d'enrobé dans les agrégats neufs et chauds et de l'ajout du bitume complémentaire
- dans la veine d'agrégats d'enrobé alimentant le tambour sécheur malaxeur.

CONDITIONS DE TRAVAIL AVEC REGEFALT RT

Le processus **REGEFALT RT** exige une température minimale d'enrobage de 160°C et de préférence 170°C ! Suivant les exigences des chantiers, un niveau supérieur de température : 180/190°C, n'est pas gênant pour le processus.

REGLE D'UTILISATION DE REGEFALT RT

La quantité d'additif **REGEFALT RT** à ajouter est proportionnelle au taux d'agrégats de vieil enrobé introduit ainsi qu'à sa teneur en bitume. Elle répond à la formule suivante qui exprime la quantité d'additif en kilogramme à incorporer à chaque tonne d'enrobé recyclé produite.

$$\text{Quantité de REGEFALT RT (kg / tonne d'enrobé)} \rightarrow Q = 36 T X$$

Exemple pour un recyclage à 50 % d'agrégats d'enrobés (T) contenant 5% de vieux liant (X), la quantité (Q) d'additif **REGEFALT RT** à ajouter est de 0,9 kg par tonne d'enrobé produite.

Les informations techniques figurant sur cette fiche constituent le guide d'emploi de l'additif. Elles ne sauraient, en aucun cas, engager la responsabilité de FENIXFALT SAS en ce qui concerne les procédés d'utilisation du produit ou les résultats obtenus en dehors des recommandations d'usage précisées concernant strictement la régénération des liants vieillis par recyclage partiel. Le choix et la mise au point de ces procédés incombent aux utilisateurs sous leur entière responsabilité.

FENIXFALT SAS au capital de 2 265 800 € - SIRET 515 288 009 00027 - RCS Pau
Impasse Chinanou - Avenue du Corps Franc POMMIES F-64270 SALIES DE BEARN
☎ + 33 (0) 05 59 67 01 19 - contact@fenixfalt.com

2012 01 V1

FICHE PRODUIT

REGEMAC

REGEMAC est le procédé de conversion en bitume modifié élastomère de tout liant résultant d'une opération de recyclage partiel d'agrégats d'enrobé par régénération du vieux bitume routier usagé. Comme pour REGEFALT, REGEMAC permet l'introduction des teneurs maximum d'agrégats d'enrobés à recycler selon les caractéristiques de la centrale utilisée,

ROLE ET ACTION DE REGEMAC

REGEMAC est le promoteur du recyclage à chaud, favorisant l'incorporation des taux maximum d'agrégats d'enrobés aux enrobés recyclés. Conditionné par les caractéristiques des dispositifs de chauffe de chaque centrale, l'usage normal du REGEMAC, se situe aux environs de 50% pour la majeure partie des unités actuellement disponibles. L'arrivée progressive de nouveaux dispositifs de chauffe plus performants, permettra de repousser ce plafond à 60/65%.

Simultanément au processus chimique irréversible de réduction des composés oxydés du bitume vieilli, REGEMAC développe en parallèle un ensemble de réactions de réticulation inter et intramoléculaires. L'additif facilite également l'interpénétration des deux milieux : le bitume vieilli et le neuf. Les propriétés du milieu sont profondément modifiées. On crée ainsi des bitumes à caractère élastique résultant du greffage des additifs et présentant les caractéristiques des bitumes élastomériques industriels, modifiés chimiquement.

BITUMES MODIFIES OBTENUS AVEC REGEMAC RCn et RCs

A partir des caractéristiques du bitume vieilli, du taux de recyclage envisagé et des disponibilités des bitumes d'apport, il sera possible avec REGEMAC RCn et RCs de reproduire in situ toute la gamme de pénétration des liants modifiés chimiquement en leur intégrant un caractère élastique standard ou très élevé.

Plage de pénétration 1/10 mm	15 - 30	35 - 50	55 - 70	70 -100
TBA °C	≥ 70	≥ 65	≥ 60	≥ 58

Dans certains cas, l'apport d'un fluidifiant sera nécessaire, en particulier à partir de valeurs de pénétrations basses et du taux de recyclage souhaité.

Pour chaque cas envisagé, REGEMAC RCn et REGEMAC RCs disposent d'une solution que FENIXFALT étudiera et proposera par l'intermédiaire de son service technique.

MISE EN OEUVRE DE REGEMAC RCn et RCs

PRESENTATION

Deux versions sont disponibles : REGEMAC RCn et REGEMAC RCs.

REGEMAC RCn répond à l'obtention de bitumes élastomériques classiques.

REGEMAC RCs permet d'envisager des liants à très fortes caractéristiques élastiques.

Les additifs REGEMAC se présentent sous forme de petits granulés conçus pour s'incorporer aux deux bitumes. Lors de la séquence de malaxage, ils conduisent au liant final reconstitué.

CARACTERISTIQUES DU LIANT D'APPORT

Le bitume complémentaire à employer avec REGEMAC est de type conventionnel. Le choix de son grade dépendra des caractéristiques recherchées pour le bitume modifié reproduit, en relation avec celles du bitume vieilli recyclé.

FORME D'USAGE

L'introduction des additifs REGEMAC est à réaliser soit :

- dans le malaxeur d'enrobage au moment de l'entrée des agrégats d'enrobé dans les agrégats neufs et chauds et de l'ajout du bitume complémentaire
- dans la veine d'agrégats d'enrobé alimentant le tambour sécheur malaxeur.

CONDITIONS DE TRAVAIL AVEC REGEMAC

Le processus REGEMAC exige une température minimale d'enrobage de 160°C et de préférence 170°C ! Suivant les exigences des chantiers, un niveau supérieur de température : 180/190°C, n'est pas gênant pour le processus

REGLE D'UTILISATION DE REGEMAC RCn et RCs

- Avec REGEMAC RCn, la quantité d'additif à ajouter (Q) est directement liée à la teneur en liant de l'enrobé recyclé final produit (X). Elle répond à la formule suivante qui exprime la quantité d'additif en kilogramme à employer par tonne d'enrobé recyclé produite.

$$\text{Qté de REGEMAC RCn (Kg d'additif / tonne d'enrobé)} \rightarrow Q = 50 X$$

Ainsi à titre d'exemple et quelque soit le taux d'agrégats d'enrobé recyclé employé, si la formulation de l'enrobé final avec recyclé est de 5% de liant, la quantité d'additif REGEMAC RCn à ajouter est de 2,5 kg par tonne d'enrobé produite.

- Avec REGEMAC RCs, la quantité d'additif (Q) à ajouter est directement liée à la teneur en liant de l'enrobé recyclé final produit (X). Elle répond à la formule suivante qui exprime la quantité d'additif en kilogramme à employer par tonne d'enrobé recyclé produite.

$$\text{Qté de REGEMAC RCs (Kg d'additif / tonne d'enrobé)} \rightarrow Q = 80 X$$

Ainsi à titre d'exemple et quelque soit le taux d'agrégats d'enrobé recyclé employé, si la formulation de l'enrobé final avec recyclé est de 5% de liant, la quantité d'additif REGEMAC RCs à ajouter est de 4 kg par tonne d'enrobé produite.

Les informations techniques figurant sur cette fiche constituent le guide d'emploi des additifs. Elles ne sauraient, en aucun cas, engager la responsabilité de FENIXFALT SAS en ce qui concerne les procédés d'utilisation du produit ou les résultats obtenus en dehors des recommandations d'usage précisées concernant strictement la régénération des liants vieillis par recyclage partiel. Le choix et la mise au point de ces procédés incombent aux utilisateurs sous leur entière responsabilité.

FENIXFALT SAS au capital de 2 265 800 € - SIRET 515 288 009 00027 - RCS Pau
Impasse Chinanou - Avenue du Corps Franc POMMIES F-64270 SALIES DE BEARN
☎ + 33 (0) 05 59 67 01 19 - contact@fenixfalt.com

2012 01 V1

3. PROPRIÉTÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES LIANTS APRÈS ENROBAGE

Tableau A - 3. Propriétés physico-chimiques des liants de BBSG3 après enrobage.

Propriété	Liant extrait après enrobage (AE, d'apport, recomposé)												
	AE-RM	APRR	35/50 (RM)	10/20 (BV)	70/100 (LF)	OR	0CR	55R	55R'	55CR	55CR'	70R	70R'
Pén loi mélange (mm/10)	-	-	-	-	-	26	14	13		21		11	
Pén (mm/10)	7	12	26	14	41	26	14	12	15	18	21	11	12
TBA (°C)	87,9	80,6	60,2	72,3	-	60,2	72,3	72,7	72,8	68,5	67,0	75,7	77,9
T _g (°C)	-19,7	-24,4	-22,2	-22,0	-25,6	-22,2	-22,0	-22,8	-21,8	-25,4	-25,2	-20,1	-20,7
FC (%)	2,3	2,9	3,2	2,1	3,1	3,2	2,1	3,5	3,0	3,1	3,6	3,2	3,3
Ico	0,18	0,13	0,06	0,07	0,06	0,06	0,07	0,13	0,11	0,11	0,11	0,17	0,14
Asphaltènes (%)	21,8	26,8	14,3	22,0	14,3	14,3	22,0	19,4	18,8	22,9	20,9	21,4	23,0
Saturés (%)	5,6	5,1	4,4	4,8	5,7	4,4	4,8	5,1	4,7	5,2	4,7	5,6	5,0
Aromatiques (%)	45,5	40,4	58,5	55,7	57,1	58,5	55,7	51,1	51,9	50,0	50,1	45,5	46,4
Résines (%)	27,1	27,7	22,8	17,5	22,9	22,8	17,5	24,4	24,6	22,0	24,2	27,5	25,6
IC	0,38	0,47	0,23	0,37	0,25	0,23	0,37	0,32	0,31	0,39	0,34	0,37	0,39

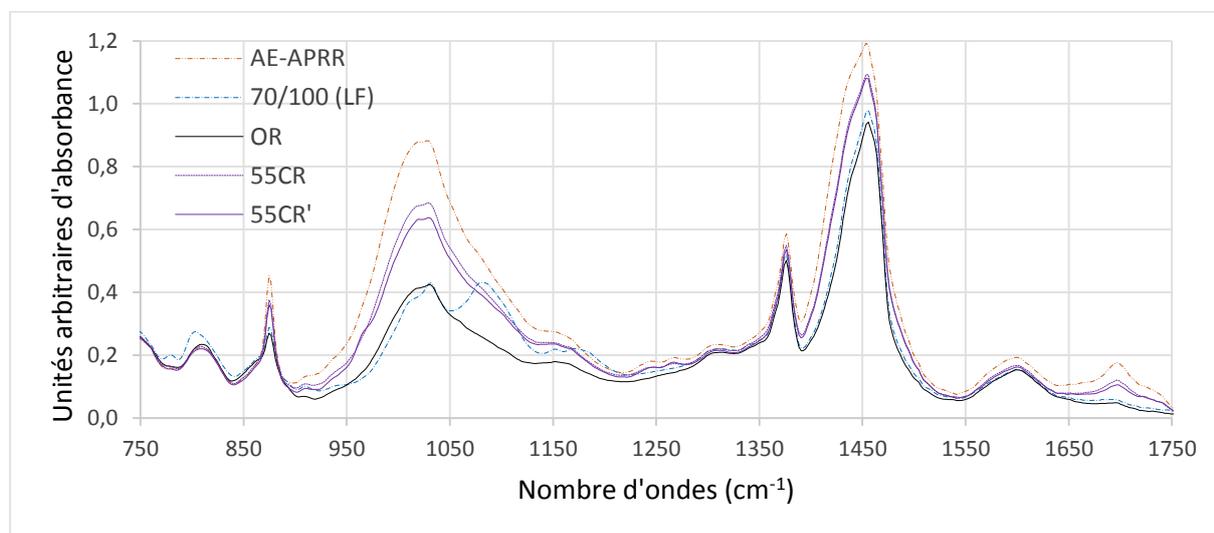


Figure A - 1. Spectre infrarouge après enrobage (BBSG3) : OR ; 55CR ; 55CR'.

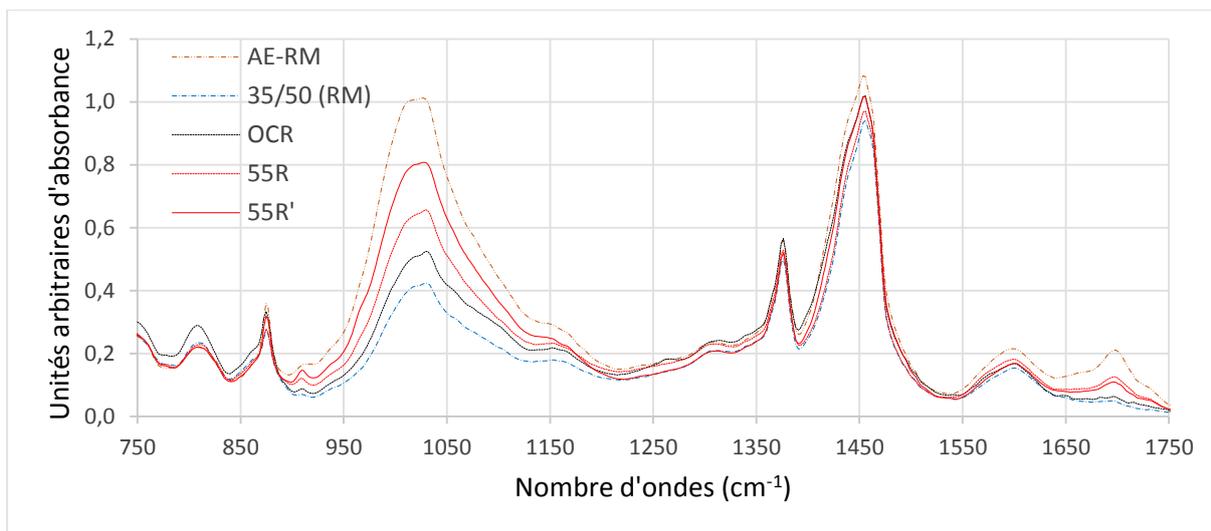


Figure A - 2. Spectre infrarouge après enrobage (BBSG3) : OCR ; 55R ; 55R'.

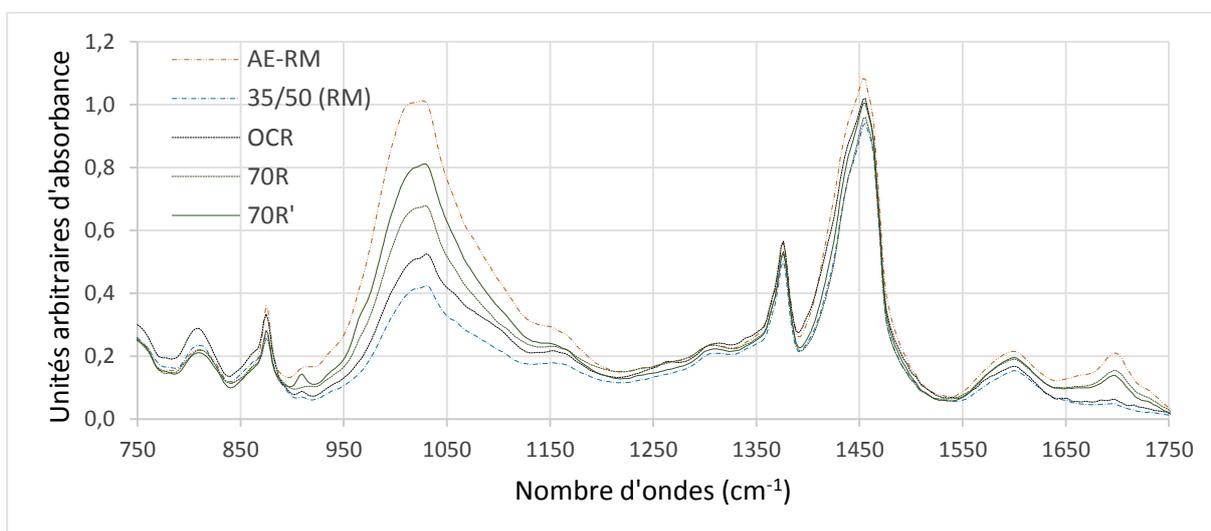


Figure A - 3. Spectre infrarouge après enrobage (BBSG3) : OCR ; 70R ; 70R'.

Tableau A - 4. Propriétés physico-chimiques des liants de GB4 après enrobage.

Propriété	Liant extrait après enrobage (AE, d'apport, recomposé)											
	AE-LF	20/30 (LF)	35/50 (LF)	50/70 (LF)	70/100 (LF)	OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Pén loi mélange (mm/10)	-	-	-	-	-	21	17		14		11	
Pén (mm/10)	7	21	31	37	41	21	14	12	12	12	11	12
TBA (°C)	84,7	71,4	-	-	-	71,4	75,7	73,3	76,1	78,6	81,4	79,7
T _g (°C)	-15,3	-33,0	-23,1	-25,5	-25,6	-33,0	-22,2	-22,0	-20,9	-24,0	-19,6	-20,7
FC (%)	2,9	5,4	2,5	3,5	3,1	5,4	2,4	4,6	3,2	2,9	3,1	3,2
Ico	0,26	0,10	0,05	0,08	0,06	0,10	0,17	0,14	0,21	0,20	0,24	0,21
Asphaltènes (%)	26,1	19,2	16,5	14,2	14,3	19,2	22,3	21,6	22,3	23,2	25,9	23,1
Saturés (%)	4,3	10,4	5,4	6,4	5,7	10,4	4,7	5,3	4,7	4,5	4,6	4,8
Aromatiques (%)	39,6	47,9	56,6	57,7	57,1	47,9	44,8	48,1	44,9	44,6	43,3	44,8
Résines (%)	30,0	22,5	21,5	21,7	22,9	22,5	28,1	25,1	28,1	27,6	26,2	27,2
IC	0,44	0,42	0,28	0,26	0,25	0,42	0,37	0,37	0,37	0,38	0,44	0,39

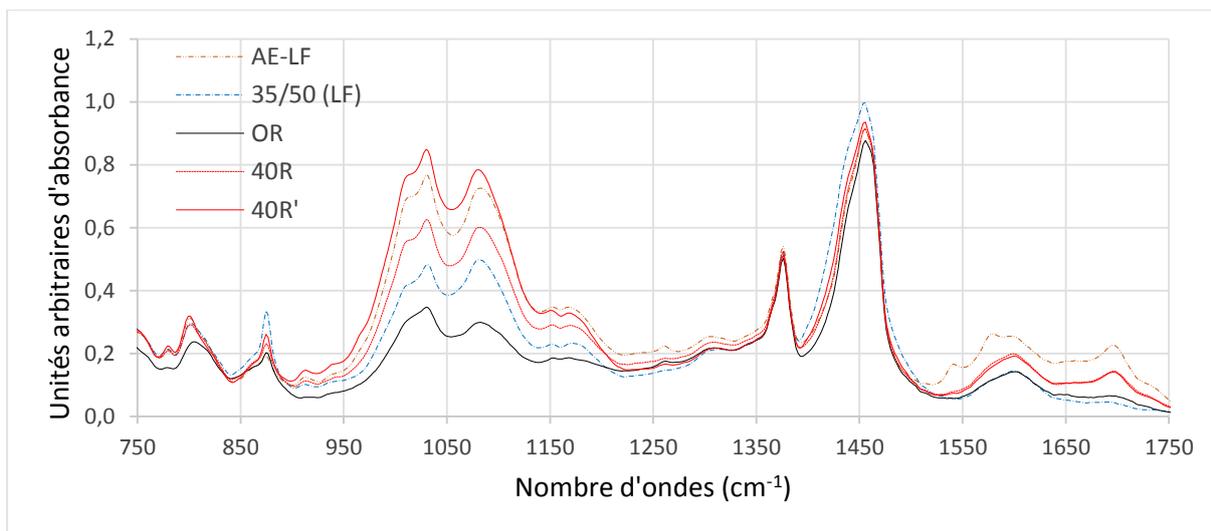


Figure A - 4. Spectre infrarouge après enrobage (GB4) : 0R ; 40R ; 40R'.

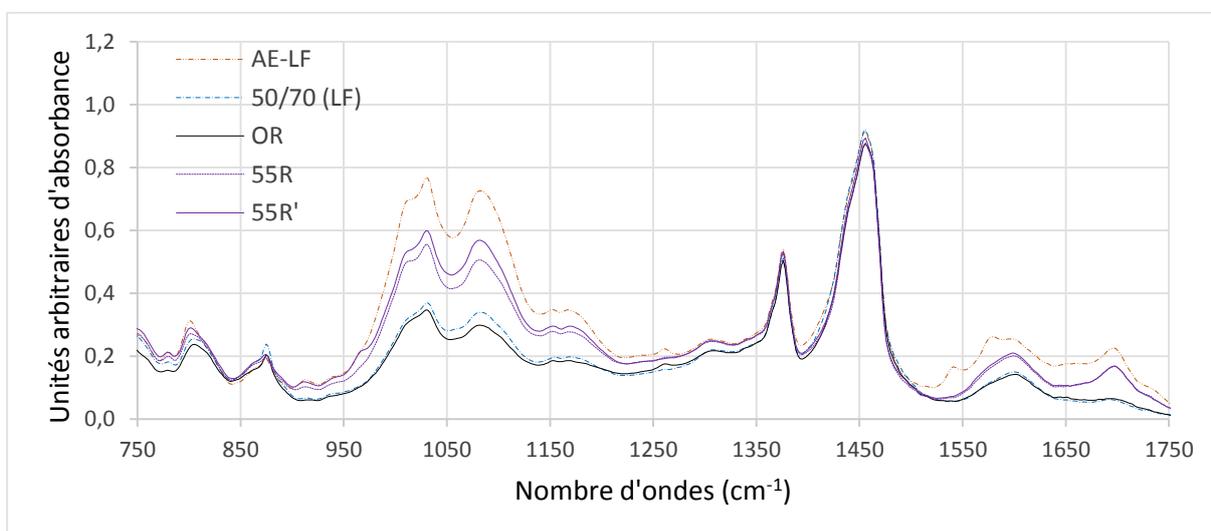


Figure A - 5. Spectre infrarouge après enrobage (GB4) : 0R ; 55R ; 55R'.

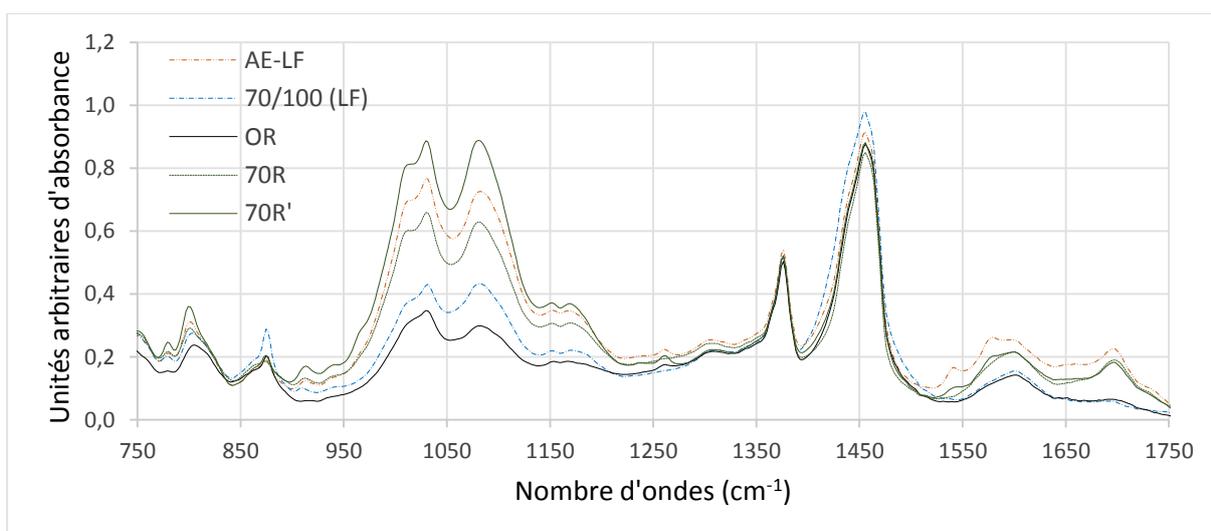


Figure A - 6. Spectre infrarouge après enrobage (GB4) : 0R ; 70R ; 70R'.

Tableau A - 5. Propriétés physico-chimiques des liants *d'EME2* après enrobage.

Propriété	Liant extrait après enrobage (AE, d'apport, recomposé)										
	AE-BV	10/20 (BV)	20/30 (BV)	35/50 (BV)	OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Pén (mm/10)	6	12	20	25	12	10	11	8	9	8	10
TBA (°C)	93,1	75,1	-	-	75,1	85,5	86,5	90,1	89,1	88,9	89,1
T _g (°C)	-15,6	-19,5	-31,7	-28,7	-19,5	-27,8	-28,2	-26,2	-26,0	-21,6	-20,5
FC (%)	2,3	3,2	5,5	4,9	3,2	3,5	3,8	3,3	3,0	2,2	2,2
I _{co}	0,20	0,08	0,08	0,07	0,08	0,12	0,12	0,18	0,16	0,24	0,16
Asphaltènes (%)	34,1	22,3	19,7	16,1	22,3	28,0	26,2	28,5	27,6	28,5	27,2
Saturés (%)	3,3	4,4	9,9	7,0	4,4	6,5	6,6	5,2	5,6	4,6	4,5
Aromatiques (%)	31,5	52,7	52,5	58,0	52,7	45,4	44,7	40,5	42,9	40,5	40,4
Résines (%)	31,1	20,7	17,9	18,9	20,7	20,1	22,5	25,8	24,0	26,3	27,9
IC	0,60	0,36	0,42	0,30	0,36	0,53	0,49	0,51	0,50	0,50	0,46

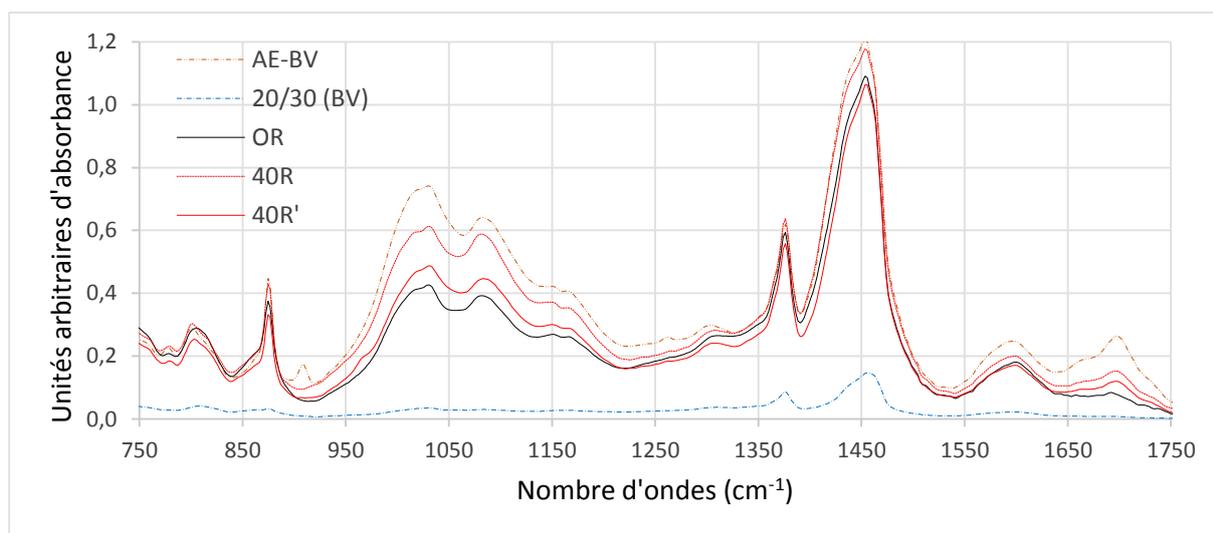


Figure A - 7. Spectre infrarouge après enrobage (EME2) : OR ; 40R ; 40R'.

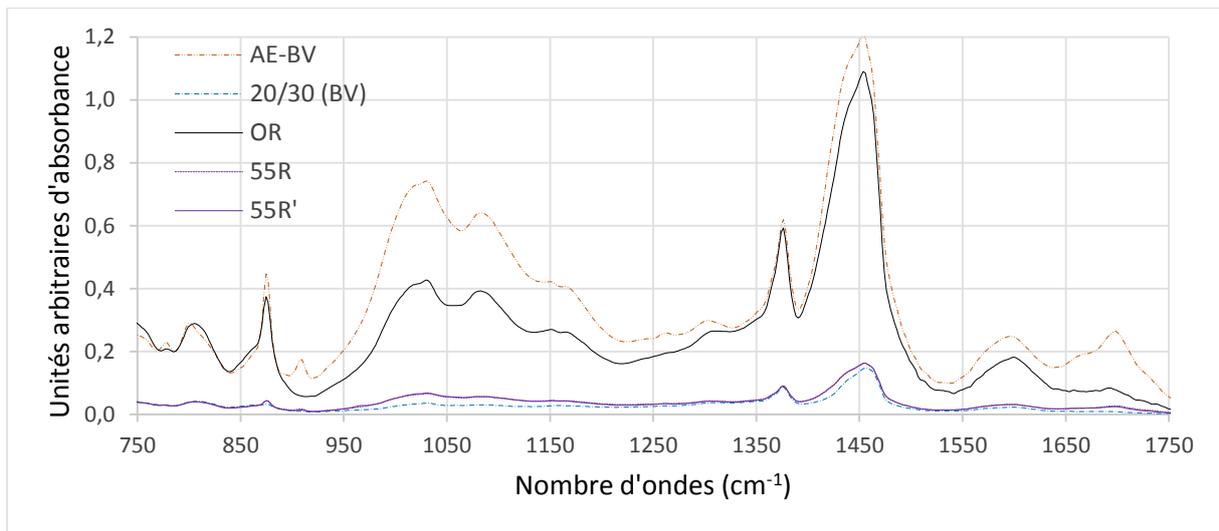


Figure A - 8. Spectre infrarouge après enrobage (EME2) : OR ; 55R ; 55R'.

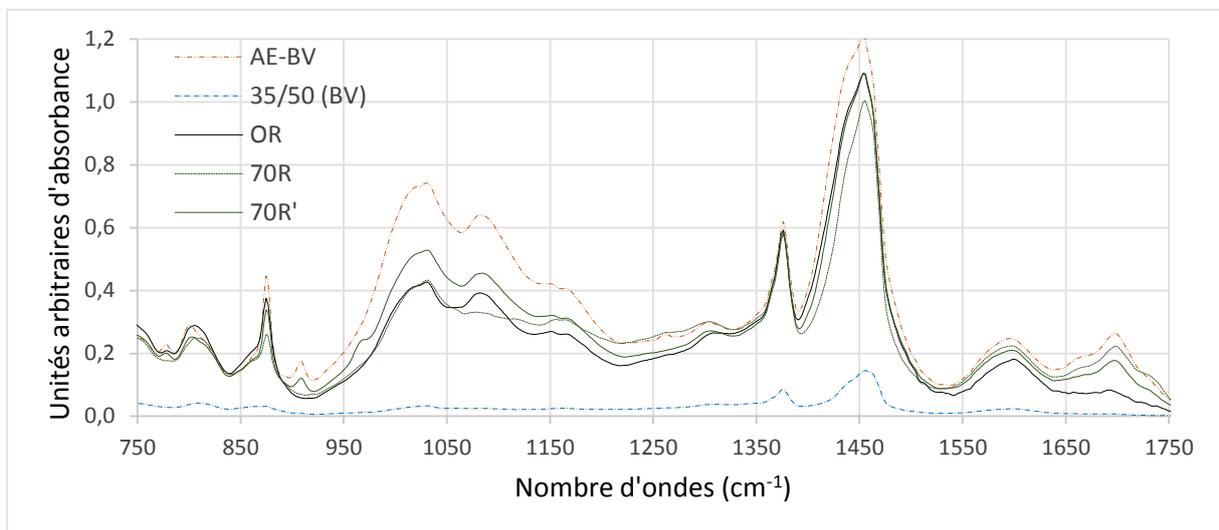


Figure A - 9. Spectre infrarouge après enrobage (EME2) : OR ; 70R ; 70R'.

ANNEXE B **COMPACTIBILITÉ, SENSIBILITÉ À L'EAU, ORNIÉRAGE**

1. VALIDATION DE LA RECOMPOSITION DES MÉLANGES

Tableau B - 1. Contrôle de la teneur en liant et de la granulométrie (BBSG3).

Formule \ Essai		Extractions Asphalt Analysator (après fabrication)				
		t _{liant} (%)	P. Tamis 0,063 mm (%)	P. Tamis 2 mm (%)	P. Tamis 6,3 mm (%)	P. Tamis D mm (%)
0R	Fab. PCG	5,44	8,1	31,4	68,8	93,9
	Fab. Duriez	5,39	8,0	30,8	68,3	94,4
	Fab. Orniérage	5,64	8,9	32,2	69,5	95,3
40R	Fab. PCG	5,59	9,0	32,4	66,1	95,0
	Fab. Duriez	5,39	9,0	33,6	69,7	95,7
	Fab. Orniérage	5,51	9,4	33,1	69,5	95,2
40R'	Fab. PCG	5,78	9,1	32,3	68,1	95,1
	Fab. Duriez	5,62	8,7	31,5	66,3	93,8
	Fab. Orniérage	5,56	9,4	32,3	69,0	95,3
55R	Fab. PCG	5,59	9,1	33,4	68,4	95,5
	Fab. Duriez	5,59	9,0	33,1	70,0	94,6
	Fab. Orniérage	5,49	9,5	32,9	68,5	95,2
55R'	Fab. PCG	5,52	8,8	32,3	67,5	94,5
	Fab. Duriez	5,42	8,6	31,6	65,5	94,0
	Fab. Orniérage	5,81	9,6	33,6	69,1	95,1
70R	Fab. PCG	5,52	9,6	33,9	68,0	94,0
	Fab. Duriez	5,50	8,9	31,7	65,1	93,5
	Fab. Orniérage	5,66	9,6	31,7	64,6	94,3
70R'	Fab. PCG	5,65	9,5	34,2	68,1	95,5
	Fab. Duriez	5,75	9,5	33,9	65,3	95,5
	Fab. Orniérage	5,70	9,6	32,3	64,5	93,3
Moyenne		5,58	9,1	32,6	67,6	94,7
Écart-type		0,12	0,5	1,0	1,8	0,7

Tableau B - 2. Contrôle de la teneur en liant et de la granulométrie (GB4 & EME2).

Formule \ Essai		GB4					EME2				
		t _{liant} (%)	P. Tamis 0,063 mm (%)	P. Tamis 2 mm (%)	P. Tamis 6,3 mm (%)	P. Tamis D mm (%)	t _{liant} (%)	P. Tamis 0,063 mm (%)	P. Tamis 2 mm (%)	P. Tamis 6,3 mm (%)	P. Tamis D mm (%)
0R	Fab. PCG	4,97	9,1	30,9	58,4	96,2	5,33	8,9	33,1	54,5	96,5
	Fab. Duriez	4,93	8,8	30,8	57,9	96,4	5,23	9,1	31,0	52,7	97,6
	Fab. Orniérage	5,09	9,1	32,2	60,7	96,2	5,43	9,2	33,5	55,8	98,0
40R	Fab. PCG	5,02	8,9	30,6	58,0	97,3	5,23	9,2	32,9	62,3	97,1
	Fab. Duriez	4,98	9,0	30,2	57,3	96,4	5,29	9,1	30,8	56,3	95,5
	Fab. Orniérage	4,92	9,1	30,3	56,5	97,7	5,64	9,2	34,9	61,5	98,4
40R'	Fab. PCG	4,94	8,4	29,1	56,5	96,5	5,46	8,8	32,1	60,8	95,9
	Fab. Duriez	5,09	9,1	30,1	56,7	95,3	5,34	9,2	31,9	58,9	96,0
	Fab. Orniérage	5,12	9,2	31,9	60,7	96,5	5,27	9,0	33,5	58,3	96,3
55R	Fab. PCG	5,01	8,7	31,0	61,7	98,0	5,26	8,7	31,4	55,1	98,5
	Fab. Duriez	4,86	8,8	29,9	57,5	96,4	5,26	8,9	30,8	52,5	95,8
	Fab. Orniérage	5,04	9,0	31,4	59,1	97,6	5,25	8,8	31,1	57,9	96,1
55R'	Fab. PCG	4,97	8,4	30,1	57,9	98,4	5,24	8,7	31,5	53,0	97,7
	Fab. Duriez	5,12	9,0	30,8	58,9	97,0	5,23	9,1	30,8	52,5	97,1
	Fab. Orniérage	4,92	8,7	29,2	57,3	97,3	5,35	8,2	29,7	52,3	97,2
70R	Fab. PCG	4,80	8,4	30,3	58,5	97,5	5,40	9,2	31,8	58,0	98,6
	Fab. Duriez	4,84	8,8	30,4	57,2	96,2	5,36	9,2	30,7	53,6	98,0
	Fab. Orniérage	5,06	8,9	30,3	57,0	97,1	5,23	8,5	30,8	56,5	95,7
70R'	Fab. PCG	4,95	8,2	30,4	57,7	96,7	5,46	9,2	33,5	59,6	98,5
	Fab. Duriez	4,92	8,8	30,0	57,5	98,0	5,32	9,2	30,6	54,1	97,7
	Fab. Orniérage	4,83	8,3	29,2	56,6	96,1	5,08	8,3	29,5	52,6	97,0
Moyenne		4,97	8,8	30,4	58,1	96,9	5,32	8,9	31,7	56,1	97,1
Écart-type		0,09	0,3	0,8	1,4	0,8	0,12	0,3	1,4	3,2	1,0

2. RÉSULTATS DES ESSAIS PCG ET ORNIÉRAGE

Tableau B - 3. Plan de compactage des plaques d'orniérage.

Phase	Nombre de passes			Pression pneu (MPa)	Force vérin (kN)	Fonction vérin
	Avant	Arrière	Centre			
Initiale	2	2	2	0,1	1	Bloqué
Finale	44	44	32	0,6	5	Libre
	2	2	2			Bloqué
Total	48	48	36	-	-	-

Tableau B - 4. Résultats complets des essais PCG et orniérage (BBSG3).

Essai \ Paramètre		Formules						
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Vides à la PCG (%)	ng 5	19,6	18,1	17,9	18,2	18,0	17,5	17,2
	ng 10	17,0	15,4	15,3	15,6	15,3	14,8	14,3
	ng 15	15,3	13,8	13,7	13,9	13,7	13,1	12,6
	ng 20	14,1	12,7	12,5	12,8	12,5	11,9	11,4
	ng 25	13,2	11,7	11,6	11,9	11,6	11,0	10,4
	ng 30	12,5	11,0	10,8	11,2	10,8	10,2	9,6
	ng 40	11,4	9,9	9,6	10,0	9,7	9,1	8,4
	ng 50	10,6	9,0	8,7	9,1	8,8	8,2	7,5
	ng 60	9,9	8,3	8,0	8,4	8,1	7,5	6,8
	ng 80	8,9	7,2	6,9	7,4	7,0	6,4	5,7
	ng 100	8,1	6,4	6,1	6,6	6,3	5,6	4,8
	ng 120	7,6	5,8	5,4	6,0	5,6	5,0	4,2
	ng 150	6,9	5,1	4,7	5,3	4,9	4,4	3,5
	ng 200	6,0	4,2	3,9	4,4	4,1	3,6	2,6
Orniérage (%)	P _{N=300}	2,6	2,7	2,2	2,9	2,4	2,2	2,1
	P _{N=1000}	3,1	3,1	2,7	3,1	2,9	2,5	2,4
	P _{N=3000}	3,7	3,6	3,1	3,5	3,3	2,7	2,7
	P _{N=10000}	4,3	4,2	3,8	3,9	3,9	3,1	3,2
	P _{N=30000}	4,7	4,5	4,3	4,1	4,5	3,6	3,7

Tableau B - 5. Résultats complets des essais PCG et orniérage (GB4 & EME2).

Essai \ Paramètre		GB4							EME2						
		OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'	OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'
Vides à la PCG (%)	ng 5	17,8	18,3	18,1	18,9	17,8	18,9	17,8	14,5	14,6	14,4	14,3	13,2	14,2	12,9
	ng 10	15,2	16,0	15,6	16,5	15,4	16,4	15,3	11,8	11,9	11,7	11,7	10,6	11,5	10,2
	ng 15	13,7	14,5	14,1	15,0	14,0	14,9	13,8	10,2	10,2	10,1	10,0	8,9	9,8	8,6
	ng 20	12,6	13,5	13,0	13,9	12,9	13,8	12,7	8,9	9,0	8,9	8,8	7,7	8,6	7,3
	ng 25	11,7	12,7	12,2	13,1	12,1	12,9	11,8	8,0	8,0	8,0	7,9	6,8	7,6	6,4
	ng 30	11,0	12,0	11,5	12,4	11,5	12,3	11,1	7,2	7,3	7,2	7,1	6,0	6,9	5,7
	ng 40	9,9	11,0	10,4	11,3	10,4	11,2	10,0	5,9	6,1	6,0	5,9	4,9	5,7	4,5
	ng 50	9,1	10,2	9,6	10,5	9,6	10,4	9,2	5,0	5,2	5,1	5,0	4,1	4,8	3,8
	ng 60	8,4	9,5	9,0	9,9	8,9	9,8	8,5	4,3	4,5	4,4	4,3	3,5	4,1	3,2
	ng 80	7,4	8,5	7,9	8,9	7,9	8,8	7,4	3,2	3,5	3,4	3,3	2,8	3,2	2,5
	ng 100	6,6	7,8	7,2	8,2	7,2	8,0	6,7	2,4	2,8	2,7	2,6	2,4	2,6	2,3
	ng 120	6,0	7,2	6,6	7,7	6,6	7,4	6,1	1,9	2,4	2,3	2,1	2,2	2,3	2,2
	ng 150	5,2	6,5	5,9	7,0	5,9	6,7	5,4	1,9	2,1	1,9	1,7	2,0	2,1	2,1
	ng 200	4,4	5,6	5,1	6,2	5,1	5,9	4,6	1,1	1,8	1,6	1,5	1,9	2,0	1,9
Orniérage (%)	P _{N=300}	1,8	2,2	1,8	2,0	2,1	1,9	2,7	2,7	0,8	0,8	0,5	0,7	0,4	0,5
	P _{N=1000}	2,2	2,6	2,2	2,4	2,5	2,2	3,1	3,5	1,2	1,3	0,8	1,0	0,6	0,7
	P _{N=3000}	2,7	3,0	2,9	2,9	2,9	2,6	3,6	4,3	2,0	1,9	1,2	1,5	0,9	1,0
	P _{N=10000}	3,1	3,6	3,9	3,4	3,6	3,0	3,9	5,2	2,9	2,9	1,4	1,7	1,1	1,4
	P _{N=30000}	3,5	4,2	4,6	3,9	4,3	3,4	4,4	6,1	3,4	3,7	1,8	1,8	1,3	1,7

3. RÉSULTATS DE L'ESSAI DURIEZ

Tableau B - 6. Résistance à la compression (C_D & C_W) des éprouvettes Duriez.

Matériau Éprouvette		Formules																											
		OR				40R				40R'				55R				55R'				70R				70R'			
		C_D (MPa)	V (%)	C_W (MPa)	V (%)																								
BBSG3	1	13,9	11,0	12,3	11,0	16,6	10,3	14,5	10,3	16,8	9,7	15,1	9,7	18,3	9,6	17,2	9,5	18,3	9,4	17,8	9,4	21,2	8,6	19,1	9,2	20,2	8,8	18,0	8,8
	2	15,1	9,9	12,9	10,6	17,1	10,2	15,3	10,1	18,0	9,4	16,3	9,3	18,1	9,4	17,7	9,2	18,9	9,1	17,6	9,5	22,1	8,4	20,7	8,5	22,5	8,0	20,5	8,1
	3	14,5	10,6	13,2	10,0	17,6	9,9	15,3	10,0	18,3	9,2	16,4	9,6	19,4	9,2	17,9	9,7	19,5	8,9	18,0	9,1	22,4	8,7	21,7	8,6	21,6	8,4	19,8	8,3
	4	15,5	10,0	13,4	10,2	18,0	10,0	14,9	10,3	20,7	8,7	17,5	9,1	21,6	8,8	20,7	8,9	19,7	9,4	18,5	8,8	22,5	8,6	20,3	8,8	22,9	7,6	20,3	7,9
	5	16,3	10,1	14,3	10,0	20,9	9,1	15,8	9,7	20,9	8,1	19,5	8,3	21,3	8,9	19,8	8,9	20,9	8,7	18,8	9,2	23,0	8,9	21,0	8,6	22,5	8,3	19,4	8,5
Écart-type	1,0	0,5	0,7	0,4	1,7	0,5	0,5	0,2	1,8	0,6	1,7	0,6	1,6	0,3	1,5	0,4	1,0	0,3	0,5	0,3	0,7	0,2	1,0	0,3	1,1	0,4	1,0	0,3	
GB4	1	21,2	4,7	19,3	4,7	21,3	4,6	18,9	5,0	19,5	4,6	19,3	4,8	20,7	5,3	19,5	5,4	22,8	4,4	20,9	5,0	24,7	5,1	21,0	5,7	26,7	4,2	26,1	4,2
	2	22,1	4,0	20,5	4,0	21,8	4,4	20,8	4,6	20,9	4,4	20,0	4,3	22,1	5,0	20,4	5,1	23,7	4,2	22,7	4,4	26,0	4,4	22,6	5,0	28,1	3,5	27,2	3,4
	3	23,4	3,9	21,0	4,0	22,9	4,3	22,5	4,3	21,7	4,1	21,1	3,9	22,8	4,6	22,3	4,6	24,3	4,1	22,9	4,2	26,4	4,0	24,0	4,0	29,8	3,2	26,7	3,5
	4	23,4	3,8	22,6	3,9	23,4	3,9	23,1	3,8	21,8	4,2	20,9	4,1	24,4	4,0	22,4	4,4	26,7	3,5	25,5	3,5	28,1	3,5	26,0	3,6	28,1	3,3	28,6	3,1
	5	25,2	3,6	22,1	3,7	24,6	3,8	22,1	4,0	23,7	3,8	21,6	4,2	24,3	4,2	22,4	4,1	27,1	3,4	25,2	3,5	28,3	3,6	25,8	3,6	29,0	3,0	28,6	3,2
Écart-type	1,5	0,4	1,3	0,4	1,3	0,3	1,7	0,5	1,5	0,3	0,9	0,3	1,6	0,5	1,4	0,5	1,9	0,4	1,9	0,6	1,5	0,7	2,1	1,0	1,2	0,4	1,1	0,4	
EME2	1	21,2	4,7	19,3	4,7	21,3	4,6	18,9	5,0	19,5	4,6	19,3	4,8	20,7	5,3	19,5	5,4	22,8	4,4	20,9	5,0	24,7	5,1	21,0	5,7	26,7	4,2	26,1	4,2
	2	22,1	4,0	20,5	4,0	21,8	4,4	20,8	4,6	20,9	4,4	20,0	4,3	22,1	5,0	20,4	5,1	23,7	4,2	22,7	4,4	26,0	4,4	22,6	5,0	28,1	3,5	27,2	3,4
	3	23,4	3,9	21,0	4,0	22,9	4,3	22,5	4,3	21,7	4,1	21,1	3,9	22,8	4,6	22,3	4,6	24,3	4,1	22,9	4,2	26,4	4,0	24,0	4,0	29,8	3,2	26,7	3,5
	4	23,4	3,8	22,6	3,9	23,4	3,9	23,1	3,8	21,8	4,2	20,9	4,1	24,4	4,0	22,4	4,4	26,7	3,5	25,5	3,5	28,1	3,5	26,0	3,6	28,1	3,3	28,6	3,1
	5	25,2	3,6	22,1	3,7	24,6	3,8	22,1	4,0	23,7	3,8	21,6	4,2	24,3	4,2	22,4	4,1	27,1	3,4	25,2	3,5	28,3	3,6	25,8	3,6	29,0	3,0	28,6	3,2
Écart-type	1,5	0,4	1,3	0,4	1,3	0,3	1,7	0,5	1,5	0,3	0,9	0,3	1,6	0,5	1,4	0,5	1,9	0,4	1,9	0,6	1,5	0,7	2,1	1,0	1,2	0,4	1,1	0,4	

ANNEXE C **MODULE COMPLEXE, RÉSISTANCE À LA FATIGUE**

1. RÉSULTATS BBSG3

Tableau C - 1. Paramètres du compactage des plaques (BBSG3).

Paramètres des plaques	Formules															
	OR		55R			55R'		55CR		55CR'		70R		70R'		
	P1	P2	P1	P2	P3	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	
Vides visés plaque (%)	14,5	14,5	13,5	13,5	12,0	14,3	14,3	12,5	12,5	13,0	13,0	14,0	14,0	14,0	14,0	
Vides éprouvettes (%)	8,5	8,5	7,4	7,7	6,6	8,0	6,8	4,8	6,1	5,2	6,5	7,2	7,7	5,7	6,8	
Écart-type (%)	0,9	1,1	0,8	0,8	1,1	0,9	1,0	1,2	1,0	1,2	1,1	1,0	1,3	1,2	1,3	
Nb de passes avant	7	7	12	12	13	9	9	8	7	9	7	8	8	9	8	
Nb de passes arrière	7	7	12	12	13	9	9	8	7	9	7	8	8	9	8	
Nb de passes centre	6	6	9	9	9	7	7	7	6	7	6	6	6	7	6	

Tableau C - 2. Résultats des essais de module complexe (BBSG3 à 6,5 % de vides).

Paramètres de l'essai		Formules													
		OR		55R		55R'		55CR		55CR'		70R		70R'	
Temp.	f (Hz)	IE*1 (MPa)	φ (°)												
15 °C	0,1	2611	37,8	7100	18,6	7093	18,7	4267	25,7	4198	25,6	8700	14,8	8957	14,6
	0,2	3395	34,3	8060	16,8	8077	16,8	5106	23,5	5033	23,3	9647	13,4	9910	13,3
	0,5	4632	29,4	9378	14,7	9392	14,6	6316	20,8	6248	20,5	10885	11,8	11178	11,6
	1	5659	26,1	10375	13,3	10393	13,2	7295	18,8	7212	18,4	11815	10,7	12126	10,6
	2	6762	23,0	11377	12,0	11393	11,9	8320	17,0	8210	16,6	12727	9,7	13058	9,6
	5	8280	19,3	12680	10,5	12686	10,5	9697	14,8	9534	14,5	13909	8,6	14266	8,5
	10	9435	17,0	13633	9,5	13637	9,4	10732	13,3	10531	13,2	14764	7,9	15139	7,7
	20	10557	14,8	14512	8,7	14516	8,6	11720	11,9	11495	12,1	15566	7,2	15957	6,9
	30	11125	13,7	14946	8,2	14929	8,2	12213	11,3	11979	11,7	15950	6,9	16337	6,5
10 °C	0,1	2564	38,2	7056	18,7	7080	18,7	4222	25,8	4180	25,6	8665	14,9	8921	14,7
	0,1	4808	28,0	9843	13,6	9895	13,5	6619	19,5	6683	18,7	11405	10,9	11547	11,1
	0,2	5824	24,9	10826	12,3	10871	12,2	7584	17,7	7632	17,0	12308	9,9	12501	9,9
	0,5	7279	21,2	12101	10,8	12142	10,7	8909	15,5	8893	14,9	13476	8,8	13709	8,8
	1	8403	18,7	13044	9,9	13085	9,7	9930	14,0	9863	13,4	14334	8,1	14587	8,1
	2	9576	16,5	13982	9,0	14015	8,8	10947	12,6	10836	12,1	15176	7,4	15453	7,4
	5	11074	14,0	15173	7,9	15195	7,8	12284	11,1	12098	10,7	16237	6,6	16540	6,6
	10	12178	12,3	16019	7,2	16028	7,2	13256	10,0	13026	9,8	16996	6,1	17320	6,0
	20	13224	10,7	16802	6,6	16797	6,5	14170	9,0	13905	9,1	17698	5,6	18040	5,4
	30	13747	10,0	17169	6,2	17158	6,2	14596	8,5	14343	8,9	18011	5,3	18351	5,0
0,1	4772	28,2	9815	13,6	9879	13,5	6593	19,6	6625	18,9	11388	10,9	11578	11,0	

Tableau C - 3. Résultats des essais de résistance à la fatigue (BBSG3 à 6,5 % de vides).

Ép.	Formules																				
	OR			55R			55R'			55CR			55CR'			70R			70R'		
	ε (μm/m)	N (cycles)	V (%)																		
F1	139,2	367.523	5,9	138,9	966.582	5,9	140,2	4.160.944	5,7	158,2	483.715	5,8	137,0	2.234.453	5,9	139,8	2.650.937	6,1	118,2	5.552.809	6,1
F2	138,1	415.827	6,1	135,5	2.266.560	6,3	138,1	2.792.740	6,2	158,3	261.811	6,1	137,2	1.154.238	6,1	140,6	1.993.196	6,2	117,0	8.073.445	6,3
F3	125,3	691.172	6,5	127,8	2.721.778	6,4	138,7	1.231.158	6,2	158,5	453.370	6,2	136,5	365.988	6,3	139,1	1.270.719	6,4	128,5	5.872.084	6,4
F4	126,1	677.725	6,8	126,5	986.825	6,6	135,7	1.562.191	6,8	156,4	406.000	6,5	135,3	1.146.284	6,4	137,3	2.329.179	6,7	127,9	3.054.830	6,6
F5	140,3	292.811	7,0	139,4	741.750	6,8	140,6	2.252.140	6,8	159,1	424.086	6,6	137,9	1.216.312	6,8	138,4	2.051.099	6,8	117,6	8.131.187	6,7
F6	138,6	572.911	7,1	137,3	799.366	7,0	141,8	541.956	7,2	161,0	428.013	7,9	139,2	1.038.342	7,2	139,2	1.530.158	6,9	117,5	16.416.730	6,9
F7	159,6	149.890	5,8	158,7	628.602	6,0	158,5	562.872	5,9	138,4	506.076	5,8	159,1	429.662	6,0	158,5	1.369.883	6,1	147,0	1.330.383	6,1
F8	159,0	252.419	6,3	159,5	691.564	6,2	157,6	700.378	6,1	138,5	1.013.273	6,1	158,3	809.900	6,1	161,0	863.026	6,2	146,3	2.354.791	6,2
F9	175,3	140.362	6,3	159,7	648.633	6,4	159,5	722.053	6,2	138,0	721.878	6,4	155,9	240.859	6,3	158,5	767.858	6,4	149,0	690.148	6,4
F10	174,6	113.384	6,7	156,8	440.735	6,6	159,8	848.439	6,6	140,0	136.386	6,4	155,5	478.879	6,4	157,8	734.031	6,7	147,4	1.492.682	6,6
F11	159,6	125.253	7,0	158,9	740.964	6,8	159,8	939.261	7,0	138,1	642.067	7,9	157,3	215.264	6,9	158,5	466.026	6,8	147,2	1.536.798	6,8
F12	157,4	216.654	7,1	157,1	583.863	7,0	157,2	922.464	7,2	137,0	799.857	6,5	156,3	283.262	7,3	159,7	443.041	7,1	145,2	3.843.548	6,9
F13	105,7	3.387.847	5,6	179,3	257.993	5,9	178,3	321.433	6,0	118,7	3.443.754	5,9	118,3	2.297.490	5,7	178,4	848.320	6,1	178,0	825.795	6,2
F14	105,3	1.706.598	5,9	176,6	304.443	6,4	174,5	587.354	6,1	120,2	2.297.941	6,1	111,0	2.806.138	6,1	178,4	393.685	6,3	179,3	624.359	6,2
F15	105,7	1.044.276	6,6	187,6	245.621	6,5	180,2	606.652	6,4	118,5	1.568.008	6,4	118,6	9.107.729	6,3	177,9	723.615	6,4	168,1	649.863	6,5
F16	104,5	1.681.917	6,9	184,7	222.344	6,5	176,8	344.657	6,6	117,9	2.965.783	6,7	117,5	1.906.109	6,7	180,4	334.076	6,4	169,5	860.797	6,6
F17	106,0	852.187	7,0	178,8	293.150	6,9	178,9	257.653	7,0	118,3	6.663.862	7,3	117,1	1.088.223	7,0	179,8	415.372	6,9	178,1	508.505	6,8
F18	104,8	1.589.674	7,2	179,6	268.405	6,9	178,9	377.833	7,1	117,2	1.204.502	6,7	116,8	2.769.005	7,1	178,1	340.237	7,0	176,8	778.302	6,8

2. RÉSULTATS GB4

Tableau C - 4. Paramètres du compactage des plaques (GB4).

Paramètres des plaques	Formules														
	OR		40R		40R'			55R		55R'		70R		70R'	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P3	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Vides visés plaque (%)	11,0	11,0	10,4	10,2	10,5	10,5	9,5	10,2	10,2	10,5	10,5	10,0	10,0	10,5	10,5
Vides éprouvettes (%)	5,2	5,2	5,1	5,1	5,7	5,4	4,5	4,8	4,7	4,9	5,4	4,5	4,7	5,2	5,3
Écart-type (%)	0,7	0,9	0,9	1,0	0,9	1,0	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7	1,0	0,9
Nb de passes avant	13	13	16	15	11	13	21	16	15	14	13	24	23	14	14
Nb de passes arrière	13	13	16	15	11	13	21	16	15	14	13	24	23	14	14
Nb de passes centre	9	9	11	10	8	9	13	11	10	10	9	15	14	10	10

Tableau C - 5. Résultats des essais de module complexe (GB4 à 4,5 % de vides).

Paramètres de l'essai		Formules													
		OR		40R		40R'		55R		55R'		70R		70R'	
Temp.	f (Hz)	E* (MPa)	φ (°)												
15 °C	0,1	5266	22,8	9257	18,6	9131	18,4	9656	17,2	9365	17,0	11709	13,5	11579	13,4
	0,2	6158	21,2	10499	16,7	10354	16,6	10868	15,6	10512	15,4	12866	12,2	12707	12,2
	0,5	7457	19,1	12163	14,5	12031	14,5	12508	13,7	12074	13,6	14389	10,8	14197	10,8
	1	8508	17,6	13444	13,0	13290	13,0	13751	12,3	13265	12,3	15516	9,9	15316	9,8
	2	9615	16,1	14719	11,7	14545	11,7	14983	11,2	14446	11,1	16632	9,0	16414	9,0
	5	11127	14,4	16360	10,2	16156	10,2	16584	9,9	15981	9,8	18064	8,0	17822	8,0
	10	12285	13,1	17548	9,1	17332	9,2	17751	8,9	17105	8,9	19093	7,3	18844	7,3
	20	13431	12,0	18670	8,2	18416	8,3	18853	8,1	18176	8,1	20073	6,7	19812	6,7
	30	14041	11,5	19223	7,7	18967	7,9	19383	7,7	18714	7,7	20562	6,4	20289	6,4
	0,1	5186	22,9	9181	18,6	9078	18,6	9610	17,3	9298	17,1	11696	13,6	11554	13,4
10 °C	0,1	8259	17,1	12747	13,4	12592	13,5	13213	12,5	12638	12,6	15023	10,0	14807	10,0
	0,2	9291	15,8	13981	12,1	13812	12,2	14401	11,3	13789	11,4	16121	9,1	15870	9,1
	0,5	10729	14,1	15605	10,6	15408	10,7	15961	10,0	15300	10,1	17530	8,2	17256	8,2
	1	11845	13,0	16787	9,6	16590	9,6	17117	9,1	16429	9,2	18571	7,5	18282	7,5
	2	12977	11,9	17956	8,7	17742	8,7	18252	8,3	17524	8,4	19579	6,9	19280	6,9
	5	14469	10,6	19420	7,6	19198	7,7	19703	7,4	18916	7,5	20866	6,2	20547	6,2
	10	15584	9,8	20468	6,9	20236	7,0	20730	6,7	19922	6,8	21783	5,7	21455	5,7
	20	16661	9,0	21419	6,2	21191	6,3	21677	6,1	20859	6,2	22642	5,2	22303	5,2
	30	17211	8,6	21892	5,8	21632	5,9	22131	5,8	21322	5,9	23054	5,0	22705	5,0
	0,1	8189	17,3	12713	13,5	12535	13,5	13184	12,5	12590	12,6	15013	10,0	14789	10,0

Tableau C - 6. Résultats des essais de résistance à la fatigue (GB4 à 4,5 % de vides).

Ép.	Formules																				
	OR			40R			40R'			55R			55R'			70R			70R'		
	ε (μm/m)	N (cycles)	V (%)	ε (μm/m)	N (cycles)	V (%)	ε (μm/m)	N (cycles)	V (%)	ε (μm/m)	N (cycles)	V (%)									
F1	128,0	4.741.613	4,1	149,2	577.240	3,6	148,5	676.383	4,5	139,9	1.456.260	4,2	160,1	1.289.967	3,9	168,1	400.948	4,2	149,6	3.403.475	4,3
F2	127,0	6.069.998	4,2	145,5	491.049	4,4	149,2	394.994	4,5	140,1	1.488.293	4,3	159,4	686.774	4,4	166,8	531.319	4,4	150,4	1.123.414	4,4
F3	129,1	7.440.757	4,6	148,2	376.161	4,5	146,8	1.030.234	3,6	139,4	1.162.530	4,3	158,3	1.694.640	4,5	148,8	982.677	4,5	149,3	1.894.058	4,5
F4	130,0	1.420.770	4,7	145,0	306.426	4,9	148,6	489.097	5,1	139,2	938.298	4,6	157,6	1.063.541	4,6	150,3	505.548	4,5	147,8	2.680.553	4,6
F5	128,1	6.212.502	4,8	150,0	237.488	4,9	149,0	489.643	5,1	137,9	1.050.889	4,6	158,7	321.699	4,6	168,5	562.802	4,7	149,1	1.354.627	4,6
F6	128,6	1.304.844	4,8	146,8	971.049	5,1	142,3	1.876.421	4,2	134,3	2.320.415	5,0	154,5	628.095	5,0	165,0	395.517	5,0	150,1	711.890	4,8
F7	148,5	1.080.371	4,0	128,5	3.861.787	3,1	128,8	1.375.633	4,3	157,5	457.733	4,2	139,3	1.864.292	4,2	138,6	3.148.566	4,2	169,0	688.850	4,3
F8	148,1	1.166.920	4,5	126,1	1.297.792	4,4	129,0	878.214	4,2	157,0	450.263	4,3	138,5	1.822.043	4,4	139,1	1.953.430	4,4	166,4	1.635.695	4,4
F9	148,9	1.132.139	4,5	128,4	1.225.708	4,5	123,4	2.832.200	4,4	158,3	603.509	4,4	139,2	1.588.366	4,5	141,2	1.977.406	4,4	168,3	704.500	4,5
F10	149,9	1.742.999	4,7	125,8	1.527.072	4,7	126,0	1.513.051	4,7	153,6	887.250	4,6	138,9	1.169.357	4,6	141,6	824.597	4,6	166,0	1.408.599	4,6
F11	148,0	1.376.416	4,7	129,6	1.397.468	4,9	128,6	1.728.588	4,6	158,6	402.416	4,7	139,0	1.813.534	4,6	140,1	3.170.235	4,6	167,6	598.767	4,7
F12	149,7	1.488.571	4,8	128,3	1.991.138	5,0	127,6	2.811.801	4,8	152,6	1.460.567	4,8	137,8	816.871	4,9	140,3	1.266.284	5,0	164,8	833.043	4,8
F13	168,4	769.023	4,1	167,6	333.103	4,1	108,6	7.032.712	4,3	178,8	288.198	4,2	180,0	355.575	4,2	109,5	16.468.853	4,3	187,9	331.853	4,3
F14	170,5	458.831	4,4	167,7	275.002	4,2	106,9	2.347.777	4,4	174,0	424.155	4,2	178,4	464.035	4,3	108,1	17.014.333	4,3	186,7	514.978	4,4
F15	167,1	330.199	4,6	169,3	221.674	4,6	109,1	3.444.339	4,7	177,5	319.511	4,4	178,1	222.926	4,5	129,5	4.803.370	4,4	187,6	606.942	4,5
F16	166,7	1.056.963	4,6	168,6	265.632	4,7	109,1	8.641.138	4,1	177,3	276.694	4,6	174,5	362.696	4,6	129,4	3.054.540	4,5	187,5	263.672	4,6
F17	168,1	444.633	4,7	168,4	282.455	4,9	109,6	5.378.658	5,3	179,5	222.437	4,8	178,6	334.768	4,6	109,8	11.214.628	4,8	187,7	505.669	4,7
F18	166,5	631.979	4,9	164,1	358.558	5,0	108,9	10.382.570	4,1	174,2	194.729	4,8	176,4	410.359	4,8	106,5	17.718.146	4,9	189,3	419.895	4,7

Tableau C - 7. Résultats des essais de module complexe (GB4 à 6 % de vides).

Paramètres de l'essai		Formules													
		OR		40R		40R'		55R		55R'		70R		70R'	
Temp.	f (Hz)	E* (MPa)	φ (°)												
15 °C	0,1	5168	22,6	8905	18,3	8810	18,5	9057	17,1	8763	17,3	11187	13,5	11050	13,4
	0,2	6046	21,0	10097	16,5	10017	16,6	10173	15,5	9867	15,7	12276	12,3	12124	12,2
	0,5	7314	18,9	11714	14,4	11635	14,5	11682	13,6	11366	13,8	13713	10,9	13545	10,9
	1	8334	17,4	12932	13,0	12856	13,0	12828	12,4	12509	12,5	14790	9,9	14610	10,0
	2	9405	15,9	14149	11,6	14062	11,7	13970	11,2	13643	11,4	15854	9,0	15675	9,1
	5	10857	14,1	15714	10,2	15620	10,2	15454	9,8	15112	10,0	17219	8,0	17036	8,1
	10	11965	12,9	16850	9,1	16749	9,3	16535	8,9	16189	9,1	18202	7,4	18028	7,5
	20	13061	11,8	17909	8,2	17807	8,5	17545	8,1	17201	8,2	19141	6,7	18962	6,8
	30	13628	11,3	18431	7,8	18339	8,1	18042	7,7	17681	7,7	19606	6,4	19418	6,5
10 °C	0,1	5094	22,8	8846	18,4	8772	18,5	8995	17,2	8705	17,4	11133	13,6	11002	13,5
	0,1	7913	17,2	12367	13,1	12274	13,3	12311	12,5	12140	12,5	14290	10,0	14241	10,0
	0,2	8910	15,9	13551	11,9	13452	12,0	13428	11,3	13244	11,4	15353	9,2	15282	9,2
	0,5	10286	14,2	15090	10,4	14987	10,5	14877	10,0	14690	10,1	16689	8,2	16625	8,3
	1	11356	13,0	16222	9,4	16126	9,5	15951	9,1	15764	9,3	17674	7,5	17615	7,6
	2	12437	11,9	17338	8,5	17227	8,6	17002	8,3	16822	8,4	18633	6,9	18589	7,0
	5	13868	10,7	18730	7,5	18628	7,6	18335	7,4	18165	7,5	19858	6,2	19821	6,3
	10	14924	9,8	19727	6,8	19620	7,0	19292	6,7	19128	6,8	20721	5,7	20712	5,8
	20	15947	9,0	20640	6,2	20545	6,4	20174	6,1	20013	6,1	21538	5,2	21533	5,3
	30	16466	8,6	21066	5,8	20982	6,2	20586	5,8	20413	5,8	21924	5,0	21921	5,0
0,1	7848	17,3	12331	13,2	12244	13,3	12274	12,5	12097	12,6	14289	10,0	14224	10,1	

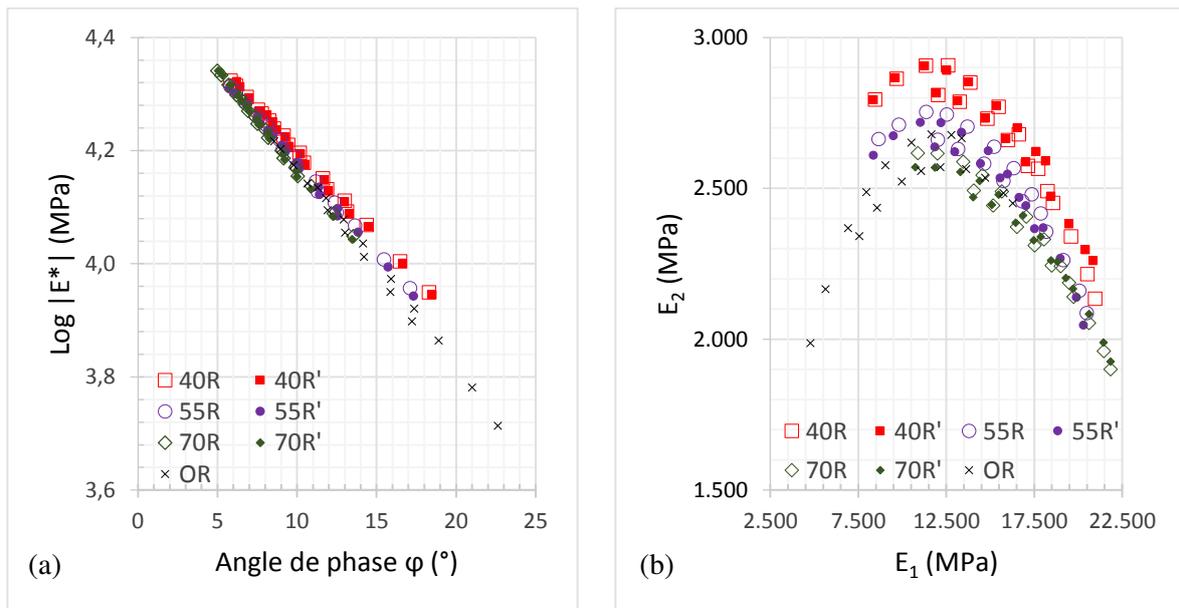


Figure C - 1. Rigidités complexes des formules de GB4 (6 % de vides) dans : (a) l'espace de Black et (b) le plan de Cole-Cole.

3. RÉSULTATS EME2

Tableau C - 8. Paramètres du compactage des plaques (EME2).

Paramètres des plaques	Formules													
	OR		40R		40R'		55R		55R'		70R		70R'	
	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2
Vides visés plaque (%)	8,0	8,0	8,5	8,5	8,1	8,1	8,0	8,0	8,5	8,5	7,0	7,0	7,0	7,0
Vides éprouvettes (%)	2,3	2,7	2,5	2,6	2,8	2,8	2,4	2,3	2,8	3,2	2,6	2,7	2,6	2,9
Écart-type (%)	0,3	0,5	0,6	0,5	0,5	0,3	0,9	0,5	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6
Nb de passes _{avant}	15	13	11	12	13	13	14	13	14	11	30	30	26	24
Nb de passes _{arrière}	15	13	11	12	13	13	14	13	14	11	30	30	26	24
Nb de passes _{centre}	10	9	8	9	9	9	10	9	10	8	18	18	16	15

Tableau C - 9. Résultats des essais de module complexe (EME2 à 3 % de vides).

Paramètres de l'essai		Formules													
		OR		40R		40R'		55R		55R'		70R		70R'	
Temp.	f (Hz)	E* (MPa)	φ (°)												
15 °C	0,1	7834	19,8	10100	13,2	9618	14,2	12638	10,1	11991	10,9	13792	8,7	13008	9,9
	0,2	9016	17,8	11060	12,1	10607	13,0	13528	9,4	12939	10,1	14658	8,1	13950	9,1
	0,5	10565	15,5	12345	10,9	11937	11,6	14742	8,4	14174	9,0	15780	7,4	15148	8,2
	1	11744	13,8	13311	10,0	12935	10,6	15640	7,8	15087	8,3	16613	6,8	16038	7,6
	2	12919	12,4	14276	9,2	13931	9,7	16527	7,2	15983	7,6	17429	6,4	16910	7,0
	5	14442	10,8	15528	8,3	15232	8,7	17663	6,6	17140	6,9	18483	5,8	18024	6,4
	10	15544	9,7	16443	7,7	16178	8,0	18480	6,1	17976	6,4	19252	5,3	18836	5,9
	20	16595	8,8	17300	7,0	17060	7,3	19250	5,7	18751	5,9	19946	4,7	19601	5,5
	30	17114	8,3	17697	6,7	17475	7,0	19603	5,4	19118	5,7	20269	4,4	19962	5,3
	0,1	7809	19,9	10051	13,2	9572	14,2	12580	10,2	11962	11,0	13752	8,7	12990	9,9
10 °C	0,1	11176	14,2	12900	10,0	12552	10,7	15298	8,0	14692	8,4	16416	6,8	15699	7,7
	0,2	12331	12,8	13837	9,2	13523	9,8	16169	7,3	15582	7,7	17182	6,4	16560	7,1
	0,5	13830	11,2	15055	8,4	14791	8,8	17283	6,6	16717	7,0	18211	5,8	17662	6,4
	1	14946	10,1	15972	7,8	15741	8,1	18104	6,2	17557	6,5	19074	5,5	18469	6,0
	2	16032	9,1	16870	7,2	16668	7,5	18904	5,7	18378	6,0	19794	5,1	19264	5,6
	5	17405	8,0	18026	6,6	17862	6,8	19926	5,2	19422	5,5	20680	4,6	20277	5,1
	10	18392	7,2	18859	6,1	18728	6,3	20666	4,9	20164	5,1	21374	4,2	20998	4,8
	20	19304	6,6	19633	5,6	19520	5,7	21337	4,5	20845	4,7	21985	3,8	21674	4,4
	30	19746	6,2	19973	5,3	19872	5,4	21639	4,3	21148	4,5	22256	3,5	21988	4,2
	0,1	11126	14,3	12867	10,0	12520	10,7	15300	7,9	14672	8,4	16342	6,8	15686	7,7

Tableau C - 10. Résultats des essais de résistance à la fatigue (EME2 à 3 % de vides).

Ép.	Formules																				
	OR			40R			40R'			55R			55R'			70R			70R'		
	ε (μm/m)	N (cycles)	V (%)																		
F1	128,8	2.583.007	2,5	149,1	2.633.668	2,7	149,4	4.508.080	2,7	158,9	1.946.871	2,2	150,6	2.733.000	2,6	151,0	1.834.166	2,7	185,6	230.986	2,5
F2	128,2	5.689.498	2,7	146,1	2.902.159	2,8	146,8	1.999.040	2,8	156,6	226.821	2,5	148,5	3.727.144	2,9	150,9	2.131.720	2,7	187,5	187.414	2,6
F3	129,1	2.232.681	2,7	159,3	2.165.632	2,9	159,2	686.376	2,9	157,2	1.149.835	2,8	150,0	2.393.879	3,0	153,3	1.240.242	2,8	188,3	780.873	3,1
F4	129,7	1.963.427	3,1	155,6	821.557	3,0	159,3	3.700.459	3,1	154,3	787.650	3,1	148,1	1.871.265	3,1	151,3	1.239.063	3,0	187,7	1.165.670	3,2
F5	128,3	4.768.780	3,1	148,7	3.083.114	3,0	149,0	4.693.310	3,1	156,0	543.660	3,3	151,8	2.214.614	3,1	152,8	3.183.060	3,0	188,5	465.835	3,2
F6	130,3	463.120	4,0	144,1	5.374.829	3,7	145,4	4.046.540	3,5	152,7	2.343.387	3,9	144,9	7.953.069	3,3	154,3	2.038.025	3,9	185,2	1.446.547	3,4
F7	148,8	992.960	2,6	182,3	405.665	2,7	178,8	452.566	2,7	139,3	2.916.885	2,4	168,9	1.031.753	2,6	171,2	1.173.845	2,7	168,6	721.717	2,6
F8	148,2	800.519	2,8	177,0	1.379.390	2,8	171,4	945.331	2,8	139,3	1.888.995	2,5	170,5	923.054	2,9	171,3	1.009.356	2,7	166,3	1.830.292	2,7
F9	150,0	2.934.514	2,8	178,6	1.809.682	2,9	178,9	1.463.535	2,9	136,7	2.118.663	2,6	170,8	469.944	3,0	170,3	1.412.185	2,8	166,9	890.334	2,9
F10	152,8	272.039	3,0	175,7	704.658	2,9	176,2	632.091	3,0	131,8	10.410.170	2,5	166,6	1.115.868	3,1	169,1	863.138	2,8	168,0	1.102.229	3,0
F11	149,4	890.777	3,2	178,5	773.165	3,4	180,9	564.672	3,3	137,2	3.948.691	3,4	170,4	840.020	3,1	170,7	1.088.987	3,3	167,6	1.479.365	3,2
F12	150,1	531.866	3,3	176,4	620.547	3,6	173,6	1.456.378	3,4	138,3	2.679.713	4,6	163,4	2.376.580	3,4	172,2	203.854	3,8	168,6	703.752	3,9
F13	169,0	717.176	2,8	210,3	287.688	2,7	210,3	169.587	2,7	178,8	436.696	2,4	188,5	385.343	2,7	191,8	113.110	2,7	147,7	4.939.532	2,9
F14	168,6	1.241.863	2,8	205,6	228.707	2,7	205,3	350.584	2,8	176,9	739.140	2,4	183,3	936.578	2,7	189,0	172.969	2,7	148,5	2.739.133	2,9
F15	167,6	455.958	2,8	200,4	348.463	2,9	197,9	441.089	2,9	178,2	496.407	2,7	189,0	429.600	3,0	189,3	137.264	2,8	147,8	4.656.760	2,9
F16	169,8	249.566	2,9	196,4	264.173	2,9	194,4	238.889	2,9	173,9	412.413	2,8	183,5	1.319.050	3,0	187,1	441.654	2,8	147,7	1.865.675	3,0
F17	168,4	424.327	3,2	209,6	268.817	3,4	210,2	290.353	3,2	177,8	424.093	3,6	188,0	760.171	3,2	194,0	761.767	3,4	149,7	5.405.177	3,2
F18	163,9	1.027.802	3,2	205,2	443.728	3,5	205,0	512.855	3,4	178,1	396.889	3,8	188,2	382.707	3,3	193,4	203.164	3,6	150,9	4.174.197	3,3

4. DIMENSIONNEMENT ALIZÉ-LCPC

La vérification des déformations horizontales de traction en base des couches bitumineuses est effectuée via l'expression ci-dessous :

$$\varepsilon_{t,adm} = \varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) k_r k_c k_s \quad (\text{C-1})$$

où $\varepsilon(NE, \theta_{eq}, f) = \varepsilon_6(10^\circ\text{C} ; 25\text{ Hz}) k_2 k_1$. La déformation conduisant à une durée de vie de 10^6 cycles ε_6 est déterminée par l'essai normalisé de fatigue aux conditions de 10°C et 25 Hz .

$$k_2 = \sqrt{\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta_{eq})}} \quad (\text{C-2})$$

$$k_1 = \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \quad (\text{C-3})$$

Le coefficient k_r ajuste la valeur de la déformation admissible en fonction du risque de calcul (approche probabiliste avec loi normale de fractile u) et des facteurs de dispersion sur l'épaisseur (écart-type Sh) et sur les résultats des essais de fatigue (écart-type S_N sur logarithme décimal du nombre de cycles entraînant la rupture par fatigue).

$$k_r = 10^{-u b \delta} \quad (\text{C-4})$$

$$\delta = \sqrt{S_N^2 + \left[\frac{c^2}{b^2}\right] Sh^2} \quad (\text{C-5})$$

où c est le coefficient reliant la variation de déformation à la variation aléatoire d'épaisseur de la chaussée. La valeur de c fixée à partir de l'étude de structures usuelles, est égale à 2 m^{-1} .

Le coefficient de calage k_c est destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul au comportement observé sur des chaussées de même type. Pour k_s , il correspond au coefficient minérateur tenant compte de l'effet d'hétérogénéités locales de portance de la couche non liée sous-jacente.

Tableau C - 11. Paramètres k_r , k_c , k_s du dimensionnement structurel des chaussées.

Coefficient	Formules étudiées							Standard EME2
	OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'	
Sh (m)	0,01							
δ (b variable)	0,338	0,243	0,248	0,302	0,243	0,324	0,301	0,269
δ (b = -0,2)	0,335	0,224	0,224	0,279	0,215	0,288	0,269	0,269
k_r (b variable)	0,928	0,958	0,960	0,954	0,962	0,957	0,958	0,937
k_r (b = -0,2)	0,922	0,947	0,947	0,935	0,950	0,933	0,937	0,937
k_c	1							
k_s	1/1,2							

Tableau C - 12. Trafic admissible des différentes couches de la structure (§ IV-5).

Paramètres				Formules étudiées							Standard EME2
				OR	40R	40R'	55R	55R'	70R	70R'	
Couche de surface : BBSG3-OR	b variable	EME2	NE _{adm}	22839	33453	28011	17452	33361	15449	27773	13280
		PF1	NE _{adm}	71074	77500	75591	92757	88889	98810	95553	60456
	b = -0,2	EME2	NE _{adm}	31146	80510	80952	65341	99958	86582	106278	13280
		PF1	NE _{adm}	71074	77500	75591	92757	88889	98810	95553	60456
Couche de surface : BBSG3-Std	b variable	EME2	NE _{adm}	12922	16244	13067	7701	14934	5915	11384	8003
		PF1	NE _{adm}	38572	42135	41067	50706	48519	54147	52285	32784
	b = -0,2	EME2	NE _{adm}	18558	47698	48018	38412	58908	50789	62503	8003
		PF1	NE _{adm}	38572	42135	41067	50706	48519	54147	52285	32784

ANNEXE D PERFORMANCES À BASSE TEMPÉRATURE

1. DÉRIVE THERMIQUE DU SYSTÈME DE MESURE

Lors d'un essai de retrait thermique empêché (TSRST), les différents éléments du système de mesure se contractent avec la diminution de la température, ce qu'il faut prendre en compte dans l'exploitation des mesures (Figure D - 1).

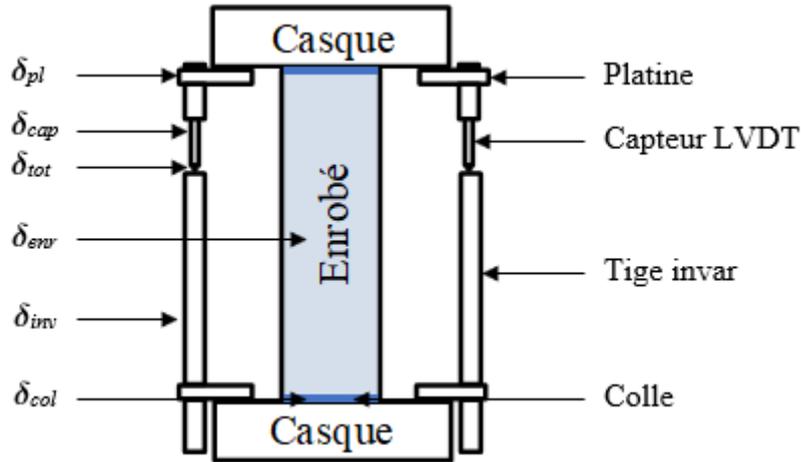


Figure D - 1. Variation de longueur des *éléments du système de mesure pour l'essai TSRST*.

Lors d'un refroidissement ΔT , le raccourcissement de l'éprouvette d'enrobé, en tenant compte des différents éléments du système de mesures (compression négative, traction positive), s'exprime par :

$$\delta_{enr} = \delta_{tot} - |\delta_{col}| + |\delta_{pl}| + |\delta_{cap}| + |\delta_{inv}| \quad \text{(D-1)}$$

où δ_{tot} est le déplacement de la pointe (sortante) du capteur de mesure LVDT, δ_{col} , δ_{pl} , δ_{cap} , et δ_{inv} correspondent respectivement aux raccourcissements thermiques de la colle, de la platine, du corps du capteur LVDT et de la tige en INVAR.

Les quatre derniers termes de l'équation D-1 s'expriment en fonction de leurs dimensions (L_i) et de leurs coefficients de dilatation/contraction thermique (α_i) :

$$\delta_{col} = L_{col}\alpha_{col}\Delta T \quad \text{(D-2)}$$

$$\delta_{pla} = L_{pla}\alpha_{pla}\Delta T \quad \text{(D-3)}$$

$$\delta_{cap} = L_{cap}\alpha_{cap}\Delta T \quad \text{(D-4)}$$

$$\delta_{inv} = L_{inv}\alpha_{inv}\Delta T \quad \text{(D-5)}$$

En remplaçant les expressions D-2 à D-5 dans l'équation D-1, on obtient :

$$\delta_{enr} = \delta_{tot} + [-L_{col}\alpha_{col} + L_{pla}\alpha_{pla} + L_{cap}\alpha_{cap} + L_{inv}\alpha_{inv}]\Delta T \quad (\text{D-6})$$

En introduisant des coefficients fictifs α'_i de dilatation/contraction thermique des divers éléments rapportés à la longueur L_{enr} de l'éprouvette d'enrobé ($\alpha'_i = \alpha_i L_i/L_{enr}$) :

$$\alpha_{enr} = \alpha_{tot} - \alpha'_{col} + \alpha'_{pla} + \alpha'_{cap} + \alpha'_{inv} = \alpha_{tot} + \sum \alpha'_i \quad (\text{D-7})$$

Les propriétés thermiques des éléments suivants sont connues ($\alpha_{col} = 46 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$; $\alpha_{pla} = 23 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$; $\alpha_{inv} = 1,2 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$) ; celle du corps du capteur LVDT (α_{cap}), est déterminée à l'aide du montage de la Figure D - 2 [196].

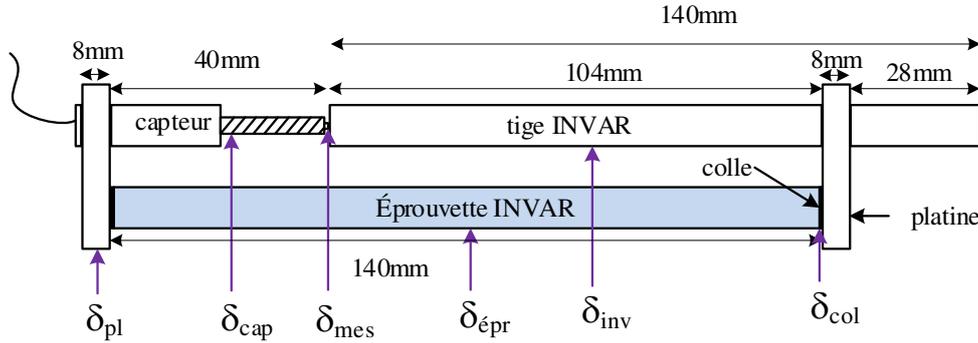


Figure D - 2. Montage pour la détermination du coefficient de contraction/dilatation thermique des capteurs LVDT.

À partir du montage ci-dessus et pour une variation de température ΔT , on obtient :

$$\delta_{cap} = \delta_{mes} + |\delta_{col}| + |\delta_{epr}| - |\delta_{pl}| - |\delta_{inv}| \quad (\text{D-8})$$

Pour un $\Delta T = -30 \text{ }^\circ\text{C}$ (de $+5 \text{ }^\circ\text{C}$ à $-25 \text{ }^\circ\text{C}$, avec $\Delta T/\Delta t = -10 \text{ }^\circ\text{C}/\text{h}$), on détermine la contraction ($\delta_{cap} = -0,063 \text{ mm}$) du corps du capteur LVDT et son coefficient de contraction thermique α_{cap} :

$$\alpha_{cap} = \frac{\delta_{cap}}{L_{cap} \Delta T} = \frac{-0,063 \text{ mm}}{(40 \text{ mm})(-30 \text{ }^\circ\text{C})} = 52,3 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C} \quad (\text{D-9})$$

Reporté à la longueur de l'éprouvette d'enrobé ($L_{enr} = 160 \text{ mm}$), $\alpha'_{cap} = 13,1 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$ et donc $\sum \alpha'_i = \alpha' = 15 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$.

Compte tenu des paramètres ci-dessus, la contrainte σ_{mes} mesurée lors de l'essai est corrigée pour déterminer la contrainte réelle σ_{cry} dans l'éprouvette d'enrobé [197], par l'expression :

$$\sigma_{cry} = \frac{\sigma_{mes}}{1 - \frac{\alpha'}{\alpha_{enr}}} \quad (\text{D-10})$$

où α_{enr} est le coefficient de contraction thermique de l'enrobé pris égal à $30 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$.

2. RÉSULTATS BBSG3

Tableau D - 1. Paramètres de compactage des plaques (BBSG3).

Paramètres des plaques	Formules																			
	OR		OCR		55R		55R'		55CR			55CR'				70R		70R'		
	P1	P3	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P1	P3	
Vides visés plaque (%)	10,0	9,5	9,0	8,0	10,2	8,0	10,3	8,3	9,0	9,0	9,5	9,3	9,8	10,0	10,5	10,0	10,2	10,0	10,0	
Vides éprouvettes (%)	3,6	4,8	4,7	3,6	5,9	4,2	5,3	4,4	4,0	3,5	4,6	3,5	2,4	4,2	4,5	3,1	3,8	2,9	3,8	
Écart-type (%)	1,1	1,2	1,4	1,3	1,1	1,2	1,2	1,2	1,4	1,3	0,9	1,1	1,0	1,1	1,0	0,8	0,6	0,5	0,5	
Nb de passes avant	32	16	36	36	16	29	14	25	12	20	15	12	20	12	12	32	13	31	11	
Nb de passes arrière	32	16	36	36	16	29	14	25	12	20	15	12	20	12	12	32	13	31	11	
Nb de passes centre	19	11	21	21	11	17	10	15	9	13	10	9	13	9	9	19	9	18	8	

Tableau D - 2. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-OR.

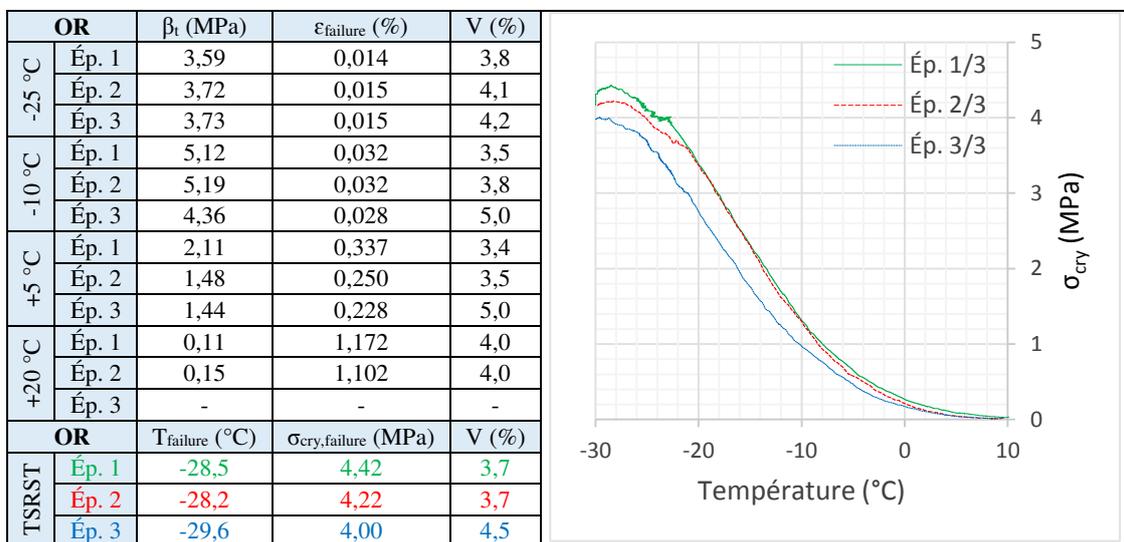


Tableau D - 3. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-OCR.

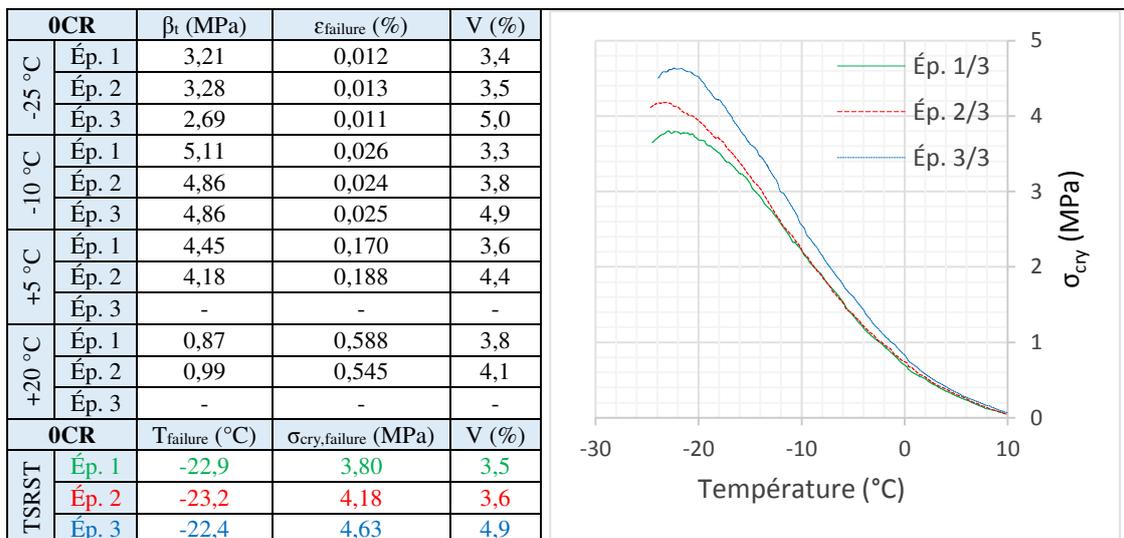


Tableau D - 4. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-55R.

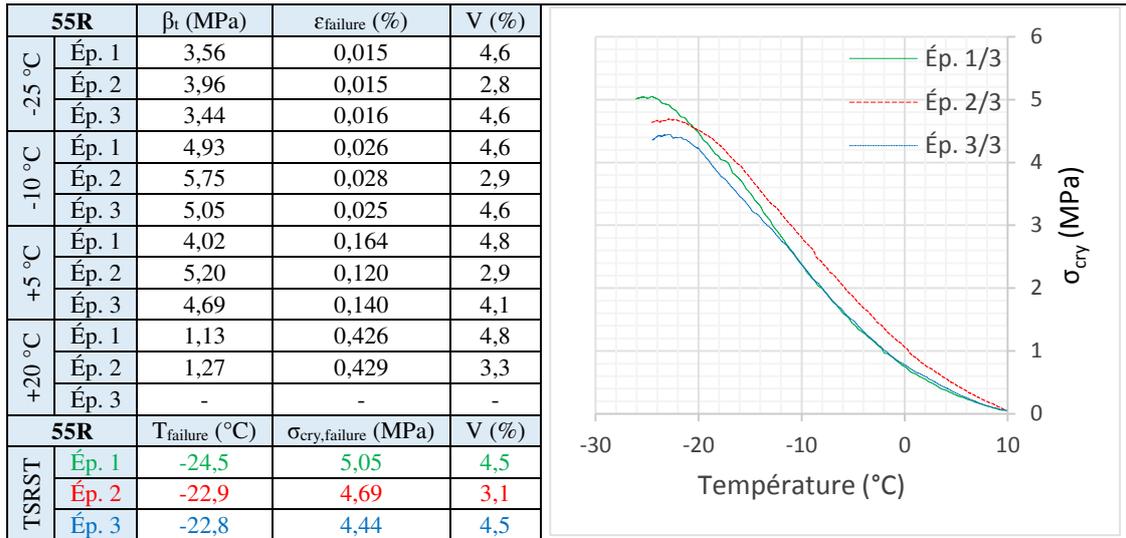


Tableau D - 5. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-55R'.

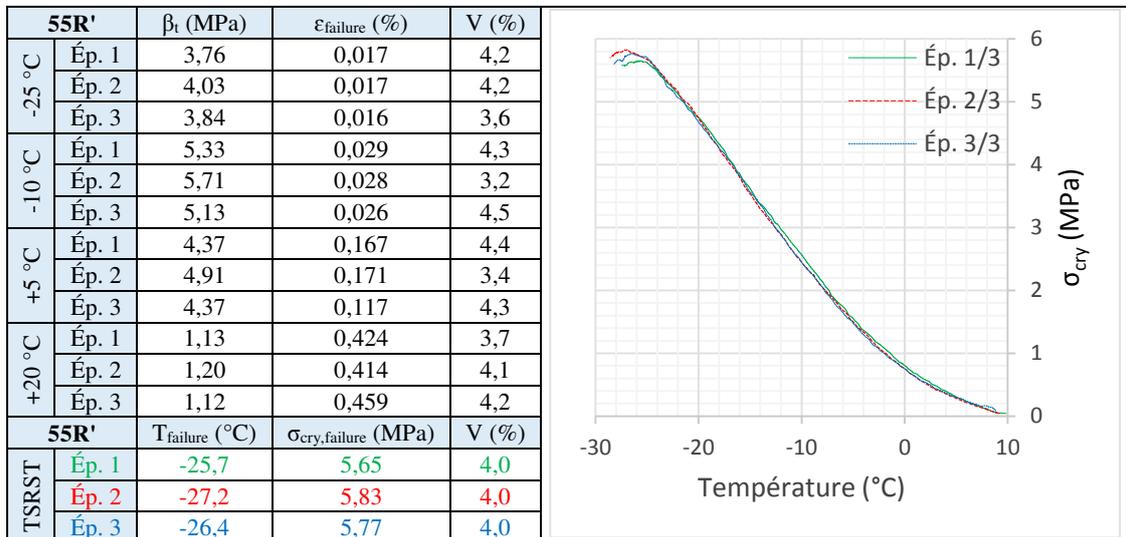


Tableau D - 6. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-55CR.

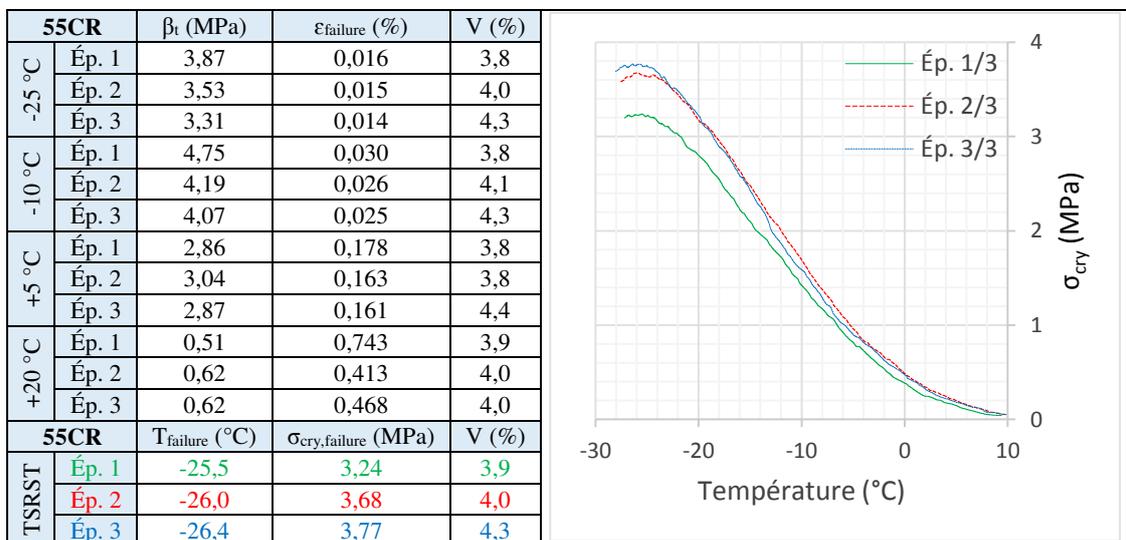


Tableau D - 7. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-55CR'.

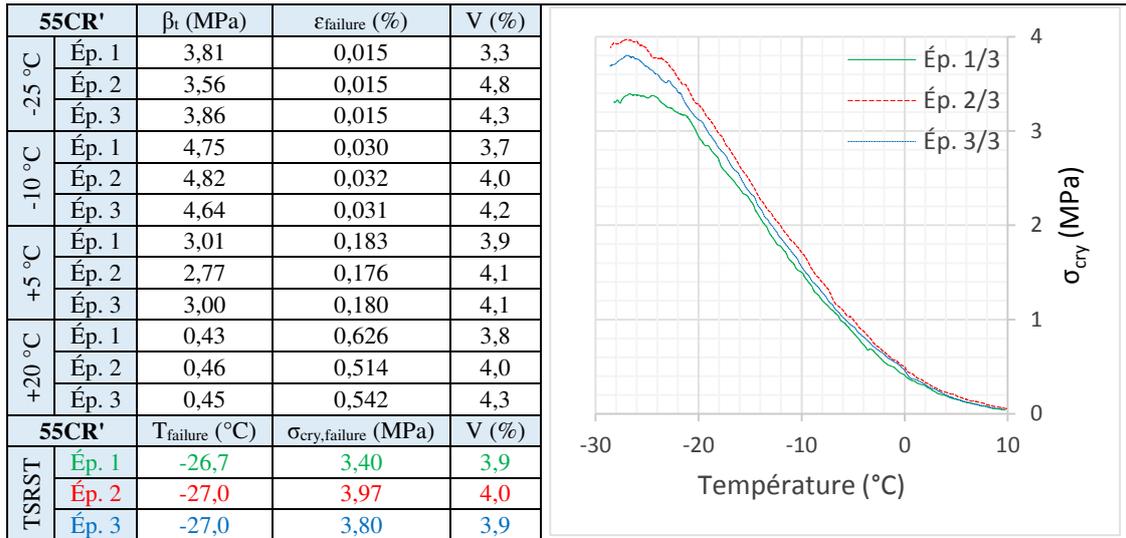


Tableau D - 8. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-70R.

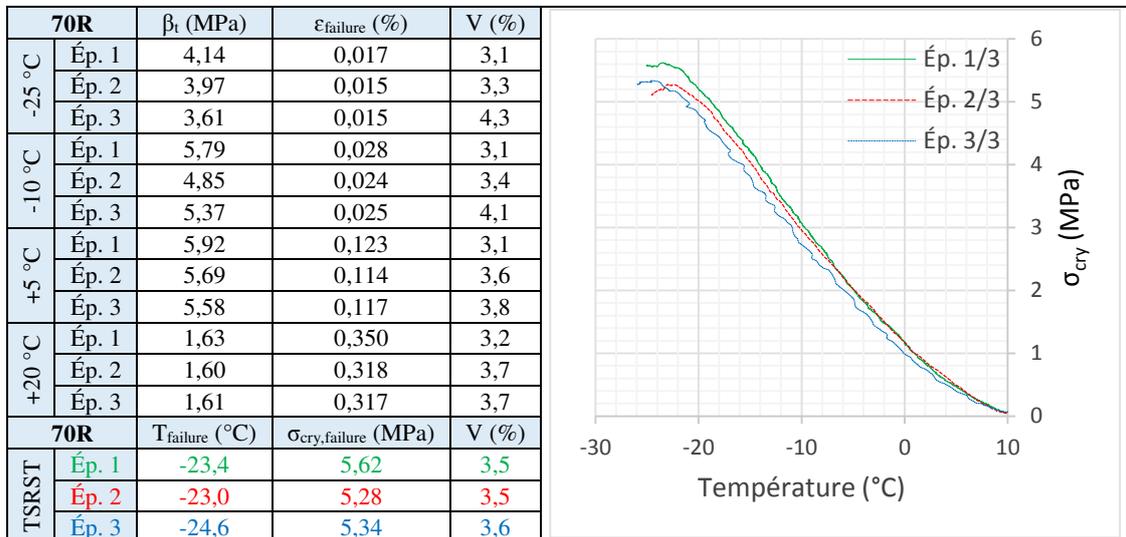
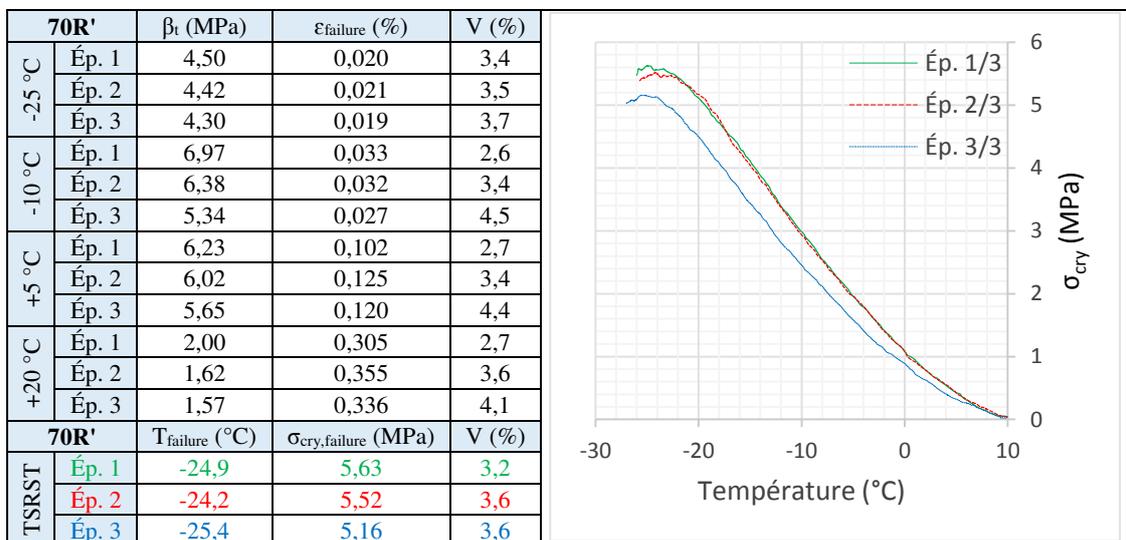


Tableau D - 9. Résultats UTST & TSRST du BBSG3-70R'.



3. RÉSULTATS GB4

Tableau D - 10. Paramètres de compactage des plaques (GB4).

Paramètres des plaques	Formules												
	OR	40R		40R'		55R		55R'		70R		70R'	
	P1	P1	P2										
Vides visés plaque (%)	13,0	12,8	12,3	12,8	12,5	12,5	11,0	12,6	12,0	12,0	12,5	12,5	12,0
Vides éprouvettes (%)	5,7	6,0	6,4	5,7	6,0	6,6	5,4	5,9	5,7	4,6	6,0	5,9	5,4
Écart-type (%)	0,7	1,1	1,0	0,9	0,6	0,8	0,7	0,7	0,9	0,9	1,0	0,9	0,8
Nb de passes avant	10	11	13	9	11	13	13	9	9	23	11	9	13
Nb de passes arrière	10	11	13	9	11	13	13	9	9	23	11	9	13
Nb de passes centre	7	8	9	7	8	9	9	7	7	12	8	7	9

Tableau D - 11. Résultats UTST & TSRST de la GB4-OR.

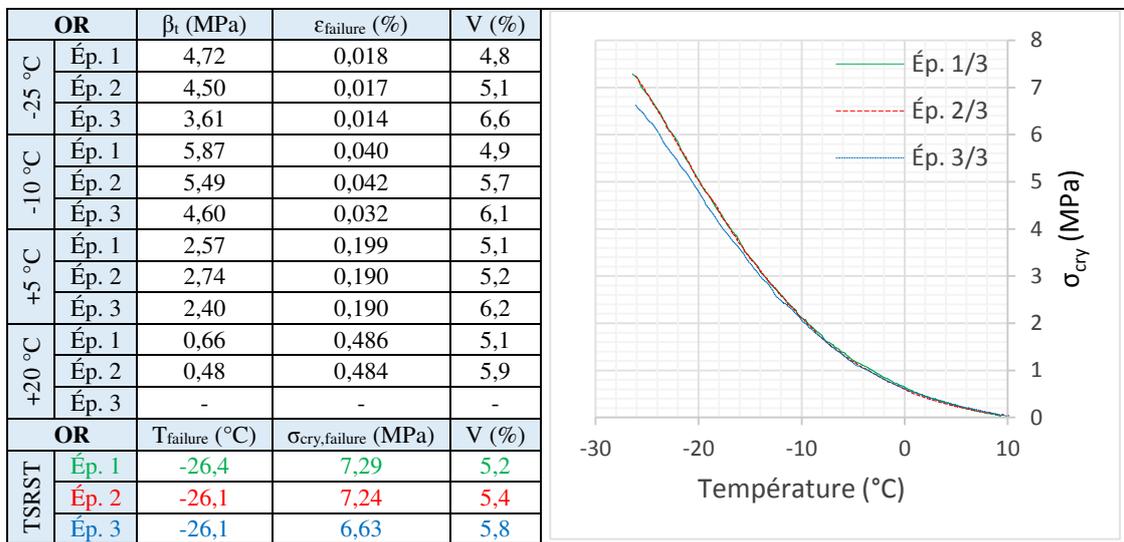


Tableau D - 12. Résultats UTST & TSRST de la GB4-40R.

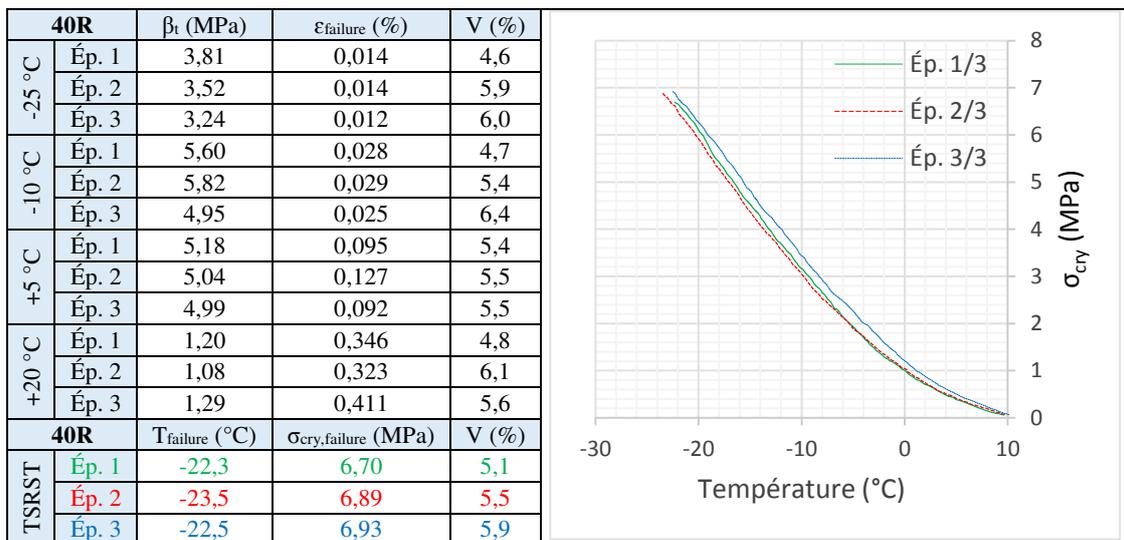


Tableau D - 13. Résultats UTST & TSRST de la GB4-40R'.

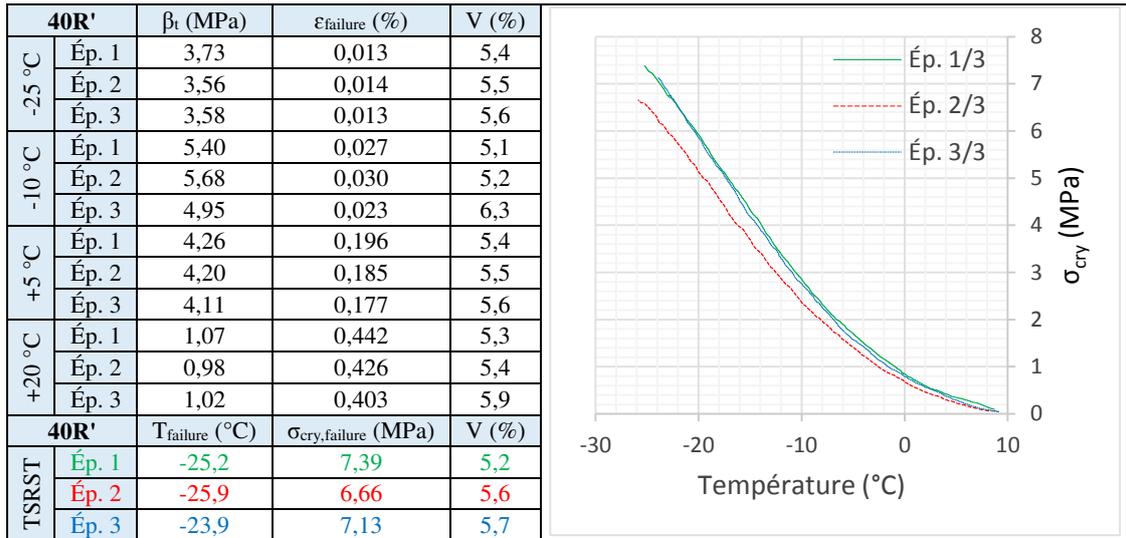


Tableau D - 14. Résultats UTST & TSRST de la GB4-55R.

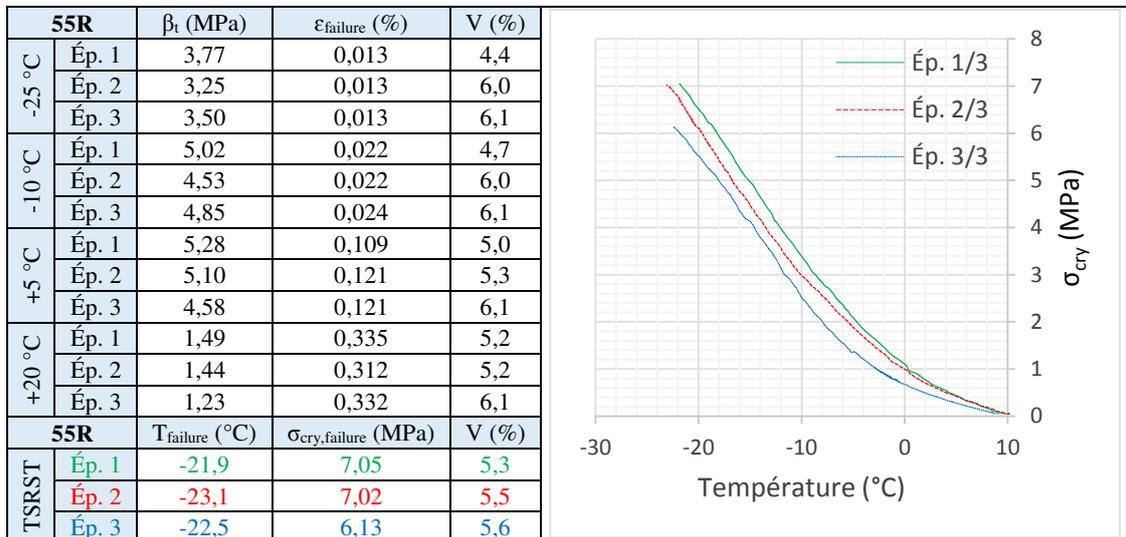


Tableau D - 15. Résultats UTST & TSRST de la GB4-55R'.

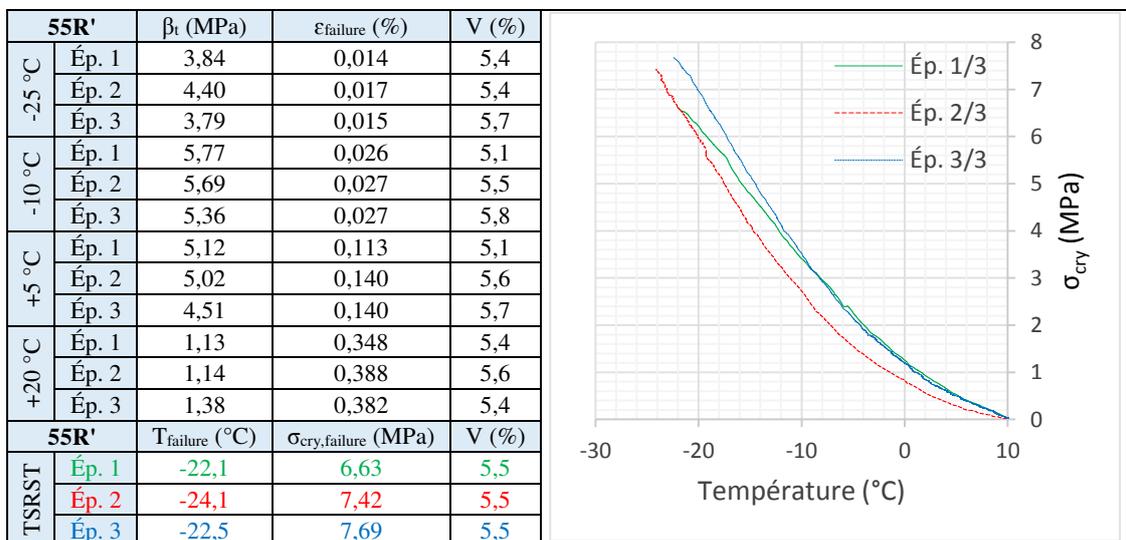


Tableau D - 16. Résultats UTST & TSRST de la GB4-70R.

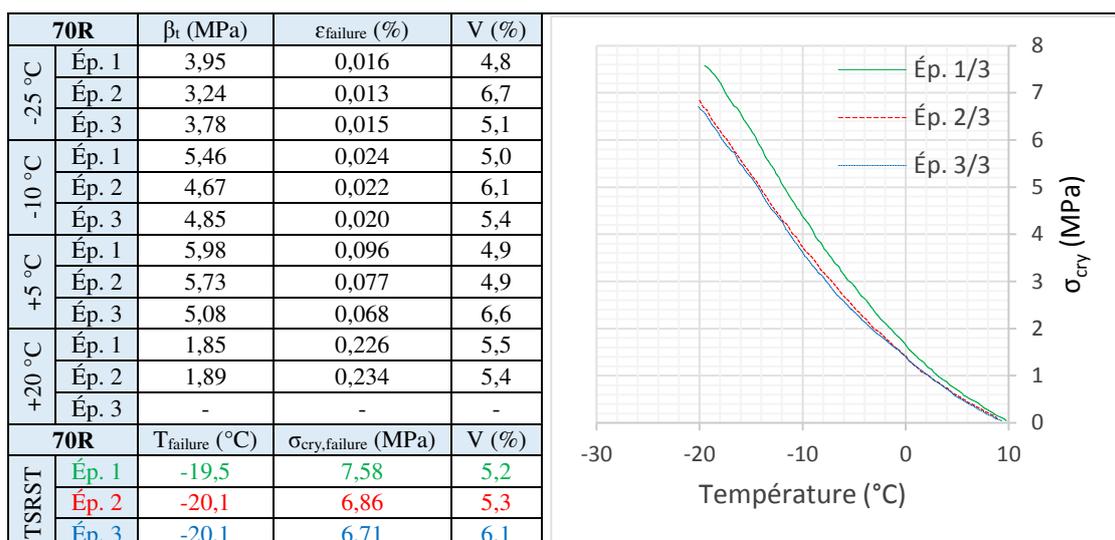
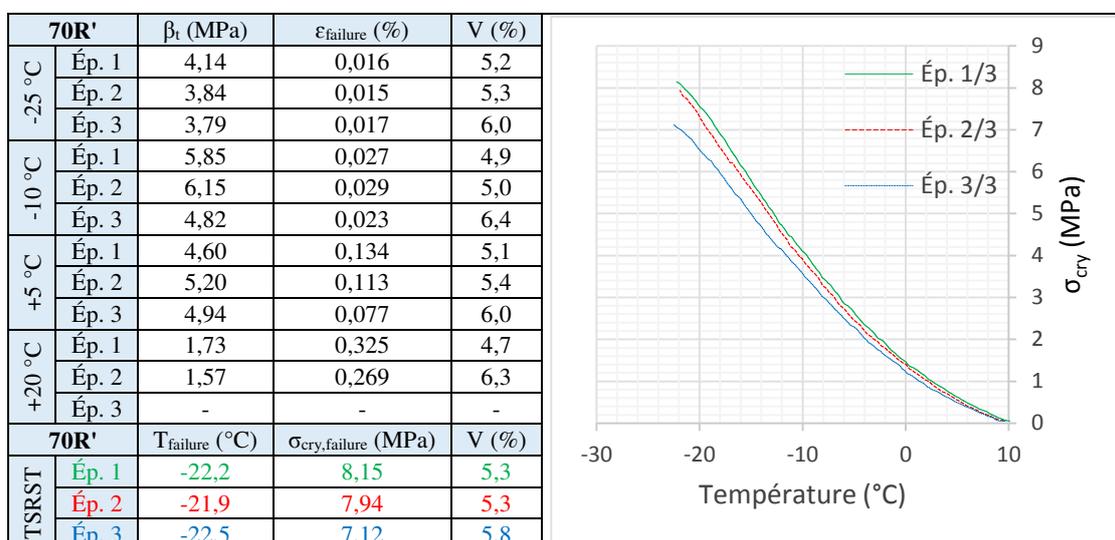


Tableau D - 17. Résultats UTST & TSRST de la GB4-70R'.



4. RÉSULTATS EME2

Tableau D - 18. Paramètres de compactage des plaques (EME2).

Paramètres des plaques														
	0R			40R		40R'		55R	55R'		70R		70R'	
	P2	P3	P4	P1	P2	P1	P2	P1	P1	P2	P2	P3	P2	P3
Vides visés plaque (%)	11,5	13,0	12,3	12,0	11,0	12,0	13,0	11,5	11,5	11,5	11,0	10,5	11,0	10,8
Vides éprouvettes (%)	2,4	4,8	4,0	4,0	3,2	2,5	3,6	3,2	3,3	3,1	3,8	4,0	3,5	3,7
Écart-type (%)	0,6	1,2	0,8	0,7	0,9	0,4	0,6	0,7	0,6	0,6	1,1	1,3	1,0	1,2
Nb de passes avant	8	5	6	7	9	9	7	9	7	9	16	12	13	12
Nb de passes arrière	8	5	6	7	9	9	7	9	7	9	16	12	13	12
Nb de passes centre	6	4	5	6	7	7	6	7	6	7	11	9	9	9

Tableau D - 19. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-0R.

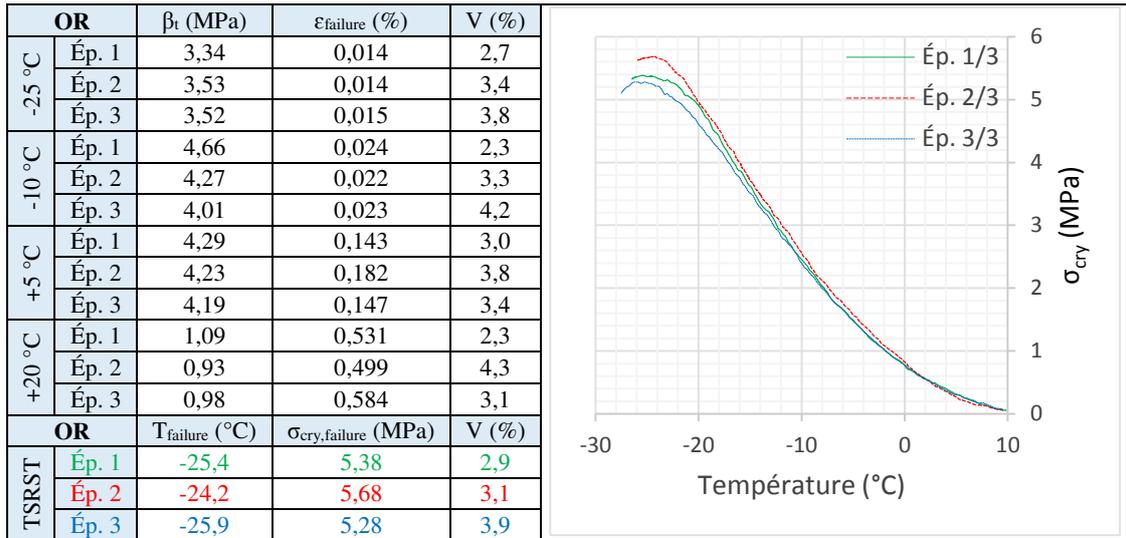


Tableau D - 20. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-40R.

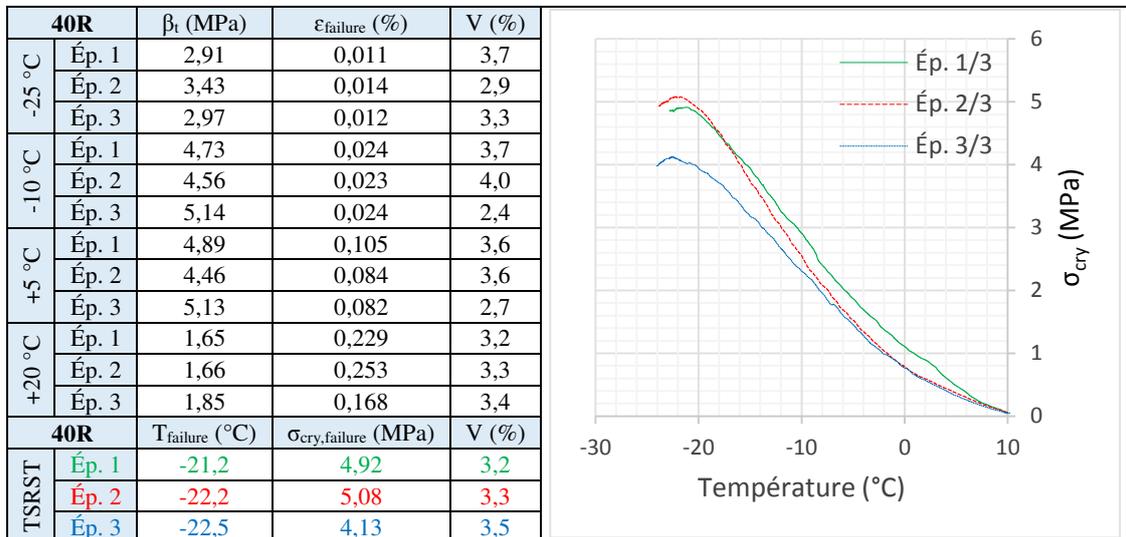


Tableau D - 21. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-40R'.

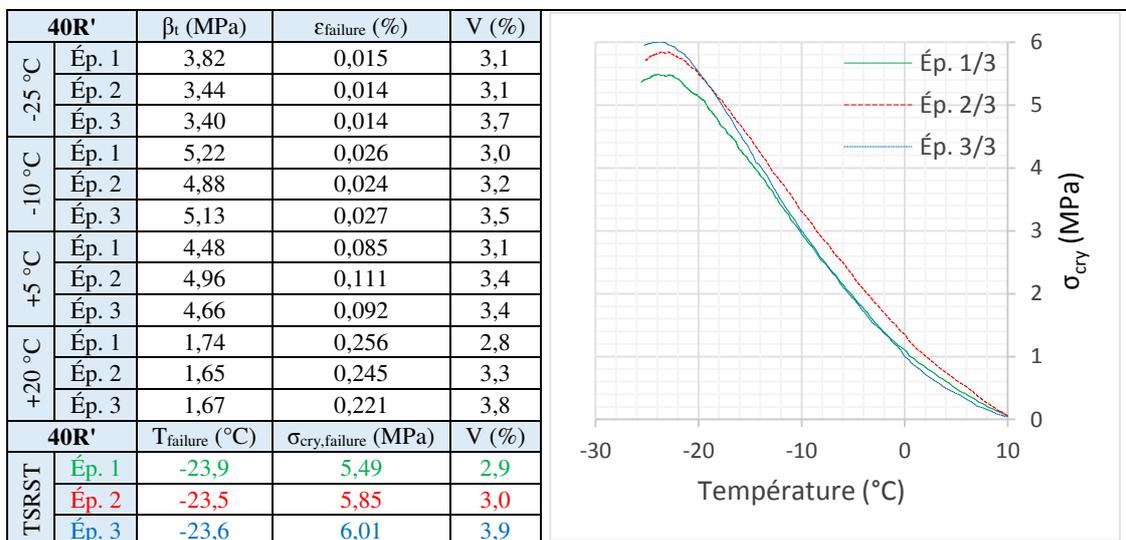


Tableau D - 22. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-55R.

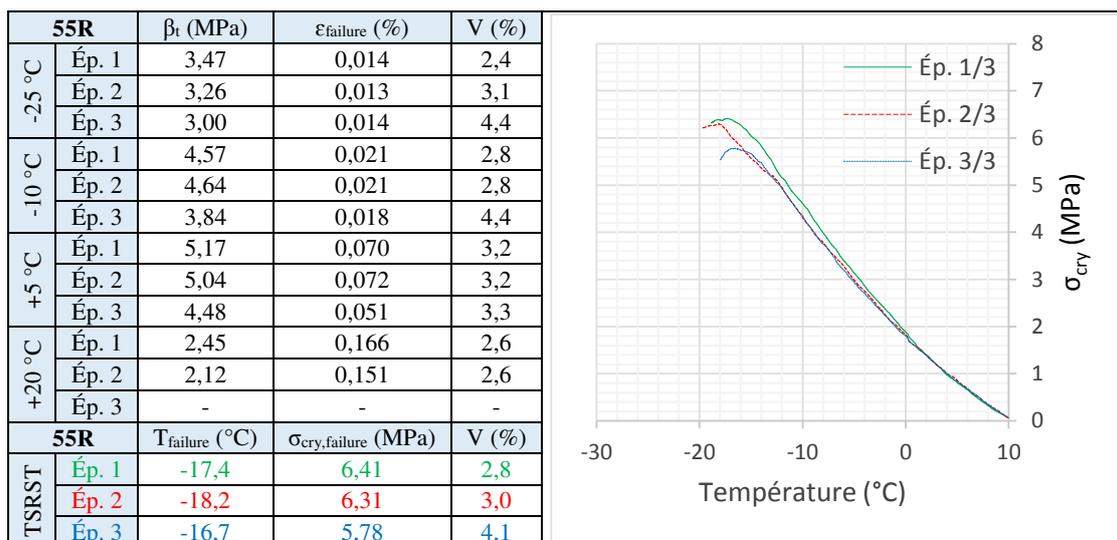


Tableau D - 23. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-55R'.

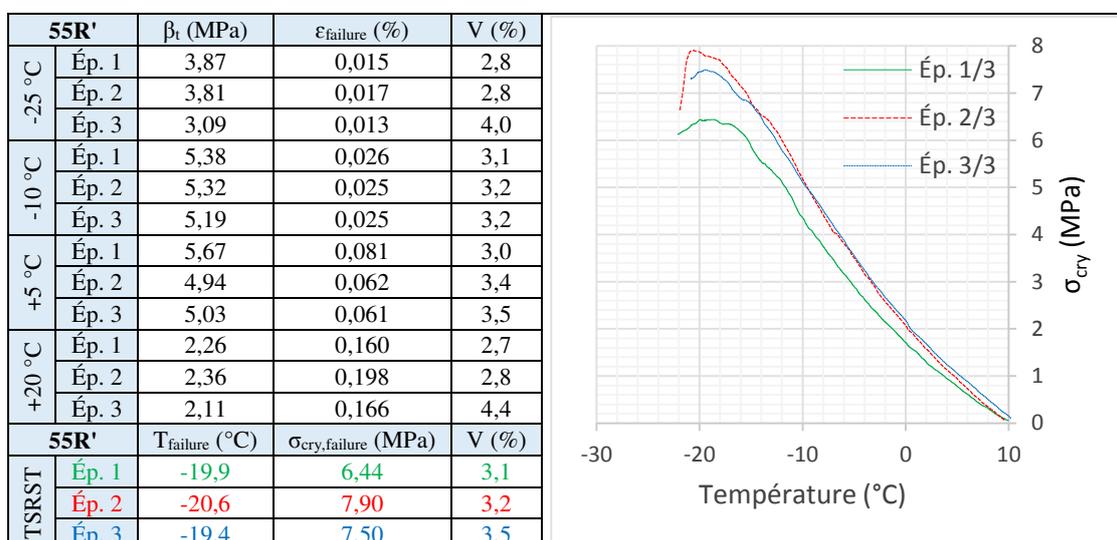


Tableau D - 24. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-70R.

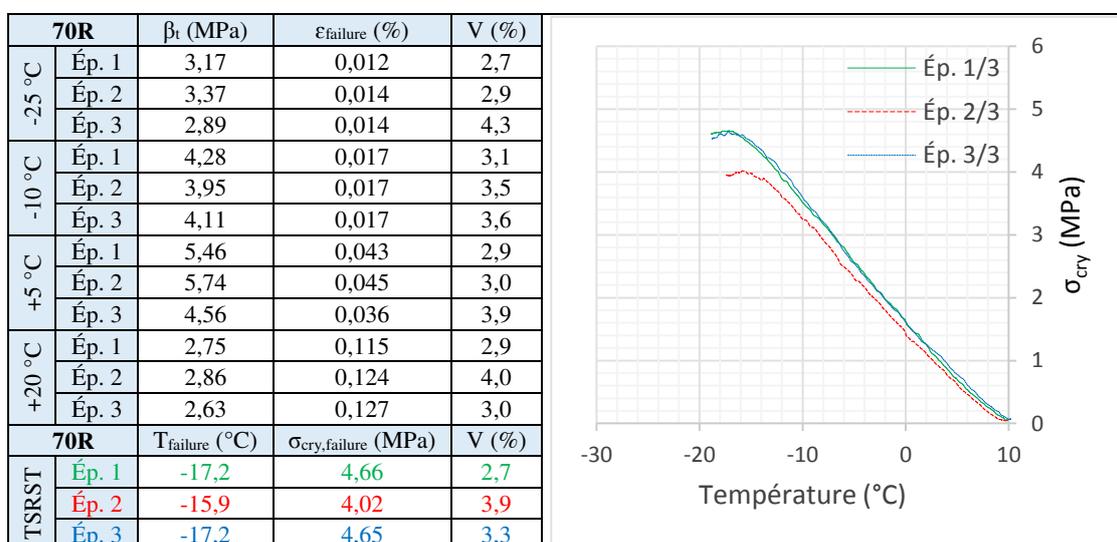
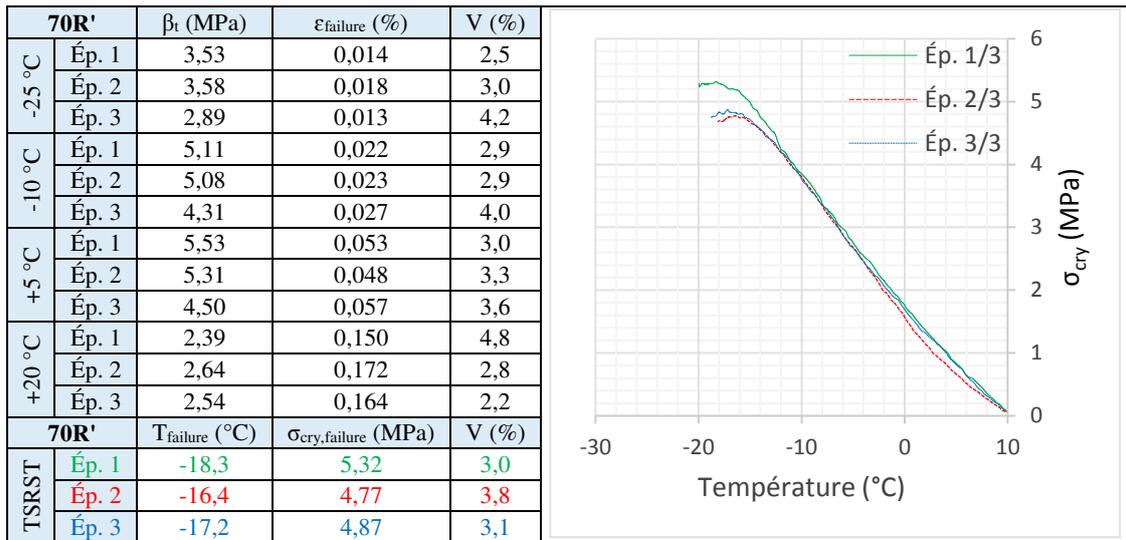


Tableau D - 25. Résultats UTST & TSRST de l'EME2-70R'



5. RD 996

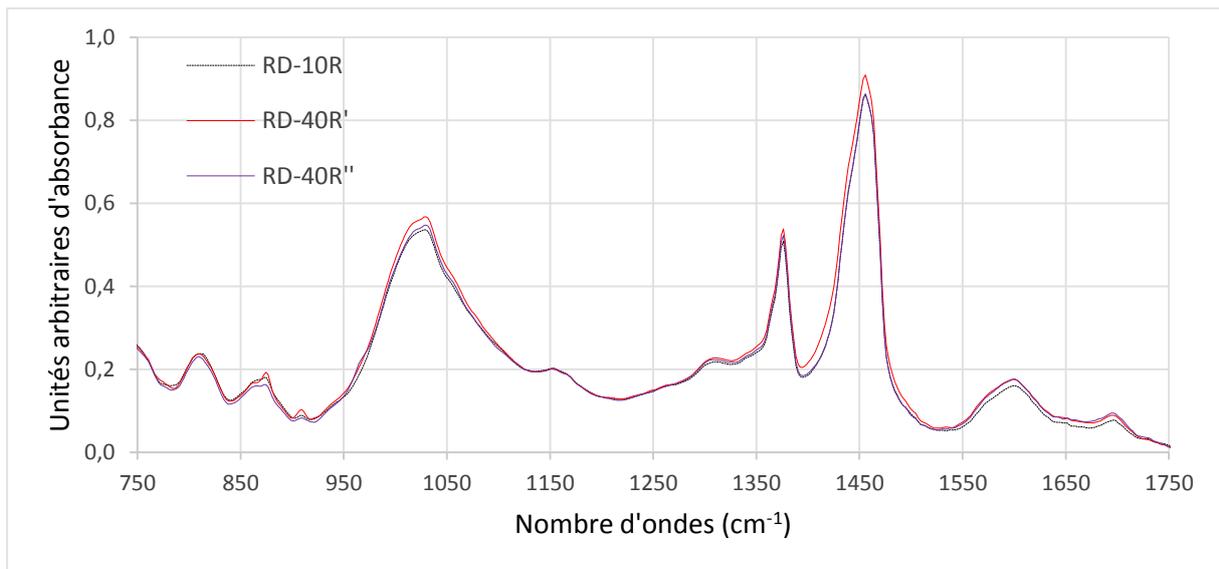


Figure D - 3. Spectre infrarouge des liants de la RD 996 après six ans de service.

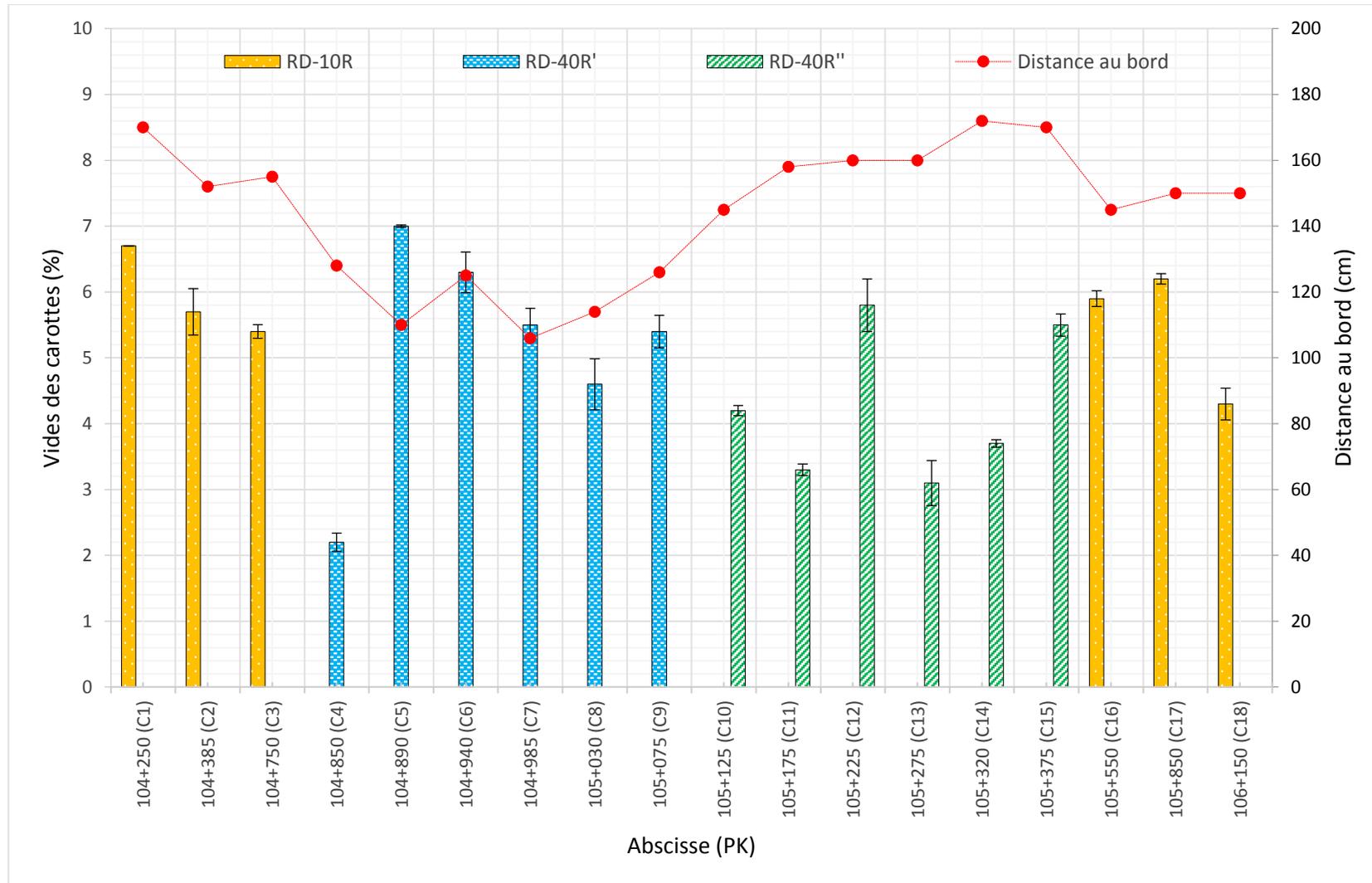


Figure D - 4. Récapitulatif des échantillons de la RD 996 ($\phi=50$ mm ; h= 160 mm) : RD-10R ; RD-40R' ; RD-40R''.

Tableau D - 26. Résultats UTST & TSRST de la RD 996-10R.

RD-10R		β_t (MPa)	$\epsilon_{\text{failure}}$ (%)	V (%)
-10 °C	C3 (A)	3,54	0,030	5,5
	C16 (A)	3,30	0,026	5,8
	-	-	-	-
-10 °C*	C3 (B)	3,19	0,026	5,3
	C2 (B)	2,92	0,029	5,4
	C16 (B)	3,27	0,025	6,0
RD-10R		T_{failure} (°C)	$\sigma_{\text{cry, failure}}$ (MPa)	V (%)
TSRST	C3 (B)	-17,1	1,70	5,3
	C2 (B)	-19,3	1,53	5,4
	C16 (B)	-17,9	1,45	6,0
Notes		* UTST à -10 °C 24h après TSRST		

Tableau D - 27. Résultats UTST & TSRST de la RD 996-40R'.

RD-40R'		β_t (MPa)	$\epsilon_{\text{failure}}$ (%)	V (%)
-10 °C	C8 (A)	3,08	0,026	5,0
	C6 (B)	2,81	0,025	6,0
	-	-	-	-
-10 °C*	C7 (B)	2,72	0,025	5,2
	C9 (B)	2,78	0,026	5,7
	C7 (A)	2,75	0,026	5,7
RD-40R'		T_{failure} (°C)	$\sigma_{\text{cry, failure}}$ (MPa)	V (%)
TSRST	C7 (B)	-19,2	1,66	5,2
	C9 (B)	-18,7	1,51	5,7
	C7 (A)	-20,6	1,80	5,7
Notes		* UTST à -10 °C 24h après TSRST		

Tableau D - 28. Résultats UTST & TSRST de la RD 996-40R''.

RD-40R''		β_t (MPa)	$\epsilon_{\text{failure}}$ (%)	V (%)
-10 °C	C3(A)	4,29	0,037	4,3
	C16(A)	2,64	0,025	6,2
	-	-	-	-
-10 °C*	C15 (A)	3,12	0,031	5,3
	C12 (A)	3,27	0,030	5,4
	C12 (B)	2,83	0,024	5,6
RD-40R''		T_{failure} (°C)	$\sigma_{\text{cry, failure}}$ (MPa)	V (%)
TSRST	C15 (A)	-20,4	1,29	5,3
	C12 (A)	-20,4	1,34	5,4
	C12 (B)	-18,2	0,95	5,6
Notes		TSRST : baisse soudaine de σ_{cry} autour de -3 °C (possible fissuration prématurée).		

AVIS DU JURY SUR LA REPRODUCTION DE LA THESE SOUTENUE

Titre de la thèse:

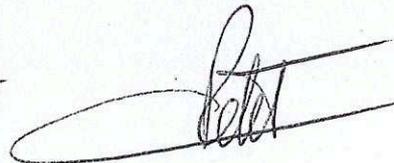
Évaluation des performances thermomécaniques des enrobés bitumineux à fort taux de recyclage. Apport du procédé de régénération Fenixfalt

Nom Prénom de l'auteur : ALVARADO PATINO NELSON ANDREY

Membres du jury :

- Monsieur CHAZALLON Cyrille
- Madame DONY Anne
- Monsieur GAUDEFROY Vincent
- Madame DARQUENNES Aveline
- Monsieur MARTINEZ Juan
- Monsieur PETIT Christophe

Président du jury : *Christophe PETIT*



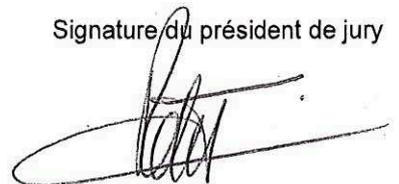
Date de la soutenance : 05 Décembre 2018

Reproduction de la these soutenue

- Thèse pouvant être reproduite en l'état
 Thèse pouvant être reproduite après corrections suggérées

Fait à Rennes, le 05 Décembre 2018

Signature du président de jury



Le Directeur,

M'hamed DRISSI



Titre : Évaluation des performances thermomécaniques des enrobés bitumineux à fort taux de recyclage. Apport du procédé de régénération Fenixfalt.

Mots clés : Agrégats d'enrobé, régénérant, fatigue, basse température, vieillissement.

Résumé : Une étude expérimentale a été effectuée sur diverses formules de trois familles d'enrobés bitumineux avec des taux de recyclage variables et la présence ou non de régénérant. La composition des mélanges et le procédé de fabrication ont été élaborés afin d'effectuer une étude comparative. L'enrobage produit des variations des paramètres physico-chimiques des liants telles que la consistance, la température de transition vitreuse, les fractions cristallisables, les taux d'aromatiques et d'asphaltes ; ces variations sont limitées en présence de régénérant. Lorsque le taux d'AE augmente, la compactibilité et l'orniérage des mélanges diminuent et leur rigidité viscoélastique augmente, mais le régénérant limite ces variations. Globalement, les AE produisent une augmentation de la résistance à la fatigue des formules et un aplatisse-

ment des droites de Wöhler. Le régénérant améliore le paramètre de fatigue ε_6 ; les performances en fatigue augmentent avec la TBA et l'indice colloïdal du liant ainsi qu'avec la diminution de la viscosité de l'enrobé. L'impact favorable d'un taux élevé d'AE et du régénérant sur le trafic admissible a été déterminé suite au dimensionnement d'une structure souple tri-couche. À basse température, la détérioration par les AE de la ductilité en traction et de la température de rupture par retrait empêché se trouvent limitées par le régénérant ; un compromis est cependant à trouver avec la résistance à la fatigue. Les formules régénérées mises en œuvre sur la couche de roulement d'une route départementale ont subi une moindre évolution après six ans de service que les mélanges non régénérés.

Title : Evaluation of the thermo mechanical performances of bituminous mixes with high recycling rates. Contribution of Fenixfalt rejuvenation process.

Keywords : RAP, rejuvenator, fatigue, low temperature, ageing

Abstract : An experimental programme has been performed on three types of bituminous mixes with variable recycling rates and the possible addition of rejuvenator. The mix composition and the production process have been defined in order to perform a comparative analysis. The coating process modifies the physico-chemical parameters of the binders, like consistency, glassy transition temperature, crystallizable moiety, aromatics and asphaltene rates; the above variations are limited by using the rejuvenator. As the RAP content increases, the compactibility and the rutting of the mixes decrease and the viscoelastic stiffness increases, but the rejuvenation reduces these variations. Globally, RAP increases the fatigue resistance of the mixes and

flattens the Wöhler curve. Rejuvenation enhances ε_6 fatigue parameter; fatigue performances increase with R&B temperature and colloidal index of the binder and as the viscous component of the mixes decreases. The positive impact of a high rate of RAP and of the rejuvenation on the allowable traffic has been evaluated from the structural design of a three-layered pavement. At low temperature, the deterioration of the tension ductility and of the stress restrained failure temperature produced by the RAP, is limited by the rejuvenation; a compromise with the fatigue resistance has to be found. The rejuvenated mixes laid as surface layers on a provincial road have experienced a smaller evolution than non rejuvenated mixes.