

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 20 Août 1955- Skikda
Faculté de Technologie
Département de Génie Civil
Réf : D012126019D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية
المرجع D012126019D

Thèse
Présentée
À
L'Université 20 Août 1955 Skikda

Pour l'obtention du diplôme de
Doctorat

Spécialité
Génie Civil

Option
DIAGNOSTIC ET TRAITEMENT DES PATHOLOGIES DES
CONSTRUCTIONS

Par
BOULEMAIZET Adel

Intitulé :
Eco matériaux pour les besoins de la rénovation des
bâtiments et ouvrages d'art

Le 07/06/2026

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Qualité	Université
BOUABAZ Mohamed	Professeur	1 Président	Université Skikda
BOUDJELLAL Khaled	MCA	Rapporteur	Université Skikda
KHERRAF Leila	MCA	Examineur	Université Skikda
BENSEBTI Salaheddine	Professeur	Examineur	Université Constantine1
MEZHOUD Samy	Professeur	Examineur	Université Constantine1
REHAB BEHOUCHE Souhila	Professeur	Invite	Université Skikda

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier chaleureusement le directeur de thèse M. BOUDJELLAL Khaled pour son aide et suivi, je remercie Mme. BEKKOUCHE-Souhila-Rahab pour son appui précieux ses conseils et sa disponibilité.

Je remercie également M. BOUABAZ Mohamed pour son soutien, un merci à Mme. MESSAOUDI Karima pour ses encouragements.

Je remercie vivement le président et tous les membres du jury pour avoir accepté d'examiner et débattre ce travail de recherche.

DEDICACES

Je dédie ce travail à Maman... ma boussole.

RESUME

Ce travail de recherche s'inscrit dans le cadre de la valorisation des matériaux routiers recyclés (RAP) par l'intégration de déchets plastiques sous forme de feuillets. L'objectif principal est d'évaluer l'impact de ces ajouts sur les propriétés physiques et mécaniques des enrobés, afin d'identifier des conditions optimales d'utilisation et de proposer une alternative durable aux techniques classiques de modification du bitume.

La méthodologie repose sur une série d'essais de caractérisation (tenue à l'eau, maniabilité, résistance à la déformation permanente, module complexe et fatigue). Trois types de plastiques ont été étudiés : PEBD, PEHD et PET, avec des dosages variant de 0 % à 2 % et des épaisseurs de 0 à 15 mm. Les résultats préliminaires ont montré que l'épaisseur optimale des plastiques se situe entre 5 et 10 mm, et que les dosages de 1 % à 1,5 % offrent le meilleur compromis entre amélioration mécanique et maniabilité.

Les essais ont révélé une augmentation significative de la résistance à la compression et à la fatigue, une réduction du fluage et une excellente résistance à l'orniérage, conforme aux normes BBSG/BBME dès 1,5 % de plastiques. L'ajout de PEBD a particulièrement renforcé le module complexe, avec une hausse de plus de 35 % entre 0 % et 2 % de dosage. La modélisation réalisée avec le logiciel Alizé LCPC a mis en évidence une augmentation de la durée de vie de plus de 200 % pour un enrobé RAP modifié par 2 % de PEBD.

Ces travaux démontrent que l'utilisation de plastiques recyclés en feuillets constitue une voie prometteuse pour améliorer la durabilité et les performances des enrobés routiers, tout en contribuant à la valorisation des déchets. Toutefois, le dosage optimal reste limité à environ 1 %, au-delà duquel la sensibilité à l'eau et les difficultés de compactage compromettent la qualité du matériau.

ملخص

يندرج هذا البحث في إطار إعادة تدوير مواد الطرق (RAP) من خلال دمج النفايات البلاستيكية على شكل رقائق. الهدف الرئيسي هو تقييم تأثير هذه الإضافات على الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للرصيف، من أجل تحديد الظروف المثلى للاستخدام وتقديم بديل مستدام للتقنيات التقليدية لتعديل البيتومين.

تعتمد المنهجية على سلسلة من اختبارات التوصيف (مقاومة الماء، قابلية التشكيل، مقاومة التشوه الدائم، المعيار المعقد والتعب). تمت دراسة ثلاثة أنواع من البلاستيك PEBD، PEHD و PET، بجرعات تتراوح من 0% إلى 2% وسماكات من 0 إلى 15 مم. أظهرت النتائج الأولية أن السماكة المثلى للبلاستيك تتراوح بين 5 و 10 مم، وأن الجرعات من 1% إلى 1.5% توفر أفضل توازن بين التحسين الميكانيكي وقابلية التشغيل.

أظهرت الاختبارات زيادة كبيرة في مقاومة الضغط والتعب، وانخفاضاً في الانسياب ومقاومة ممتازة للتجوية، بما يتوافق مع معايير BBSG/BBME اعتباراً من 1.5% من البلاستيك. أدى إضافة PEBD إلى تعزيز المعيار المعقد بشكل خاص، مع زيادة تزيد عن 35% بين 0% و 2% من الجرعة. أظهرت النمذجة التي تم إجراؤها باستخدام برنامج Alizé LCPC زيادة في العمر الافتراضي بأكثر من 200% لرصيف RAP المعدل بنسبة 2% من PEBD.

تُظهر هذه الأعمال أن استخدام البلاستيك المعدل تدويره في شكل رقائق يمثل وسيلة واعدة لتحسين متانة وأداء خلطات الطرق، مع المساهمة في إعادة تدوير النفايات. ومع ذلك، تظل الجرعة المثلى محدودة بنحو 1%، حيث تتجاوزها الحساسية للماء وصعوبات الضغط مما يضر بجودة المادة.

ABSTRACT

This research is part of efforts to promote the use of recycled asphalt pavement (RAP) by incorporating plastic waste in the form of flakes. The main objective is to assess the impact of these additions on the physical and mechanical properties of asphalt mixes in order to identify optimal conditions for use and propose a sustainable alternative to conventional asphalt modification techniques.

The methodology is based on a series of characterization tests (water resistance, workability, resistance to permanent deformation, complex modulus, and fatigue). Three types of plastics were studied: LDPE, HDPE, and PET, with dosages ranging from 0% to 2% and thicknesses from 0 to 15 mm. Preliminary results showed that the optimal thickness of the plastics is between 5 and 10 mm, and that dosages of 1% to 1.5% offer the best compromise between mechanical improvement and workability.

Tests revealed a significant increase in compressive strength and fatigue resistance, reduced creep, and excellent rutting resistance, in compliance with BBSG/BBME standards at 1.5% plastic content. The addition of LDPE particularly strengthened the complex modulus, with an increase of more than 35% between 0% and 2% dosage. Modeling carried out using Alizé LCPC software showed an increase in service life of more than 200% for RAP modified with 2% LDPE. This work demonstrates that the use of recycled plastic sheets is a promising way to improve the durability and performance of road mixes, while contributing to waste recovery. However, the optimal dosage remains limited to around 1%, above which water sensitivity and compaction difficulties compromise the quality of the material.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 CHROMATOGRAMME D'UN BITUME AVANT ET APRES UN PROCEDE DE VIEILLISSEMENT AU LABORATOIRE (PAV). L'ACCROISSEMENT DE L'INTENSITE DE LA PREMIERE BANDE SIGNALE DE PLUS NOMBREUX GROS ELEMENTS (LE GUERN, 2010).	19
FIGURE 2 LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE RECYCLAGE DES ENROBES.....	22
FIGURE 3 EXEMPLE DES SPECTRES IR POUR DIFFERENTS BITUMES (FORMULES) (NELSON ANDREY ALVARADO PATINO, 2018)	25
FIGURE 4 SCHEMA EXPLICATIF DE DEGRES D'HOMOGENEITE DE MELANGE (ZIADE ELIO, 2023)	30
FIGURE 5 MELANGE PROGRESSIF DES AE EN FONCTION DU TEMPS DE MALAXAGE (NAVARO, 2011; NGUYEN, M, 2009).....	31
FIGURE 6 PHOTOGRAPHIES REALISEES SUR UN ENROBE RECYCLE MALAXE PENDANT 45 S A 130°C (NAVARO, 2011)	32
FIGURE 7 DEFINITION DE LA REMOBILISATION A PARTIR DES PROFILS DE COMPOSITION DES DIFFERENTS LIANTS (VASSAUX, 2017).....	33
FIGURE 8 ILLUSTRATION (A) DE L'APPAREIL D'EXTRACTION ET (B) DE LA PROCEDURE D'EXTRACTION PAR ETAPES (GASPAR, & AL., 2020)	34
FIGURE 9 SANDWICH DE LIANTS BITUMINEUX, PREPARATION ET ESSAI (RAD, Y, 2013)	35
FIGURE 10 RESULTATS DU DSR POUR LES ECHANTILLONS DU LIANT A DIFFERENTES TEMPERATURES (RAD, Y, 2013).....	35
FIGURE 11 MODULES DES COUCHES DE LIANT EXTRAITES ET RECUPEREES DES AGREGATS D'ENROBE A DEUX TEMPERATURES DE MELANGE (XU, & AL., 2018).....	36
FIGURE 12 MODULES DES COUCHES DE LIANT EXTRAITES DES AGREGATS D'ENROBE A 150°C ET A DIFFERENTS TEMPS DE CONDITIONNEMENT APRES LE MELANGE (XU, & AL., 2018)	37
FIGURE 13 VARIATION DE G^* A DIFFERENTES DUREES ET TEMPERATURES DE CONDITIONNEMENT PAR RAPPORT AUX ECHANTILLONS SANS CONDITIONNEMENT (RAD, Y, 2013)	38
FIGURE 14 VARIATION DE $ G^* $ POUR CHAQUE ETAPE D'EXTRACTION D'UN ENROBE TIEDE CONTANT 25% D'AE (GASPAR,& AL., 2020)	39
FIGURE 15 RESISTANCE A LA FATIGUE EN SE BASANT SUR LE TAUX DE RECYCLAGE POUR UNE PERIODE DE MALAXAGE DE 240 SECONDES ET A DIVERSES TEMPERATURES. (110°C EN BLEU, 135°C EN VERT, 160°C EN ROUGE) (NAVARO, 2011)	40
FIGURE 16 COURBE DE TENDANCE DONNANT LA RELATION ENTRE LE NOMBRE DE CYCLES ET LE DOB (XU,& AL., 2019)	41
FIGURE 17 INFLUENCE DU TAUX D'AE ET DU DOB SUR LA FATIGUE DES MELANGES (XU,& AL., 2019)	41
FIGURE 18 RESULTATS DE L'ESSAI LAS : LA FATIGUE D'UN ENROBE CONTENANT 0% AE (GAUCHE) ET 25% AE (DROITE) (GASPAR,& AL., 2020)	42
FIGURE 19 INFLUENCE DU TAUX D'AE ET DU DOB SUR LA RESISTANCE A BASSE TEMPERATURE DES MELANGES (XU, & AL., 2019)	43
FIGURE 20 RESISTANCE A L'ORNIERAGE AVEC 4% DE DECHETS PLASTIQUES (FONSECA ET AL., 2022)	46
FIGURE 21 RESISTANCE A L'ORNIERAGE AVEC 6% DE DECHETS PLASTIQUES (FONSECA ET AL., 2022)	47
FIGURE 22 RESISTANCE A L'ORNIERAGE AVEC 8% DE DECHETS PLASTIQUES (FONSECA ET AL., 2022)	47
FIGURE 23 RESISTANCE A LA FATIGUE DES MELANGES SELON TAUX DE (SUARYANA ET AL., 2018)	48
FIGURE 24 COURBE GRANULOMETRIQUE DES GRANULATS DU MATERIAU RAP (MOYENNE).	53
FIGURE 25 LAVAGE ET SECHAGE DES DECHETS PLASTIQUES	55
FIGURE 26 COURBES GRANULOMETRIQUE DES TROIS TYPES DE PLASTIQUE.....	55
FIGURE 27 CONSERVATION ET PESAGE DES DECHETS PLASTIQUES	57
FIGURE 28 FABRICATION D'EPROUVETTES POUR TEST DURIEZ.	59
FIGURE 29 PRINCIPE DE L'ESSAI PCG.	61
FIGURE 30 PRESSE A CISAILLEMENT GIRATOIRE TROXLER 4140 B-5.	64
FIGURE 31 ORNIEREUR FRANÇAIS COOPER CRT-WTENLD.	66
FIGURE 32 PRINCIPE DE L'ESSAI DE FLEXION SUR EPROUVETTE TRAPEZOÏDALE ET SCHEMA DE L'EPROUVETTE TRAPEZOÏDALE POUR ESSAI DE FATIGUE ET DE MODULE.....	67
FIGURE 33 APPAREIL DE L'ESSAI DE FLEXION SUR EPROUVETTE TRAPEZOÏDALE (FATIGUE ET DE MODULE).....	68
FIGURE 34 REPRESENTATION DU MODULE COMPLEXE.....	70
FIGURE 35 SOLLECITATION SINUSOÏDALE EN TRACTION-COMPRESSION ALTERNEE SUR UN ENROBE	71
FIGURE 36 EVOLUTION DE L'INDICE DES VIDES DES MELANGES EN FONCTIONS DE L'EPaisseur PEBD	75
FIGURE 37 CONTRAINTES DE COMPRESSION & SENSIBILITE A L'EAU DES MELANGES SELON L'EPaisseur DES PEBD	75

FIGURE 38	CONTRAINTES DE COMPRESSION & SENSIBILITE A L'EAU DES MELANGES SELON L'EPAISSEUR DES PEHD	75
FIGURE 39	EVOLUTION DE L'INDICE DES VIDES DES MELANGES EN FONCTION DES EPAISSEURS DE PEHD	76
FIGURE 40	FLUAGE DES ECHANTILLONS SECS PEBD HUMIDES (H) ET SECS (S) PEBD	77
FIGURE 41	RESISTANCE A LA COMPRESSION DES ECHANTILLONS	77
FIGURE 42	SENSIBILITE I/C PEBD	77
FIGURE 43	TENEUR EN VIDE/DOSAGE EN PEBD.....	78
FIGURE 44	RESISTANCE A LA COMPRESSION DES ECHANTILLONS HUMIDES (H) ET SECS (S) PEHD.....	78
FIGURE 45	FLUAGE DES ECHANTILLONS SECS PEHD	79
FIGURE 46	SENSIBILITE I/C PEHD.....	79
FIGURE 47	TENEUR EN VIDE /DOSAGE EN PEHD	79
FIGURE 48	RESISTANCE A LA COMPRESSION DES ECHANTILLONS HUMIDES (H) ET SECS (S) PET.....	80
FIGURE 49	FLUAGE DES ECHANTILLONS SECS PET	80
FIGURE 50	SENSIBILITE I/C PET.....	81
FIGURE 51	TENEUR EN VIDE /DOSAGE EN PET.....	81
FIGURE 52	PCG RAP + PEBD	82
FIGURE 53	PCG RAP + PEHD	83
FIGURE 54	PCG RAP + PET	84
FIGURE 55	ESSAI D'ORNIERAGE MELANGE AVEC PEBD	85
FIGURE 56	ESSAI D'ORNIERAGE MELANGE AVEC PEHD	85
FIGURE 57	ESSAI D'ORNIERAGE MELANGE AVEC PET.....	86
FIGURE 58	ESSAI D'ORNIERAGE MELANGE AVEC 2% DE CHAQUE TYPE DE PLASTIQUE	86
FIGURE 59	NORME DU MODULE COMPLEXE/T/Hz	88
FIGURE 60	VARIATION DU MODULE / TEMPERATURE DANS L'ESPACE BLACK.....	89
FIGURE 61	VARIATION DU MODULE / TEMPERATURE / ENROBE DE REFERENCE	89
FIGURE 62	REPRESENTATION DU MODULE COMPLEXE DANS LE PLAN COLE-COLE RAP+0%PEBD	90
FIGURE 63	VARIATION DU MODULE COMPLEXE / ANGLE DE PHASE DANS L'ESPACE BLACK.....	90
FIGURE 64	REPRESENTATION DU MODULE COMPLEXE DANS LE PLAN COLE-COLE RAP+1%PEBD	91
FIGURE 65	REPRESENTATION DU MODULE COMPLEXE DANS LE PLAN COLE-COLE RAP+1,5%PEBD	92
FIGURE 66	REPRESENTATION DU MODULE COMPLEXE DANS LE PLAN COLE-COLE RAP+2%PEBD	92
FIGURE 67	VARIATION DE L'ANGLE DE PHASE / TEMPERATURE	93
FIGURE 68	VARIATION DE LA NORME DU MODULE / TEMPERATURE/ DOSAGE EN PEBD.....	94
FIGURE 69	COURBES DU MODULE COMPLEXE DANS LE PLAN COLE-COLE POUR DIFFERENTS DOSAGES	94
FIGURE 70	RESULTATS DE FATIGUE POUR RAP+0%PEBD.....	96
FIGURE 71	RESULTATS DE FATIGUE POUR RAP+1%PEBD.....	96
FIGURE 72	RESULTATS DE FATIGUE POUR RAP+1,5%PEBD.....	97
FIGURE 73	RESULTATS DE FATIGUE POUR RAP+2%PEBD.....	97
FIGURE 74	DROITE DE FATIGUE (COURBE DE WÖHLER) : $\text{LOG}(N) = A + 1/B \text{ LOG}(\epsilon)$	98
FIGURE 75	EVOLUTION DE LA DEFORMATION MAXIMALE GENEREE DANS LA COUCHE.....	107
FIGURE 76	EVOLUTION DE LA DUREE DE VIE DE L'ENROBE PAR RAPPORT A L'AUGMENTATION DE TAUX DE PEBD.....	112

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 ESSAIS DE CARACTERISATION D'AE.....	23
TABLEAU 2 DIRECTIVES DE SELECTION DES LIANTS POUR LES ENROBES RECYCLES FOURNIES PAR LE PROJET NCHRP 9-46 (AASHTO)	27
TABLEAU 3 TENEUR EN BITUME DU MATERIAU RAP.....	52
TABLEAU 4 CARACTERISTIQUES DU LIANT EXTRAIT DU RAP	52
TABLEAU 5 ANALYSE GRANULOMETRIQUE DES GRANULATS DU MATERIAU RAP	53
TABLEAU 6 CARACTERISTIQUES DES GRANULATS D'ENROBE RAP	54
TABLEAU 7 CARACTERISTIQUES DES DECHETS PLASTIQUES	55
TABLEAU 8 POIDS DES DECHETS PLASTIQUES ADDITIONNES EN FONCTION DE POURCENTAGE DESIRE	57
TABLEAU 9 CARACTERISTIQUES DES CORPS D'EPREUVE (DULORME).....	59
TABLEAU 10 VALEURS ADMISSIBLES DES RESULTATS SELON LE TYPE DE L'ENROBE (GRADE DE BITUME 35/50) NF EN 12697-12	60
TABLEAU 11 SPECIFICATION DES VALEURS D'INDICE DE VIDE EN FONCTION DU NOMBRE DE ROTATIONS LCPC.....	63
TABLEAU 12 VALEURS ADMISSIBLES (BITUME 35/50) LCPC.....	65
TABLEAU 13 DIMENSIONS DES EPROUVETTES POUR CHAQUE TYPE D'EPROUVETTE ET CHAQUE GRANDEUR (D).....	67

TABLE DES MATIERES

1.	ETAT DE L'ART	16
1.1	Introduction	16
1.2	Le vieillissement du bitume	16
1.2.1	Le vieillissement physique.....	17
1.2.2	Le vieillissement chimique.....	17
1.2.3	Mécanismes de l'oxydation de composés hydrocarbonés	17
1.2.4	Oxydation de l'enrobé bitumineux dans la chaussée et cinétiques d'oxydation	18
1.2.5	Impact du vieillissement sur les fractions du bitume	18
1.2.6	Simulation du vieillissement en laboratoire.....	19
1.3	Recyclage des enrobés.....	20
1.4	Préparation au recyclage des déchets résultants	20
1.5	Evolution et intérêt de l'utilisation des AE.....	20
1.6	Techniques de recyclage des agrégats d'enrobé AE.....	21
1.7	Caractéristiques des agrégats d'enrobé (AE).....	22
1.8	Propriétés du liant d'agrégat d'enrobé (LAE).....	23
1.9	Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier IRTF	24
1.10	Propriétés des granulats d'agrégats d'enrobé (GAE)	25
1.11	Taux de recyclage des enrobés	25
1.12	Formulation et fabrication des enrobés contenant des AE.....	26
1.13	Ajustement des caractéristiques du liant d'apport	26
1.14	Ajustement des caractéristiques des granulats d'apport.....	28
1.15	Mode opératoire pour la fabrication en laboratoire du mélange bitumineux contenant des AE ..	28
1.15.1	Séchage des constituants	28
1.15.2	Mise en température de bitume	28
1.15.3	Mise en température des granulats et agrégats d'enrobé	28
1.15.4	Malaxage.....	29
1.16	Performances mécaniques des enrobés contenant des AE	29
1.16.1	Notion d'homogénéité du mélange entre le liant vieux et le liant neuf.....	29
1.16.2	Méthodes de détermination du degré d'homogénéité du mélange.....	30
1.16.2.1	Essai de NGUYEN (NGUYEN, M, 2009).....	30
1.16.2.2	Essai de Navaro (Navaro, 2011).....	31
1.16.2.3	Essai de Vassaux (Vassaux, 2017)	33
1.16.2.4	Essai de Gaspar (Gaspar, & al., 2020)	33
1.16.3	Les éléments impactant le niveau d'homogénéité du mélange.	34
1.16.4	Action du degré de mélange sur les performances mécaniques	37
1.16.4.1	Rigidité.....	37
1.16.4.2	Fatigue.....	39
1.16.4.3	Comportement à basse température	42
1.17	La régénération du bitume	43
1.17.1	Composés chimiques essentiels au processus de régénération du bitume vieilli	43

1.17.2	Principaux composés chimiques utilisés dans la régénération du bitume	43
1.17.3	Mécanismes de régénération du bitume	45
1.18	Incorporation des déchets plastiques dans les mélanges bitumineux.....	46
1.18.1	Propriétés mécaniques améliorées.....	46
1.18.2	Durabilité améliorée.....	48
1.18.3	Avantages environnementaux	48
1.18.4	Inconvénients	49
2.	PROCEDURE EXPERIMENTALE	51
2.1	Introduction	51
2.2	Provenance des matériaux utilisés.....	51
2.3	Caractérisation des matériaux.....	52
2.4	L'enrobé recyclé.....	52
2.4.1	Prélèvement et identification	52
2.4.2	Teneur en bitume par extraction méthode Kumagawa EN 12697-1	52
2.4.3	Caractéristiques du liant extrait du RAP	52
2.4.4	Analyse granulométrique des granulats du matériau RAP.....	52
2.4.5	Classification du matériau agrégat d'enrobé RAP selon XP P 98-135.....	53
2.4.6	Caractérisation des granulats.....	54
2.5	Déchets plastiques.....	54
2.6	Préparation des matériaux	56
2.6.1	Les agrégats d'enrobé (RAP) :.....	56
2.6.1.1	Le séchage.....	56
2.6.1.2	Préchauffage du matériau RAP	56
2.6.2	Les déchets plastiques.....	56
2.6.2.1	Le préchauffage.....	56
2.6.3	Le dosage en liant supplémentaire du mélange	56
2.7	Préparation des échantillons	57
2.7.1	Introduction des déchets plastiques	57
2.7.2	Malaxage du mélange.....	57
2.7.3	Moulage et compactage des corps d'épreuve	58
2.7.4	Sciage et collage des corps d'épreuve	58
2.7.5	Conservation des corps d'épreuve	58
2.7.6	Pourcentage de vides des corps d'épreuve.....	58
2.8	Compagne d'essais au laboratoire	59
2.8.1	Mesure de la tenue à l'eau DURIEZ (NF P 98-251-1) méthode B	59
2.8.2	Essai à la presse à cisaillement giratoire PCG (NF EN 12697-31)	61
2.8.3	Mesure de la profondeur de l'orniérage NF EN 12697-22	64
2.8.4	Module complexe et résistance à la fatigue.....	66
2.9	Structure de la présentation des résultats :	74
2.10	Valeurs de référence :	74
2.11	Les essais de niveau 1.....	74
2.11.1	Optimisation de l'épaisseur des feuillets de plastique par l'essai (DURIEZ).....	74
2.11.2	L'essai de la tenue à l'eau DURIEZ	77
2.11.3	Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG)	82

2.12	Les essais de niveau 2.....	85
2.12.1	Essai de la déformation permanente (Orniérage).....	85
2.13	Les essais de niveau 3 (Module complexe).....	88
2.13.1	Réglage et calage de la machine (données d'entrée)	88
2.13.2	Résultats obtenus	88
2.13.3	Synthèse des résultats du module pour différents dosages	93
2.14	Les essais de niveau 4 (Résistance à la fatigue).....	95
2.14.1	Réglage et calage de la machine (données d'entrée)	95
2.14.2	Résultats obtenus	95
2.14.3	Droite de fatigue (courbe de Wöhler) : $\text{Log}(N) = a + 1/b \text{Log}(\epsilon)$	98
3.	Application numérique programme ALIZE – LCPC.....	101
3.1	Principe de calcul du programme ALIZE-LCPC.....	101
3.2	Evolution de la déformation générée sur une chaussée donnée par rapport à l'évolution du module de rigidité (dosage en plastique PEBD) :	102
3.3	Calcul de la durée de vie supplémentaire générée par les nouveaux paramètres (Module + Fatigue).....	107

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le trafic routier connaît une croissance continue à l'échelle mondiale. En Algérie, pays en voie de développement, la route constitue l'infrastructure dominante pour le transport des personnes et des marchandises. Depuis les années 2000, les investissements dans les infrastructures routières se sont intensifiés, notamment avec la construction de l'autoroute Est-Ouest, longue de plus de 1200 km, et de plusieurs autoroutes pénétrantes reliant les zones portuaires aux hauts plateaux. Cette expansion s'accompagne d'une augmentation significative du parc automobile, passé de 2,7 millions de véhicules en 1997 à 7,7 millions en 2020, dont 13,55 % de poids lourds (ONS, 2020). Ce développement exerce une pression croissante sur les ressources naturelles nécessaires à la construction et à l'entretien des routes, en particulier les granulats et le bitume.

Dans ce contexte, l'utilisation de matériaux recyclés tels que les agrégats d'enrobés (RAP), issus du fraisage des revêtements existants, apparaît comme une solution prometteuse pour préserver les ressources, réduire les émissions de gaz à effet de serre et améliorer la durabilité des infrastructures routières. L'ajout de déchets plastiques dans les enrobés recyclés est une piste innovante qui pourrait renforcer leurs performances tout en contribuant à la valorisation des déchets et à la protection de l'environnement. Cette approche s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, où les matériaux en fin de vie sont réintégrés dans le cycle de production, réduisant ainsi l'impact environnemental global du secteur routier. Au-delà des applications routières, ces enrobés modifiés par plastiques peuvent également être utilisés dans les terrasses de bâtiments et dans les façades comme solution d'isolation thermique par l'extérieur (ITE), offrant ainsi une extension de leur champ d'usage vers le domaine du bâtiment.

De nombreuses études ont démontré les bénéfices environnementaux, économiques et techniques de l'utilisation des RAP. Par exemple, l'incorporation de 25 % de RAP permettrait de réduire de 10 % les émissions de gaz à effet de serre (NAPA, 2009), tandis que des taux de 30 à 70 % réduisent les émissions de CO₂ de 20 à 35 % (ZAUMANIS & al, 2014), (Moghaddam & Baaj, 2016), (Lopez & al., 2015). En plus des bénéfices environnementaux, l'utilisation des RAP engendre des économies pouvant atteindre 70 % du coût total selon le taux d'incorporation et la localisation des centrales (Antunes & al., 2019), (COTITA, 2012).

Sur le plan technique, les enrobés contenant du RAP présentent des performances intéressantes : amélioration de la résistance à l'orniérage (Wang, 2016), augmentation du module dynamique (Visintine & al., 2013), et meilleure tenue à l'eau (Xiao et al., 2009). Toutefois, des limites persistent, notamment la rigidité accrue du liant vieilli, sa sensibilité à la fissuration et sa faible adhésivité en présence d'humidité (Goli & Latifi, 2020). Des essais ont révélé que des taux élevés de bitume vieilli réduisent la résistance à la fatigue (Xiao & al., 2019), (Zhou & al., 2019). Pour pallier ces défauts, plusieurs approches ont été explorées : l'ajout d'additifs régénérants (Song & Huang, 2018), (Nahar & al., 2014), ou la modification des bitumes avec des polymères (Sharp & al., 2017), (Costa & al, 2013), (Gürü & al., 2014). Les polymères comme le HDPE améliorent la rigidité et la résistance à la fissuration à basse température (-10 °C) (Attaelmanan & al., 2011), tandis que les mélanges modifiés au SBS ou aux pneus broyés (CR) offrent de meilleures performances à haute température (Ren & al., 2020). Une revue de littérature sur les plastiques recyclés (LDPE, HDPE, PET, PP) a montré qu'ils améliorent la stabilité Marshall et la résistance à la fatigue à partir d'un dosage de 4,5 % du poids du bitume (Rahman & al., 2020), (Leng & al., 2018).

Cependant, l'impact environnemental des plastiques reste débattu : certains travaux évoquent le risque de formation de microplastiques (Royer et al., 2018), tandis que d'autres n'ont relevé

aucun effet négatif (White, 2019), (Ponnada & Vamsi, 2020). Malgré ces avancées, peu de recherches ont porté sur l'utilisation directe de déchets plastiques recyclés dans les enrobés 100 % RAP, en particulier via la méthode sèche.

Malgré les nombreux avantages démontrés, l'utilisation des RAP à grande échelle reste limitée, notamment en Algérie, en raison du manque de recherche locale, de la disponibilité de matériaux vierges à bas coût, et de la méfiance des acteurs du secteur. De plus, la rigidité du bitume vieilli et sa faible adhésivité posent des défis techniques majeurs. Par ailleurs, la littérature reste encore peu fournie sur l'utilisation directe de déchets plastiques recyclés (sous forme de feuilletes) dans les enrobés 100 % recyclés, en particulier via la méthode sèche.

La question centrale est donc si l'on peut améliorer les performances mécaniques et environnementales des enrobés recyclés en y incorporant des déchets plastiques broyés, tout en assurant leur durabilité et leur sécurité d'usage. Cette problématique soulève des enjeux techniques, économiques et environnementaux qui nécessitent une approche expérimentale rigoureuse. Elle interroge également la capacité des infrastructures routières à intégrer des solutions innovantes dans un cadre normatif encore peu adapté à l'usage de matériaux alternatifs.

La présente étude propose d'examiner les performances d'un enrobé bitumineux issu à 100 % de RAP, modifié par l'ajout de fibres plastiques de forme polygonale (feuilletes) de 0 à 15 mm, issues de déchets plastiques broyés. Contrairement aux approches classiques utilisant des granulés de polymères de 1 à 4 mm par voie humide (Chin & Damen, 2019), cette étude adopte la méthode sèche. La taille des feuilletes, leur épaisseur ainsi que le type de plastique seront examinés afin d'obtenir des mélanges capables de résister au phénomène d'orniérage et de fatigue.

Les performances seront évaluées à travers des essais normalisés tels que la tenue à l'eau par l'essai DURIEZ, la résistance en fatigue et le module complexe. L'objectif est de déterminer les conditions optimales d'incorporation pour garantir des performances équivalentes, voire supérieures, aux enrobés traditionnels. Cette approche permettra également de mieux comprendre les interactions physico-chimiques entre les plastiques recyclés et les liants bitumineux vieillissants.

L'objectif principal est de développer un mélange bitumineux 100 % recyclé, performant et durable, intégrant des déchets plastiques comme additifs. Les résultats attendus sont :

- Une amélioration de la sensibilité à l'eau du matériau étudié
- Une bonne aptitude au compactage
- Une amélioration de la résistance à l'orniérage et à la fatigue.
- Une augmentation de durée de vie du matériau étudié par rapport au matériau de référence

Ce travail s'inscrit dans une démarche de développement durable et d'innovation dans le domaine des infrastructures routières. Il vise à proposer une alternative concrète aux matériaux traditionnels, en valorisant des déchets plastiques qui représentent une source abondante et souvent mal exploitée. En intégrant ces polymères dans des enrobés entièrement recyclés, l'étude cherche à concilier performance technique, réduction des coûts et respect de l'environnement. Elle pourrait également ouvrir la voie à une révision des normes et des pratiques en matière de construction routière en Algérie, en encourageant l'adoption de solutions plus responsables et plus adaptées aux enjeux actuels.

En définitive, cette recherche ambitionne de fournir des données expérimentales utiles aux professionnels du secteur, tout en contribuant à une meilleure compréhension des matériaux recyclés dans les infrastructures routières. Elle s'inscrit dans une logique de transition vers des infrastructures plus durables, plus résilientes et plus respectueuses des ressources naturelles.

CHAPITRE I
ETAT DE L'ART

1. ETAT DE L'ART

1.1 Introduction

Cette revue de littérature synthétise les connaissances actuelles sur les revêtements bitumineux incorporant des granulats recyclés et des additifs polymères ou des déchets plastiques par procédé à sec, dans le but de définir le contexte général de la présente étude.

Le matériau le plus recyclé au monde est l'enrobé bitumineux, avec un taux de recyclage pouvant atteindre 80% en volume. En 2009, en France, les divers intervenants chargés de la mise en œuvre des infrastructures routières ont conclu un accord de volontariat appelé convention d'engagement volontaire (CEV). Ils ont pris l'engagement de diminuer de 33% les émissions de gaz à effet de serre (GES) et de réutiliser ou valoriser intégralement 100% des matériaux géologiques naturels excavés sur les chantiers d'ici à 2020. En janvier 2021, cet engagement a été réaffirmé par la signature d'un pacte supervisé par le ministère des Transports et l'IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité) (Ziade Elio, 2023). Ce pacte présente de nouveaux engagements visant à relever les défis de la transition écologique, énergétique et numérique. Étant donné l'importance du recyclage des enrobés, ce chapitre présente le cycle de vie d'une chaussée.

Tout d'abord, des considérations générales concernant la configuration d'une chaussée, sa constitution en matériaux bitumineux et les essais de caractérisation mécanique de ces matériaux sont exposées. La chaussée est soumise à diverses contraintes telles que le trafic et les conditions météorologiques, ce qui entraîne sa détérioration. Cette menace peut se manifester de diverses manières, mettant ainsi en danger la chaussée.

Lorsque la chaussée subit des dommages, des opérations de maintenance sont entreprises. Ces travaux consistent à substituer entièrement ou partiellement la structure routière existante par une nouvelle. Les résidus bitumineux engendrés lors du processus de démantèlement de la chaussée, connus sous le nom d'Agrégats d'Enrobés (AE), subissent un processus de recyclage afin d'être réincorporés dans de nouvelles compositions d'enrobé. Les caractéristiques des agrégats d'enrobé et les diverses méthodes de recyclage sont examinées.

Une section est dédiée à une revue de la littérature concernant l'impact des agrégats d'enrobé sur les caractéristiques mécaniques des enrobés et la réactivité face au taux de réincorporation du matériau vieillis dans le matériau neuf.

La deuxième section traite d'une revue de la littérature concernant les effets des matières plastiques, en mettant particulièrement l'accent sur celles provenant des déchets. Elle examine les récentes avancées dans l'utilisation de ces matières pour améliorer les caractéristiques et les performances des enrobés bitumineux.

1.2 Le vieillissement du bitume

Le bitume subit des transformations en réponse aux altérations physiques et chimiques auxquelles il est exposé. Le processus de vieillissement se caractérise par une augmentation de la rigidité du bitume et une augmentation de sa fragilité. Ce phénomène peut résulter de l'interaction entre le durcissement physique et le vieillissement chimique, comme mentionné par (Petersen, 1975), (Anderson & al., 1994), (Branthaver & al., 1994), (Lu et Ulf., 2002). Diverses phases du cycle de vie du bitume peuvent être identifiées en relation avec les étapes clés de son processus de vieillissement. Pendant la phase de conditionnement à court terme,

comprenant le malaxage, l'enrobage avec les granulats, le transport sur site, le répandage et le compactage, le bitume est soumis à des températures élevées en présence d'oxygène pendant une période brève. Une oxydation rapide et intense peut se produire en raison d'une importante contribution d'énergie thermique. Selon (RAMOND, G., & SUCH, 1990), Le processus de vieillissement à long terme, qui se réfère à la durée de vie du bitume sur la chaussée, implique des cinétiques d'oxydation plus lentes. Il est réalisé à une température plus basse. Dans cette situation, la propagation de l'oxygène et le mécanisme d'activation de la réaction sont des éléments clés (Petersen & al., 1998). (Petersen, 2009).

1.2.1 Le vieillissement physique

Pendant le processus de vieillissement physique, il n'y a pas de changements chimiques observés au niveau des macromolécules et aucune variation de masse n'est détectée. Il s'agit d'une réorganisation réversible de la structure moléculaire, en particulier des asphaltènes, qui peut se produire pendant la mise en œuvre, le stockage ou en réponse à des chocs thermiques. Le phénomène connu sous le nom de durcissement stérique suscite encore des débats quant à sa réversibilité totale par l'effet de la température.

En effet, cette réorganisation induite par des interactions faibles devient de plus en plus complexe à mesure que la température s'élève. Il est largement accepté que ce phénomène de vieillissement est favorisé à des températures basses. (Bartolomeo, 2003; Frolov & al., 2016; Karlsson & Ulf, 2006; Petersen, 1984).

1.2.2 Le vieillissement chimique

Le processus de vieillissement chimique englobe toutes les réactions qui peuvent altérer la composition d'un matériau. Parmi ces processus, on peut mentionner l'évaporation de composés volatils, les ruptures de chaînes, la réticulation et l'oxydation, comme indiqué par (Siddiqui & Ali, 1999; Tauste & al., 2018) De manière générale, le matériau devient plus rigide. Les interruptions de la chaîne provoqueront la formation de molécules ayant des masses moléculaires plus faibles, comme c'est le cas avec la désalkylation. La réticulation aura un effet opposé. Une tendance générale montre une hausse de la masse moléculaire et une baisse de la mobilité moléculaire, comme indiqué par (Bartolomeo, 2003).

Les principales évolutions examinées lors du processus de vieillissement chimique des bitumes concernent les réactions qui entraînent l'absorption de l'oxygène atmosphérique par les molécules de bitume et la transition vers des états plus oxydés à travers des mécanismes complexes.

1.2.3 Mécanismes de l'oxydation de composés hydrocarbonés

L'oxydation des composés hydrocarbonés est principalement effectuée par un mécanisme radicalaire en chaîne. La rupture homolytique d'une liaison covalente carbone-hydrogène engendre la formation d'un radical libre, permettant ainsi un transfert de chaîne. La scission homolytique carbone-hydrogène peut être alimentée de diverses manières en énergie. En présence d'une agression par rayonnement ultraviolet (UV), il est question d'une réaction photochimique, tandis que dans le cas d'une oxydation, on observe un effet couplé photo-oxydatif. Lorsque la température agit en tant qu'amorceur, on fait référence au phénomène de vieillissement thermo-oxydatif. Les radicaux libres, de par leur grande réactivité, ont une durée de vie très brève. Ils vont induire la propagation de l'oxydation à travers un mécanisme de réactions en chaîne qui peut être représenté par les étapes réactionnelles définies dans les travaux de (Bartolomeo, 2003; Cho L.F., 1982; Denis & al., 1997)

Au sein du revêtement routier, les processus d'oxydation entraînent la création de différentes entités chimiques telles que les cétones, les acides carboxyliques, les anhydrides d'acides carboxyliques et les sulfoxydes. Dans ses recherches, (Petersen & al., 1998; Petersen, 1984, 2009) a identifié divers mécanismes d'oxydation des composés du bitume, mettant en lumière la création de nouvelles fonctions carbonyles et sulfoxydes.

1.2.4 Oxydation de l'enrobé bitumineux dans la chaussée et cinétiques d'oxydation

L'importance des réactions d'oxydation est dépendante de la quantité d'oxygène disponible sur les sites réactifs. Par conséquent, la profondeur des sites réactifs du bitume par rapport à la surface, la porosité des granulats et la communication des vides dans la structure d'un enrobé bitumineux sont des paramètres cruciaux qui influent sur la perméabilité à l'air, à l'eau et à l'oxygène (Cui & al., 2018). Seule la couche de bitume en surface est exposée au rayonnement solaire, incluant les rayons UV. Ces derniers, conjugués aux effets thermiques des rayons infrarouges, induisent des réactions de photo-oxydation. Toutefois, ce rayonnement présente une faible capacité de pénétration, restreignant ainsi son influence à une profondeur de quelques micromètres sous la surface. Il est largement accepté que la photo-oxydation a un impact limité par rapport à la thermo-oxydation, bien que les produits formés puissent se déplacer vers l'intérieur du matériau lors d'une exposition prolongée (Verhasselt, 1999).

L'analyse des groupements oxygénés peut être réalisée en utilisant la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF), en se concentrant sur les bandes caractéristiques des fonctions carbonyles (environs 1700 cm⁻¹) et des fonctions sulfoxydes (environs 1030 cm⁻¹). La quantité d'espèces oxygénées est évaluée de manière semi-quantitative en référence aux groupements éthylène et méthylène, qui restent stables pendant l'oxydation (Mouillet & al., 2010).

Le processus de vieillissement du bitume est caractérisé par la coexistence de deux phénomènes concurrents :

L'oxydation et la diffusion de l'oxygène sont des processus essentiels en chimie et en physique. (Cui & al., 2018; Jin & Glover, 2013) décrivent la compétition entre les réactions d'oxydation et la diffusion de l'oxygène dans les autres parties de la chaussée. La diffusion est définie par un coefficient qui varie en fonction de l'état physique de la substance. La solidification du bitume entraîne une diminution du coefficient de diffusion de l'oxygène, ce qui altère la cinétique effective de l'augmentation de l'aire carbonyle.

1.2.5 Impact du vieillissement sur les fractions du bitume

Le processus de vieillissement oxydatif entraîne des modifications dans la composition chimique, lesquelles peuvent se refléter à une échelle plus large dans les proportions des familles génériques SARA. On a constaté une augmentation de la proportion des asphaltènes et une diminution de celle des maltènes. En raison de leur faible réactivité, les composés saturés restent peu ou pas altérés, tandis que les composés aromatiques diminuent au profit des asphaltènes. Les résines présentent des variations minimales, principalement dues à la diminution de la fraction oxydable en asphaltènes, ainsi qu'à la formation de nouvelles résines par oxydation de certains composés aromatiques. (Petersen, 1984), (Farcas, 1996).

L'évolution vers une polarité croissante des groupes fonctionnels lors du vieillissement peut entraîner des interactions moléculaires susceptibles de provoquer une restructuration du bitume. Des populations de masses moléculaires plus élevées sont ainsi générées. L'utilisation de méthodes telles que la chromatographie par perméation de gel (GPC) a été essentielle pour parvenir à cette observation (Brulé, 1987), (RAMOND, G., & SUCH, 1990), (Le Guern, 2010). La Figure 1-15, provenant de l'étude de Le Guern et al., illustre la variation de l'intensité du pic

associé au temps d'élution le plus court lors d'un processus de vieillissement artificiel. Il est couramment associé aux asphaltènes, qui sont des molécules de plus grande taille présentes dans le bitume.

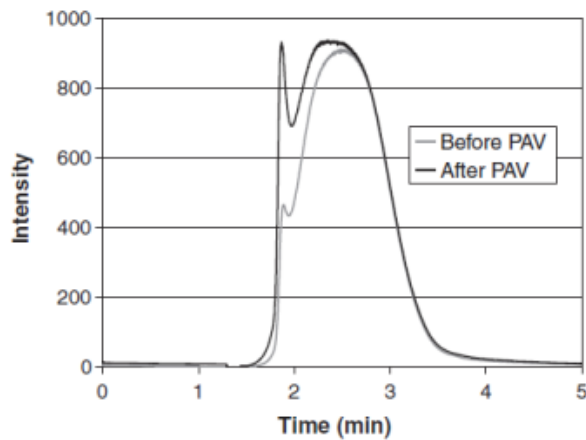


Figure 1 Chromatogramme d'un bitume avant et après un procédé de vieillissement au laboratoire (PAV). L'accroissement de l'intensité de la première bande signale de plus nombreux gros éléments (Le Guern, 2010).

Alors que la réversibilité des mécanismes de vieillissement physique semble possible, les réactions conduisant au vieillissement chimique sont bien plus difficiles à inverser. De ces processus, l'évaporation de composés volatils et l'oxydation altèrent de manière constante la structure et la mobilité moléculaire des composés présents dans le bitume. On peut donc anticiper une évolution constante et irréversible des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau au cours du processus de vieillissement.

1.2.6 Simulation du vieillissement en laboratoire

Il est complexe de réaliser des expérimentations de suivi du vieillissement dans des conditions naturelles réelles du bitume, sur des infrastructures conçues pour avoir une durabilité allant parfois jusqu'à plusieurs décennies. Pour diminuer les délais d'analyse en laboratoire, il est essentiel de favoriser le processus de vieillissement afin de faciliter l'accès aux caractéristiques des bitumes vieillis.

Cependant, la maîtrise de ces essais s'avère délicate. D'une part, il est nécessaire de saisir de manière précise les effets in-situ de toutes les contributions au processus de vieillissement. D'un autre côté, il est nécessaire de pouvoir reproduire ces contributions en sélectionnant soigneusement les facteurs d'accélération à renforcer. Pour faciliter les expérimentations, il est fréquent de limiter leur nombre en variant des paramètres tels que la température, la concentration en agents agressifs (pression d'oxygène, exposition aux rayonnements UV), comme mentionné par (Bartolomeo, 2003), (Tauste & al., 2018).

Diverses approches sont disponibles pour modéliser les effets du vieillissement sur le bitume.

Deux essais couramment employés pour reproduire le processus de vieillissement du bitume en laboratoire sont le Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) et le Pressure Ageing Vessel (PAV). Ils représentent, l'un, un processus de conditionnement à court terme et, l'autre, un processus de vieillissement oxydatif à long terme. La méthode de vieillissement RTFOT suivie du PAV est

conçue pour reproduire un processus de vieillissement sur le terrain équivalent à une période de 5 à 10 ans (Lesueur, 2012). Mouillet et ses collaborateurs ont démontré que, pour certains types de bitumes, cette méthode ne reproduit que l'équivalent de 1 à 2 années de vieillissement sur le terrain (Mouillet et al., 2008).

Certains auteurs peuvent parfois opter pour la combinaison de plusieurs cycles de RTFOT et/ou de PAV afin de reproduire de manière plus précise le processus de vieillissement (Koudelka, 2018).

1.3 Recyclage des enrobés

Les déchets bitumineux résultants des chantiers d'entretien et de réhabilitation des autoroutes, des routes et des rues sont appelés des agrégats d'enrobé (AE). Ces produits sont élaborés après fraisage, concassage, calibrage et stockage afin d'être utilisés dans les mélanges d'enrobés neufs. Les enrobés recyclés sont obtenus en incorporant des agrégats d'enrobé dans la formulation des enrobés bitumineux.

1.4 Préparation au recyclage des déchets résultants

Les Agrégats d'Enrobés, tout comme tous les déchets destinés à être réutilisés ou recyclés, font l'objet d'une caractérisation et d'un contrôle rigoureux. Il est essentiel de s'assurer de l'absence de substances dangereuses et polluantes telles que l'amiante (conformément au Décret 2012-639) et les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) dans la chaussée. Le recyclage de l'enrobé contenant ces produits est envisageable, mais il est soumis à des conditions en lien avec leurs concentrations. (Colwill, 2001; IDRRIM, 2021)

La fabrication des agrégats d'enrobés (AE) s'effectue en trois phases :

1. Fraisage : Une fraiseuse est utilisée pour enlever la couche d'enrobé des chaussées en fin de vie utile. Il est préconisé de réaliser le fraisage de manière progressive par couches successives afin de garantir un contrôle optimal des caractéristiques et de l'homogénéité du futur produit AE.(IDRRIM, 2021). Les échantillons d'enrobé prélevés sont ensuite acheminés vers des installations de traitement des déchets bitumineux.
2. Concassage et criblage : Il s'agit d'une opération mécanique impliquant deux plaques métalliques utilisées pour comprimer les plaques d'enrobé récupérées pendant le fraisage. Le processus de criblage est utilisé pour améliorer la distribution granulométrique afin d'optimiser le pourcentage d'agrégats d'enrobé introduit dans les mélanges bitumineux.
3. Stockage : Le produit obtenu après le criblage est récupéré afin d'être stocké. Il est nécessaire de le protéger afin de réduire l'humidité.

1.5 Evolution et intérêt de l'utilisation des AE

Le béton bitumineux est un matériau entièrement recyclable. Initialement, l'aspect économique constituait le principal incitatif au recyclage des chaussées ou d'autres déchets. Les matériaux d'excavation sont facilement accessibles à un coût abordable sur le site ou à proximité, ce qui permet d'éviter le recours à de nouveaux matériaux granulaires et leur transport. Au fil des

dernières décennies, la durabilité, la protection de l'environnement et une réflexion accrue sur le cycle de vie ont acquis une importance croissante en ce qui concerne le recyclage des chaussées et d'autres déchets. Ces aspects sont considérés comme essentiels pour des raisons similaires : réduction du transport de matériaux, diminution des émissions de gaz à effet de serre, moindre consommation d'énergie pour la préparation des matériaux et préservation des ressources naturelles. Par exemple, l'utilisation des coques de noix de palmiste en remplacement des granulats naturels dans la construction routière illustre cette approche (Koti.J, 2022).

Étant donné la longue tradition de recyclage en France, il est légitime de s'interroger sur le concept de multi-recyclage, qui consiste à recycler des chaussées contenant déjà des ajouts d'Agent d'Enrobés (AE). Le Projet National MURE (2014-2021) visait à évaluer la durabilité des enrobés contenant des agrégats d'enrobés recyclés multiples grâce à des techniques de fabrication à chaud et à tiède. Les résultats des expérimentations réalisées dans le cadre de ce projet démontrent que, à des taux de recyclage élevés, les performances des enrobés bitumineux demeurent en conformité avec la norme 13108-1 même après trois cycles de recyclage. Les techniques de production, qu'elles soient à haute température ou à température modérée, ne semblent pas restreindre la capacité de recyclage multiple (Dony, A.& al., 2019).

Toutefois, des défis subsistent en ce qui concerne le recyclage des enrobés, notamment :

- Le recyclage des chaussées est une opération à risque élevé, ce qui soulève des interrogations quant à la qualité des mélanges bitumineux obtenus.
- Le coût des matériaux recyclés peut parfois ne pas être concurrentiel par rapport aux granulats naturels.
- La complexité inhérente à l'extraction de contaminants des matériaux recyclés,
- Les défis pratiques associés aux matériaux et aux méthodes, souvent spécifiques à chaque site.

La majorité, voire la totalité de ces obstacles, peuvent être contournés. Des initiatives de recherche, telles que le Projet National MURE, ont grandement contribué à combler le déficit de connaissances scientifiques et techniques en matière de recyclage.

1.6 Techniques de recyclage des agrégats d'enrobé AE

Diverses méthodes sont mises en œuvre pour fabriquer des enrobés recyclés. Ces deux méthodes se distinguent par la température à laquelle l'enrobé est produit. (USIRF-Route de France, 2013).

- Enrobés à chaud : Ce type d'enrobé est produit dans des centrales d'enrobage à des températures comprises entre 130°C et 180°C, selon le type de liant. Cette température permet de mélanger des granulats secs ;
- Enrobés tièdes : Ce genre d'enrobé est fabriqué dans des centrales d'enrobage à des températures variant entre 130°C et 180°C, en fonction du type de liant utilisé. Cette température est suffisante pour effectuer le mélange des granulats secs.

- Enrobés à froid : Cette approche nécessite l'utilisation d'une émulsion bitumineuse, ce qui permet de contourner les phases de séchage et de chauffage des granulats.

Ces méthodes se différencient également par le site de mélange, qu'il soit centralisé ou décentralisé. Le choix des techniques à utiliser dépend des performances souhaitées pour l'enrobé produit, ainsi que des applications spécifiques découlant des avancées techniques propres à chaque pays. La Figure 1 illustre les diverses techniques. Malgré l'évolution des techniques à froid, celles-ci ne sont pas encore couramment employées pour les chaussées à fort trafic.

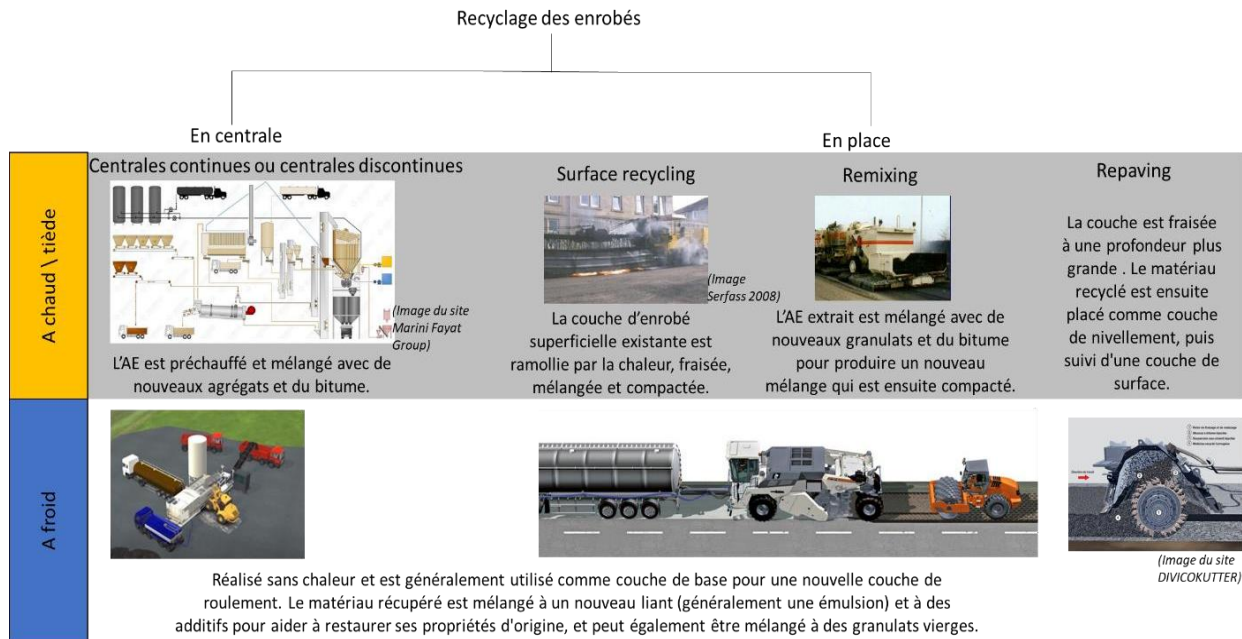


Figure 2 Les différentes techniques de recyclage des enrobés

1.7 Caractéristiques des agrégats d'enrobé (AE)

Outre les considérations sanitaires précédemment évoquées (telles que le contrôle des HAP et de l'amiante), il est essentiel de contrôler la qualité et l'uniformité des caractéristiques des agrégats d'enrobé pour pouvoir les intégrer dans de nouveaux mélanges. Il est essentiel de prendre en compte les propriétés des agents d'enrobage lors de l'élaboration des mélanges afin d'assurer des performances comparables à celles des enrobés frais. Le guide technique (IDRRIM, 2021) spécifie les taux d'ajout d'émulsion d'asphalte autorisés pour les couches de roulement, de liaison et d'assise en fonction des caractéristiques de l'émulsion d'asphalte, pouvant atteindre 40%. Les études menées par (IDRRIM, 2021) sur l'identification des stocks d'AE peuvent être classées en trois catégories, comme indiqué dans le Tableau 1 :

Tableau 1 Essais de caractérisation d'AE

Matériaux	Essais	Normes
Agrégats d'enrobé (AE)	Teneur en matériaux étrangers (bois, béton, polystyrène... de dimension > 8 mm)	NF EN 12697-42
	Dimension apparente (Analyse granulométrique par tamisage avant désenrobage)	NF EN 933-1
	Homogénéité de la teneur en liant (TL)	NF EN 12697-1
	Masse volumique réelle (MVRe)	NF EN 12697-5
Granulats de l'AE (GAE)	Analyse granulométrique après désenrobage (tamis 1.4 D ; D ; 6.3 mm ; 2 mm ; 0.250 mm et 0.063 mm)	NF EN 12697-2
	Angularité des alluvionnaires (uniquement pour un usage en couche de roulement et de liaison)	NF EN 933-5 NF EN 933-6
	Résistance à l'usure d'un échantillon de granulat, résistance à la fragmentation d'un gravillon (Los Angeles)	NF EN 1097-1,2
	Résistance au polissage (PSV)	NF EN 1097-8
Bitume de l'AE (LAE)	Pénétrabilité à 25 °C, 100 g, 5 s après récupération du liant	NF EN 1426 NF EN 12697-3
	Point de ramollissement (TBA) après récupération du liant	NF EN 1427 NF EN 12697-3
	Présence de liant modifié par des polymères, bitume pur, bitume dur ou contenant un additif	Méthode d'essai interne

1.8 Propriétés du liant d'agrégat d'enrobé (LAE)

En règle générale, le bitume subit deux types de vieillissement : un vieillissement à court terme et un vieillissement à long terme. Pendant la phase de production à court terme en centrale, le matériau est exposé à des températures élevées comprises entre 135 et 163°C. Cette exposition entraîne une augmentation significative de la viscosité du matériau, ce qui engendre

des changements dans ses caractéristiques rhéologiques et physico-chimiques, notamment dans le module de cisaillement complexe et l'adhésion. Pendant sa période d'utilisation, le liant bitumineux subit un processus de vieillissement et de durcissement progressif, causé par divers mécanismes. Le phénomène de durcissement par vieillissement, qui se manifeste tout au long du processus de fabrication et pendant la durée de vie en service, a été examiné en relation avec différents mécanismes importants majeurs (Karlsson, R., & Isacson, 2006; Roberts, & al., 1996; Tyrion.F.C, 2000).

- L'oxydation par réaction diffusive entre le liant et l'oxygène de l'air ;
- Volatilisation par évaporation des composants les plus légers, en particulier durant la fabrication ;
- Polymérisation par réaction chimique des composants moléculaires ;
- Thixotropie due à la formation d'une structure dans le liant bitumineux sur une longue période ;
- L'absorption des constituants huileux, des résines et des asphaltènes par des granulats minéraux.

1.9 Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier IRTF

La spectroscopie infrarouge par transformée de Fourier est utilisée pour différencier le liant d'apport du liant d'agrégats d'enrobé. La spectroscopie IRTF est fréquemment employée afin d'analyser les variations de composition chimique des hydrocarbures pétroliers, notamment dans le cadre des phénomènes de vieillissement artificiel ou naturel (Lamontagne & al., 2001; Mouillet et al., 2008).

Le processus de vieillissement des bitumes se manifeste par la création de groupes fonctionnels oxygénés tels que les groupes carboxyles (C=O) et sulphydes (S=O), qui résultent de l'interaction entre les liants bitumineux et l'oxygène de l'air. Ces propriétés chimiques spécifiques se manifestent par des pics observés à des nombres d'onde de 1700 cm⁻¹ et 1045 cm⁻¹, respectivement (Navaro, 2011) a réalisé une comparaison entre trois solutions bitumineuses ayant la même concentration (0,0080 ± 0,0002 g/g) en recourant à la spectrométrie IRTF (cf. Figure 3). Le tracé en pointillé représente la solution du liant d'apport non vieilli et non oxydé, tandis que le tracé en gras correspond à la solution du liant extrait des AE, qui est oxydé. Enfin, la ligne en pointillés illustre la solution contenant des fractions massiques équivalentes de liant d'apport et de liant provenant des agrégats d'enrobé.

Selon les données présentées dans la Figure 3, il est possible de constater que le spectre du liant d'apport ne présente aucun pic aux nombres d'ondes de 1700 cm⁻¹ et 1045 cm⁻¹. Le liant ancien montre des pics autour de ces valeurs d'ondes.

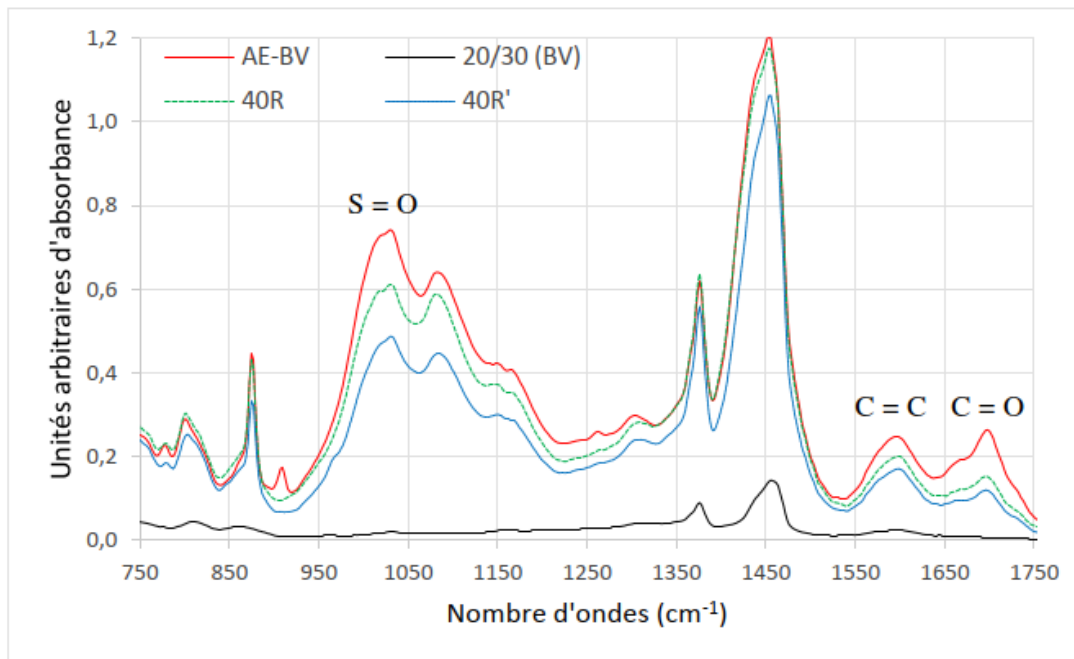


Figure 3 exemple des spectres IR pour différents bitumes (formules) (Nelson Andrey ALVARADO PATINO, 2018)

1.10 Propriétés des granulats d'agrégats d'enrobé (GAE)

Les caractéristiques des granulats d'origine peuvent être altérées par l'impact du trafic routier et des conditions météorologiques, ce qui les distingue des granulats neufs. Par exemple, (Kowalski, & al., 2016) ont démontré que le passage des essieux peut entraîner un phénomène de polissage des granulats exposés (GAE) qui altère la rugosité de la chaussée. Ce phénomène demeure marginal par rapport à la superficie soumise au processus de polissage, en comparaison avec la superficie totale des granulats (non traités et traités à l'émulsion d'asphalte).

1.11 Taux de recyclage des enrobés

Les enrobés recyclés sont principalement caractérisés par leur teneur en masse en agrégats d'enrobé. Cette grandeur massique est fréquemment désignée sous le nom de "taux de recyclage" ou "pourcentage de recyclage". En France, les pratiques courantes actuelles impliquent un taux de recyclage pouvant atteindre 30 %. Il est nécessaire de surveiller attentivement entre 30 et 40 % des points identifiés comme des zones de vigilance, en attendant le retour d'expérience, dans le but de renforcer la doctrine technique (IDRRIM, 2021). Selon les conclusions de l'expérience menée en France, les enrobés recyclés contenant jusqu'à 20% d'agrégats d'enrobés (AE) sont catégorisés comme des enrobés à "faible taux de recyclage", tandis que ceux renfermant entre 40% et 65% d'AE sont qualifiés d'enrobés à "fort taux de recyclage".

Selon la circulaire n° 2001-39 du 18/06/01 concernant la gestion des déchets du réseau routier national en France, les enrobés avec un faible taux de recyclage, inférieur ou égal à 10 %, sont dispensés de la réalisation d'essais préliminaires pour la caractérisation des granulats d'enrobé

employés dans les enrobés destinés aux couches de liaison, de base et de fondation. La composition des AE a peu d'influence sur ces mélanges (Xinjun & al., 2008). Pour les couches de roulement, il est nécessaire, dans certains cas en fonction du type d'enrobé et du niveau de trafic, de réaliser des études préliminaires pour déterminer les additifs d'enrobés utilisés.

L'utilisation d'enrobés contenant un taux moyen d'agents d'enrobage dans la couche de roulement peut avoir un impact sur l'adhérence des chaussées. Cette incidence découle de la contribution des additifs d'extrême pression à la microstructure et à la macrostructure.

Diverses recherches ont confirmé la possibilité de fabriquer des mélanges bitumineux avec une teneur élevée (supérieure à 40 % en poids) ou très élevée (jusqu'à 100 % en poids) en agent d'enrobage (Silva, & al., 2012). Les limitations pratiques entravant la possibilité d'augmenter la teneur moyenne en agent d'enrobage (AE) à plus de 15-30% en poids dans les mélanges bitumineux peuvent être regroupées en quatre catégories, à savoir la qualité des agrégats d'AE, les procédés utilisés dans les installations de production, la méthodologie de conception des mélanges, et les performances des mélanges finaux contenant des AE (Tarsi, & al., 2020).

1.12 Formulation et fabrication des enrobés contenant des AE

Les mélanges bitumineux incorporant des matériaux recyclés doivent être conçus de manière à garantir des performances équivalentes à celles des mélanges bitumineux vierges (neufs). Ces performances sont évaluées à l'aide d'essais réalisés lors d'une épreuve de formulation en laboratoire, comme indiqué dans le Tableau 2.

Pour parvenir aux performances désirées, il est nécessaire d'ajuster les caractéristiques des granulats et du liant utilisés.

1.13 Ajustement des caractéristiques du liant d'apport

Étant donné les caractéristiques du liant d'émulsion (AE) évoquées précédemment, le liant d'apport est conçu de manière à obtenir un liant dont les propriétés sont comparables à celles d'un bitume conventionnel utilisé dans la production d'enrobés bitumineux sans ajout d'émulsion. L'objectif de l'ajustement des caractéristiques d'un matériau d'apport est de compenser les caractéristiques d'un matériau d'élément d'assemblage en diminuant sa rigidité.

La norme NF EN 13108-1 de 2007 fournit un cadre pour l'évaluation des propriétés du liant d'apport en se basant sur les caractéristiques du liant d'émulsion et du liant issu du mélange.

La détermination des pénétrabilités (pen) est effectuée en utilisant l'équation 23 :

$$\%_{\text{mélange}} \times \log(\text{pen}_{\text{mel}}(\text{mm})) = \%_{\text{liant apport}} \times \log(\text{pen}_{\text{liant apport}}(\text{mm})) + \%_{\text{liant AE}} \times \log(\text{pen}_{\text{liant AE}}(\text{mm}))$$

Détermination des températures bille – anneau (TBA) : Équation 24

$$\%_{\text{mélange}} \times \text{TBA}_{\text{mélange}}(^{\circ}\text{C}) = \%_{\text{liant apport}} \times \text{TBA}_{\text{liant apport}}(^{\circ}\text{C}) + \%_{\text{liant AE}} \times \text{TBA}_{\text{liant AE}}(^{\circ}\text{C})$$

Détermination des viscosités (η) : Équation 25

$$\%_{\text{mélange}} \times \log(\log \eta_{\text{mélange}}) = \%_{\text{liant apport}} \times \log(\log \eta_{\text{liant apport}}) + \%_{\text{liant AE}} \times \log(\log \eta_{\text{liant AE}})$$

Ces formules considèrent que la totalité du liant d'AE et du liant d'apport se mélangent

parfaitement. On parle dans ce cas, de remobilisation totale du LAE.

Aux États-Unis, les recommandations pour la conception des enrobés recyclés à chaud ont été mises à jour et améliorées grâce à une étude intégrée dans le projet NCHRP 9-46 (National Cooperative Highway Research Program). Cette étude a conduit à l'introduction du ratio de liant d'agent émulsifiant. Cette méthode a permis de différencier les mélanges contenant des agrégats d'enrobés en fonction de la proportion de liant d'agrégats d'enrobés par rapport au liant total. Les mélanges contenant une proportion élevée d'émulsifiant ont été définis comme ceux ayant un rapport de bitume supérieur à 0,25, tel qu'indiqué dans le Tableau 2.

Tableau 2 Directives de sélection des liants pour les enrobés recyclés fournies par le projet NCHRP 9-46 (AASHTO)

Grade du liant d'apport recommandé	Ratio de bitume
Pas de changement dans le choix du liant	< 0.25
A suivre les recommandations dans la norme	> 0.25

La méthode américaine a pour objectif de classifier les bitumes en fonction de leurs performances, selon les catégories Performance Grade High - Low (PG HL). Si l'on connaît le grade souhaité du liant à mélanger, le pourcentage souhaité d'asphalte émulsionné (AE) et les propriétés du liant d'AE récupéré, il est alors possible de déterminer les propriétés requises d'un grade de liant d'apport à chaque température (élevée, intermédiaire et basse) de manière distincte comme suit :

$$T_{\text{liant apport}} = \frac{T_{\text{liant mélange}} - (\%AE \times T_{\text{liant AE}})}{(1 - \%AE)} \quad \text{Equation 26}$$

Avec :

T : température des classes de performances des bitumes (PG température).

L'inconvénient de ces méthodes réside dans leur limitation à prédire les caractéristiques mécaniques des mélanges bitumineux qu'à des températures et fréquences déterminées. La thèse de (Mangiafico, 2014) traitait de l'élaboration d'une méthode pour prédire les caractéristiques viscoélastiques des mélanges de bitume.

Mangiafico a réalisé des essais sur différents mélanges bitumineux en modifiant le taux d'agent d'enrobage. Il a établi une corrélation linéaire entre les paramètres 2S2P1D et la concentration en AE présente dans le mélange. En accord avec les tendances identifiées, les paramètres 2S2P1D (incluant k et h) ainsi que les coefficients de compensation de température de tous les mélanges ont été modélisés en dérivant les équations générales suivantes :

$$A_{x\%} = A_{0\%} + x(A_{AE} - A_{0\%})$$

Équation 27

$$\log(B_{x\%}) = \log(B_{0\%}) + x[\log(B_{AE}) - \log(B_{0\%})]$$

Équation 28

Les termes A et B désignent de manière générique tous les paramètres 2S2P1D et les facteurs de calage associés, tels que les relations linéaires (E_0 , k , h , δ et β) et logarithmiques (τ_0 et aT), en fonction du pourcentage de liant extrait d'AE dans le mélange, représenté par la variable x variant de 0 à 1. Par exemple, la valeur du paramètre δ est de 40% pour un mélange contenant 40% d'AE, calculée à partir des valeurs de δ du liant de base pur ($\delta_{0\%}$) et du liant d'AE (δ_{AE}), avec x équivalent à 0.4.

Ces méthodes de prédiction ne prennent pas en compte le degré de mélange entre le liant d'AE et le liant d'apport qui peut influencer les caractéristiques mécaniques du liant mélange.

1.14 Ajustement des caractéristiques des granulats d'apport

La granulométrie de l'agrégat d'enrobé doit se situer dans la plage de 0/10mm à 0/14mm, avec un taux de filler oscillant entre 8% et 12%.

L'ajustement vise à rectifier la distribution granulométrique des granulats d'enrobé à chaud en incorporant des granulats supplémentaires pour obtenir une courbe granulométrique similaire à celle d'un enrobé neuf.

Il n'existe pas de règles de formulation permettant de prédire les caractéristiques intrinsèques d'un mélange de granulats.

1.15 Mode opératoire pour la fabrication en laboratoire du mélange bitumineux contenant des AE

La réalisation d'essais d'enrobés en laboratoire offre la possibilité de contrôler précisément les paramètres de mélange, ce qui permet d'atteindre les performances désirées. La norme NF EN 12697-35 définit le mode opératoire à suivre pour la production d'un enrobé recyclé.

1.15.1 Séchage des constituants

Conformément à la réglementation en vigueur, il est requis de sécher les granulats vierges et les fillers à une température de $110 \pm 5^\circ\text{C}$. Les additifs alimentaires doivent être disposés en une fine couche (moins de 5 cm) dans une enceinte de séchage ventilée. Ils sont soumis à un processus de séchage à une température de $50 \pm 5^\circ\text{C}$ pendant une durée maximale de 24 heures.

1.15.2 Mise en température de bitume

La température de chauffage du bitume final est déterminée par son grade. Plus la dureté du bitume est grande, plus la température est élevée. Par exemple, le bitume de qualité 20/30 est porté à une température de 180°C . En cas de modification du bitume, un protocole opératoire spécifique est mis en place.

1.15.3 Mise en température des granulats et agrégats d'enrobé

Avant d'être malaxés, les agrégats d'enrobé sont préalablement chauffés dans une étuve à une température de $110 \pm 5^\circ\text{C}$ pendant une période de $2\text{h}30 \pm 30$ min. En ce qui concerne les

granulats d'apport, la norme fournit une équation mathématique permettant de calculer la température de chauffage. La température en question est influencée par la température de chauffage de l'asphalte d'apport et le pourcentage d'agrégats d'enrobés utilisé dans la composition. Plus le pourcentage d'asphalte végétal incorporé dans le mélange augmente, plus la température maximale de chauffage des granulats non traités augmente.

1.15.4 Malaxage

Initialement, les granulats d'apport sont ajoutés en commençant par la fraction la plus grossière et en finissant par la plus fine. Ces granulats sont mélangés pendant une durée de 15 à 45 secondes en fonction de leur nature. Par la suite, les additifs alimentaires sont incorporés et mélangés pendant une durée de 15 à 45 secondes. La durée de malaxage varie en fonction de la quantité produite et de la capacité du malaxeur. Le liant bitumineux est finalement incorporé. Les divers composants sont agités ensemble pendant une période maximale de 5 minutes (habituellement 3 minutes pour un mélange bitumineux sans agent d'émulsion).

1.16 Performances mécaniques des enrobés contenant des AE

L'intégration des granulats d'enrobé dans un mélange bitumineux altère les propriétés mécaniques de l'enrobé et impacte ses performances. Les changements observés dans les caractéristiques mécaniques du mélange sont principalement attribuables à l'intégration du liant d'émulsion d'asphalte. Le liant formé suite au mélange présente des caractéristiques mécaniques et une composition chimique distinctes de celles d'un liant neuf. Pour obtenir des caractéristiques comparables, il est essentiel de vérifier l'homogénéité du liant, c'est-à-dire de garantir que le liant d'apport et le liant des agrégats d'enrobé peuvent se mélanger de manière homogène dans un même mélange. L'interaction et la combinaison de ces deux agents liants ne sont pas encore entièrement caractérisées ni comprises (Al-Qadi, & al., 2007), et peu d'informations sont disponibles dans la littérature sur les mécanismes et les phénomènes physico-chimiques qui surviennent pendant la phase de mélange (Bressi & al., 2016).

1.16.1 Notion d'homogénéité du mélange entre le liant vieux et le liant neuf

En pratique, le liant des agrégats d'enrobé est présent sous forme d'une fine couche qui recouvre les granulats d'AE, plutôt que sous forme de masse libre. Cette configuration ne favorise pas un mélange mécanique efficace entre le matériau d'AE et le liant d'apport lors de la phase de mélange. D'autres mécanismes peuvent favoriser l'homogénéisation de deux liants lorsqu'ils sont soumis à des températures spécifiques pendant une durée déterminée. Ce processus, connu sous le nom de diffusion, facilite le déplacement des molécules à travers la matière dès lors qu'elles possèdent une énergie cinétique suffisante. La dépendance est observée en fonction de la viscosité des liants à des températures spécifiques (Vassaux, 2017). La diffusion peut être influencée par divers paramètres tels que la morphologie et la dimension des molécules, la température, les interactions intermoléculaires, la rigidité structurale des molécules en diffusion, etc. (Cussler, E, 1997). D'après Cussler, il existe une relation inverse entre le taux de diffusion et la viscosité du fluide. La diffusion d'un matériau est caractérisée par un coefficient de diffusion qui mesure la capacité de déplacement du matériau en raison de ce processus. En théorie, le coefficient de diffusion est déterminé à l'aide de la première et de la deuxième loi de Fick.

La diffusion est le processus principal qui régit le mélange des liants, comme indiqué par (Karlsson & Isacson, 2002). Différents scénarios peuvent être distingués en fonction du niveau d'homogénéité du mélange, comme illustré dans la Figure 3 :

- Black Rock (Zero Blending) : Il est observé que le liant d'AE et le liant d'apport ne se combinent pas, ce qui entraîne une absence totale d'homogénéité du mélange. Dans cette situation, les lois régissant le mélange des deux liants peuvent se révéler inadéquates.
- Partial Blending : Le liant d'AE se mélange partiellement avec le liant d'apport, conduisant à une homogénéité intermédiaire ou indéterminée. Les granulats et le liant d'apport sont combinés avec les agrégats d'enrobé tout en préservant une couche de liant d'agent d'enrobage sur les granulats de ces derniers.
- Total Blending : L'agent d'entretien se mélange complètement avec le liant d'apport, ce qui conduit à la formation d'un mélange homogène. Les granulats d'apport et les granulats d'agrégats légers sont combinés avec un liant obtenu à partir de la fusion des deux liants.

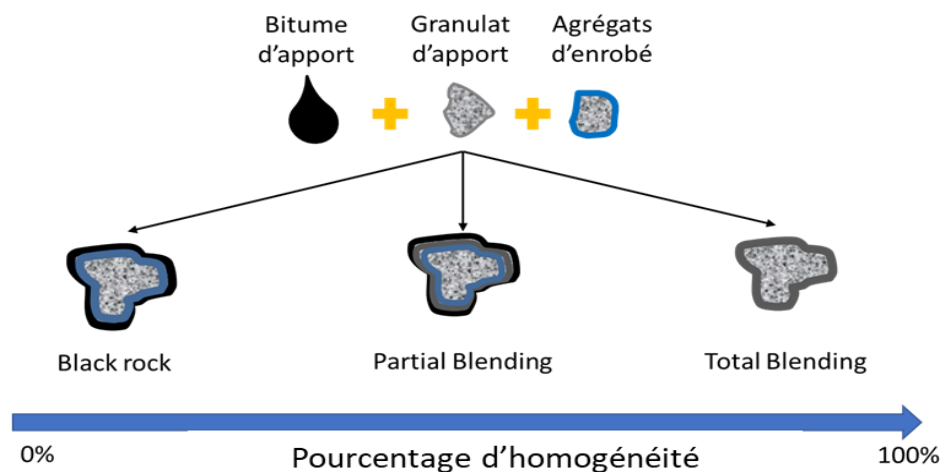


Figure 4 Schéma explicatif de degrés d'homogénéité de mélange (Ziade Elio, 2023)

1.16.2 Méthodes de détermination du degré d'homogénéité du mélange

L'uniformité du mélange entre le liant bitumineux et le liant d'apport est un enjeu crucial qui impacte les caractéristiques finales d'une chaussée. Plusieurs chercheurs ont tenté de concevoir une expérience visant à évaluer l'homogénéité du mélange ou le taux de remobilisation du constituant ancien dans le mélange. Au sein de ces expérimentations :

1.16.2.1 Essai de NGUYEN (NGUYEN, M, 2009)

Nguyen a tenté, dans le cadre de ses travaux de recherche, d'évaluer la cohérence du mélange en utilisant une méthode visuelle qui repose sur la disparité des couleurs entre les différents constituants. Dans cette étude, l'agrégat d'enrobé est synthétiquement produit en laboratoire. Le liant d'AE se caractérise par sa couleur noire. En revanche, le liant d'apport est composé d'un mélange de liant synthétique transparent et de 10% d'oxyde de fer en poids, ce qui lui

confère une teinte rouge. Les agrégats d'enrobé sont combinés avec le liant bitumineux et des granulats frais pour former le mélange d'enrobé. Pendant la même opération, on réalise des prélèvements répétés de l'enrobé pour la fabrication de cylindres d'essai. Les disques sont découpés puis enregistrés à l'aide d'une caméra numérique pour analyser l'évolution de la présence des agrégats d'enrobé en fonction du temps et de la température de malaxage. Une diminution de la durée de malaxage entraîne une réduction de la formation d'amas d'agrégats, comme illustré dans la Figure 4. Les températures élevées contribuent également à la dissolution de ces agrégats.

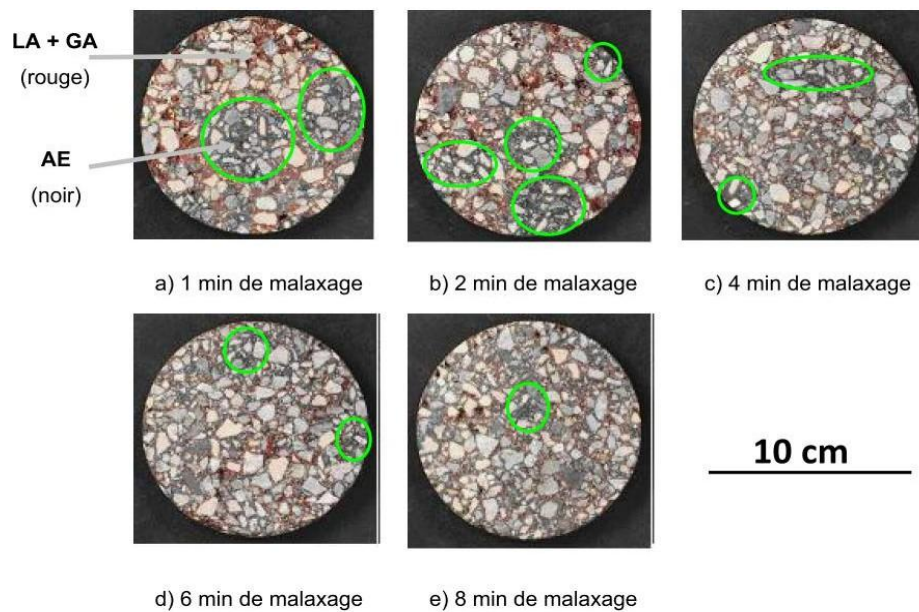
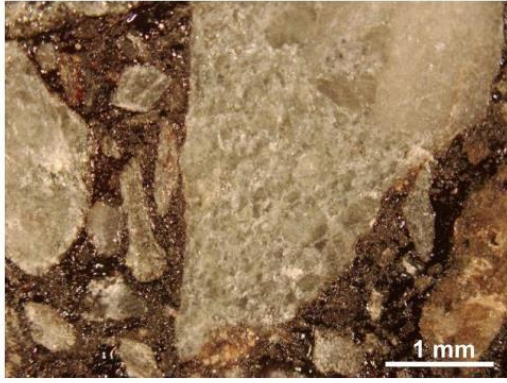


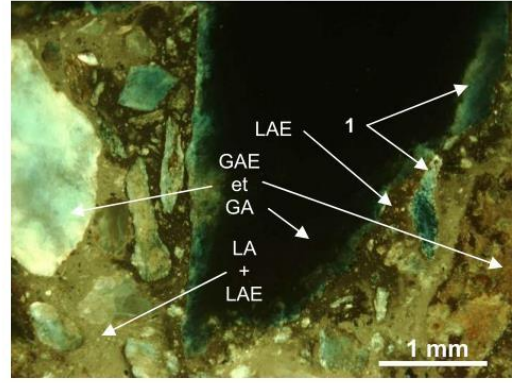
Figure 5 Mélange progressif des AE en fonction du temps de malaxage
(Navaro, 2011; NGUYEN, M, 2009)

1.16.2.2 Essai de Navaro (Navaro, 2011)

Navaro a initialement opté pour une approche basée sur l'observation microscopique en recourant à un agent de liaison fluorescent sous une source de lumière ultraviolette UV. Le bitume est utilisé comme un indicateur pour différencier les deux liants présents dans le mélange. Tout comme dans les travaux de Nyugen, la cinétique d'homogénéisation a été évaluée en utilisant deux paramètres : l'un pour détecter la présence des agrégats et l'autre pour suivre l'évolution de l'uniformité du mélange en relation avec la température de production et la durée de mélange.



Photographie réalisée en lumière blanche permettant de distinguer le liant et les granulats



Photographie réalisée en lumière UV permettant de distinguer le liant d'apport et le liant d'agrégats d'enrobé

Figure 6 Photographies réalisées sur un enrobé recyclé malaxé pendant 45 s à 130°C (Navaro, 2011)

Pour évaluer le degré d'homogénéité du mélange, il est nécessaire de se concentrer sur l'extraction du bitume du mélange. Les méthodes conventionnelles d'extraction du bitume par solubilisation impliquent la combinaison des deux liants sans tenir compte de la possible hétérogénéité de l'enrobé (Lahjiri, 2020). Ensuite, Navaro a opté pour une approche différente de l'observation microscopique. Il a tenté de relever le défi des méthodes de récupération classiques en instaurant une approche analytique. Cette opération est réalisée sans avoir recours à un agent fluorescent de liaison. Cette approche implique de dissocier de manière séquentielle les différentes couches du liant entourant les granulats en recourant à la technique de lixiviation au perchloroéthylène. Deux analyses sont réalisées : la première vise à quantifier la proportion de liant présente dans le solvant, tandis que la seconde a pour objectif d'établir le rapport entre le liant ajouté et le liant d'émulsion. La différenciation entre le liant d'agrégats d'enrobé et le liant d'apport est réalisée à l'aide de la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF). Cet instrument de mesure spectrale est utilisé pour surveiller la variation des divers constituants chimiques présents dans un mélange d'hydrocarbures d'origine pétrolière au cours de son processus de vieillissement (Mouillet et al., 2008). Au cours de ce processus de vieillissement, des groupes fonctionnels carboxyles (C=O) et sulfones (S=O) se forment au contact de l'oxygène de l'air. Ces fonctions chimiques se caractérisent par la présence distincte de pics à des nombres d'onde de 1700 cm⁻¹ et 1045 cm⁻¹. Les solutions de lixiviation récupérées sont soumises à une filtration à un seuil de 6 µm afin d'éliminer les particules minérales. Cependant, des particules minérales de silice de taille micrométrique demeurent dans la solution même après cette opération de filtration. La présence de ce résidu perturbe la mesure infrarouge et impacte les nombres d'ondes proches du pic qui caractérise la fonction S=O à une fréquence de 1045 cm⁻¹ (Silverstein, 1998). La fonction carboxyle (C=O), dont le pic est intact, sera donc examinée en tant qu'indicateur de la progression du liant. L'analyse de la relation entre la hauteur du pic du carboxyle et la concentration de la solution de liaison d'AE permet de déterminer la concentration du liant d'AE dans le mélange de liaison.

1.16.2.3 Essai de Vassaux (Vassaux, 2017)

Vassaux a examiné la régénération du liant des agrégats d'enrobé en recourant à trois techniques microscopiques. Ces méthodologies sont appropriées pour l'étude de l'interface "liant vierge/liant d'AE". Vassaux a démontré que l'utilisation de la microscopie infrarouge en mode Imaging ATR (Attenuated Total Reflectance), avec la fonction carbonyle comme indicateur, représente la méthode la plus efficace pour analyser la remobilisation du liant d'AE. En se basant sur les profils verticaux de distribution des carbonyles, une longueur de zone de mélange est définie comme un indicateur permettant de mesurer la remobilisation dans diverses conditions de fabrication, figure 7.

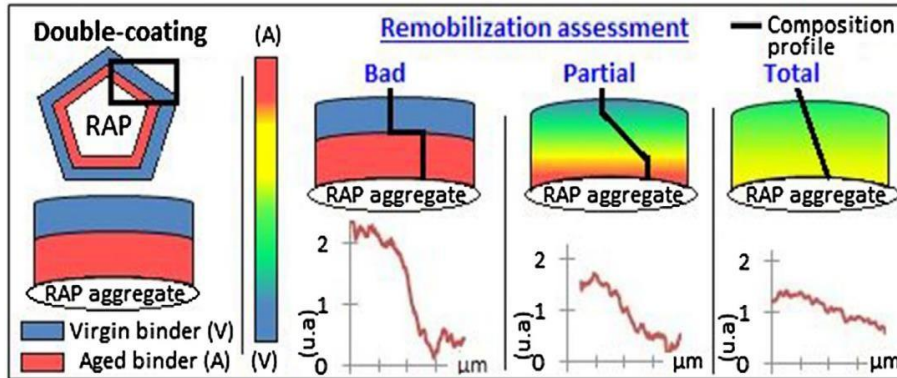


Figure 7 Définition de la remobilisation à partir des profils de composition des différents liants (Vassaux, 2017)

1.16.2.4 Essai de Gaspar (Gaspar, & al., 2020)

Gaspar a mis en œuvre la méthode d'extraction séquentielle en trois étapes selon le protocole d'extraction par reflux (méthode B de la norme ASTM D2172-11). Le même dispositif d'extraction est employé (avec un unique cône d'extraction tel qu'illustré dans la Figure 8a), cependant la méthode d'extraction standard est interrompue à deux reprises jusqu'à ce que le spécimen soit entièrement rincé. À la terminaison de la première et de la seconde phase d'extraction, le mélange de trichloréthylène et de liant bitumineux est collecté et substitué par un solvant frais. Ainsi, on suppose que le liant bitumineux recouvrant les particules d'agrégat de l'échantillon est constitué de trois couches. Tel qu'indiqué dans la Figure 8, la première étape de l'extraction consiste à prélever la couche externe (étape 1), tandis que la couche interne est obtenue lors du dernier rinçage (étape 3). La deuxième étape implique l'extraction de la couche intermédiaire du bitume. La durée de chaque phase d'extraction est déterminée de manière à garantir une quantité uniforme de bitume pour l'ensemble des phases. Suite à l'extraction, les liants récupérés sont soumis à des essais rhéologiques en laboratoire pour évaluer les caractéristiques des couches extraites et ainsi obtenir une estimation de l'uniformité des couches de liant, laquelle est censée être corrélée au degré de mélange des liants.

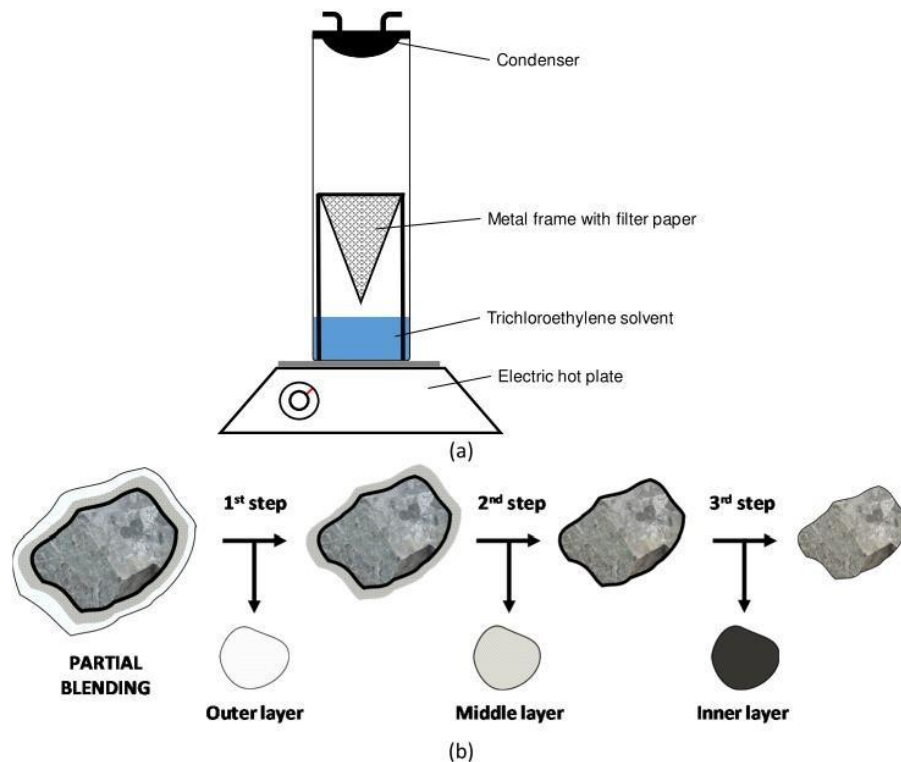


Figure 8 Illustration (a) de l'appareil d'extraction et (b) de la procédure d'extraction par étapes (Gaspar, & al., 2020)

1.16.3 Les éléments impactant le niveau d'homogénéité du mélange.

Il est essentiel de bien comprendre l'interaction entre le liant frais et le liant d'agent d'enrobage lors du processus de mélange et de mise en œuvre afin d'assurer une conception de chaussée plus fiable. Toutefois, cela implique une analyse approfondie des divers aspects et des facteurs qui influent sur l'uniformité du mélange. Un mélange complet et homogène des deux liants est supposé se produire en raison de l'interaction des différents composants entre eux. Les paramètres de durée et de température de conditionnement sont déterminés de manière à garantir un niveau d'uniformité satisfaisant dans les mélanges comprenant des agrégats d'enrobé. Une sélection judicieuse de ces paramètres se traduira par une efficacité accrue en matière de temps et de coûts.

(Rad, y, 2013) a fait une étude qui porte sur les interactions entre le liant d'apport et le liant d'agent d'expansion, qui conduisent à l'émergence de nouvelles propriétés rhéologiques, en prenant en compte l'influence du temps et de la température. Afin d'analyser les phénomènes de diffusion entre deux liants en se basant sur leurs propriétés rhéologiques, il a été essentiel d'établir une configuration où les liants interagissent sans qu'aucune contrainte externe ne vienne influencer leur mélange. L'extraction du liant AE a été exclue de cette étude en raison des implications sur la modification des caractéristiques des liants (Johnson & Bahia, 2010). Ainsi, Rad a élaboré le liant "AE artificiel" en soumettant le matériau à deux cycles ou plus de vieillissement sous pression (PAV). Afin d'analyser la diffusion entre les liants, Rad a confectionné des échantillons de liants bitumineux en sandwich en utilisant deux liants

présentant des degrés de vieillissement distincts. La dimension totale de l'échantillon inséré dans le DSR est de 2 mm (cf. Figure 8).

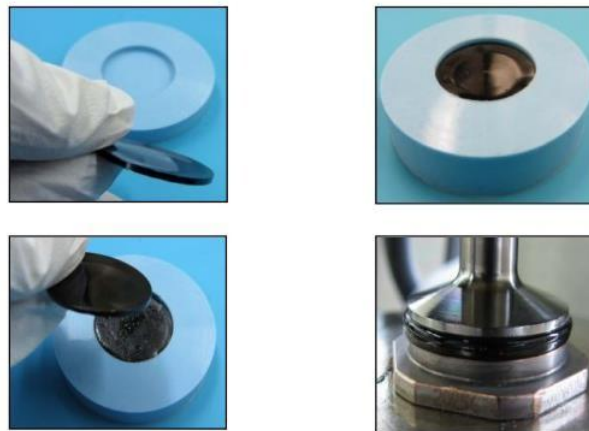


Figure 9 Sandwich de liants bitumineux, préparation et essai (Rad, y, 2013)

Rad a également expérimenté du mortier à base de liant, allant au-delà du simple mélange liant-liant. Les mortiers à petite échelle peuvent illustrer l'impact du mélange des agrégats d'enrobés et du liant d'apport dans un mélange bitumineux. La réalisation et l'analyse de mortiers en laboratoire s'avèrent être plus aisées que celles des enrobés. Il est nécessaire que l'écart entre les deux plans, également appelé DSR, soit supérieur à un quart ($>1/4$) du diamètre maximal des granulats selon la norme AASHTO T 315. Le mortier examiné est composé d'un granulat dont la taille maximale est de 0,30 mm, ce qui suggère un intervalle ou un espacement adéquat de 2 mm.

Afin d'analyser l'influence de la température sur la diffusion et la dispersion du liant, Rad a soumis ses échantillons à des températures comprises entre 40°C et 140°C. À certaines températures de conditionnement basses, les échantillons ont été placés dans le DSR et testés immédiatement après le conditionnement, car l'échantillon n'a pas coulé et sa géométrie a pu être maintenue pendant cette phase. L'expérience a été menée à une température de 64°C. La Figure 9 illustre les résultats du module. Les deux températures de conditionnement les plus basses, à savoir 40°C et 64°C, n'indiquent aucune variation des valeurs de G^* pour diverses durées de conditionnement. Cela suggère que la remobilisation est impossible à des températures basses. Les échantillons soumis à une température de 145°C présentent des

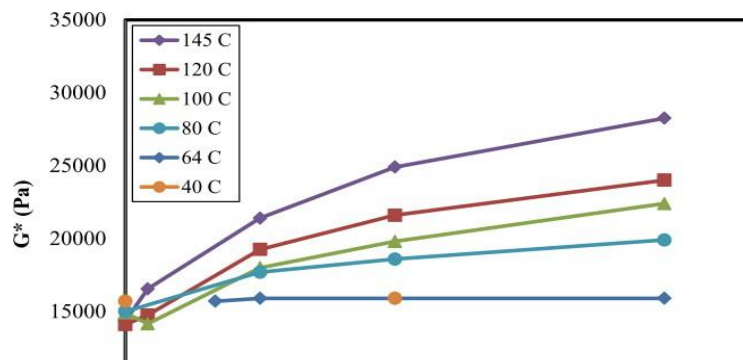


Figure 10 Résultats du DSR pour les échantillons du liant à différentes températures (Rad, y, 2013)

taux de diffusion nettement supérieurs, tandis que les taux estimés pour 100 et 120°C étaient similaires.

Ces résultats mettent en évidence l'impact significatif de la température sur les processus de diffusion au sein des liants. À des températures très basses, la mobilité moléculaire des liants est réduite, ce qui limite tout transfert de masse significatif, entraînant ainsi une absence d'homogénéité du mélange. Concernant la période de conditionnement, les résultats indiquent qu'après 60 minutes, il n'y a pas d'augmentation significative de la rigidité de l'échantillon.

Navaro, 2011 (Navaro, 2011) a étudié l'influence de la température sur le degré de mélange des liants. Il a observé que réduire la température de malaxage de 30°C entraîne la nécessité de prolonger la durée de malaxage afin d'atteindre le même niveau de mélange. En outre, il a été prouvé que la durée de malaxage influence positivement le degré d'homogénéité du mélange entre les agrégats d'enrobé et les matériaux d'apport.

Xu et al., 2018 (Xu, & al., 2018) L'auteur a examiné la distribution des liants en utilisant une approche combinant une méthode d'extraction séquentielle et la microscopie à force atomique (AFM). Les propriétés micromécaniques des trois couches de liant extraites des granulats d'AE ont été mesurées successivement à des températures de mélange de 130°C et 150°C. On a constaté une augmentation du module moyen et une diminution de la force d'adhérence et de la dissipation d'énergie en passant de la couche externe à la couche interne pour les liants recyclés (cf. Figure 24). La variation des caractéristiques à travers l'épaisseur du volume entourant les granulats d'émulsion d'asphalte est attribuable aux niveaux variables d'homogénéité du liant d'émulsion d'asphalte et du liant d'apport présents dans chaque couche.

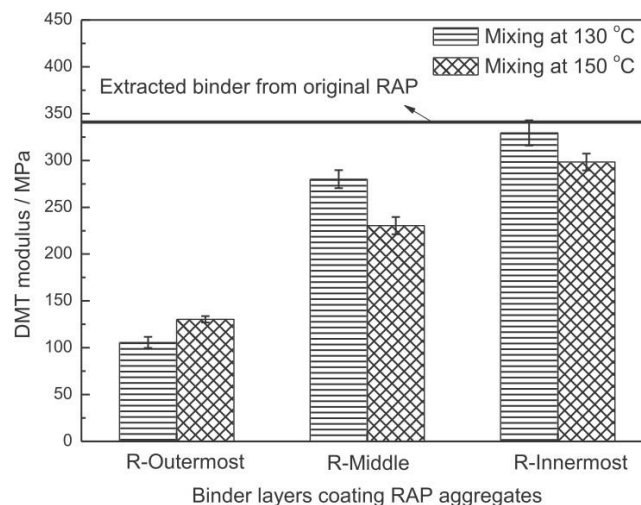


Figure 11 Modules des couches de liant extraites et récupérées des agrégats d'enrobé à deux températures de mélange (Xu, & al., 2018)

Selon ces résultats, Xu ont mis en évidence que la réduction de la température de mélange empêche la diffusion du liant d'apport dans le liant d'AE, ce qui conduit à une concentration plus élevée du liant neuf dans les couches externes du liant d'AE. Par conséquent, il y a moins d'interactions entre le liant d'apport et les couches internes du liant d'AE.

En ce qui concerne la durée de maturation après le mélange, Xu ont analysé les caractéristiques micromécaniques des différentes couches de liant entourant les granulats d'AE récupérés après un mélange à 150°C sans période de maturation, ainsi que ceux récupérés après un mélange à 150°C avec une période de maturation de 2 heures dans une étuve à 150°C suivie de 7 jours à température ambiante. La figure 11 présente les résultats du module.

Selon cette illustration, Xu ont observé que la durée de conditionnement est un autre paramètre crucial influençant le mélange entre les liants d'émulsion d'asphalte et les liants d'apport. En plus de l'interaction pendant le processus de malaxage, la fusion entre les anciens et les nouveaux liants se prolonge après la phase de malaxage. En comparaison avec le mélange à une température de 130°C, il serait nécessaire d'accorder davantage de temps pour parvenir à l'homogénéité complète du mélange entre les liants des enrobés mélangés, stockés ou utilisés à une température plus basse.

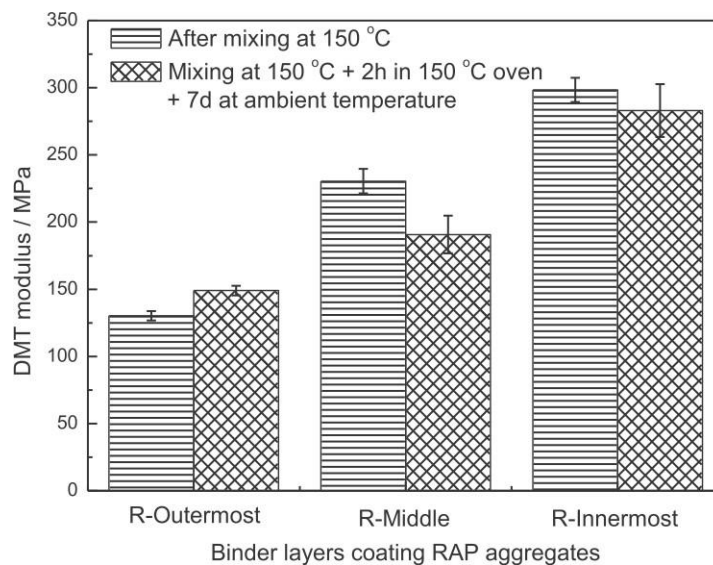


Figure 12 Modules des couches de liant extraites des agrégats d'enrobé à 150°C et à différents temps de conditionnement après le mélange (Xu, & al., 2018)

1.16.4 Action du degré de mélange sur les performances mécaniques

1.16.4.1 Rigidité

Nguyen, 2009 (NGUYEN, M, 2009) Divers échantillons d'enrobé recyclé ont été testés dans plusieurs éprouvettes, en variant les temps de malaxage afin d'obtenir des degrés d'homogénéité différents. La rigidité de chaque échantillon est évaluée à l'aide d'un essai de module de rigidité en traction indirecte (ITSM) selon la norme BS-EN :12697-26 2004. L'expérience est réalisée à une température de 20°C, en appliquant un temps de montée de 124 millisecondes et un déplacement horizontal de 5 µm, afin de vérifier la réaction du spécimen en tant que matériau élastique. Le chercheur a observé que l'augmentation du temps de mélange entraîne une diminution de la variabilité des propriétés mécaniques. Cette situation

pourrait résulter de la diversité présente dans le mélange recyclé. En cas de temps de mélange insuffisant, il est possible que certains emplacements présentent une concentration prédominante en éléments d'alliage, tandis que d'autres sont majoritairement composés de matériaux d'apport. La disparité des caractéristiques entre les matériaux recyclés et les matériaux vierges entraîne une grande diversité dans les valeurs de rigidité.

(Rad, y, 2013) Des essais ont été réalisés sur des mélanges de mortier en utilisant le Dispositif de Système de Réalisation (DSR). L'essai à l'échelle mortier permet de mettre en évidence l'impact de la composition des matériaux d'enrobés et des ajouts sur le mélange. Les mortiers sont composés d'un mélange de bitume vieilli et de granulats provenant d'agrégats d'enrobés, utilisant un bitume d'ajout 50/70 et des granulats d'ajout ayant un diamètre maximal de 0,3 mm. Le mortier est appliqué sur des surfaces géométriques de 25 mm avec un espacement de 2 mm. Un essai de module complexe est effectué avec une déformation imposée de 2 %, à une température de 64°C et à une fréquence de 10 rad/s. Rad a conclu que l'intensité de la remobilisation croît en fonction de la température et de la durée de conditionnement. Les deux derniers paramètres font référence à la température et au temps auxquels sont soumis les deux disques de matériaux en contact, préalablement placés dans le DSR avant le début de l'essai. Selon les données présentées dans la Figure 26, il a été observé que le module G^* des mortiers augmente en fonction du degré de mélange. L'expérience a également mis en évidence que l'augmentation de l'effet du conditionnement à 140°C pendant deux heures entraîne une augmentation du G^* total allant jusqu'à 20% par rapport au G^* des échantillons initiaux (échantillons non conditionnés) (Figure 12).

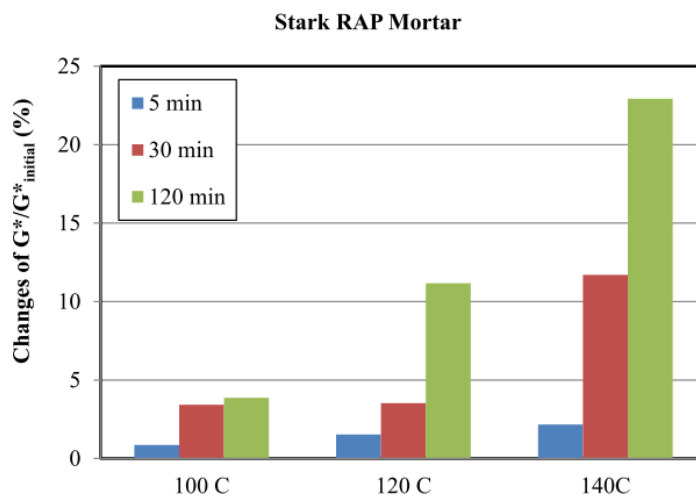


Figure 13 Variation de G^* à différentes durées et températures de conditionnement par rapport aux échantillons sans conditionnement (Rad, y, 2013)

Gaspar et al., 2020 (Gaspar, & al., 2020) ont utilisé des tests rhéologiques pour déterminer les propriétés des différentes couches issues de l'extraction séquentielle (méthode décrite dans le paragraphe 1.3.2.4). L'extraction et les analyses sont effectuées sur des enrobés comprenant une teneur en liant hydrocarboné modifié par des agents d'enrobage de 25 %. Ces recherches ont mis en évidence le gradient de rigidité présent dans les couches de liant entourant les

granulats d'agrégats d'enrobés. Selon les données illustrées dans la Figure 13, on peut constater une augmentation de la rigidité du liant au cours du processus d'extraction, ce qui est en accord avec l'idée que les phases finales d'extraction (couches internes du liant) renferment des concentrations plus importantes de liant d'AE en raison d'un mélange partiel entre les liants. Le matériau liant obtenu lors de la première étape affiche des valeurs initialement plus faibles de $|G^*|$, qui ont tendance à augmenter à la deuxième étape, et plus encore à la troisième étape, en raison de l'augmentation de la quantité de liant d'acide acrylique (AE).

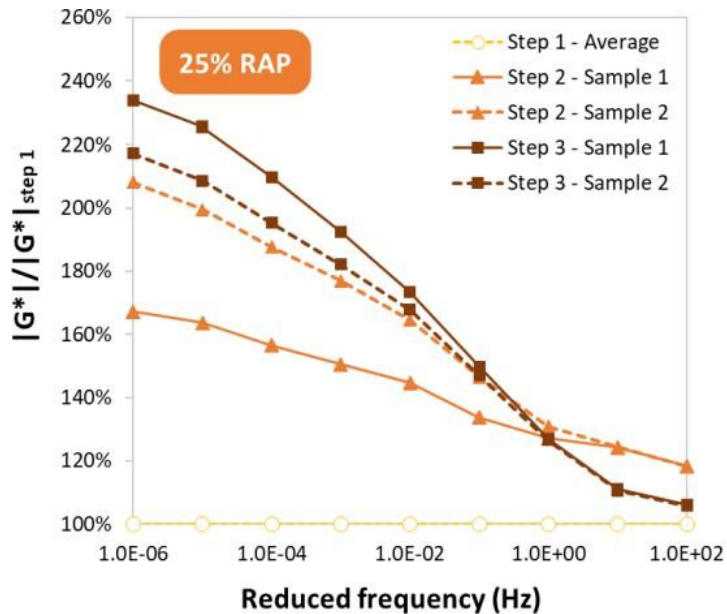


Figure 14 Variation de $|G^*|$ pour chaque étape d'extraction d'un enrobé tiède contenant 25% d'AE (Gaspar, & al., 2020).

1.16.4.2 Fatigue

Navaro, 2011 (Navaro, 2011) Des échantillons d'enrobé contenant respectivement 20%, 45% et 70% d'agent d'enrobage ont été testés. Ces revêtements bitumineux sont produits en étant malaxés pendant 240 secondes et à des températures de 110, 135 et 160°C. La fatigue des échantillons est évaluée en termes de résistance à la flexion à deux points à une température de 10°C et une fréquence de 25 Hz. La Figure 28 présente la variation de la résistance à la fatigue en fonction du taux de recyclage pour une durée de malaxage de 240 s à différentes températures.

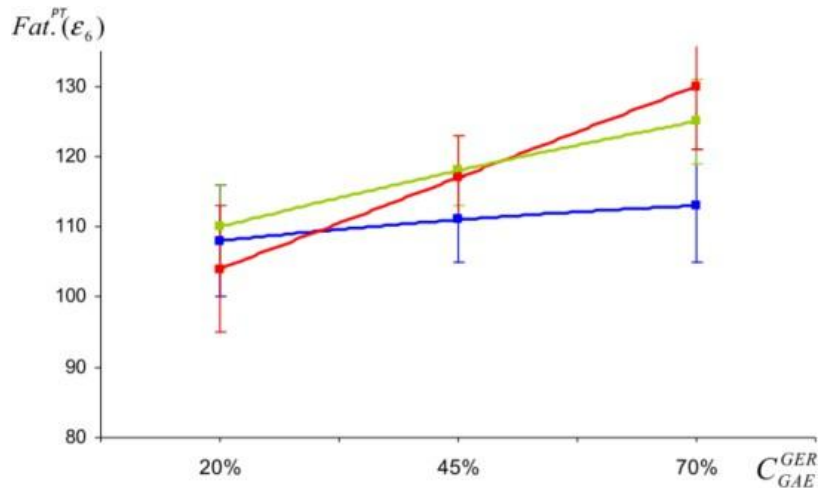


Figure 15 Résistance à la fatigue en se basant sur le taux de recyclage pour une période de malaxage de 240 secondes et à diverses températures. (110°C en bleu, 135°C en vert, 160°C en rouge) (Navaro, 2011) .

L'uniformité du mélange s'accroît en fonction de l'élévation de la température de malaxage. Ainsi, les échantillons préparés à ces trois températures illustrent trois niveaux distincts d'uniformité de mélange. Pour les enrobés contenant 20% de matériau recyclé, la résistance à la fatigue demeure constante, quel que soit le taux de mélange. À un taux de 70% d'AE, la durée de vie augmente avec les températures, ce qui laisse supposer une bonne remobilisation lorsque celles-ci sont élevées. Navaro a établi que l'uniformité du mélange a un impact significatif sur la résistance à la fatigue des enrobés contenant des taux élevés d'agent d'enrobage : une homogénéité accrue du matériau est associée à une durée de vie plus longue.

Cependant, des recherches dans la littérature démontrent que, pour les mélanges avec des taux d'agents d'extension inférieurs à 50 %, il y a une diminution de la résistance à la fatigue à mesure que le degré d'homogénéité du mélange augmente. Au sein de ces recherches :

(Xu, & al., 2019) Des enrobés ont été élaborés en incorporant des taux d'agent d'enrobage (AE) de 30 %, 40 % et 50 %, tout en variant la température de mélange (150, 165 et 180°C) afin d'induire des degrés de mélange DOB (degree of blending) distincts, sans causer de vieillissement des liants bitumineux. Un essai de flexion à quatre points, conforme à la norme chinoise T 0739-2011, dérivée de la norme AASHTO T 321-03, est effectué. Les tubes d'essai sont soumis à un chargement sinusoïdal à une température de 15°C, une fréquence de chargement de 10 Hz et une déformation imposée de 400 $\mu\epsilon$. Xu ont initialement examiné le lien entre le Degré d'Ouverture des Bouches (DOB) et les caractéristiques de performance de la chaussée pour une concentration équivalente en Agent Émulsifiant (AE). Le diagramme de la Figure 15 illustre l'évolution de la fatigue d'un enrobé avec une teneur en liant hydrocarboné modifié de 50% à divers niveaux de réactivation. Selon ces résultats, il a été démontré que l'augmentation du Degré d'Oxydation du Bitume (DOB) est associée à une augmentation de la durée de vie du mélange. De plus, dans cette étude, Xu ont analysé l'impact du taux d'asphalte

émulsionné sur la fatigue du mélange. On constatait une réduction de la durée de vie en fonction de l'augmentation de la concentration en AE pour une DOB donnée. Les résultats sont exposés dans la Figure 16.

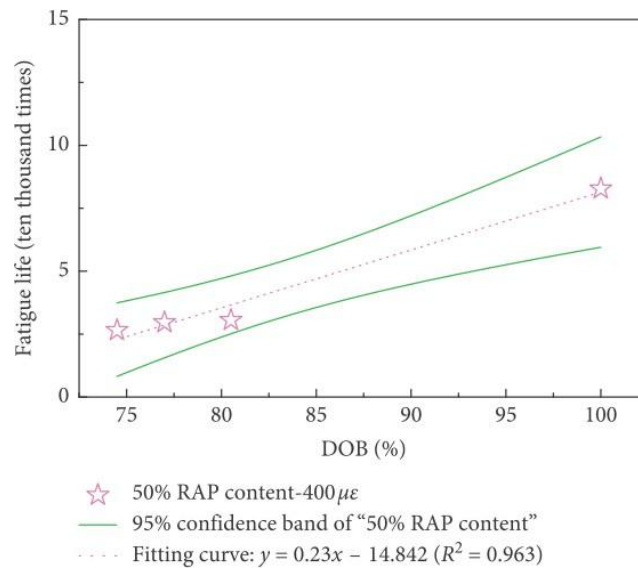


Figure 16 Courbe de tendance donnant la relation entre le nombre de cycles et le DOB (Xu,& al., 2019) .

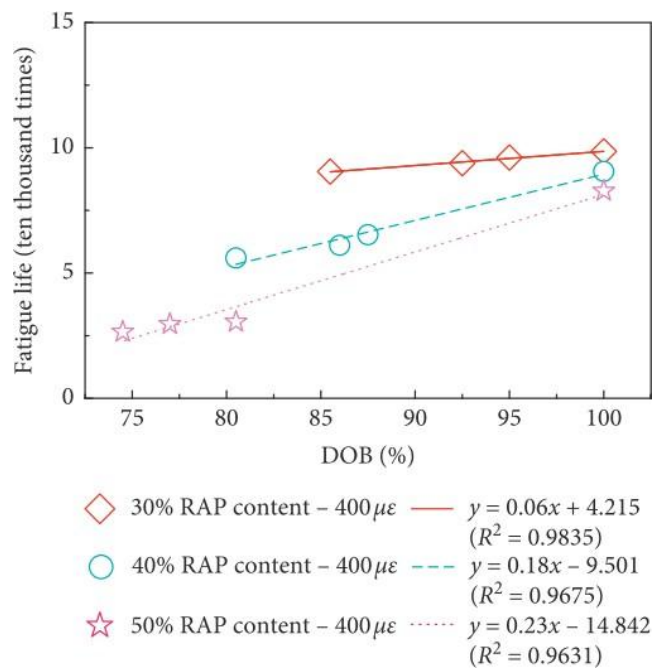


Figure 17 Influence du taux d'AE et du DOB sur la fatigue des mélanges (Xu,& al., 2019) .

Gaspar et al., 2020 (Gaspar,& al., 2020) La fatigue des différentes couches a été évaluée en utilisant une technique de balayage d'amplitude linéaire (LAS). Le test LAS est également utilisé pour évaluer le comportement du bitume en dehors de sa plage viscoélastique linéaire, dans le

but d'analyser la susceptibilité du liant bitumineux à la fissuration par fatigue. L'étude est menée en conformité avec la méthode AASHTO TP 101, et se déroule en deux phases. En premier lieu, une analyse spectrale est réalisée sur une plage de fréquences allant de 0.2 à 30 Hz, en imposant une distorsion d'oscillation de 0.1 %. Par la suite, une modulation linéaire d'amplitude est effectuée, variant de 0 à 30 %, à une fréquence de 10 Hz. L'expérience est menée à une température de 20°C. Le critère de rupture est défini comme le seuil auquel la contrainte de cisaillement maximale est observée. Les tendances identifiées dans les expérimentations sur les modules ne se reflétaient pas de manière évidente dans les conclusions de l'essai LAS (Figure 17), malgré une variation observée dans l'inclinaison des courbes.

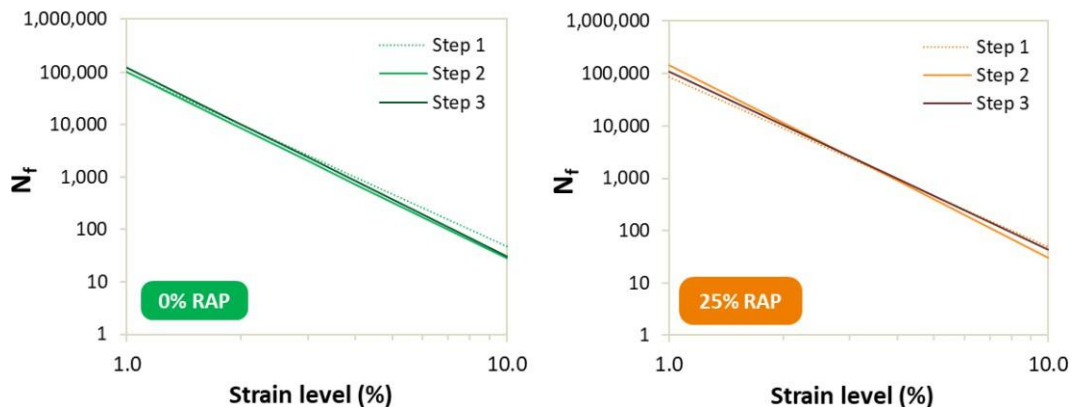


Figure 18 Résultats de l'essai LAS : la fatigue d'un enrobé contenant 0% AE (gauche) et 25% AE (droite) (Gaspar,& al., 2020) .

La présence d'agents externes influence le comportement du revêtement bitumineux de diverses manières, et est fréquemment associée à une diminution de sa durée de vie en fatigue mécanique. Ce phénomène survient en raison de l'oxydation du liant des agrégats d'enrobé, ce qui entraîne une augmentation de la rigidité du mélange et le rend plus sujet aux fissures. Cette situation peut poser des problèmes significatifs en termes de performances sur le terrain, notamment à des températures basses (Gaspar,al., 2020). Ce phénomène s'accompagne d'une variation du degré de mélange, lequel influence également les performances mécaniques du mélange.

1.16.4.3 Comportement à basse température

(Xu, & al., 2019) L'essai de flexion à basse température (norme chinoise T 0715-2011) a été réalisé. Les plaques d'orniérage sont conçues avec des dimensions de 300 mm x 300 mm x 50 mm. Par la suite, elles sont transformées en poutres quadrangulaires mesurant 250 mm x 30 mm x 35 mm. La déformation de flexion-traction à la rupture de l'échantillon est évaluée à une température de -10°C et à une vitesse de chargement de 50 mm/min en employant l'appareil UTM-25. Les variations de déformation en fonction du pourcentage d'agent d'expansion et de la densité apparente sont illustrées dans la Figure 18. Cette illustration met en évidence une amélioration de la résistance à la fissuration à basse température du mélange avec l'augmentation du Degré d'Ouverture à la Bonne. En augmentant le pourcentage d'agent d'enrobage dans le mélange, on observe une diminution de la déformation mesurée lors de la

rupture.

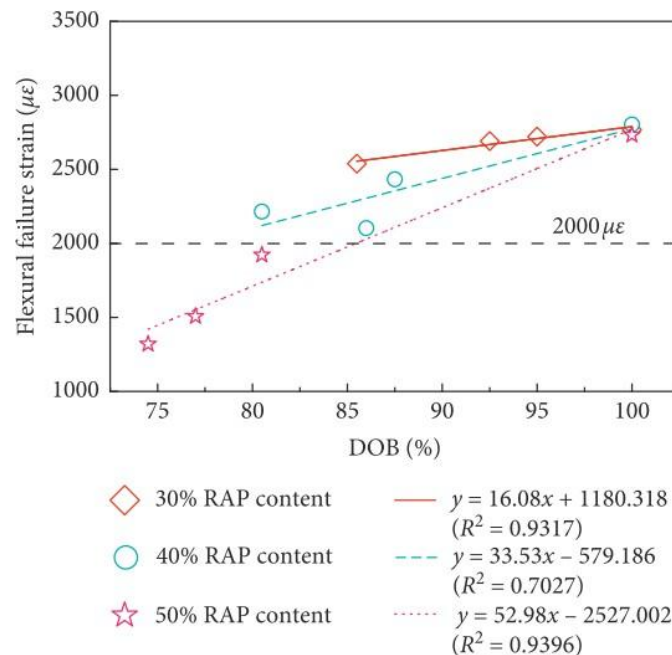


Figure 19 Influence du taux d'AE et du DOB sur la résistance à basse température des mélanges (Xu, & al., 2019) .

1.17 La régénération du bitume

1.17.1 Composés chimiques essentiels au processus de régénération du bitume vieilli

La régénération du bitume vieilli est un processus essentiel dans le recyclage des revêtements en asphalte recyclé (RAP), car elle rétablit les propriétés du liant afin de garantir la durabilité et la performance des mélanges d'asphalte. Ce processus implique l'utilisation de divers composés chimiques, appelés rajeunissants, qui neutralisent les effets du vieillissement, tels que l'augmentation de la rigidité, de la fragilité et de l'oxydation. Ces composés agissent en rétablissant la composition chimique et les propriétés rhéologiques du bitume vieilli. Vous trouverez ci-dessous une discussion détaillée des composés chimiques essentiels impliqués dans ce processus, étayée par des informations tirées de documents de recherche pertinents.

1.17.2 Principaux composés chimiques utilisés dans la régénération du bitume

1. Huiles de friture usagées (WCO) :

L'huile de cuisson usagée (WCO) est devenue un rajeunissant durable et efficace pour le bitume vieilli. Il contient des hydrocarbures et d'autres composés organiques qui contribuent à réduire les groupes carbonyle (CO) et sulfoxyde (SO) du bitume vieilli, qui sont responsables de son comportement viscoélastique. L'utilisation de l'OMD améliore non seulement les propriétés rhéologiques du bitume à haute température, mais contribue également à une approche plus durable de la régénération des liants bitumineux (Ji et al., 2024).

2. Huile aromatique (AO) :

L'huile aromatique est un autre agent rajeunissant largement utilisé qui joue un rôle crucial dans la restauration des propriétés du bitume vieilli. Il agit en complétant les fractions légères perdues des molécules d'asphalte, en particulier les composants aromatiques, qui sont essentiels au maintien de l'équilibre viscoélastique du liant. L'huile aromatique est souvent utilisée en combinaison avec d'autres composés, tels que les prépolymères de polyuréthane, pour obtenir un effet synergique dans le processus de rajeunissement (Shu et al., 2023).

3. Composés à base d'époxy :

Les composés à base d'époxy, tels que les éthers mono-époxy et diépoxy glycidyliques, se sont révélés très efficaces pour réparer les chaînes polymères de styrène-butadiène-styrène (SBS) dégradées dans le bitume vieilli. Ces composés reconnectent chimiquement les chaînes polymères fracturées, rétablissant ainsi la ductilité et les propriétés viscoélastiques du bitume. Les composés diépoxy, en particulier, sont connus pour leur capacité à équilibrer les propriétés à haute température et la résistance à la fatigue à température moyenne (Chiang et al., 2024) (Li et al., 2024).

4. Prépolymère de polyuréthane (PU) :

Le prépolymère de polyuréthane est un régénérateur réactif qui interagit avec les produits de dégradation par oxydation du SBS, tels que les groupes carboxyliques, pour reconstruire la structure du polymère. Ce procédé permet non seulement de rétablir la stabilité du bitume à haute température, mais également d'améliorer sa résistance à la fatigue. Il a été démontré que l'utilisation du PU en combinaison avec de l'huile aromatique permet d'obtenir des performances équilibrées en termes de propriétés à haute et à basse température (Shu et al., 2023).

5. Oligoterpènes :

Les oligoterpènes, composés de fractions d'isoprène, ont été identifiés comme des agents rajeunissants prometteurs pour le bitume vieilli. Ces composés peuvent être mélangés avec de l'asphalte recyclé et/ou de l'asphalte vierge pour former des mélanges de bitume modifié. Les oligoterpènes agissent en interagissant avec la structure moléculaire du bitume, améliorant ainsi ses propriétés rhéologiques et mécaniques. Leur capacité à rajeunir le bitume en fait une alternative intéressante aux rajeunisseurs traditionnels (Broere, 2015).

6. Mélanges d'huile moteur usée (WEO) et d'huile de cuisson usagée (WCO) :

Des mélanges d'huile moteur usée (WEO) et d'huile de cuisson usagée (WCO) ont été étudiés pour déterminer leur potentiel en tant que rajeunisseurs rentables. Ces mélanges compensent la perte de composants visqueux du bitume vieilli et améliorent sa sensibilité à la température et sa résistance à l'orniérage. L'ajout de caoutchouc styrène-butadiène (SBR) à ces mélanges renforce encore leur effet rajeunissant en améliorant la compatibilité et les performances du liant (Ren, et al., 2020).

7. Huiles non comestibles :

Les huiles non comestibles, telles que l'huile de pongamia et l'huile de ricin composite, ont également été étudiées en tant que rajeunisseurs potentiels. Ces huiles sont riches en acides gras et autres composés organiques capables de restaurer les propriétés du bitume vieilli.

Leur utilisation fournit non seulement une solution durable pour la régénération du bitume, mais permet également de relever les défis liés au recyclage de grandes quantités de RAP (Nayak & Sahoo, 2017).

8. Rajeunisseur réactif à mélange chaud (RWR) :

Un nouveau régénérateur réactif à mélange chaud (RWR) a été développé pour relever les défis de la régénération du bitume. Ce régénérateur est composé d'huile de caoutchouc, d'éther de polybutadiène à terminaison époxy (ETPBE), de cardanol (CA) et d'autres additifs. Il agit en reconnectant les chaînes moléculaires fracturées du SBS vieilli et en régulant l'équilibre des composants du bitume. L'utilisation du RWR rétablit non seulement les propriétés physiques et rhéologiques du bitume vieilli, mais réduit également les températures de construction requises pour la production du mélange d'asphalte (Li et al., 2024).

9. Activateurs de régénération :

Les activateurs de régénération sont des composés spécialisés conçus pour ajuster la composition chimique du bitume vieilli. Ces activateurs agissent en rétablissant l'équilibre des acides gras saturés, des aromatiques, des résines et des asphaltènes dans le bitume, rétablissant ainsi ses performances technologiques d'origine. Ils sont particulièrement efficaces pour résoudre le problème de transfert des composants (vieillessement) dans les matériaux bitumineux recyclés (Chengxiang et Yanghao, 2013).

1.17.3 Mécanismes de régénération du bitume

La régénération du bitume vieilli fait intervenir plusieurs mécanismes clés, notamment :

1. Restauration chimique : Les rajeunisseurs agissent en rétablissant la composition chimique du bitume vieilli. Cela implique de compléter les fractions légères perdues (acides gras saturés et aromatiques) et de réduire les niveaux de groupes fonctionnels nocifs, tels que les groupes carbonyle et sulfoxyde, qui se forment au cours du processus de vieillissement (Ji et al., 2024), (Ren et al., 2024).

2. Réparation de chaînes en polymère : Dans le cas du bitume modifié au SBS, les agents rajeunissants tels que les composés à base d'époxy et les prépolymères de polyuréthane jouent un rôle crucial dans la réparation des chaînes polymères dégradées. Ce processus implique des réactions chimiques qui reconnectent les chaînes fracturées, rétablissant ainsi la ductilité et les propriétés viscoélastiques du liant (Chiang et al., 2024) (Shu et al., 2023).

3. Amélioration rhéologique : Les propriétés rhéologiques du bitume vieilli, telles que son comportement viscoélastique et sa sensibilité à la température, sont considérablement améliorées grâce à l'utilisation de rajeunisseurs. Ces composés réduisent la rigidité du bitume et améliorent sa résistance à la déformation et à la fissuration (Li et al., 2024) (Xu et al., 2024).

4. Interaction moléculaire : L'efficacité des agents de rajeunissement dépend également de leur structure moléculaire et de leur interaction avec les composants moléculaires du bitume. Par exemple, la structure moléculaire des agents de régénération détermine leur capacité à perturber les agglomérations d'asphaltènes et à restaurer la microstructure du bitume (Han et al., 2022).

1.18 Incorporation des déchets plastiques dans les mélanges bitumineux

L'incorporation de déchets plastiques dans l'asphalte bitumineux présente plusieurs avantages importants, visant principalement à améliorer les performances des mélanges d'asphalte tout en répondant aux préoccupations environnementales liées aux déchets plastiques. L'intégration de plastiques recyclés améliore non seulement les propriétés mécaniques de l'asphalte, mais contribue également à des pratiques de gestion durable des déchets. Les sections suivantes présentent les principaux avantages de cette approche innovante.

1.18.1 Propriétés mécaniques améliorées

Résistance à l'ornière : L'asphalte modifié au plastique présente une meilleure résistance à la déformation et à l'orniérage, ce qui est essentiel pour une performance routière durable (Laomuad et al., 2024), (Cardoso et al., 2023).

(Fonseca et al., 2022) ont obtenu les résultats suivants selon le dosage des déchets plastiques par rapport au poids de bitume comme suit :

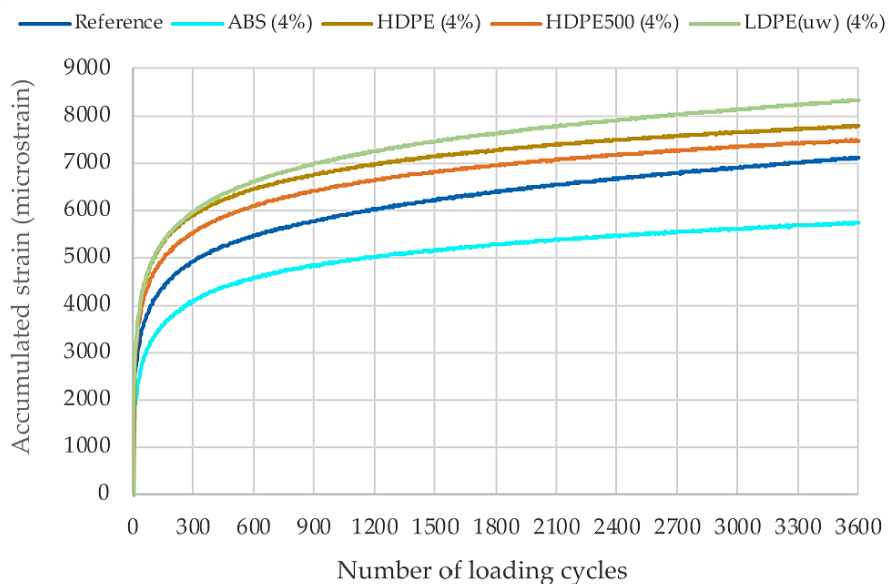


Figure 20 résistance à l'orniérage avec 4% de déchets plastiques (Fonseca et al., 2022)

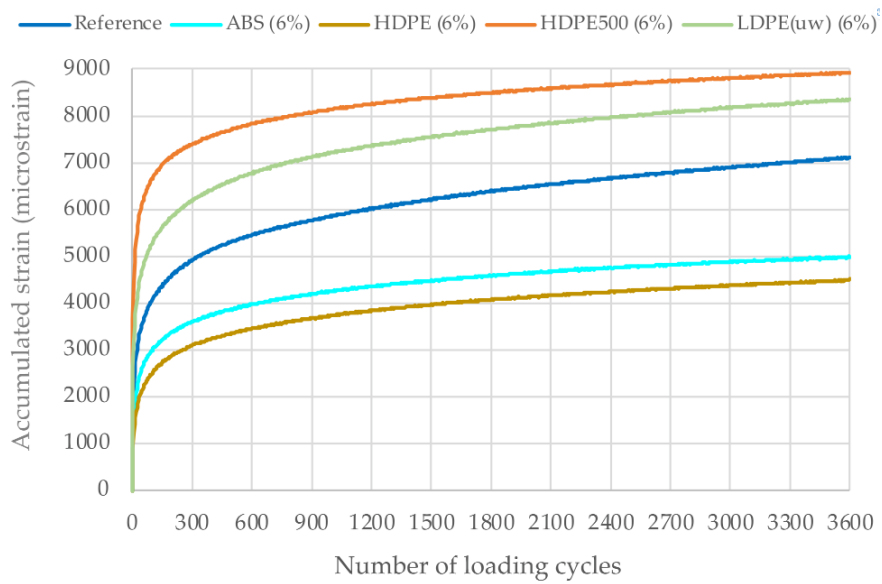


Figure 21 résistance à l'orniérage avec 6% de déchets plastiques (Fonseca et al., 2022)

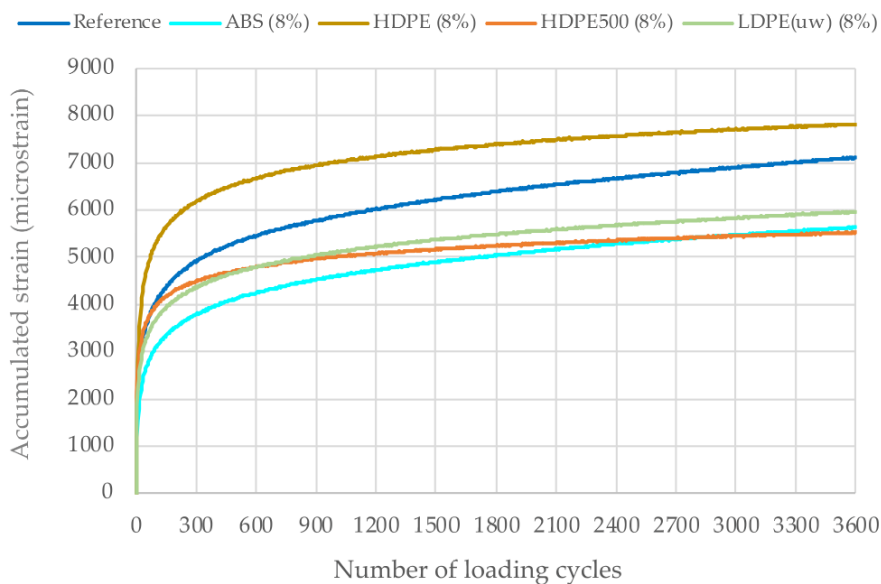


Figure 22 résistance à l'orniérage avec 8% de déchets plastiques (Fonseca et al., 2022)

Résistance à la fatigue : Il a été démontré que l'incorporation de déchets plastiques améliore la résistance à la fatigue de l'asphalte, lui permettant de résister à des charges répétées sans dommages structuraux importants (Suaryana et al., 2018),(Fonseca et al., 2022)

(Suaryana et al., 2018) ont réalisé des essais de fatigue sur les enrobés contenant des déchets plastiques et ont obtenu les résultats montrés dans les courbes suivantes :

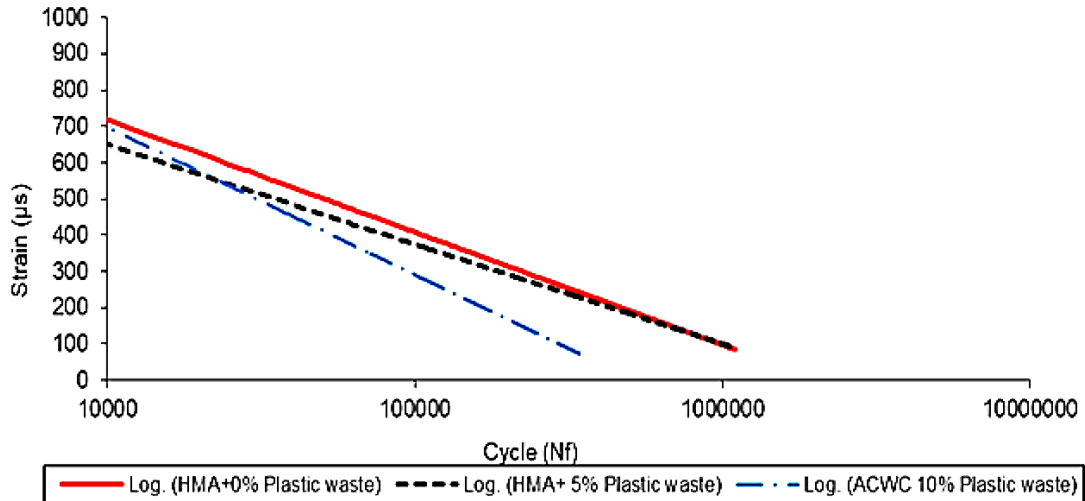


Figure 23 résistance à la fatigue des mélanges selon taux de (Suaryana et al., 2018)

Par ailleurs, des études menées par (Yin & Pan, 2022), (Mannan et al., 2018) ont montré qu'une teneur en RAP plus élevée entraîne une rigidité accrue, ce qui est en corrélation avec une durée de vie réduite en fatigue. Les études montrent que les mélanges contenant plus de 30 % de RAP présentent des dommages significatifs dus à la fatigue.

1.18.2 Durabilité améliorée

Maniabilité : Bien que l'ajout de déchets plastiques puisse réduire la maniabilité, des études montrent que le béton bitumineux maintient des conditions de manipulation satisfaisantes, permettant une application efficace (Fonseca et al., 2022)

Sensibilité à l'humidité et résistance au décapage : L'ajout de déchets plastiques améliore la sensibilité à l'humidité et réduit le décapage, ce qui est essentiel pour maintenir l'intégrité de la chaussée dans des conditions humides (Suaryana et al., 2018).

Des études indiquent que l'ajout de déchets plastiques, tels que le polyéthylène téréphtalate (PET), améliore la stabilité des mélanges d'asphalte. Par exemple, un ajout de 0,5 % de PET a considérablement amélioré les paramètres de stabilité de Marshall (Bilema et al., 2024).

1.18.3 Avantages environnementaux

Réduction des déchets : L'utilisation de déchets plastiques dans l'asphalte contribue à réduire les déchets mis en décharge et la pollution, répondant ainsi à la crise environnementale croissante associée à l'élimination du plastique (Ogada et al., 2023)

Conservation des ressources : Cette approche contribue également à préserver les ressources naturelles en remplaçant partiellement les composants d'asphalte traditionnels par des matériaux recyclés, promouvant ainsi une économie circulaire dans la construction (Lee et al., 2024).

Réduction des émissions de CO₂ : L'utilisation de déchets plastiques dans les mélanges d'asphalte permet de réaliser d'importantes économies d'émissions de CO₂, une étude faisant

état d'une réduction de 67,85 kg de CO₂-e/m³ à une teneur en plastique optimale (Suksiripattanapong et al., 2022).

Le recyclage des déchets plastiques dans l'enrobé réduit le besoin de matériaux vierges et réduit les émissions de gaz à effet de serre associées à la production traditionnelle d'asphalte. Par exemple, des études ont montré que l'utilisation de polyéthylène recyclé dans l'enrobé peut réduire les émissions de carbone de 17,7 % par rapport aux mélanges conventionnels modifiés par des polymères (Elnaml et al., 2024).

Bien que les avantages de l'incorporation de déchets plastiques dans l'enrobé soient considérables, il est important de noter qu'une teneur excessive en plastique peut entraîner une diminution des performances, ce qui souligne la nécessité d'une optimisation minutieuse de la conception du mélange (Bilema et al., 2024) (Suaryana et al., 2018).

1.18.4 Inconvénients

Impact sur la qualité de l'air

Le processus de production des enrobés au plastique peut générer des fumées et des composés organiques volatils (COV), ce qui peut avoir un impact négatif sur la qualité de l'air. Des recherches ont mis en évidence que le chauffage des déchets plastiques pendant le processus de mélange peut libérer des microplastiques et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) dans l'atmosphère (Enfrin & Giustozzi, 2022) (Adetuyi et al., 2024). Ces émissions peuvent contribuer à la pollution de l'air et présenter des risques potentiels pour la santé humaine et l'environnement. Pour atténuer ces problèmes, des études suggèrent l'utilisation de températures et de temps de mélange optimisés, ainsi que la mise en œuvre de technologies de contrôle des émissions (Sofa et al., 2024).

Impact sur la santé des sols et sur le ruissellement

La possibilité que des microplastiques pénètrent dans le sol et ruissellent dans l'eau par l'usure des chaussées en enrobé contenant du plastique suscite des inquiétudes. Des recherches ont montré que des microplastiques peuvent être libérés par l'enrobé contenant du plastique lors de la dégradation de la chaussée, contaminant potentiellement le sol et les eaux souterraines (Smyth et al., 2025), (Duan et al., 2024), (Adetuyi et al., 2024).

Cependant, l'étendue de cette contamination est souvent minime par rapport à d'autres sources de pollution microplastique, telles que les particules d'usure des pneus (Duan et al., 2024).

Pour répondre à ces préoccupations, des études recommandent l'utilisation d'additifs tels que le magnésium, les cendres volantes et les scories d'acier pour améliorer les propriétés liantes des mélanges d'asphalte et réduire la libération de microplastiques (Lee et al., 2024).

CHAPITRE II

PROCEDURE EXPERIMENTALE

PARTIE 1

MATERIAUX, MATERIEL, METHODES

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

PARTIE 1 : MATERIAUX, MATERIEL & METHODES

2.1 Introduction

Dans cette étude, une démarche expérimentale a été entreprise afin d'analyser le comportement du matériau RAP à base des matériaux recyclés utilisés dans les couches de chaussée. Cette section détaille, dans un premier temps, l'origine et les caractéristiques des matériaux employés, puis présente les machines d'essais réalisés en laboratoire, en s'appuyant sur les normes techniques de référence.

Les mélanges ainsi obtenus ont été soumis à une série d'essais réalisés en laboratoire, afin d'évaluer leurs propriétés mécaniques et leur durabilité. Ces essais ont été conduits en suivant les prescriptions des normes en vigueur (NF, EN ou ASTM selon les cas), garantissant ainsi la rigueur et la comparabilité des résultats. Les analyses ont porté notamment sur la granulométrie, la sensibilité à l'eau, la compactibilité, la résistance à l'orniérage, la rigidité et la fatigue sous chargement cyclique.

A noter que des essais pré sélectifs ont été réalisés pour optimiser l'épaisseur des déchets plastiques, trois intervalles d'épaisseurs ont été choisis pour être soumis à des essais préliminaires comme suit :

- Epaisseur de 0 à 0,5mm (sacs en plastique, uniquement sur le PEBD)
- Epaisseur de 0,5 à 1mm (PEBD + PEHD + PET)
- Epaisseur de 1 à 2mm (uniquement sur le PEBD et PEHD)
- Epaisseur de 2 à 5mm (uniquement sur le PEBD et PEHD)

2.2 Provenance des matériaux utilisés

Les agrégats d'enrobé (RAP) :

Le matériau RAP objet de notre étude est issu de la réhabilitation du revêtement de la route nationale N° 27, il a été prélevé des stocks situés dans le parc de la direction des travaux publics de la Wilaya de Mila subdivision de Grarem Gouga.

Les déchets plastiques :

Les déchets plastiques sont collectés dans un cadre de valorisation par les usines de broyage et de recyclage situées dans la localité de Teleghma dans la Wilaya de Mila, les déchets sont d'origine de broyage de sac, bidons, gaines de câblage, bassines, bouteilles d'eau minérale et soda. Un tri par type de plastique (PET, PEHD, PEBD...etc.) est effectué en amont, les déchets sont stockés séparément après broyage.

Ils sont par la suite lavés et séchés avant d'être retransformés à des grains de plastique pour commercialisation. Notre matériau est donc récupéré juste après son lavage et séchage en forme de feuillets comme montré dans la figure 25.

2.3 Caractérisation des matériaux

2.4 L'enrobé recyclé

2.4.1 Prélèvement et identification

Le matériau issu du fraisage de l'ancien revêtement de la route est stocké dans une plateforme non imperméabilisée avec une hauteur des tas de 2 mètres maximum, pour des échantillons non ségrégués le prélèvement s'est effectué de haut du bas et du milieu des tas à l'aide d'une pelle mécanique (rétrochargeur) et une pelle manuelle conformément à la norme EN NF 932-1, des sacs étanches sont remplis et transportés au laboratoire.

Le matériau RAP avait environ 10 ans d'âge au moment de l'échantillonnage sur site. Les documents d'archives révèlent un bitume de grade 35/50 avec une teneur en liant de 5,25 %, tandis que les granulats provenaient d'une roche calcaire. Des essais de caractérisation du matériau ont été réalisés, notamment :

2.4.2 Teneur en bitume par extraction méthode Kumagawa EN 12697-1

Les résultats obtenus des trois échantillons testés sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 3 teneur en bitume du matériau RAP

	Ech 1	Ech 2	Ech 3	Ech 4	Ech 5	moyenne
teneur en bitume % (NF EN 12697-1)	5.19	4.81	5.33	5.48	4.76	5.11

Etendu TL = 0.72%

2.4.3 Caractéristiques du liant extrait du RAP

Un essai de laboratoire d'extraction de bitume par la méthode de distillation à l'évaporateur rotatif au tétrachloroéthylène NF EN 12697-3 a été effectué sur le matériaux vieillis RAP, des essais sur le bitume obtenu ont été réalisés pour le caractériser à savoir ; l'essai de la pénétrabilité du bitume ainsi que l'essai de température de ramollissement TBA (bille et anneau), les résultats obtenus sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 4 Caractéristiques du liant extrait du RAP

	ECH 1	ECH 2	ECH 3	Moy.
C° TBA	67	64	65	65
Pénétrabilité (1/10 mm)	25	23	22	23
MVR (g/m3)	1,016	1,026	1,022	1,021

Etendu TBA = 3°C

Etendu pénétrabilité = 3 (1/10 mm)

2.4.4 Analyse granulométrique des granulats du matériau RAP.

Après extraction du bitume des granulats, et conformément à la méthode de la norme (NF EN 12697-2), le matériau récupéré (graviers et sable) été soumis à une analyse granulométrique en le plaçant après dans un fuseau de type BBSG 0/14, comme indiqué sur la figure 1.

Tableau 5 Analyse granulométrique des granulats du matériau RAP

Tamis	Passant %					Moyenne	Ecart type e
	ECH 1	ECH 2	ECH 3	ECH 4	ECH 5		
31,5	100	100	100	100	100	100	-
20	100	100	100	100	100	100	-
14	100	95	99	96	98	97,6	2,07
6,3	51	49	55	57	51	52,6	3,29
2	33	29	30	27	35	30,8	3,19
0,25	24	13	14	15	17	16,6	4,39
0,063	7,1	6,3	6,4	7,3	5,2	6,46	0,83

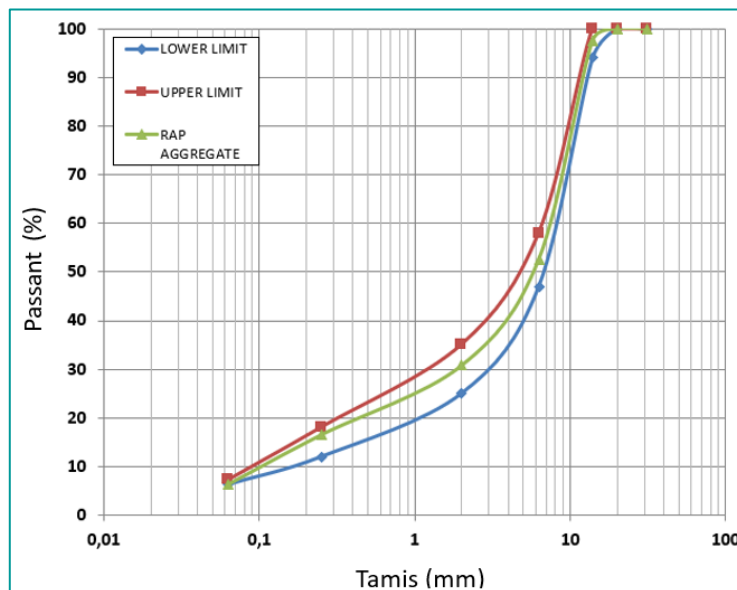


Figure 24 Courbe granulométrique des granulats du matériau RAP (Moyenne).

Nous indiquons qu'un tamisage du matériau avant désenrobage a été effectué par les tamis 20, 31.5, 40, 50 et 63 mm, les résultats obtenus sont les suivants :

- Passants au tamis 20 mm = 18.8%
- Passants au tamis 31.5 mm = 39.7%
- Passants au tamis 40 mm = 74.7%
- Passants au tamis 50 mm = 98.1%
- Passants au tamis 63 mm = 100%

Le matériau est classé U AE d/D = 63 AE 0/14 (NF EN 13108-8)

2.4.5 Classification du matériau agrégat d'enrobé RAP selon XP P 98-135

En application du guide CEREMA pour le recyclage des agrégats d'enrobé (IDRRIM, 2021) nous obtenons ce qui suit :

Étendu de la teneur en liant = 0.72% soit une teneur en liant de classe « TL₀ »

Pénétrabilité = 23 avec étendu = 3

TBA = 65 avec étendu = 3 soit une catégorie B₀

Passant à 2xD = 100%

Passant à 1.4xD = 100%

Passant à D = 97.6% e10 (e=2.07<10) soit des granulats G₀

2.4.6 Caractérisation des granulats

Des essais de caractérisation des granulats ont été réalisés lors de la formulation du matériau (archives) conformément aux normes correspondantes, masse volumique (NF EN 1097-6), essai d'abrasion Los Angeles (NF EN 1097-2), essai d'abrasion Micro Deval (NF EN 1097-1), les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 2.

Tableau 6 caractéristiques des granulats d'enrobé RAP

	Méthode	Valeur
Densité (g/cm ³)	NF EN 1097-6	2.63
LA %	NF EN 1097-2	26
MDE %	EN 1097-1	18

Un autre essai de détermination de la masse volumique réelle des agrégats par la méthode de la pesée hydrostatique a été réalisé au laboratoire, le résultat obtenu confirme les valeurs données par l'historique du matériau soit une MVR_e = 2,63 g/cm³

2.5 Déchets plastiques

Les particules plastiques se présentent sous forme de feuillets de dimension maximale d'environ 15 mm et d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 2 mm. Elles ont été lavées avec un détergent ménager et séchées avant d'être placées dans des boîtes séparées avec marquage par type de polymère (figure 3). Certaines caractéristiques ont été fournies par le fournisseur, d'autres ont été déterminées lors de notre recherche. Le tableau 3 présente les caractéristiques physiques des déchets selon le type de plastique, tandis que la figure 3 illustre la courbe de granulométrie de chaque type de plastique.

Tableau 7 caractéristiques des déchets plastiques

		LDPE	HDPE	PET
Densité (g/cm ³)	NF EN ISO 3838	0.926	0.979	1.388
Température de ramolissement °C	EN ISO 2507	121	134	155
point de fusion °C	NF EN ISO 3146	185	204	226



Figure 25 Lavage et séchage des déchets plastiques

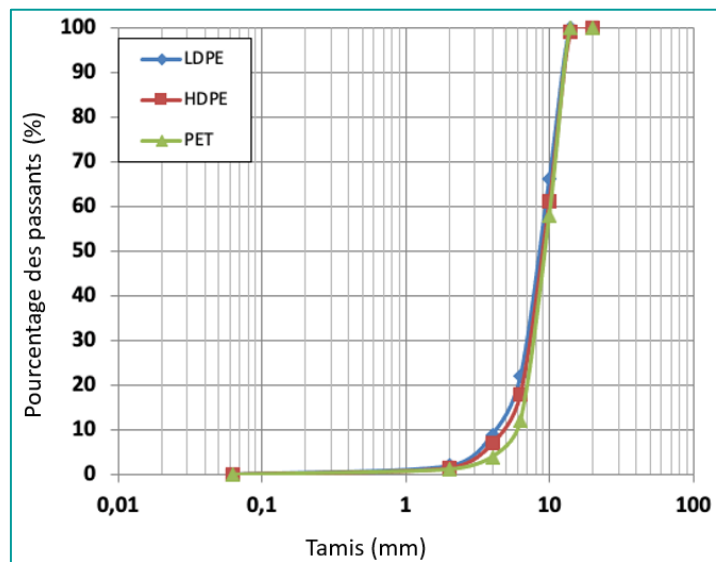


Figure 26 Courbes granulométrique des trois types de plastique.

2.6 Préparation des matériaux

2.6.1 Les agrégats d'enrobé (RAP) :

2.6.1.1 Le séchage

Le matériau est mis dans des plateaux en acier et étalé en couche d'environ 05 cm, le plateau est ensuite pesé avant d'être introduit dans une étuve ventilée à 50° (IDRRIM, 2021) Il a été constaté après plusieurs pesées des plateaux à partir de 04 heures de séchage que le matériau atteint un poids inchangé avec une teneur en eau initiale variant de 1.6 à 2.1 %.

Le matériau est ensuite mis dans des sacs en plastique et soigneusement fermés afin de le conserver dans son état sec.

A noter que cette opération de séchage ne s'effectue que quelques heures avant le préchauffage proprement dit du matériaux RAP à 130° (IDRRIM, 2021)

2.6.1.2 Préchauffage du matériau RAP

Afin d'optimiser le temps de malaxage dans le récipient sous feu nous préférons préchauffer le matériau seul avant de le mélanger avec du plastique.

L'enrobé de recyclage est mis dans des plateaux (bacs) en acier en couche de 10 cm maximum puis introduit dans une étuve à 130° pendant une durée de 2,5 heures.

2.6.2 Les déchets plastiques

2.6.2.1 Le préchauffage

Etant déjà asséchés, les feuillets de plastique passent au préchauffage avant d'être malaxé avec le matériaux bitumineux, une couche fine de déchets est étalée dans un plateau en acier (une couche de deux à trois feuilles d'épaisseur maximum). Le plateau est ensuite introduit dans une étuve, la température de préchauffage (101° ~ 135°) varie d'un matériau à un autre selon le type de plastique, elle est 20° moins que la température de ramollissement du matériau et ce afin d'éviter le collage des feuilles de plastique et garantir la non ségrégation de ces derniers lors de malaxage avec l'enrobé bitumineux.

A noter que l'ajout des déchets plastiques sans préchauffage pendant le malaxage de l'enrobé ne leur suffit pas de fondre correctement et coller aux granulats.

2.6.3 Le dosage en liant supplémentaire du mélange

Il est bien évident que le mélange bitumineux de recyclage a une teneur en bitume déterminée pendant la caractérisation du matériau, l'ajout de particules solides telles que les déchets plastiques ou granulats pourrait conduire à une augmentation des vides d'une part et à une insuffisance d'enrobage des particules ajoutés d'autre part.

Nous partons sur l'hypothèse que les additifs plastiques fondent partiellement et se liquéfie pendant le malaxage à chaud du mélange bitumineux et que l'ajout de liant additionnel n'a pas de nécessité.

2.7 Préparation des échantillons

2.7.1 Introduction des déchets plastiques

Le matériau RAP préalablement préchauffé est versé dans un malaxeur de laboratoire préchauffé à 130°C et mis en rotation à une vitesse de 120 tr/min pendant 120 à 300 secondes. Dès le début de la rotation, nous introduisons, au pourcentage souhaité, les particules de déchets plastiques de manière progressive afin d'obtenir un mélange homogène.

Le poids des déchets plastiques à introduire au mélange pour 1 Kg de matériau RAP et pour une teneur en liant de 5,11% est donné par le tableau suivant :

Tableau 8 poids des déchets plastiques additionnés en fonction de pourcentage désiré

Matériau	Dosage	Poids (g)
Enrobé RAP		1 000,00
Granulats		948,90
Bitume		51,10
Déchets plastiques	1%	9,49
	1,5%	14,23
	2%	18,98



Figure 27 Conservation et pesage des déchets plastiques

2.7.2 Malaxage du mélange

Après l'ajout des déchets plastiques nous mettons le mélange dans un malaxeur préchauffé à 160 °C et nous le mettons en rotation à une vitesse de 120 tr/min et ce pendant 60 à 90 secondes conformément à la norme EN 12697-35, selon la quantité du mélange cette durée peut aller jusqu'à 120 secondes. Après l'arrêt du malaxeur nous mesurons la température du mélange qui doit être 160°C ± 5°C, en cas de non atteinte de la température nous faisons tourner le malaxeur encore par paliers de 30 secondes jusqu'à obtenir la température souhaitée et ce pour ne pas surchauffer le mélange.

Pour chaque type de polymère (PEBD, PEHD, PET), le mélange obtenu est composé de matériau RAP et de déchets plastiques en différents pourcentages, à savoir : 0 %, 1 %, 1,5 % et 2 % de poids des granulats.

2.7.3 Moulage et compactage des corps d'épreuve

Après chauffage du mélange, les moules (Duriez & PCG) ainsi que les plaques (ornièreur et fatigue) sont préchauffés à 160°C.

Pour les essais de tenue à l'eau, les corps d'épreuve sont soit des éprouvettes compactées à l'aide de la Presse à Cisaillement Giratoire, soit des carottes extraites de plaques confectionnées au compacteur de plaques. Cependant, pour déterminer la tenue à l'eau selon NF EN 12697-12, il est nécessaire de compacter les éprouvettes selon le processus par compression statique à double effet, décrit dans la partie B, pour retrouver le mode opératoire Duriez de l'ancienne NF P 98-251-1.

Pour les essais mécaniques, les plaques sont confectionnées au compacteur de plaques, selon NF P 98-250-2 ou NF EN 12697-33, à compacité visée. L'utilisation d'une plaque ou d'une planche en fin de compactage pour améliorer l'état de surface de la plaque n'est pas autorisée car des effets sur le résultat à l'essai d'orniérage ont été mis en évidence (Delorme et al., 2007).

2.7.4 Sciage et collage des corps d'épreuve

Les corps d'épreuve cylindriques ou trapézoïdaux sont sciés et collés selon les indications de la norme NF P 98-250-3. Ce point n'est pas traité par les normes européennes (Delorme et al., 2007).

2.7.5 Conservation des corps d'épreuve

Pour l'essai de tenue à l'eau ITSR, les éprouvettes doivent subir un mûrissement minimal de 16h entre la confection et la mise en conservation.

Pour un essai d'orniérage, il est nécessaire d'avoir au moins 2 jours entre la fin du compactage et la mise en condition sur l'ornièreur (NF EN 12697-22).

Pour un essai de fatigue ou de module, le délai entre le carottage ou le sciage et le début de l'essai est de 15 jours à 2 mois (Delorme et al., 2007).

2.7.6 Pourcentage de vides des corps d'épreuve

Les corps d'épreuve destinés à la réalisation d'essais d'orniérage ou d'essais mécaniques (module ou fatigue) doivent répondre à des spécifications concernant les pourcentages de vides.

Le pourcentage de vides est mesuré par méthode géométrique. Les principales valeurs sont répertoriées dans le Tableau 9 (Delorme et al., 2007) :

Tableau 9 Caractéristiques des corps d'épreuve (Dulorme).

	Ornièreur		Fatigue / module	
	Épaisseur de la plaque mm	Pourcentage de vides %	Épaisseur de la plaque mm	Pourcentage de vides %
EB-BBSG et EB-BBME	100	5 à 8	120	5 à 8

2.8 Compagne d'essais au laboratoire

Afin de mesurer les performances de l'enrobé issu du mélange de matériau bitumineux de recyclage RAP et des déchets plastiques une compagne expérimentale a été menée aux laboratoires suivants :

LTP-EST Constantine :

- Teneur en bitume RAP, Granulométrie RAP, LA, MDE, MVR, Duriez, densité des déchets plastiques

Laboratoire de contrôle interne/externe CITIC Drean Wilaya de Taref :

- Presse à cisaillement giratoire PCG

Laboratoire de contrôle interne/externe CITIC Kebouda Wilaya de Taref :

- Module complexe & essai de fatigue

2.8.1 Mesure de la tenue à l'eau DURIEZ (NF P 98-251-1) méthode B

Cet essai permet d'évaluer la résistance à l'eau d'un enrobé bitumineux en mesurant la chute de sa résistance à la compression après une immersion de 7 jours (figure 27). Le fluage à la rupture des éprouvettes lors de l'écrasement est également mesuré. La valeur de la sensibilité ou tenue à l'eau est donnée par le rapport suivant :

$$i/C = r / R$$

Où :

R est la résistance moyenne à la compression à sec (MPa)

r est la résistance moyenne à la compression après immersion (MPa)



Figure 28 Fabrication d'éprouvettes pour test Duriez.

a- Préparation des éprouvettes

Le mélange hydrocarboné doit être fabriqué en une seule fois. Les températures de référence de préparation des éprouvettes de mélanges sont définies comme suit :

–bitume 80/100 : 140°C
–bitume 35/50 : 160 °C (pour notre cas)

–bitume 60/70 : 150 °C.
–bitume 20/30 : 180 °C.

Le remplissage des moules (80 mm) se fait comme suite :

1000g+/- 1g pour les mélanges hydrocarbonés de D inférieur ou égal à 14mm (pour notre cas).
3500g+/-3.5g pour les mélanges hydrocarbonés de D supérieur à 14mm.

Les moules pleines sont ensuite introduites dans une étuve réglée à la température de référence durant 0,5 à 2 heures.

Ensuite il faut compacter les éprouvettes (par double effet) sous une charge adéquate au diamètre pour une durée de 5 min. les éprouvettes sont démoulées après retour à la température ambiante.

b- Mode opératoire

Après fabrication, les éprouvettes sont conservées à une température ambiante (c'est la phase de dégazage des éprouvettes) ensuite les éprouvettes sont réparties :

-2 éprouvettes sont destinées à la mesure de la masse volumique apparente hydrostatique.
-5 éprouvettes sont destinées à la conservation sans immersion dans le cas de D inférieur à 14mm et 4 dans le cas de D supérieur à 14mm.

Les éprouvettes restantes sont destinées à la conservation en immersion après le contrôle de la variation de la masse des différentes éprouvettes au cours de la conservation avec ou sans immersion.

Les éprouvettes soumises à l'essai de compression à jour j+8 à l'aide de la presse, la vitesse du plateau est réglée à 1mm/s.

La résistance à la compression simple est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette d'essai c'est le rapport de la charge maximale à la section circulaire des éprouvettes.

On établit également le rapport de la résistance avec immersion r à la résistance sans immersion R (r/R). La valeur du fluage est donnée directement par l'équipement de mesure.

Le tableau suivant donne les valeurs admissibles des résultats selon le type de l'enrobé.

Tableau 10 valeurs admissibles des résultats selon le type de l'enrobé (grade de bitume 35/50) NF EN 12697-12

Type d'enrobé	R (Mpa)	r/R	Fluage (mm)
BBSG	6 à 14	$\geq 0,70$	< 4
BBME	8 à 15	$\geq 0,80$	< 4

2.8.2 Essai à la presse à cisaillement giratoire PCG (NF EN 12697-31)

Cet essai (figure 29) permet de caractériser la compactibilité des enrobés hydrocarbonés et d'évaluer leur maniabilité et de prédire certaines difficultés de compactage sur chantier. Les résultats des essais doivent répondre aux spécifications ci-dessous dans le tableau 11 conformément aux recommandations du LCPC (Delorme et al., 2007).

a- Principe de l'essai

Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé, foisonné et à la température d'essai (130 °C à 160 °C environ) dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre. On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression, verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1° (externe) ou 0,82° (interne) et soumise à un mouvement circulaire. Ces différentes actions exercent un compactage par pétrissage. On observe l'augmentation de compacité (diminution du pourcentage de vides) en fonction du nombre de tours.

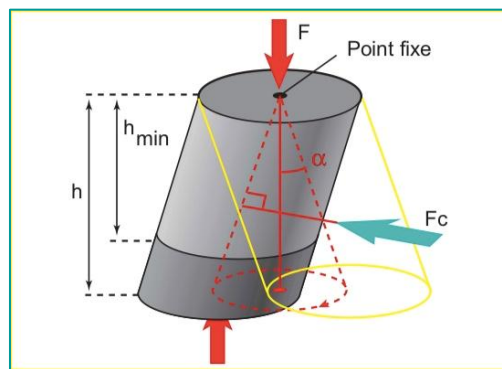


Figure 29 Principe de l'essai PCG.

- h_{\min} : hauteur minimale pour 0% de vide
- h : hauteur apparente pour N girations
- F : force axiale
- F_c : force de cisaillement angle d'inclinaison
- α : angle d'inclinaison

b- Conditions d'essai

- Angles d'inclinaison α prédéterminés pour répondre aux normes française, européenne et américaine à $\pm 0,02^\circ$ près.
- Vitesse de rotation : 30 tr/min à $\pm 10\%$ près.
- Contrainte axiale : 6.105 Pa.

Soit force axiale F prédéterminée selon diamètre du moule à ± 250 N

$F \approx 10\,550$ N. pour un moule \varnothing 150 mm $F \approx 12\,000$ N. pour un moule \varnothing 160 mm

- Température de l'essai :

Selon le grade du liant en général de 140 °C à 180 °C ± 10 °C.

- Nombre de girations $n_g > 100$ (en général pour les enrobés hydrocarbonés $n_g = 200$)

On mesure la hauteur de l'éprouvette pour en déduire l'évolution de la teneur en vides V en fonction de n_g . On peut ainsi tracer la droite de régression linéaire :

$$V = v_1 + K \log (n_g)$$

c- Présentation de la machine d'essai

Le compacteur giratoire modèle 4140 (figure 30) satisfait toutes les spécifications SUPERPAVE™ de la Federal Highway Administration (FHWA). Il assure un compactage giratoire sûr et fiable des échantillons d'asphalte à une pression de consolidation et un angle de rotation donnés. Le modèle 4140 offre des améliorations significatives par rapport aux autres compacteurs giratoires en termes de sécurité, de durabilité, de niveau sonore, de dégagement de chaleur et de consommation d'énergie.

Principales caractéristiques du TROXLER - Modèle : 4140 B-5 :

- Dimensions (avec capot de vérin installé) : 214 H x 89 L x 94 P cm
84 H x 35 L x 37 P po
- Dimensions de la base de l'extrudeuse : 12 L x 14 P po
- (sans poignée)
- Hauteur (sans capot de vérin) : 188 cm
- Poids : 363 kg
- Poids à l'expédition : 408 kg
- Poids du moule : 10,2 kg
- Poids du palet : 3,2 kg
- Pression de consolidation : 200 à 1 000 kPa
- Plage de pression : 29 à 145 psi
- Précision de la pression : 200 à 600 kPa
± 30 kPa pour les girations 1 à 5
± 18 kPa pour les girations 6 et plus
600 à 1 000 kPa
± 5 % pour Rotations 1 à 5
± 3 % pour les rotations 6 et plus
- Nombre de rotations 0 à 999
- Angle de rotation : 0,5° à 2,0° ± 0,02,
par incréments de 0,02
(Calibré en usine à 1,25)
- Vitesse de rotation : 30 ± 0,5 tr/min
- Moteur CC : 1 CV
- Vitesse nominale du moteur CC : 1 800 tr/min

- Température maximale de l'échantillon : 162 °C (324 °F)
- Température maximale du moule : 175 °C (350 °F)
- Température ambiante de fonctionnement : 10 à 70 °C
- Température ambiante de stockage : -55 à 85 °C

d- Interprétation

Interprétation : pour un nombre de girations donné, fonction du type d'enrobés, de la nature des granulats et de l'épaisseur de mise en œuvre, le formulateur peut prévoir le pourcentage de vides sur le chantier. Dans le cas de couches de roulement très minces, il s'agit plutôt d'approcher la macrotexture que la compacité.

L'essai est très sensible aux facteurs de formulation, comme le "frottement" du squelette granulaire (angularité), la teneur en liant.

A partir de cet essai, les risques d'orniérage peuvent être aussi détectés. Grâce à la rapidité de l'essai, la Presse à Cisaillement Giratoire est un instrument précieux pour le formulateur. Cet essai permet également de déceler les changements imperceptibles par les essais courants sur les granulats. Aussi, la Presse à Cisaillement Giratoire sert à vérifier la constance des formules dans le temps.

Les spécifications s'appliquent à tous types d'enrobés. Elles portent sur une fenêtre de pourcentage de vides à respecter pour un nombre de girations donné.

Le pourcentage de vide peut être calculé pour chaque hauteur du cylindre par la formule suivante :

$$V\% = 100(1 - MVA \div MVR)$$

MVR masse volumique réelle du mélange hydrocarboné calculée pour chaque teneur en fibre plastique.

$$MVR = \frac{100}{\frac{\%G_1}{\rho_{g1}} + \frac{\%G_2}{\rho_{g2}} + \dots + \frac{\%G_n}{\rho_{gn}} + \frac{t_{int}}{\rho_b}}$$

Où % G_i sont les pourcentages des fractions granulaires ou des déchets plastiques et pi leurs masses volumiques respectives. T_{int} et ρ_b sont la teneur en liant interne et la masse volumique du bitume.

MVA masse volumique apparente par pesée hydrostatique du mélange hydrocarboné pour chaque teneur en fibre plastique.

Tableau 11 Spécification des valeurs d'indice de vide en fonction du nombre de rotations LCPC

Nbre de girations	% vides (Spécifications)
10	≥ 11 %
60	5 à 10 %
80	4 à 9 %



Figure 30 Presse à cisaillement giratoire Troxler 4140 B-5.

2.8.3 Mesure de la profondeur de l'orniérage NF EN 12697-22

L'ornièreur français est une machine ou méthode de conception de mélanges (figure 31) utilisée pour évaluer la résistance des mélanges à la déformation permanente dans des conditions où le risque d'orniérage est élevé. Le tableau 12 présente les valeurs de profondeur d'orniérage selon les spécifications.

a- Principe de l'essai

Le corps d'éprouve est une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5 cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence : 1 Hz, charge : 5 kN, pression: 6 bars), dans des conditions sévères de température (60 °C).

Pour les essais mécaniques, les plaques sont confectionnées au compacteur de plaques, selon NF P 98-250-2 ou NF EN 12697-33, à compacité visée. L'utilisation d'une plaque ou d'une planche en fin de compactage pour améliorer l'état de surface de la plaque n'est pas autorisée car des effets sur le résultat à l'essai d'orniérage ont été mis en évidence.

Pour un essai d'orniérage, il est nécessaire d'avoir au moins 2 jours entre la fin du compactage et la mise en condition sur l'ornière (NF EN 12697-22).

b- Méthode française LCPC

Le testeur de suivi de roue français (The French Wheel Tracking Tester - FWTT) est une méthode française de conception des mélanges utilise le FWTT pour évaluer la résistance d'un mélange à la déformation permanente dans des conditions où le risque d'orniérage est élevé.

Le FWTT, est conforme à la norme EN 12697-22. Dans cet appareil, deux dalles de dimensions 500 x 180 x 100 mm sont testées simultanément. La roue utilisée pour appliquer la charge à l'échantillon est un pneu 400 x 8 sans bande de roulement et dont la largeur de voie est de (80 ± 5) mm. La pression des pneumatiques est réglée sur 600 ± 30 kPa. Le pneu Trelleborg T522 BV Extra ou spéciale 6 plis convient pour cet essai.

Le trajet du pneumatique doit être de 410 ± 5 mm par rapport à l'échantillon. La fréquence de déplacement (aller et retour) est de $1,0 \pm 0,1$ Hz. La charge de roulement appliquée à

l'éprouvette est fixée à $5\,000 \pm 50$ N au centre de l'essai conformément à la norme, mais il est possible d'ajuster la charge si nécessaire. L'angle d'inclinaison de la roue doit être réglé sur $0,0 \pm 0,5$ °.

L'équipement d'essai est contenu dans une chambre à température contrôlée, capable de chauffer jusqu'à 60 ° C. Les températures d'essai standard pour les essais effectués dans ces appareils à grande échelle se situent entre 50 et 60 ° C. La température est régulée par une sonde qui est réglée à l'intérieur de l'échantillon et elle doit maintenir la température des échantillons à ± 2 ° C. l'essai est exécuté sur plusieurs cycles. Pour commencer, 1000 cycles sont effectués à température ambiante. Le profil des échantillons est ensuite mesuré pour être le point zéro. Le profil est mesuré en mesurant la hauteur de l'échantillon dans 15 positions le long de la trajectoire de la roue. Les valeurs des 15 mesures sont moyennées.

Les échantillons sont ensuite réglés à la température d'essai et laissés à conditionner pendant au moins 8 heures. L'essai est ensuite exécuté pour 10 000 ou 30 000 cycles. Ou exécutez jusqu'à ce qu'une profondeur d'ornièrre de 10% soit dépassée. La profondeur de l'ornièrre doit être mesurée après 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 cycles, avec des mesures optionnelles prises à 30, 100, 300 et 100 000 cycles.

La profondeur de la déformation produite dans le passage de roue, est notée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications portent sur un pourcentage d'ornièrre à un nombre de cycles donné, qui dépend du type de matériau, et de sa classe.

Tableau 12 valeurs admissibles (Bitume 35/50) LCPC

Type d'enrobé	Classe	Nombre de cycles	Profondeur (mm)
BBSG BBME	1	30 000	$\leq 10\%$ (P_{10})
	2	30 000	$\leq 7.5\%$ ($P_{7.5}$)
	3	30 000	$\leq 5\%$ (P_5)

c- Présentation de la machine d'essai

La machine utilisée est de marque Cooper, elle peut tester à la fois deux échantillons de 500x180 mm à la fois, elle peut circuler 410 mm sur la plaque en lui appuyant une charge de 5000N en effectuant des mouvements d'aller-retour d'une fréquence de 1 Hz (1 A/R à la seconde)

Principales caractéristiques Modèle Cooper CRT-WTENLD:

- Essais de matériaux pour routes avec des charges à l'essieu d'au moins 13 tonnes
- Dispositif unique de mesure du profil d'ornièrres relié au système d'acquisition de données
- Cabinet intégré à température contrôlée
- Plage de température d'essai de 40 à 60 °C
- Essais pour un nombre de cycles ou une profondeur d'ornièrre spécifiés
- Système lumineux tricolore indiquant l'état de l'ordinateur
- Portes à double vitrage pour la visualisation des essais
- Système de chargement facile pour la manipulation des échantillons

- Conditionnement des échantillons à la température d'essai
- Logiciel Windows™ convivial
- Démarrage/arrêt automatique des essais
- Variateur de vitesse en boucle fermée
- Les échantillons peuvent être compactés dans le CRT-RCENLD-II, puis mis sur chenilles sans démoulage

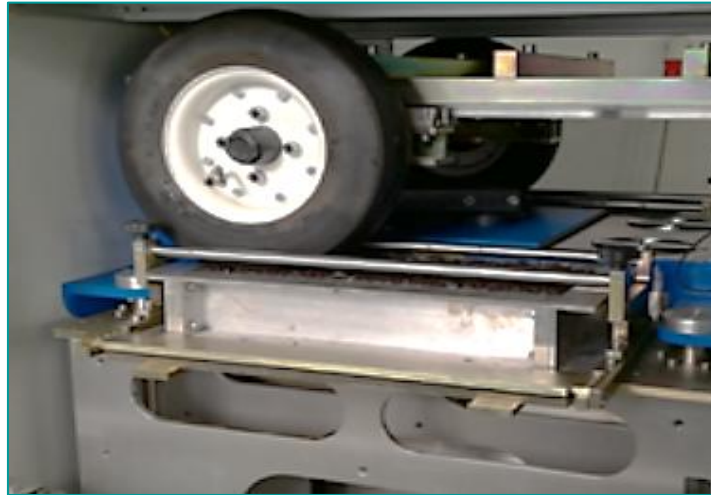


Figure 31 Ornièreur français Cooper CRT-WTENLD.

2.8.4 Module complexe et résistance à la fatigue

Cet essai permet de mesurer la fatigue des enrobés bitumineux sous forme de dalle de matériau rigide soumise à des contraintes de traction-flexion (figure 32).

a- Principe de l'essai

Une éprouvette trapézoïdale est soumise, à une température de 10°C et pour une fréquence de chargement de 25Hz fixées, à une déformation imposée. Lorsque la contrainte appliquée pour maintenir la déformation constante est diminuée de moitié, l'éprouvette est considérée comme endommagée au nombre de cycles considéré.

La forme trapézoïdale de l'éprouvette a été choisie pour obtenir une déformation maximale en dehors de la zone d'encastrement de l'échantillon sollicité en poutre console. Des calculs résistance de matériaux (RDM) montrent que la rupture s'effectue généralement au voisinage de 1/5 de la hauteur totale. Une grande disparité expérimentale existe néanmoins sur les valeurs de cette hauteur. L'expérience montre qu'elles peuvent être comprises entre $h/10$ et $h/2$ compte tenu de l'hétérogénéité du matériau.

La dispersion des résultats de fatigue conduit à utiliser au moins six éprouvettes par niveau de déformation et trois niveaux de déformation minimum afin d'obtenir des résultats statistiquement significatifs.

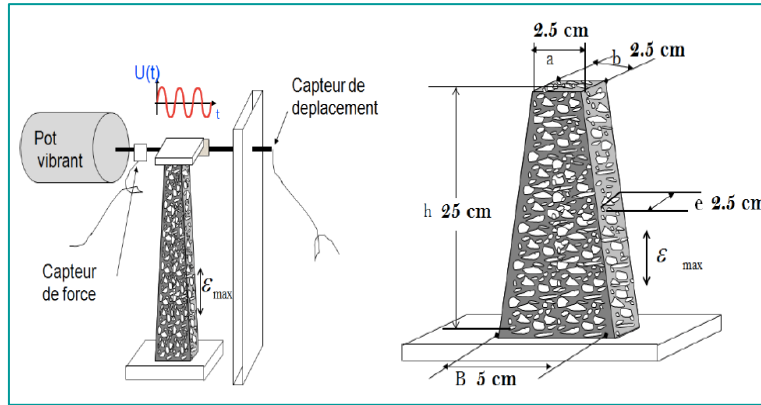


Figure 32 Principe de l'essai de flexion sur éprouvette trapézoïdale et schéma de l'éprouvette trapézoïdale pour essai de fatigue et de module

b- Dimensions de l'éprouvette

Le tableau suivant donne les valeurs des dimensions des éprouvettes pour chaque type d'éprouvette et chaque grandeur (D) des granulats d'enrobé comme suite :

Tableau 13 dimensions des éprouvettes pour chaque type d'éprouvette et chaque grandeur (D)

Dimensions des éprouvettes mm	Éprouvettes prismatiques mm			Éprouvettes trapézoïdales mm		
	$D \leq 16 \text{ mm}$	$16 < D \leq 22 \text{ mm}$	$D > 22 \text{ mm}$	$D \leq 16 \text{ mm}$	$16 < D \leq 22 \text{ mm}$	$22 < D \leq 45 \text{ mm}$
B				56 ± 1	70 ± 1	70 ± 1
b	40 ± 1	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	25 ± 1
e	40 ± 1	40 ± 1	80 ± 1	25 ± 1	25 ± 1	50 ± 1
h	120 ± 1	160 ± 1	320 ± 1	250 ± 1	250 ± 1	250 ± 1

NOTE D est la dimension maximale du granulat dans le mélange, en millimètres (mm).

Pour notre cas il s'agit d'un mélange bitumineux BBSG 0/14 pour une éprouvette trapézoïdale donc correspond aux données entourées du rectangle rouge.

c- Préparation et collage des éprouvettes

L'obtention des éprouvettes se fait par sciage à partir des plaques fabriquées en laboratoire selon la norme EN 12697-33 ou de plaques prélevées dans des couches de chaussées d'une épaisseur de $\geq 60 \text{ mm}$. L'axe longitudinal de la plaque doit être parallèle à l'axe de compactage horizontal du mélange.

Chaque éprouvette doit être collée par sa base à un support métallique, de manière à garantir un bon positionnement géométrique de l'éprouvette par rapport à son support. Le casque reliant l'éprouvette à la machine de sollicitation alternative doit être collé sur la tête de l'éprouvette. Le support doit avoir une épaisseur minimale de 10 mm.

d- Présentation de la machine d'essai

L'appareil de Cooper Technology (CRT- 2PT) teste deux éprouvettes trapézoïdales

simultanément et déterminent le module complexe sur une gamme étendue de deux fréquences et deux températures. Lors de l'essai de fatigue les éprouvettes sont sujettes à une amplitude de déformation constante à une fréquence et une température sélectionnée jusqu'à ce que le module complexe diminue à un niveau cible choisi par l'utilisateur (notamment 50% de sa valeur initiale).

Principales caractéristiques :

- Structure de l'appareil rigide logé dans une enceinte climatique de contrôle de la température avec portes à double vitrage et circulation d'air par ventilateur puissant
- Plage de température de l'enceinte climatique de moins 20 à 30 °C
- Appareil conçu pour tester 2 trapèzes simultanément plages de fréquence de 0,1 à 35 hertz
- Réglage Manuel précis de l'amplitude de déformation
- Réglage précis du capteur de déplacement avant l'essai en utilisant le retour d'information du logiciel
- Deux capteurs de force piézoélectrique à tenue en fatigue nominale $\pm 2,5$ KN haute précision
- Système de contrôle et d'acquisition grande vitesse pour l'interface avec l'ordinateur hôte
- Logiciel convivial pour les essais de modules de rigidité et fatigue
- Logiciel pour l'exécution automatique des balayages de fréquence
- Normes : EN 12697-24 A et EN 12697-26 A et NF P 98 260-2

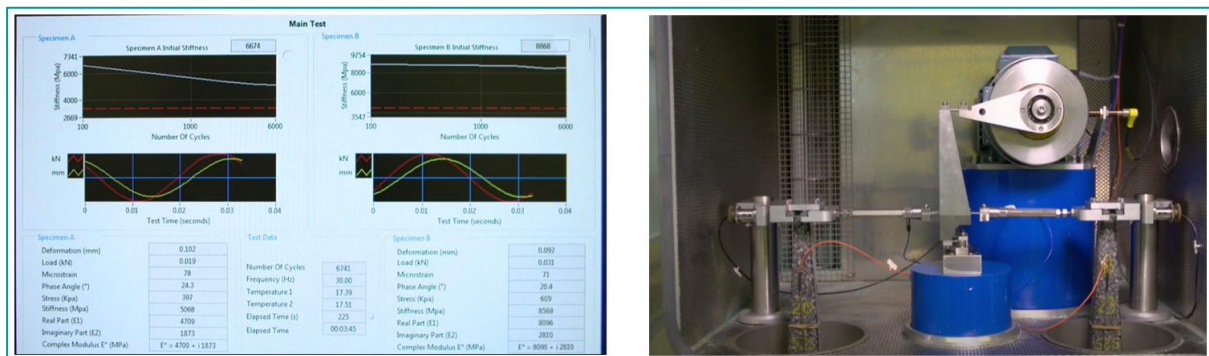


Figure 33 Appareil de l'essai de flexion sur éprouvette trapézoïdale (fatigue et de module)

e- Procédure pour la détermination du module

L'éprouvette doit être soumise à une force sinusoïdale à la fréquence cible de ± 5 % appliquée à la tête pendant un minimum de 30 s et un maximum de 2 min selon une flèche imposée correspondant à une déformation, ϵ , inférieure à 50 microdéformations.

La force, F_0 , la flèche, z_0 , et l'angle de phase, ϕ , doivent être mesurés au cours des 10 dernières secondes de l'essai.

Le module complexe peut être déterminé à la température et à la fréquence requises. Si la courbe maîtresse doit être déterminée, il faut déterminer le module complexe à au moins 4 températures séparées par 10 °C au plus et pour chaque température à un minimum de 4 fréquences également espacées sur une échelle logarithmique avec un rapport minimal de 10 entre les fréquences extrêmes.

Réglage et calage de la machine (données d'entrée)

Déformation imposée $\varepsilon = 50 \mu\text{def}$. Soit le déplacement en tête de l'éprouvette z selon la formule de la norme NF EN12697-24 juin 2018 :

$Z = \varepsilon / K\varepsilon$ avec :

$$K_\varepsilon = \frac{(B_i - b_i)^2}{8 \cdot b_i \cdot h_i^2 \left[\frac{(b_i - B_i) \cdot (3B_i - b_i)}{2 \cdot B_i^2} + \ln \frac{B_i}{b_i} \right]}$$

i est l'indice de l'éprouvette pour un essai élémentaire (varie de 1 à n) ;

h_i est la hauteur, en millimètres (mm) ;

B_i est la longueur de la grande base, en millimètres (mm) ;

b_i est la longueur de la petite base, en millimètres (mm) ;

application numérique :

$h=250$ mm

$B=56$ mm

$b= 25$ mm

Nous obtenons $z = 0.065$ mm (arrondi à 3 chiffres significatifs)

Fréquences de l'essai en Hz:

0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30 puis 0.1 (s'assurer que le module pour la première et la dernière fréquence de 0.1 Hz ne change pas de 3% maximum.)

Températures de l'essai en ° C:

-10, 0, 10, 20, 30, 40, 50

Temps de l'essai (entre 30s et 120 s) on choisit 90s

Temps de mesure du module = 10 derniers secondes de l'essai

Nombre de cycles appliqué :

Fréquences de 0.1 à 2 Hz, 50 répétitions (cycles) de charges

Fréquences de 5 à 30 Hz, 200 répétitions de charges

f- Interprétation

Module : Les éprouvettes sont soumises en tête à des sollicitations sinusoïdales constantes pour des fréquences et températures définies. L'excitateur impose un effort sinusoïdal en tête d'éprouvette provoquant un déplacement. Le déplacement ainsi que la force en tête d'éprouvette sont mesurés, permettant ainsi de calculer à partir des caractéristiques des

éprouvettes, les valeurs de contraintes et déformation maximales nécessaires pour la détermination du module complexe.

Ces mesures sont effectuées dans le domaine « Linéaire » du matériau, pour que le module soit indépendant de la déformation appliquée. La température demeure constante pendant la durée de l'essai. Le résultat est la moyenne des modules des 6 éprouvettes testées. La valeur de module retenue dans les normes produit est le module à 15 °C et 10 Hz.

Le module complexe (E^*) est l'expression de la rigidité d'un matériau viscoélastique sous chargement cyclique, tel qu'un enrobé. La déformation d'un matériau viscoélastique dépend du temps de chargement et est différée dans le temps, contrairement à un matériau élastique dont la déformation est instantanée. De plus, l'enrobé est un matériau thermosensible, ce qui signifie que le E^* varie également en fonction de la température. Le E^* permet de généraliser des méthodes de résolution de problèmes mécaniques développées pour les matériaux élastiques aux matériaux viscoélastiques (Di Benedetto & Corté, 2005).

Le E^* est un nombre complexe composé d'une partie réelle (E_1) et d'une partie imaginaire (E_2), tel que présenté à l'Équation 1. Le E^* peut également se décomposer en deux paramètres sous sa forme vectorielle, soit son module ($|E^*|$) (norme du vecteur) à l'Équation 2 et son argument (ϕ) (angle du vecteur) à l'Équation 3, tel que représenté dans le plan complexe de la Figure 34.

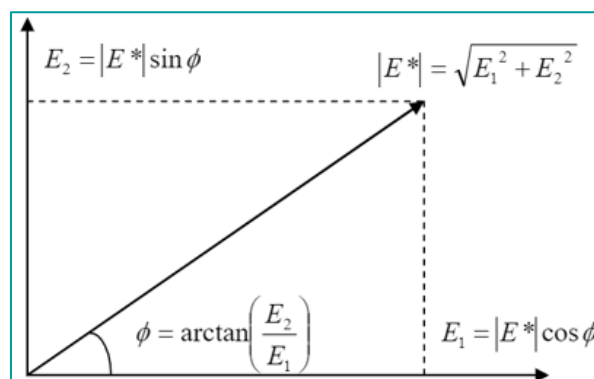


Figure 34 Représentation du module complexe

$$\text{Équation 1 : } E^* = E_1 + iE_2 = |E^*| \cos \phi + i|E^*| \sin \phi$$

$$\text{Équation 2 : } |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

$$\text{Équation 3 : } \phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

où E^* = module complexe (MPa),

$|E^*|$ = module du module complexe (MPa),

ϕ = argument du module complexe (rad),

E_1 = partie réelle du module complexe (MPa),

E_2 = partie imaginaire du module complexe (MPa),

i = nombre imaginaire ($\sqrt{-1}$).

Le E^* d'un enrobé est déterminé à l'aide d'essais cycliques à petites déformations ($< 100 \mu\text{m/m}$), soit dans le domaine linéaire du comportement mécanique, où la rigidité de l'enrobé est indépendante de l'état de contrainte ou de déformation (Di Benedetto & Corté, 2005). La Figure 35 montre un cycle de sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé.

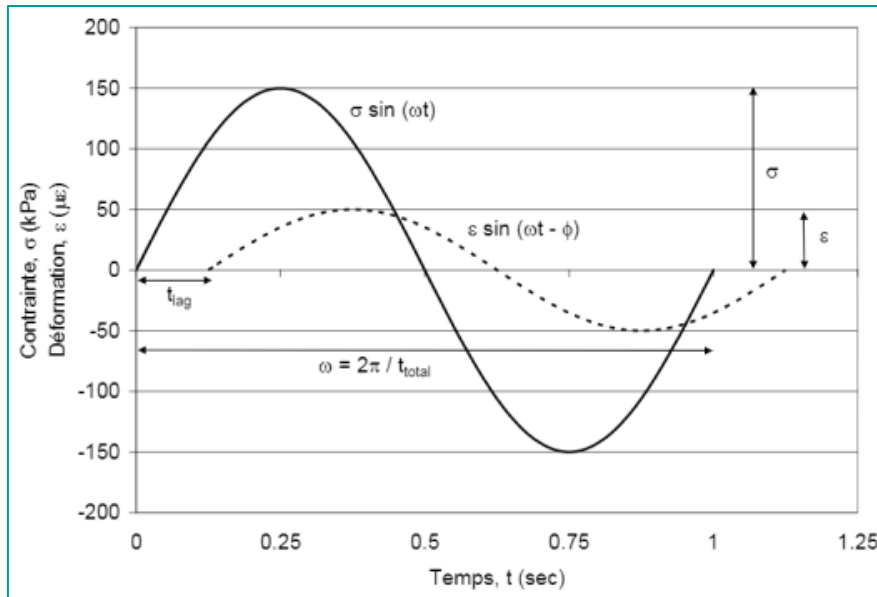


Figure 35 Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé

Sous sollicitation cyclique, le E^* est le rapport entre la contrainte cyclique et la déformation cyclique, tel que présenté à l'Équation 4. La déformation accuse un retard sur la contrainte, ce qui introduit un déphasage dans l'équation qui s'exprime alors sous forme de nombre complexe. Le $|E^*|$ de l'enrobé est nommé « module dynamique » en mécanique de chaussée, il est déterminé selon l'Équation 5. Le ϕ est nommé « angle de phase », il est déterminé selon l'Équation 6.

Équation 4 :
$$E^* = \frac{\sigma \sin(\omega t)}{\varepsilon \sin(\omega t - \phi)} = |E^*| \cos \phi + i |E^*| \sin \phi$$

Équation 5 :
$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Équation 6 :
$$\phi = \omega t_{lag}$$

où E^* = module complexe (MPa),
 $|E^*|$ = module dynamique (MPa),
 \emptyset = angle de phase (rad),
 σ = contrainte (MPa),
 ε = déformation (m/m),
 ω = période (rad/s),
 t = temps de chargement (s),
 t_{lag} = temps de déphasage entre σ et ε (s).

Le $|E^*|$ est le rapport entre la contrainte totale (maximale) et la déformation totale (maximale), bien qu'elles ne se produisent pas en même temps. Le $|E^*|$ est une approximation du module élastique d'un matériau viscoélastique, qui peut être utilisée

pour le dimensionnement des chaussées lorsque les lois de l'élasticité sont employées. Le t_{lag} représente le décalage dans le temps entre la contrainte et la déformation. Il varie de 0° pour un matériau purement élastique (réaction instantanée) à 90° pour un matériau purement visqueux. Le $|E^*|$ est nommé « module dynamique » en Amérique du Nord (AASHTO TP 62-07, ASTM D 3497-79) et « module de rigidité » en Europe (EN 12697- 26). Le E^* est nécessaire pour décrire le comportement viscoélastique complet de l'enrobé.

Fatigue : À partir des résultats représentant la durée de vie N_i pour ε_i définie, la droite de fatigue $N = f(\varepsilon)$ est obtenue par régression linéaire entre les logarithmes décimaux de N_i et les logarithmes décimaux de ε_i . L'équation de la droite de fatigue peut s'écrire de trois façons différentes :

$$\log(N) = a + \left(\frac{1}{b}\right)\log(\varepsilon)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_6 \times \left(\frac{N}{10^6}\right)^{-\frac{1}{b}}$$

$$N = 10^6 \times \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_6}\right)^b$$

Sur le graphique \lg/\lg , les différents couples (niveau de chargement, nombre de cycles jusqu'à l'endommagement), se placent sur une droite de fatigue, à 10^6 cycles, le seuil de chargement relevé sur la droite est la valeur caractéristique de la résistance en fatigue : ε_6 (la déformation admissible pour 10^6 cycles) elle correspond à l'amplitude de la sollicitation qu'il faut appliquer pour obtenir une durée de vie de 10^6 cycles.

Pour notre cas, et pour des raisons de volume important de matériau et de difficulté de préparation des éprouvettes, nous avons étudié la résistance en fatigue d'un mélange bitumineux de recyclage (RAP) auquel on ajoute des particules de PEBD dosé de 0%, 1%, 1,5% et 2%, 6 éprouvettes trapézoïdales sont soumises à l'essai de fatigue pour chacun des niveaux de déformations allant de 60 à 120 μdef soit au total 18 éprouvettes pour dosage, le nombre total des éprouvettes confectionnées dans notre étude est 72.

CHAPITRE II

PROCEDURE EXPERIMENTALE

PARTIE 2

PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

PARTIE 2 : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS

2.9 Structure de la présentation des résultats :

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus suite aux essais effectués sur les échantillons préparés et testés conformément aux modes opératoires des normes indiquées dans les paragraphes 2.7 & 2.8.

Les essais ont été scindés en quatre selon les niveaux spécifiés par le laboratoire des ponts et chaussées LCPC, le niveau 1 étudie les caractéristiques des constituants, la tenue à l'eau ainsi que l'aptitude au compactage, le niveau 2 étudie la résistance à la déformation permanente, le niveau 3 pour le module de rigidité et le niveau 4 pour les essais de fatigue.

2.10 Valeurs de référence :

L'objectif principale derrière notre campagne expérimentale est d'examiner voire optimiser les performances physico-mécaniques du matériau et de les comparer à celles d'un matériau bitumineux neuf.

Les principales références pour les valeurs admissibles issues des essais effectués sont les suivantes :

Interprétation des résultats et classification des matériaux

- Normes françaises
- Guide technique pour l'utilisation des normes d'enrobé à chaud (SETRA, 2008)
- Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés (Delorme et al., 2007)

2.11 Les essais de niveau 1

2.11.1 Optimisation de l'épaisseur des feuillets de plastique par l'essai (DURIEZ)

Comme indiqué dans le paragraphe 2.1 nous présentons ci-après les résultats pour les essais DURIEZ sur les enrobés avec les différentes épaisseurs comme suit :

- Epaisseur de 0 à 0,5mm (sacs en plastique, uniquement sur le PEBD)
- Epaisseur de 0,5 à 1mm (PEBD + PEHD + PET)
- Epaisseur de 1 à 2mm (uniquement sur le PEBD et PEHD)
- Epaisseur de 2 à 5mm (uniquement sur le PEBD et PEHD)

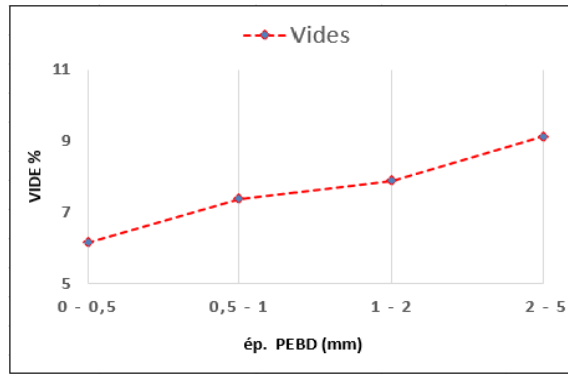


Figure 36 évolution de l'indice des vides des mélanges en fonctions de l'épaisseur PEBD

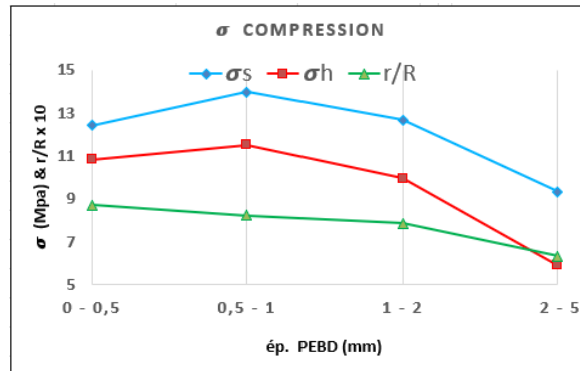


Figure 37 contraintes de compression & sensibilité à l'eau des mélanges selon l'épaisseur des PEBD

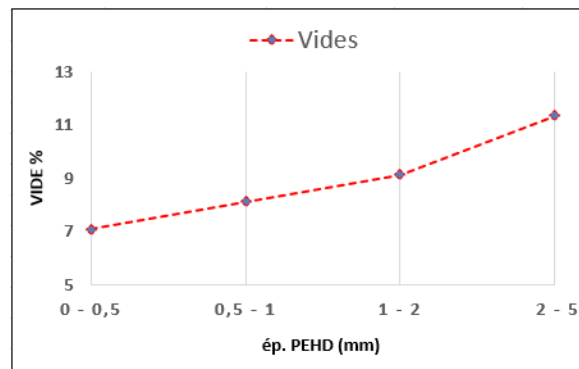


Figure 38 contraintes de compression & sensibilité à l'eau des mélanges selon l'épaisseur des PEHD

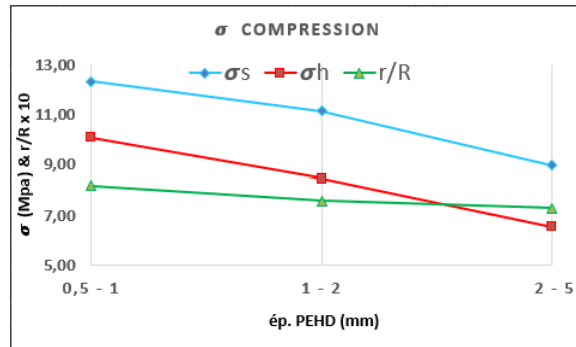


Figure 39 évolution de l'indice des vides des mélanges en fonction des épaisseurs de PEHD

D'après les graphiques ci-dessus (fig.36), il est clair que l'indice des vides augmente lorsque l'épaisseur des plastiques PEBD augmente passant de 6,15 % à 9,12% pour une épaisseur allant de 0-0,5mm à 2-5mm.

D'après les graphiques ci-dessus (fig.38), il est constaté aussi que l'indice des vides augmente lorsque l'épaisseur des plastiques PEHD augmente passant de 7,08 % à 11,37% pour une épaisseur allant de 0,5 -1mm à 2-5mm.

Pour le PEBD, d'après la figure 37, les contraintes de compression sèche et humide augmentent entre l'épaisseur allant de 0-0,5mm à 0,5-1mm, correspondant aux contraintes de compression à sec allant de 12,43 Mpa à 13,98 Mpa et des contraintes de compression humides allant de 10,83 Mpa à 11,51 Mpa puis décline et continue de baisser lorsque l'épaisseur augmente (2-5mm). La sensibilité à l'eau exprimée par le rapport r/R baisse quand l'épaisseur des plastiques augmente passant de 87% à 63% pour une épaisseur allant de 0-0,5mm à 2-5mm.

Pour le PEHD, d'après la figure 39, les contraintes de compression sèche et humide baissent lorsque l'épaisseur des plastiques augmente entre 0,5-1mm et 2-5mm, correspondant aux contraintes de compression à sec allant de 12,33 Mpa à 8,97 Mpa et des contraintes de compression humides allant de 10,09 Mpa à 6,55 Mpa. La sensibilité à l'eau exprimée par le rapport r/R baisse quand l'épaisseur des plastiques augmente passant de 82% à 73% pour une épaisseur allant de 0,5-1mm à 2-5mm.

Conclusion :

La plage des épaisseurs retenue est celle qui offre à la fois une résistance à la compression la plus élevée avec une sensibilité à l'eau acceptable et un indice de vide optimisé (4% à 8%), de ce fait nous choisissons les épaisseurs entre 0,5 mm et 1mm pour la suite des essais.

2.11.2 L'essai de la tenue à l'eau DURIEZ

a) Essai avec les déchets PEBD

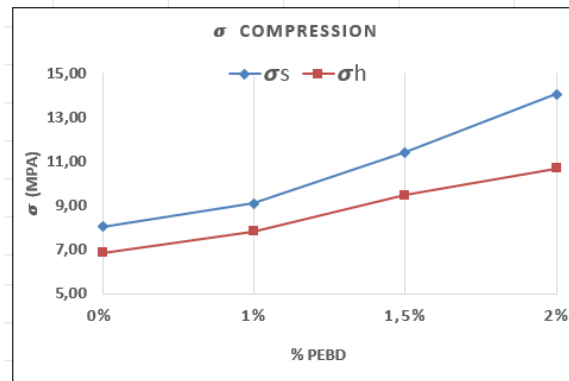


Figure 40 Fluage des échantillons secs PEBD humides (h) et secs (s) PEBD

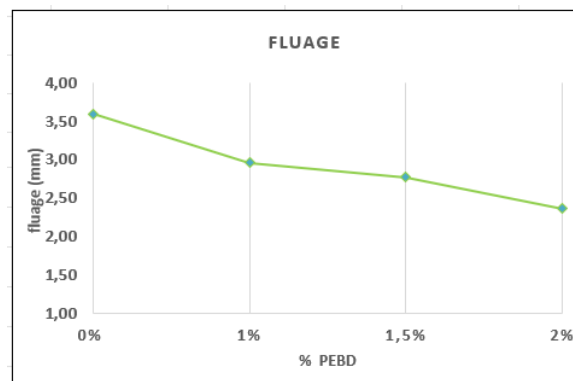


Figure 41 Résistance à la compression des échantillons

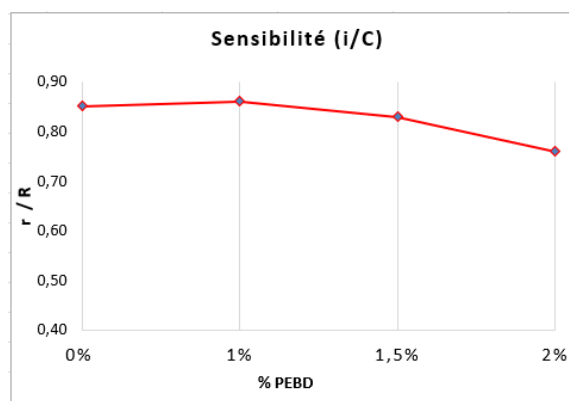


Figure 42 Sensibilité i/C PEBD

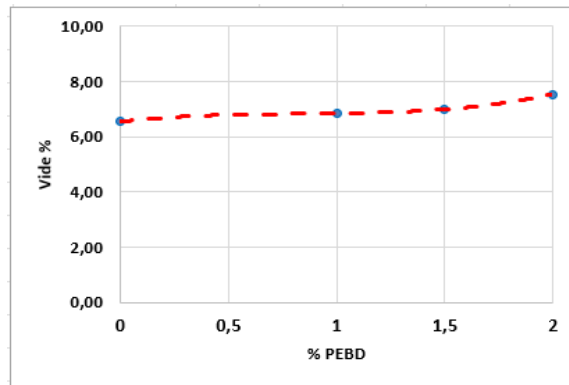


Figure 43 Teneur en vide/dosage en PEBD

Interprétation et discussion :

La résistance à la compression des éprouvettes augmente avec l'augmentation du dosage en PEBD, au dosage de 2% la résistance de l'enrobé à sec gagne 74,75% tant que la résistance de l'enrobé humide augmente de 55,91% pour le même type de plastique.

Le fluage quant à lui baisse en faisant augmenter le dosage de PEBD, le pourcentage de diminution du fluage est estimé à 34,26% pour 2% de dosage en PEBD.

La sensibilité à l'eau exprimé par le rapport r/R augmente légèrement avec un dosage de 1% puis commence à décliner. Ce rapport passe de 85% à 86% pour le dosage de 0% à 1% en PEBD puis diminue jusqu'à 76% pour le dosage de 2% en PEBD.

La teneur en vide augmente lorsque le dosage en PEBD augmente en passant de 6,54% pour 0% de dosage à 7,54% pour 2% de dosage, donc une augmentation de 15,29%.

b) Essai avec les déchets PEHD

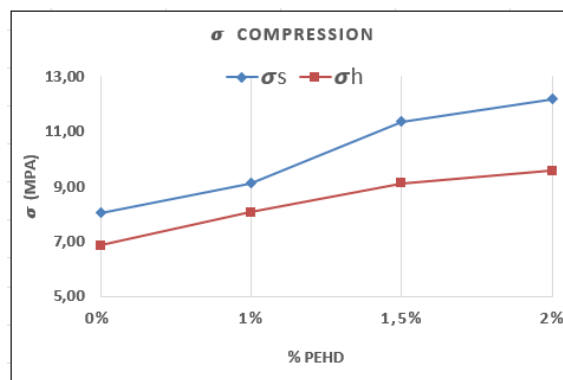


Figure 44 Résistance à la compression des échantillons humides (h) et secs (s) PEHD

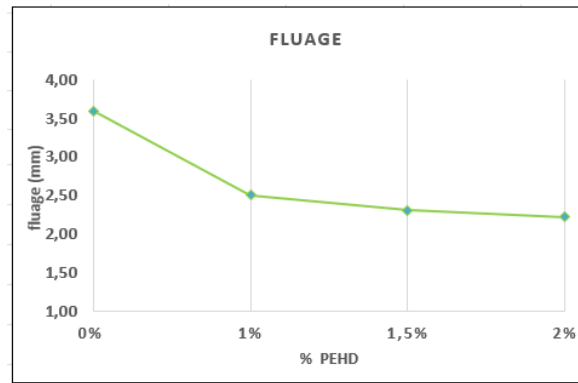


Figure 45 Fluage des échantillons secs PEHD

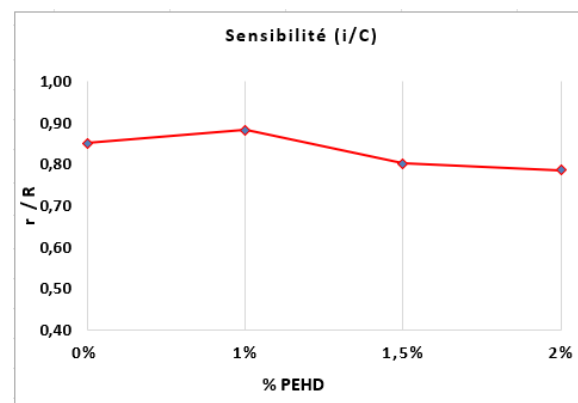


Figure 46 Sensibilité i/C PEHD

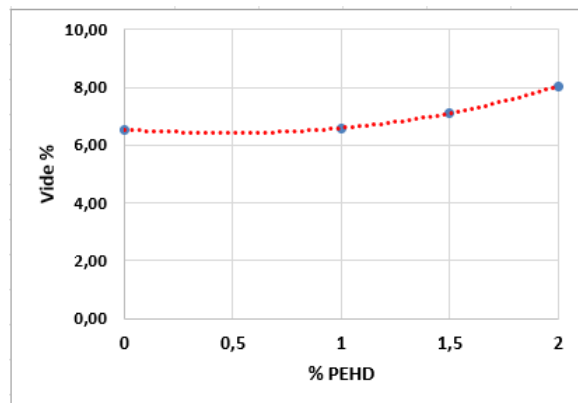


Figure 47 Teneur en vide /dosage en PEHD

Interprétation et discussion :

La résistance à la compression des éprouvettes augmente avec l'augmentation du dosage en PEHD, au dosage de 2% la résistance de l'enrobé à sec gagne 51,49% tant que la résistance de l'enrobé humide augmente de 39,85% pour le même type de plastique.

Le fluage quant à lui baisse en faisant augmenter le dosage de PEHD, le pourcentage de diminution du fluage est estimé à 37,88% pour 2% de dosage en PEHD.

La sensibilité à l'eau exprimé par le rapport r/R augmente légèrement avec un dosage de 1% puis commence à décliner. Ce rapport passe de 85% à 88% pour le dosage de 0% à 1% en PEHD puis diminue jusqu'à 79% pour le dosage de 2% en PEHD.

La teneur en vide augmente lorsque le dosage en PEHD augmente en passant de 6,54% pour 0% de dosage à 8,05% pour 2% de dosage, donc une augmentation de 23,08%.

c) Essai avec les déchets PET

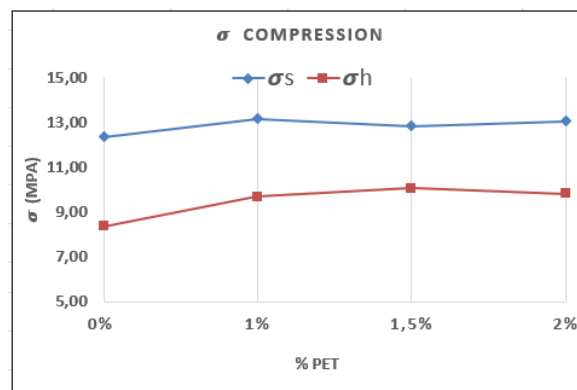


Figure 48 Résistance à la compression des échantillons humides (h) et secs (s) PET

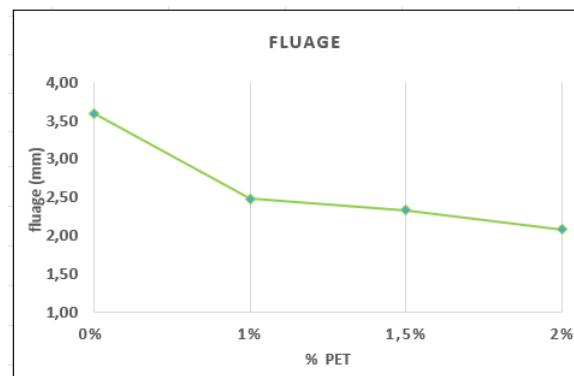


Figure 49 Fluage des échantillons secs PET

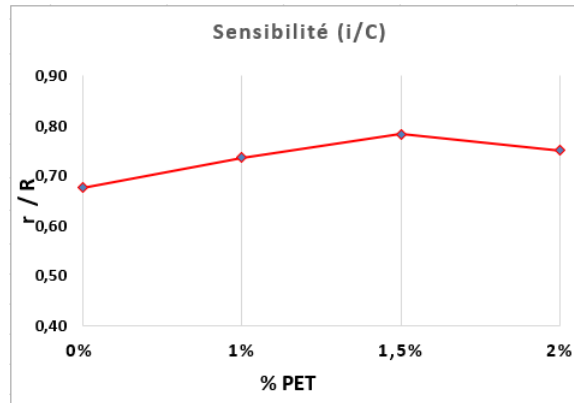


Figure 50 Sensibilité i/C PET

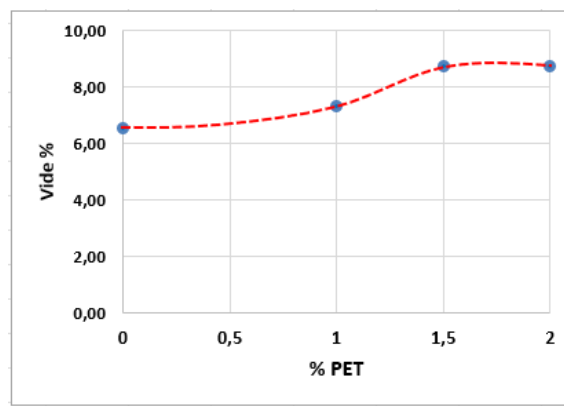


Figure 51 Teneur en vide /dosage en PET

Interprétation et discussion :

La résistance à la compression des éprouvettes augmente avec l'augmentation du dosage en PET, au dosage de 2% la résistance de l'enrobé à sec gagne 5,73% tant que la résistance de l'enrobé humide augmente de 17,20% pour le même type de plastique.

Le fluage quant à lui baisse en faisant augmenter le dosage de PET, le pourcentage de diminution du fluage est estimé à 41,78% pour 2% de dosage en PET.

La sensibilité à l'eau exprimé par le rapport r/R augmente légèrement avec un dosage de 1% puis commence à décliner. Ce rapport passe de 68% à 75% pour le dosage de 0% à 1% en PET puis diminue légèrement jusqu'à 74% pour le dosage de 2% en PET.

La teneur en vide augmente lorsque le dosage en PET augmente en passant de 6,54% pour 0% de dosage à 8,75% pour 2% de dosage, donc une augmentation de 33,79%.

Conclusion des essais de sensibilité à l'eau DURIEZ :

Ce qui est constaté d'après les différents résultats d'essais pour les trois types de plastique que la résistance à la compression (sèche et humide) augmente avec l'augmentation de taux

de plastique. La sensibilité à l'eau commence à décliner à partir du taux de 1% pour le PEBD et le PEHD et décline à partir de 1,5% pour le PET.

Le fluage continue à baisser en augmentant le taux de plastique pour les trois types. L'indice des vides augmente avec l'augmentation de taux de plastique mais atteint des valeurs hors tolérance pour le PET au dosage au-delà de 1,5%.

L'amélioration des performances étudiées par l'essai DURIEZ est due à une meilleure liaison des différents composants du mélange apportée par l'ajout des plastiques (Basim H., 2014), (Abdul Muqet & al., 2023), (Mohankar R.H, 2024), (Ilwandri & al., 2023). Au-delà de 1% de dosage l'indice de vide augmente et le mélange devient plus sensible à l'eau qui s'infiltre et affaiblit les liaisons du matériau.

Des études similaires ont obtenu des résultats concordants, (Radeef & al., 2021) a trouvé une amélioration des valeurs de l'ITS et la résistance à l'eau pour un taux de 1% de LDPE. (Jassim & al., 2014) a constaté avec un taux de plastique (PEBD) de 1,3% par rapport au mélange total une augmentation de 12 à 18% de stabilité Marshall et de fluage. (Marquez & al., 2021) a obtenu des résultats attestant une amélioration de 14,2% de stabilité pour un dosage de 1,5% de plastique (PET).

D'autres études ont constaté des taux optimums plus faibles, (Mosa & al., 2018) avait trouvé un dosage optimum de 0,5% en PET, (Ullah & al., 2021) a constaté un optimum d'environ 0,8% en PEBD et PEHD.

D'après nos résultats (courbes) il est clair que le taux optimal pour les trois types de plastique est de 1%.

2.11.3 Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG)

a) Essai avec les déchets PEBD

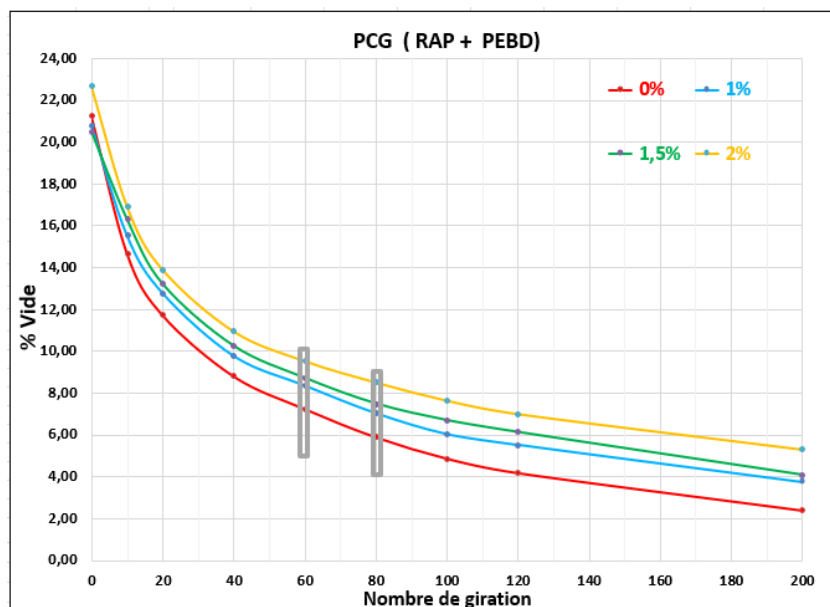


Figure 52 PCG RAP + PEBD

Interprétation et discussion :

Le graphique montre clairement que l'indice de vide augmente proportionnellement à l'ajout de feuillets plastique. Ainsi, à 60 girations et pour un dosage variant de 0 % (RAP seul) à 2 % de plastique, l'indice de vide passe de 7,25 % à 9,54 % pour le PEBD.

À 80 girations, pour la même variation de dosage (0 à 2 %), l'indice de vide passe de 5,9 % à 8,52 % pour le mélange avec PEBD.

Conformément aux spécifications (tableau 11), les valeurs d'indice de vide des éprouvettes dosées de 1 % jusqu'à 2 % sont dans les tolérances.

b) Essai avec les déchets PEHD

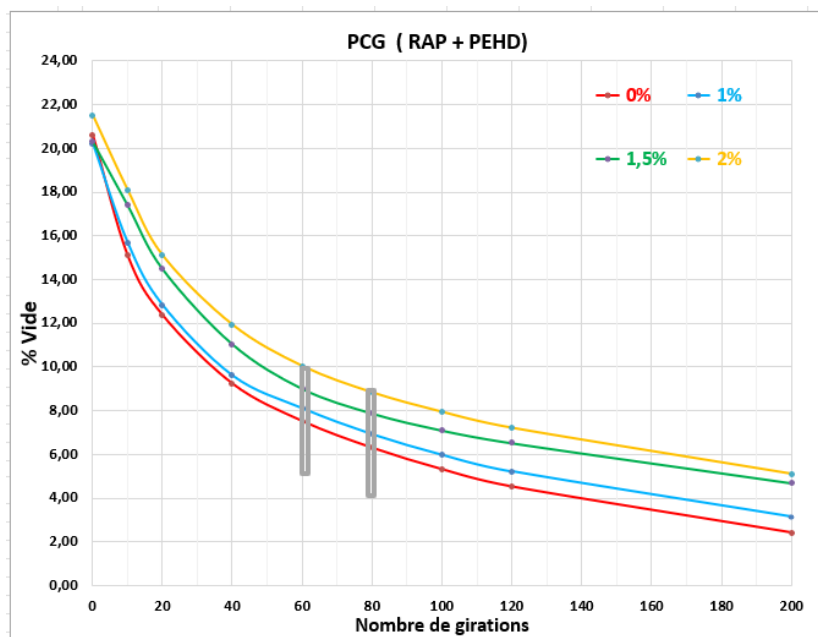


Figure 53 PCG RAP + PEHD

Interprétation et discussion :

Le graphique montre clairement que l'indice de vide augmente proportionnellement à l'ajout de feuillets plastique. Ainsi, à 60 girations et pour un dosage variant de 0 % (RAP seul) à 2 % de plastique, l'indice de vide passe de 7,25 % à 10,04 % pour le PEHD.

À 80 girations, pour la même variation de dosage (0 à 2 %), l'indice de vide passe de 6,30 % à 8,83 % pour le mélange avec PEHD.

Conformément aux spécifications (tableau 11), les valeurs d'indice de vide des éprouvettes dosées de 1 % jusqu'à 2 % sont dans les tolérances à l'exception de la teneur en vide à 2% de dosage en PEHD qui dépasse légèrement 10% (10,04%) à 60 girations.

c) Essai avec les déchets PET

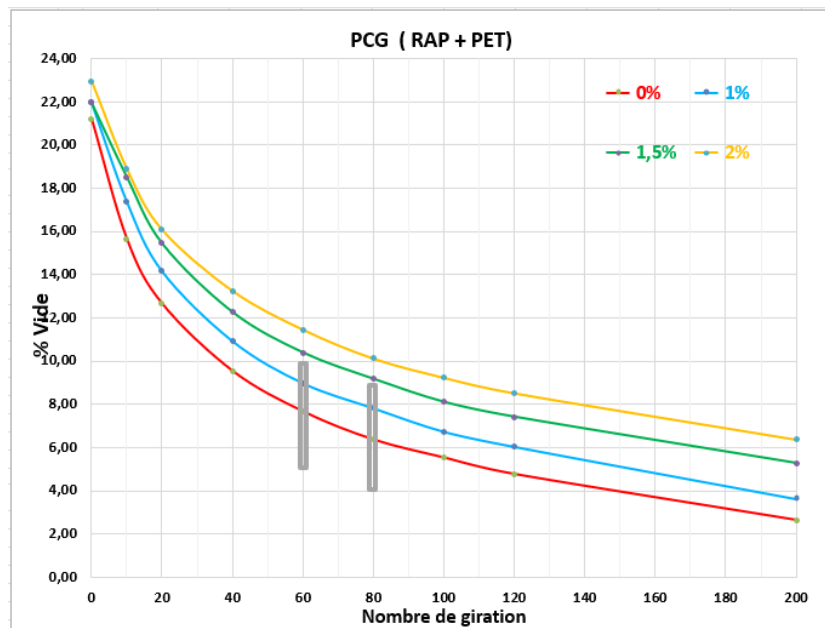


Figure 54 PCG RAP + PET

Interprétation et discussion :

Le graphique montre clairement que l'indice de vide augmente proportionnellement à l'ajout de feuillets plastique. Ainsi, à 60 girations et pour un dosage variant de 0 % (RAP seul) à 2 % de plastique, l'indice de vide passe de 7,67 % à 11,46 % pour le PET.

À 80 girations, pour la même variation de dosage (0 à 2 %), l'indice de vide passe de 6,37 % à 10,13 % pour le mélange avec PET.

Conformément aux spécifications (tableau 11), les valeurs d'indice de vide des éprouvettes dosées à 1 % sont dans les tolérances, or que les éprouvettes dosées à 1,5% et 2% sont hors tolérances.

Conclusion des essais de compactibilité (PCG) :

Les courbes ci-dessus montrent que l'ajout des plastiques diminue l'aptitude au compactage et engendre l'augmentation de l'indice de vide, des recherches similaires ont bien constaté le même phénomène (Mariana & al., 2022), (Fonseca & al., 2022), (Heydari & al., 2024).

Les feuilles de plastique ont été chauffées à seulement 135 degrés maximum pour éviter qu'elles ne collent les unes aux autres, puis mises en malaxage en rotation avec le mélange bitumineux pendant 2 à 5 minutes, ce qui ne leur permet pas de fondre suffisamment et de combler les vides lors du compactage, d'autant plus que ces particules n'ont pas été prises en compte lors de la conception du mélange. Ce phénomène n'est généralement pas observé dans les recherches de modification de bitume par les granulats plastiques, selon la littérature, où l'indice de vide n'augmente pas de cette manière en raison des granulats plastiques fins utilisés qui se combinent au bitume et combler les vides.

Nous constatons que le taux de plastique maximum toléré pour des indices de vides correspondant à des nombres de giration donné (SETRA, 2008) pour le PEBD est de 2%, il est de 1,5% pour le PEHD et de 1% pour le PET.

2.12 Les essais de niveau 2

2.12.1 Essai de la déformation permanente (Orniérage)

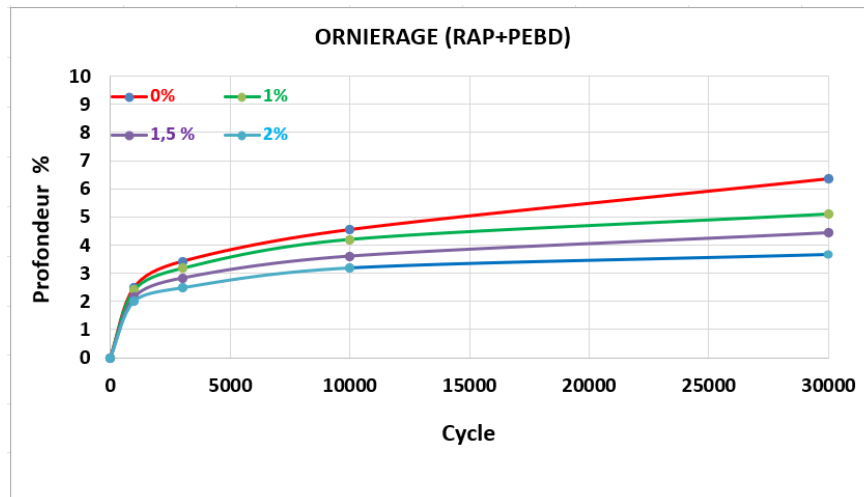


Figure 55 Essai d'orniérage mélange avec PEBD

Interprétation et discussion :

Les courbes d'essai d'orniérage ci-dessus montrent que l'ajout de feuillets de plastique PEBD augmente proportionnellement et substantiellement la résistance du matériau RAP à la déformation permanente. En effet, pour un dosage de plastique variant de 0 % (RAP seul) à 2 %, la profondeur d'orniérage du RAP avec PEBD passe de 6,4 mm à 3,7 mm.

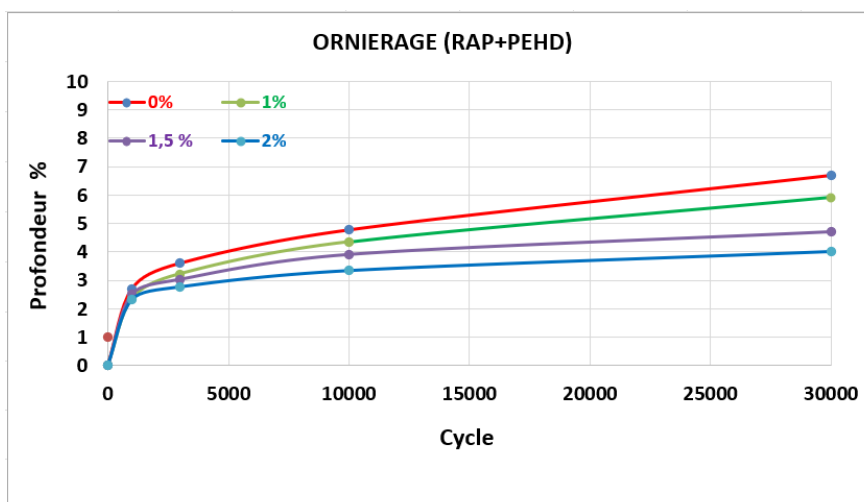


Figure 56 Essai d'orniérage mélange avec PEHD

Interprétation et discussion :

Les courbes d'essai d'orniérage ci-dessus montrent que l'ajout de feuillets de plastique PEHD augmente proportionnellement et substantiellement la résistance du matériau RAP à la déformation permanente. En effet, pour un dosage de plastique variant de 0 % (RAP seul) à 2 %, la profondeur d'orniérage du RAP avec PEHD passe de 6,4 mm à 4,0 mm.

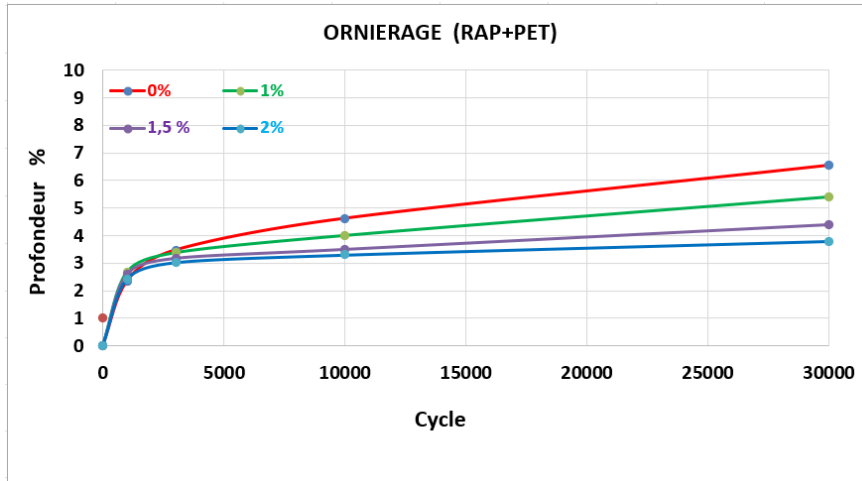


Figure 57 Essai d'orniérage mélange avec PET

Interprétation et discussion :

Les courbes d'essai d'orniérage ci-dessus montrent que l'ajout de feuillets de plastique PET augmente proportionnellement et substantiellement la résistance du matériau RAP à la déformation permanente. En effet, pour un dosage de plastique variant de 0 % (RAP seul) à 2 %, la profondeur d'orniérage du RAP avec PET passe de 6,4 mm à 3,8 mm.

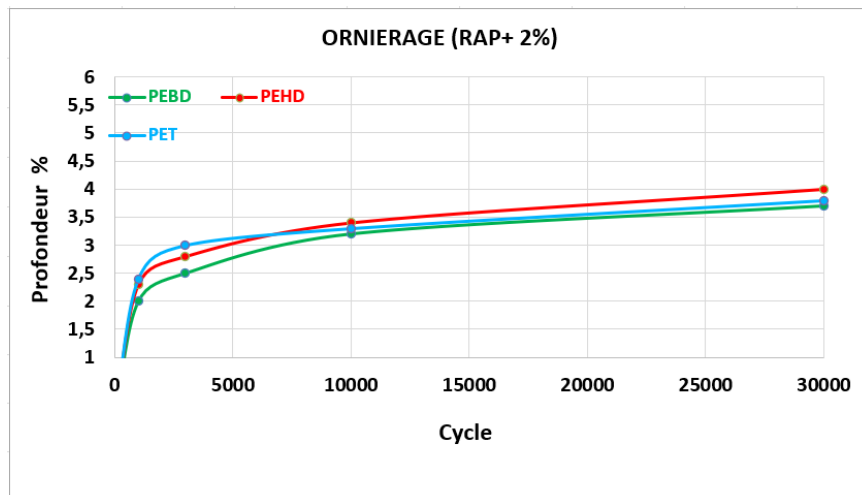


Figure 58 Essai d'orniérage mélange avec 2% de chaque type de plastique

Interprétation et discussion :

Les courbes d'essai d'orniérage ci-dessus montrent que l'ajout de feuillets de plastique de différents types à un dosage de 2% conduit à une profondeur d'ornière variant de 3,5 à 4 mm, le mélange avec PET et PEHD donne légèrement des performances meilleures que celles du mélange avec PEBD.

Conclusion des essais de déformation permanente :

Les effets de l'ajout des déchets plastiques sont visibles sur le mélange RAP lors de cet essai, la profondeur de l'orniérage baisse en augmentant le taux de plastique tout type et ce grâce à l'augmentation de la rigidité du matériau (Jalal J., 2016), (Akinleye & al., 2020). En effet, cela a été rendu possible grâce aux valeurs de résistance à la compression obtenues lors de l'essai Duriez (r/R) qui donnent une indication du comportement du matériau sous contrainte de déformation.

Le PET semble être le type de plastique qui offre les meilleurs résultats cela a également été constaté par (Sajid & al., 2024), (Siddhart & al., 2022).

Des études similaires ont obtenu une amélioration de la résistance à l'orniérage à 1,1% et 1% de PET (Ghabchi & al., 2021), (Mosa & al., 2018), le PEHD et le PEBD au taux d'environ 1% améliorent aussi cette performance (Delorme et al., 2007).

Il est confirmé que les valeurs obtenues pour 30 000 cycles correspondent à des BBSG/BBME de 3e classe, conformément au tableau 12, à partir de 1,5 % du dosage.

2.13 Les essais de niveau 3 (Module complexe)

Il s'agit d'essai non homogène de flexion 2PB-TR sur éprouvette trapézoïdale norme NF EN 12697-26 – Annexe A.

2.13.1 Réglage et calage de la machine (données d'entrée)

Déformation imposée $\varepsilon = 50 \mu\text{def}$.

Fréquences de l'essai en Hz:

0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 5, 10, 20, 30 puis 0.1 (s'assurer que le module pour la première et la dernière fréquence de 0.1 Hz ne change pas de 3% maximum.)

Températures de l'essai en ° C:

-10, 0, 10, 20, 30, 40, 50

2.13.2 Résultats obtenus

a) Essai avec l'enrobé RAP seul (sans plastique PEBD)

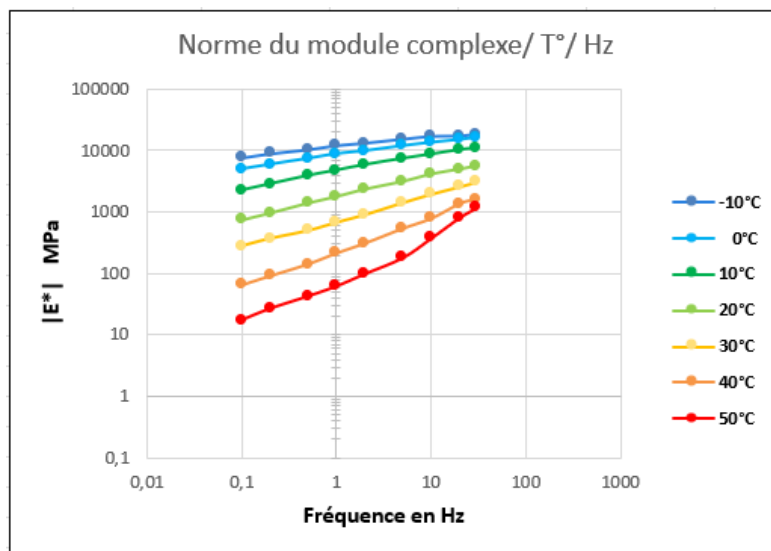


Figure 59 Norme du module complexe/T/Hz

Interprétation et discussion :

Le graphique ci-dessous ressemble à celui des courbes maîtresses du module complexe à différentes fréquences et températures.

Nous constatons bien que pour une température donnée le module augmente en augmentant la fréquence des essais. Cette augmentation est plus prononcée en augmentant la température.

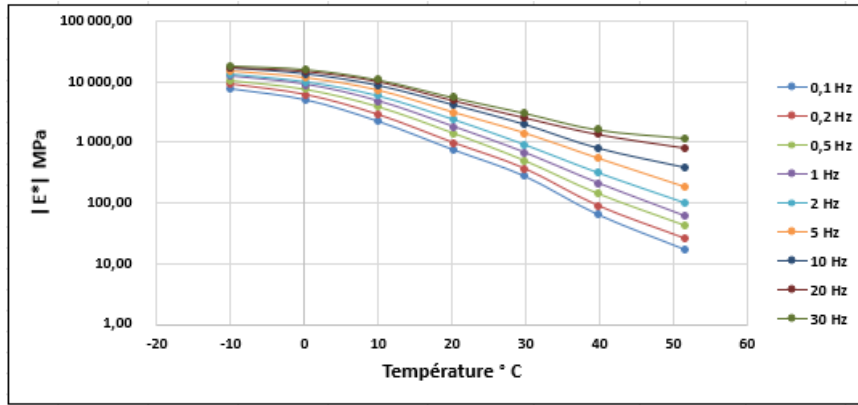


Figure 60 variation du module / température dans l'espace Black

Interprétation et discussion :

Le graphique ci-dessous est une autre manière de représenter la variation du module complexe à différentes fréquences et températures.

Nous constatons bien que pour une fréquence donnée le module augmente en augmentant la température des essais. Cette augmentation est plus prononcée en augmentant la température.

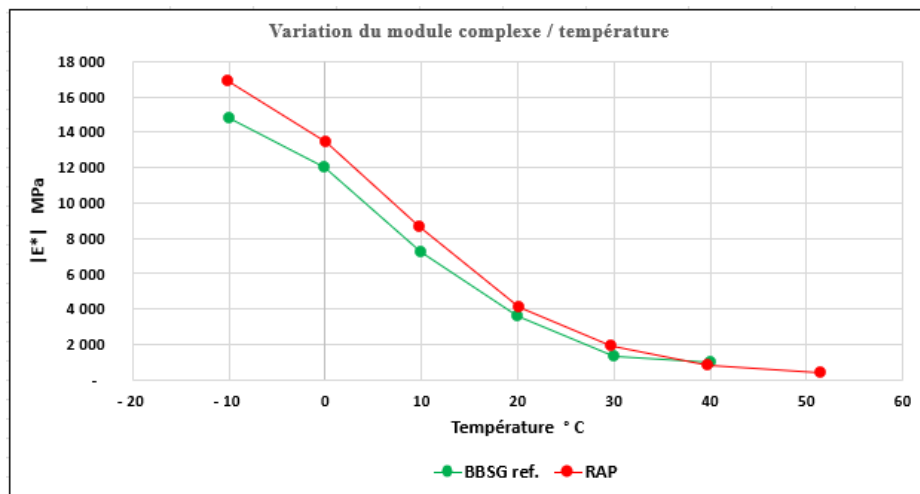


Figure 61 variation du module / température / enrobé de référence

Interprétation et discussion :

Le graphique ci-dessus montre que pour l'enrobé RAP comme pour un enrobé de référence la norme du module complexe diminue en diminuant la température du mélange (échantillons).

Un écart entre les modules des deux mélanges pour une température donnée est constaté, cet écart est moins prononcé lorsque la température baisse.

L'écart passe de 2012 Mpa à -10°C à 492 Mpa à 20°C, puis les deux courbes (enrobé de référence + RAP) se rejoignent aux environs de la température de 40°C.

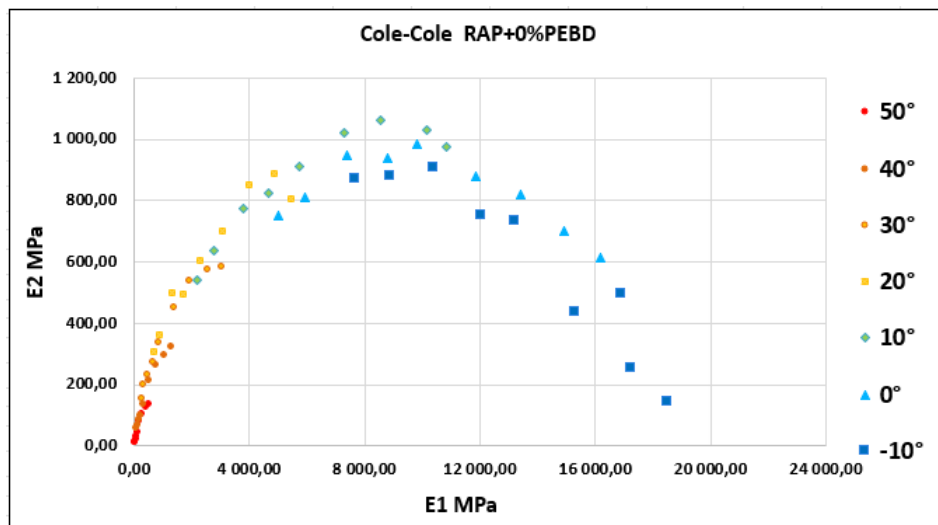


Figure 62 représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole RAP+0%PEBD

Interprétation et discussion :

La représentation dans le plan Cole-Cole du module complexe (E_1 et E_2) indique une valeur de E_2 qui avoisine 1000 Mpa lorsque la valeur E_1 tourne autour de 9000 Mpa, et une valeur de E_1 qui tend vers une valeur d'environ 19 Gpa appelée E_∞ quand la température est $< -10^\circ\text{C}$ et quand le E_2 tend vers 0.

La valeur de la norme E à la température -10°C est de 18 506,48 Mpa avec $E_1 = 18 505,92$ Mpa et $E_2 = 144,27$ Mpa

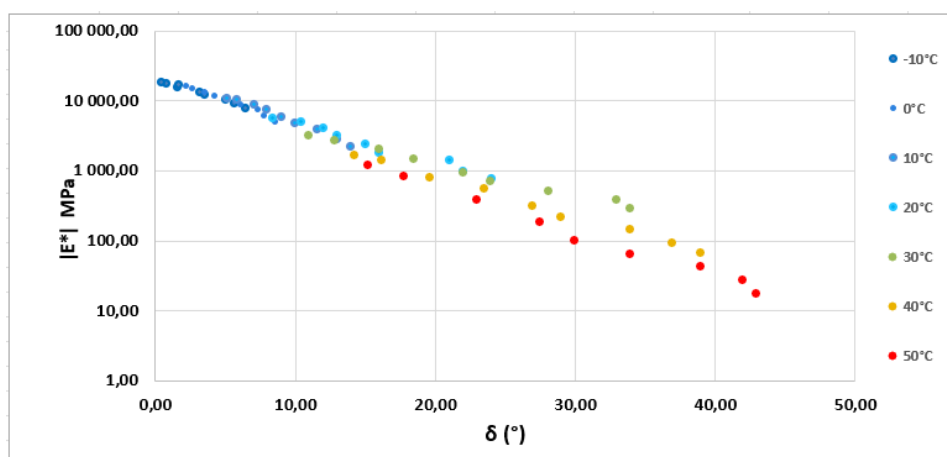


Figure 63 variation du module complexe / angle de phase dans l'espace Black

Interprétation et discussion :

La représentation de la valeur de la norme du module complexe E^* en fonction de la variation de l'angle de phase δ montre bien une diminution du module lorsque l'angle de phase augmente et vis vers ça. A titre approximatif, le module passe de 10 Mpa à 45° à 18 Gpa quand δ tend vers 0°.

b) Essai avec l'enrobé (RAP +1% PEBD)

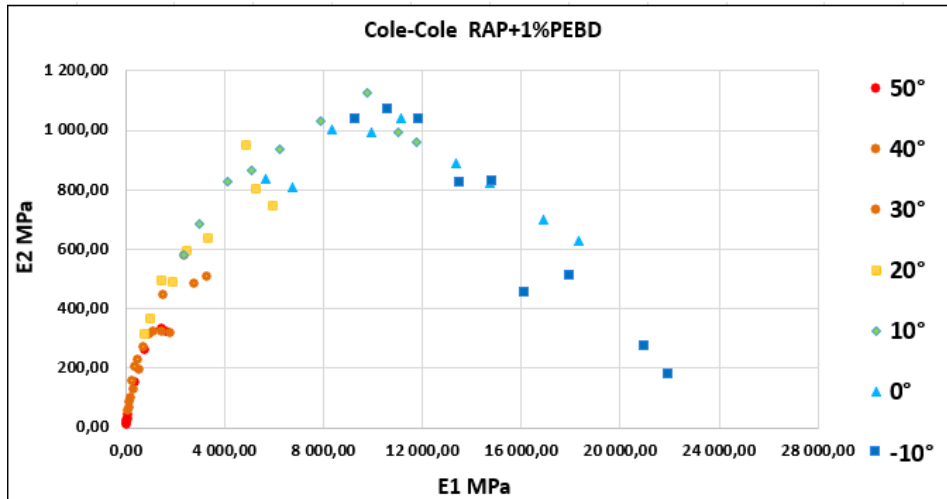


Figure 64 représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole RAP+1%PEBD

Interprétation et discussion :

La représentation dans le plan Cole-Cole du module complexe (E_1 et E_2) indique une valeur de E_2 qui avoisine 1100 Mpa lorsque la valeur E_1 tourne autour de 10000 Mpa, et une valeur de E_1 qui tend vers une valeur de 22 Gpa appelée E_∞ quand la température est $< -10^\circ\text{C}$ et quand le E_2 tend vers 0.

La valeur de la norme E à la température -10°C est de 21 965,91 Mpa avec $E_1 = 21 965,19$ Mpa et $E_2 = 178,74$ Mpa

c) Essai avec l'enrobé (RAP +1,5% PEBD)

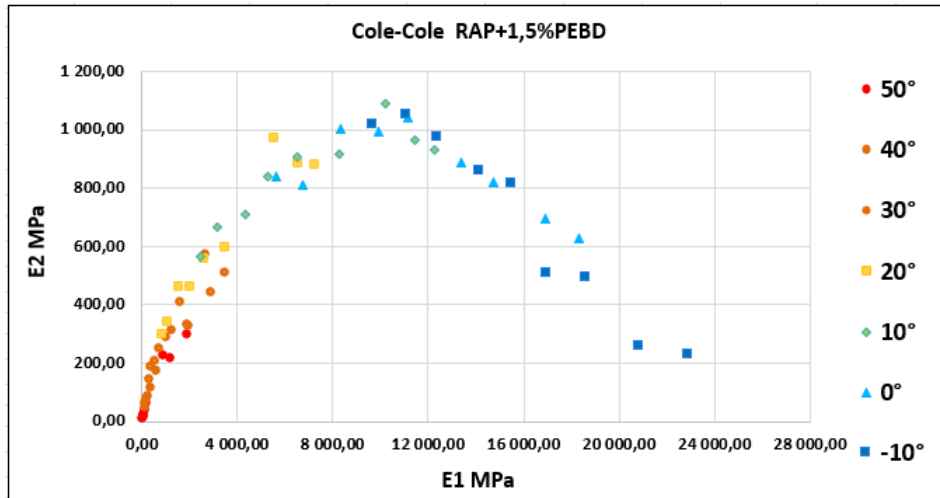


Figure 65 représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole RAP+1,5%PEBD

Interprétation et discussion :

La représentation dans le plan Cole-Cole du module complexe (E_1 et E_2) indique une valeur de E_2 qui avoisine 1100 Mpa lorsque la valeur E_1 tourne autour de 10000 Mpa, et une valeur de E_1 qui tend vers une valeur de 23,5 Gpa appelée E_∞ quand la température est $< -10^\circ\text{C}$ et quand le E_2 tend vers 0.

La valeur de la norme E à la température -10°C est de 22 894,68 Mpa avec $E_1 = 22 893,55$ Mpa et $E_2 = 227,76$ Mpa

d) Essai avec l'enrobé (RAP +2% PEBD)

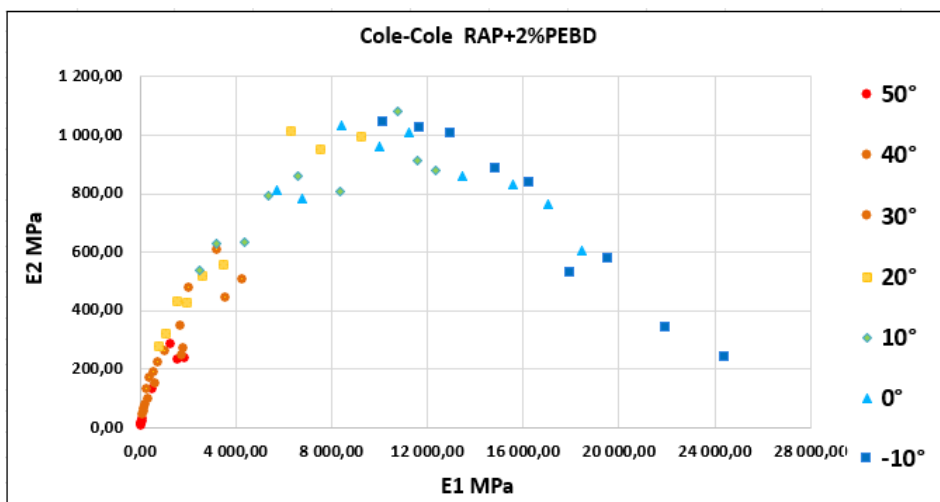


Figure 66 représentation du module complexe dans le plan Cole-Cole RAP+2%PEBD

Interprétation et discussion :

La représentation dans le plan Cole-Cole du module complexe (E_1 et E_2) indique une valeur de E_2 qui avoisine 1100 Mpa lorsque la valeur E_1 tourne autour de 10000 Mpa, et une valeur de E_1 qui tend vers une valeur de 25,5 Gpa appelée E_∞ quand la température est $< -10^\circ\text{C}$ et quand le E_2 tend vers 0.

La valeur de la norme E à la température -10°C est de 24 426,61 Mpa avec $E_1 = 24 425,45$ Mpa et $E_2 = 238,14$ Mpa

2.13.3 Synthèse des résultats du module pour différents dosages

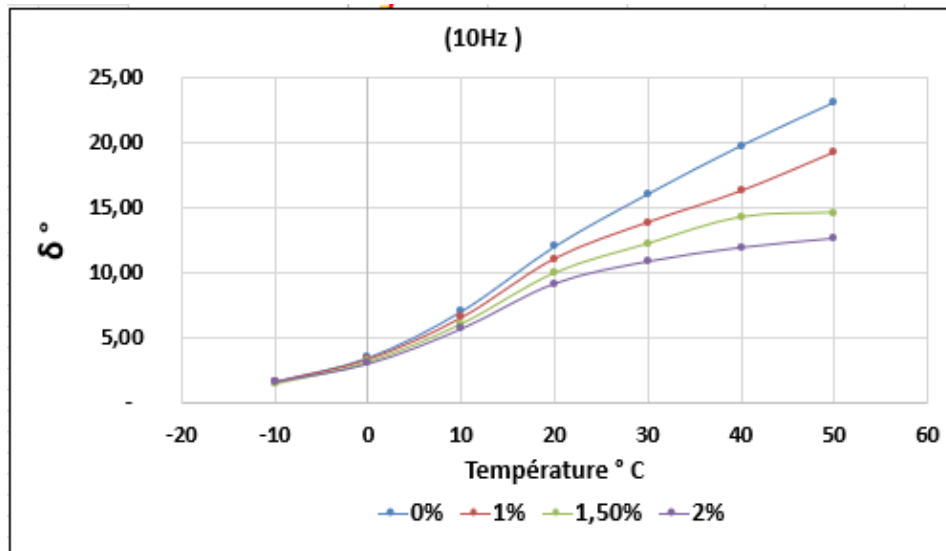


Figure 67 variation de l'angle de phase / température

Interprétation et discussion :

Pour un dosage en plastique donné, l'angle de phase δ augmente avec l'augmentation de la température, l'augmentation de l'angle de phase entraîne la diminution de module complexe comme indique le graphique suivant.

Pour une température donnée, l'angle de phase δ diminue lorsque le dosage en plastique augmente, ce qui entraîne une augmentation du module complexe comme montre le graphique suivant.

Quand la température de l'échantillon diminue ($T < 0$) l'angle de phase δ devient insensible au dosage en plastique.

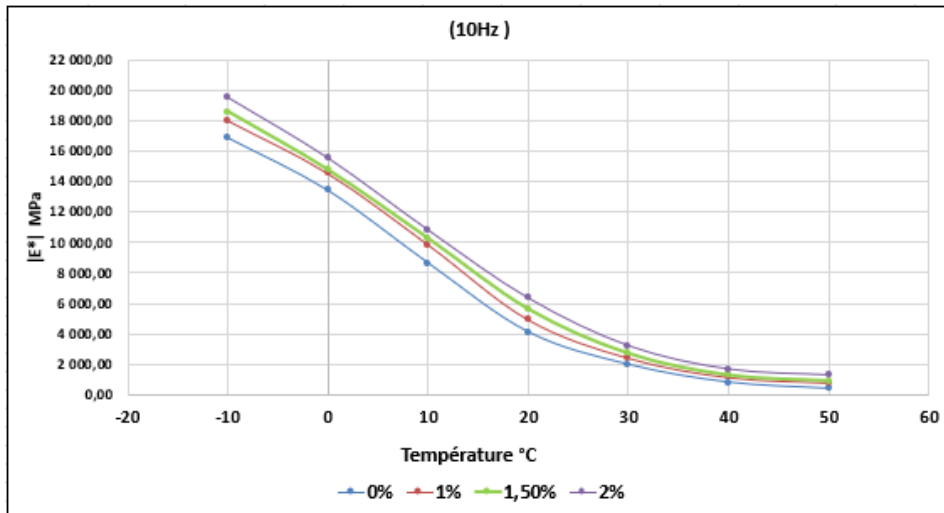


Figure 68 variation de la norme du module / température/ dosage en PEBD

Interprétation et discussion :

Pour une température donnée, le module complexe augmente avec l'augmentation du dosage en plastique, il devient moins sensible au dosage à partir de 40°C.

Courbes Cole-Cole pour différents dosages

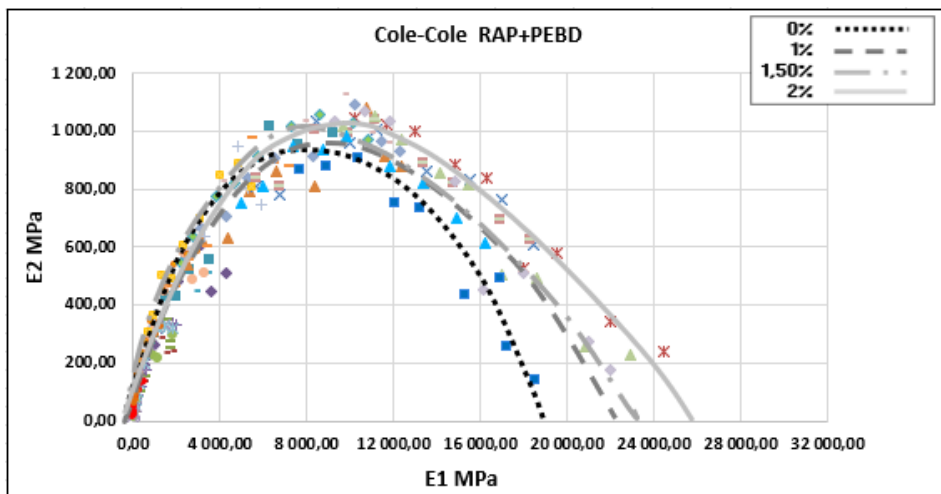


Figure 69 Courbes du module complexe dans le plan Cole-Cole pour différents dosages

Interprétation et discussion :

Les courbes ci-dessus montre clairement une augmentation du module complexe (norme) lorsque le dosage des déchets plastiques en PEBD augmente particulièrement à basses températures.

Le module infini E_{∞} ($T < -10^{\circ}\text{C}$) est de 19 Gpa, 22Gpa, 23,5 Gpa puis 25,5 Gpa pour les dosages consécutifs de 0%, 1%, 1,5% et 2% de dosage en plastique du mélange.

Le module normalisé (NF P98 086 mai 2019) à 15°C et 10Hz passe de 6 364,29 Mpa, 7 395,07 Mpa, 7 941,56 Mpa puis à 8 598,12 Mpa pour les dosages consécutifs de 0%, 1%, 1,5% et 2% en plastique, de ce fait le module augmente de 35,1 % entre un dosage de 0% et 2% de déchet en PEBD.

Conclusion des essais de rigidité (module complexe) :

Nous avons bien constaté que le matériau RAP a une rigidité plus importante qu'un enrobé de référence dont les caractéristiques mécaniques sont définies par les normes et guides des matériaux tels que le LCPC et (SETRA, 2008).

Nous avons également confirmé que la rigidité du matériaux RAP augmente lorsque le dosage de PEBD augmente. Des études similaires ont abouti aux mêmes conclusions, (Er. Dushyant & al., 2024) a trouvé que l'ajout des matériaux plastiques aux enrobés bitumineux augmente le module et diminue l'angle de phase (augmentation de la viscosité).

(Ullah & al., 2021) a obtenu une augmentation de la rigidité de 168,5% avec l'ajout de 0,75% de PEHD. (Mosa & al., 2018) a constaté une amélioration de la rigidité pour 0,5% de PET.

Pour notre cas (ajout de PEBD) à 2% nous avons constaté une augmentation du module de 35,1%, cette différence de taux d'amélioration de module est due à deux aspects, la taille des particules de plastique qui est plus fine et se combine mieux avec le bitume ce qui n'est pas le cas pour notre étude, le deuxième aspect est le fait que la majorité des études et cas de la littérature utilisent des enrobés neufs non recyclés et dont le bitume est encore jeune et vierge.

2.14 Les essais de niveau 4 (Résistance à la fatigue)

Il s'agit d'essai non homogène de flexion 2PB-TR sur éprouvette trapézoïdale norme NF EN 12697-24 – Annexe A.

2.14.1 Réglage et calage de la machine (données d'entrée)

- 18 Eprouvettes testées pour chaque niveau de déformation
- Fréquence de l'essai = 25 ± 1 Hz
- Température de l'essai = $10^{\circ}\text{C} \pm 1$
- Déformations imposées : 60, 80, 100 microdéformations pour le RAP seul, 80,100,120 microdéformations pour le RAP +1% , +1,5% et +2% PEBD

2.14.2 Résultats obtenus

- a) Essai avec l'enrobé RAP seul (sans plastique PEBD)

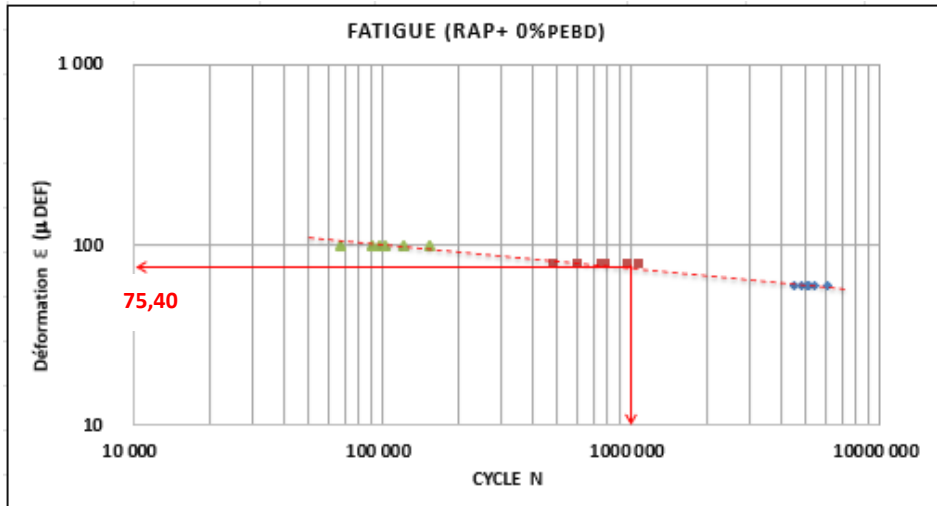


Figure 70 résultats de fatigue pour RAP+0%PEBD

Interprétation et discussion :

La valeur d'épsilon 6 (ϵ_6) pour le RAP seul = 75,40 μdéf.

b) Essai avec l'enrobé (RAP +1% PEBD)

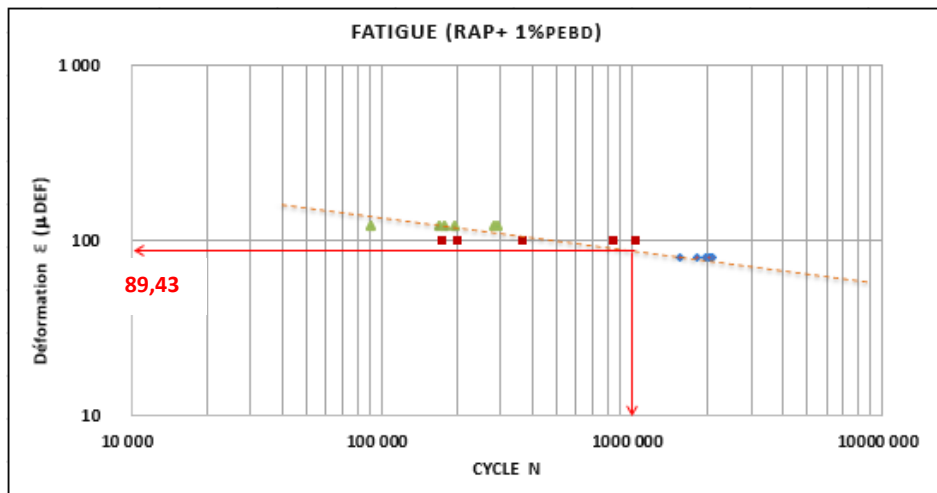


Figure 71 résultats de fatigue pour RAP+1%PEBD

Interprétation et discussion :

La valeur d'épsilon 6 (ϵ_6) pour le RAP + 1% de PEBD = 89,43 μdéf. Cette valeur est plus grande que celle obtenue avec un dosage de 0% de PEBD (enrobé RAP seul)

c) Essai avec l'enrobé (RAP +1,5% PEBD)

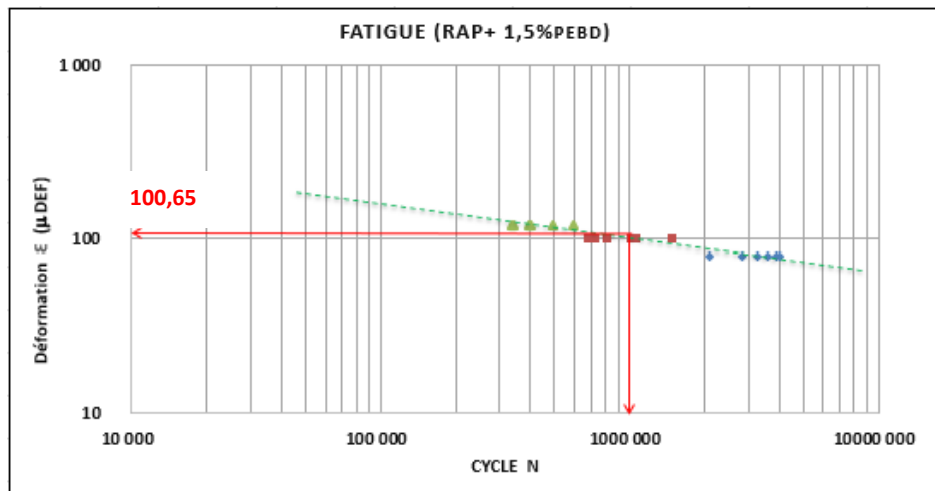


Figure 72 résultats de fatigue pour RAP+1,5%PEBD

Interprétation et discussion :

La valeur d'épsilon 6 (ϵ_6) pour le RAP + 1,5% de PEBD = 100,65 μdéf. Cette valeur est plus grande que celle obtenue avec un dosage de 1% de PEBD (enrobé RAP seul)

d) Essai avec l'enrobé (RAP +2% PEBD)

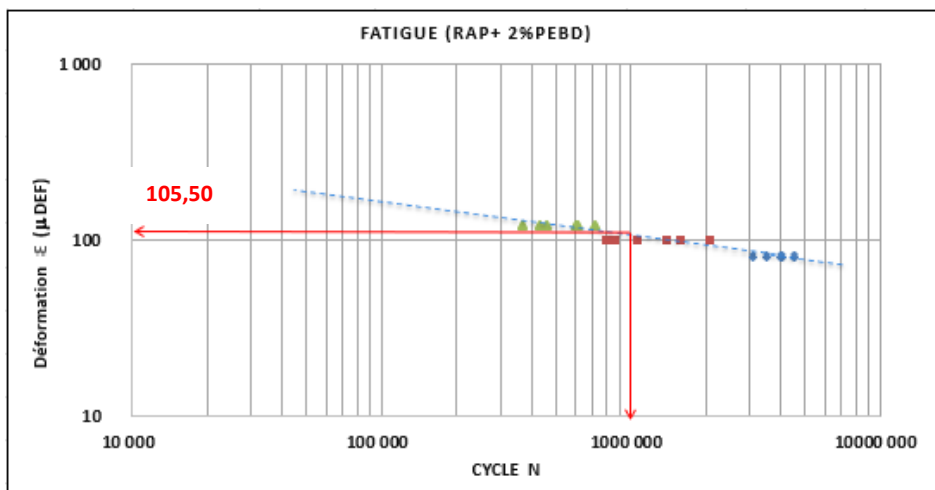


Figure 73 résultats de fatigue pour RAP+2%PEBD

Interprétation et discussion :

La valeur d'épsilon 6 (ϵ_6) pour le RAP + 2% de PEBD = 105,50 μdéf. Cette valeur est plus grande que celle obtenue avec un dosage de 1,5% de PEBD (enrobé RAP seul)

2.14.3 Droite de fatigue (courbe de Wöhler) : $\text{Log}(N) = a + 1/b \text{Log}(\epsilon)$

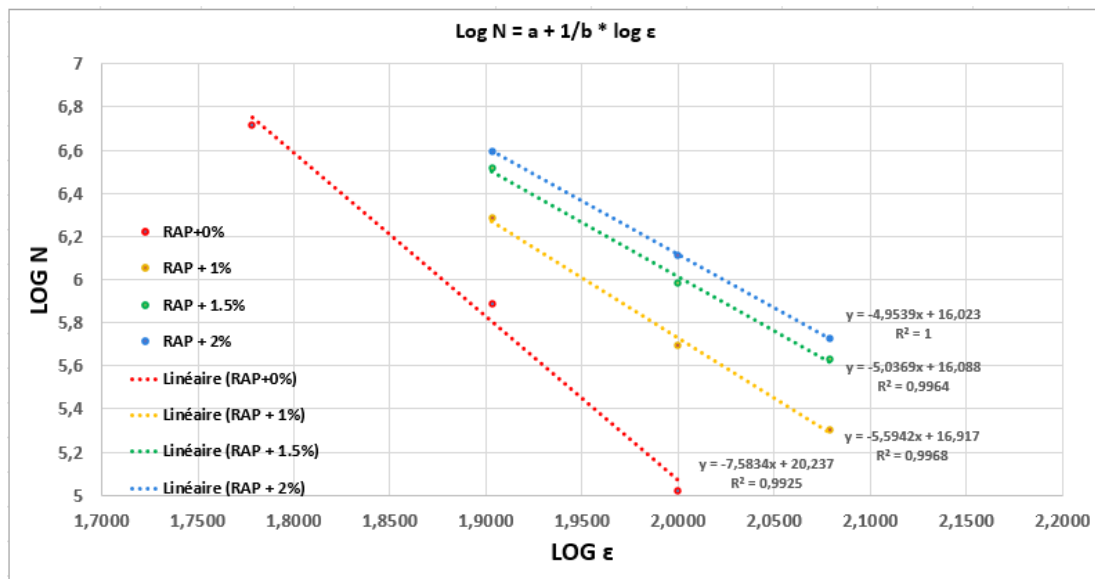


Figure 74 Droite de fatigue (courbe de Wöhler) : $\text{Log}(N) = a + 1/b \text{Log}(\epsilon)$

Interprétation et discussion :

D'après les équations de droites de fatigue il résulte :

Plus nous augmentons le dosage en PEBD plus les courbes se décalent vers des déformations plus importantes ce qui s'explique par une meilleure résistance à la fatigue, les courbes sont également plus couchées en augmentant le dosage en plastique ce qui explique une diminution de la sensibilité du matériau aux sollicitations de déformations.

La tendance générale des courbes montre une nette amélioration de la résistance à la fatigue avec l'augmentation du dosage de plastique. Cependant, les mélanges RAP additionnés de 2 % de feuilles de plastique PEBD présentent une meilleure résistance à la fatigue avec des valeurs ϵ_6 supérieures à 100 μ def (valeur de spécification $\geq 100 \mu$ def).

Selon les équations des droites de la figure 74 on a :

Déformation à 1 million cycles pour RAP seul :

$$Y=6 \text{ donc } x = 1,877 \text{ soit } \epsilon_6 = 10^x = \mathbf{75,40 \mu def.}$$

Déformation à 1 million cycles pour RAP + 1% PEBD :

$$Y=6 \text{ donc } x = 1,95 \text{ soit } \epsilon_6 = 10^x = \mathbf{89,43 \mu def.}$$

Déformation à 1 million cycles pour RAP + 1,5% PEBD :

$$Y=6 \text{ donc } x = 2,00 \text{ soit } \epsilon_6 = 10^x = \mathbf{100,65 \mu def.}$$

Déformation à 1 million cycles pour RAP + 2% PEBD :

$Y=6$ donc $x = 2,023$ soit $\epsilon_6 = 10^x = 105,50 \mu\text{déf.}$

Conclusion des essais de fatigue :

Il est à remarquer que la résistance à la fatigue de l'enrobé RAP augmente en augmentant le dosage en plastique PEBD, la déformation caractéristique de la fatigue au dosage de 2% passe ainsi de 75,40 $\mu\text{déf}$ à 105,65 $\mu\text{déf}$ marquant ainsi une amélioration d'environ 40%.

L'amélioration des performances étudiées par l'essai de fatigue est due à une meilleure liaison des différents composants du mélange apportée par l'ajout des plastiques (Basim H., 2014), (Abdul Muqeet & al., 2023), (Mohankar R.H, 2024), (Ilwandri & al., 2023). Cette augmentation de résistance en fatigue est également due à une augmentation de l'élasticité du matériau suite à l'ajout de plastique (Ma Y. & al., 2023), (Jexembayeva & al., 2024). Nous avons bien remarqué dans les essais de module complexe l'augmentation de la partie réelle du module complexe donc une augmentation de la partie élastique.

Des résultats similaires ont été observés par (Suaryana et al., 2018), (Fonseca et al., 2022).

Nous soulignons que très peu de recherches se sont intéressés à l'étude de la fatigue des enrobés avec ajout de plastique de taille jusqu'à 14 mm, la majorité des travaux ont abordé la modification du bitume par des éléments de plastique plus fins en taille (0 à 5 mm) ce qui rend non pertinente la comparaison des résultats.

CHAPITRE III

APPLICATION NUMERIQUE IMPACT SUR LA DUREE DE VIE DE L'ENROBE

3. Application numérique programme ALIZE – LCPC

Dans cette section nous allons étudier l'impact des paramètres mesurés (Module & Fatigue) sur le calcul de la durée de vie la chaussée objet de la réhabilitation (RN 27) dans le tronçon appartenant à la Wilaya de Mila. Le calcul s'effectuera en utilisant le programme ALIZE-LCPC basé sur une modélisation en éléments finis.

Nous commençons par évaluer l'influence de l'augmentation de la rigidité, selon le pourcentage des plastiques PEBD, sur les déformations générées dans la couche de roulement dans le corps de chaussée existante. A titre de supposition nous attribuons aux différentes couches d'assise du corps de chaussée des caractéristiques mécaniques selon la norme NF P98 036, pour la couche de roulement nous retenons les résultats obtenus dans notre étude (PEBD = 2%) pour la comparer avec une couche de roulement d'un enrobé BBSG de référence dont les caractéristiques sont conformes à la norme NF P98 036.

3.1 Principe de calcul du programme ALIZE-LCPC

Le logiciel Alizé LCPC V1.4.0, développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC, aujourd'hui Université Gustave Eiffel), constitue l'outil de référence pour le dimensionnement rationnel des structures de chaussées en France. Il s'inscrit dans la continuité des méthodes françaises de calcul, en intégrant les prescriptions actualisées de la norme NF P98-086 (mai 2019), qui définit les règles de conception des chaussées neuves en fonction du trafic, des matériaux et des conditions environnementales.

Sur le plan méthodologique, Alizé repose sur une modélisation multicouche élastique du corps de chaussée. Chaque couche (fondation, base, enrobés bitumineux ou matériaux traités aux liants hydrauliques) est représentée par son module élastique et son épaisseur. Le logiciel calcule les contraintes et déformations induites par les charges de trafic (essieu de 13 tonnes), en particulier les essieux équivalents pondérés, et vérifie la résistance des matériaux vis-à-vis des phénomènes de fatigue (pour les enrobés bitumineux) et de fissuration (pour les couches traitées aux liants hydrauliques). La norme NF P98-086 fixe les critères de performance à respecter : durée de vie cible (souvent 20 ans), classes de trafic, modules des matériaux et conditions climatiques (gel/dégel, humidité).

Le principe de fonctionnement d'Alizé LCPC est donc double :

- Analyse mécanique : simulation des sollicitations dans le corps de chaussée sous l'effet des charges répétées. (La méthode se base sur la loi de fatigue des matériaux avec une probabilité de rupture à 1 million de cycles de 50% selon la même norme).
- Vérification normative : comparaison des résultats aux seuils définis par la NF P98-086, garantissant la conformité et la durabilité de la structure.

Les résultats fournis par le logiciel permettent de déterminer les épaisseurs optimales des différentes couches, d'anticiper les modes de dégradation et d'optimiser le compromis entre performance technique et coût économique. Alizé offre également la possibilité de réaliser des rétrocalculs à partir de mesures de déflexion, afin d'évaluer l'état des chaussées existantes et de proposer des solutions de renforcement conformes à la norme.

En définitive, Alizé LCPC V1.4.0 constitue un outil essentiel pour les ingénieurs et chercheurs en génie civil. En appliquant rigoureusement les prescriptions de la norme NF P98-086 (2019),

il assure la conception de corps de chaussée fiables, durables et adaptés aux contraintes du trafic et de l'environnement.

3.2 Evolution de la déformation générée sur une chaussée donnée par rapport à l'évolution du module de rigidité (dosage en plastique PEBD) :

Epaisseurs des couches de la chaussée (RN27) selon l'archive de la DTP Mila :

BBSG 0/14 = 6 cm (désigné par autre dans le tableau ci-dessous)

GB2 0/20 2x8cm = 16 cm

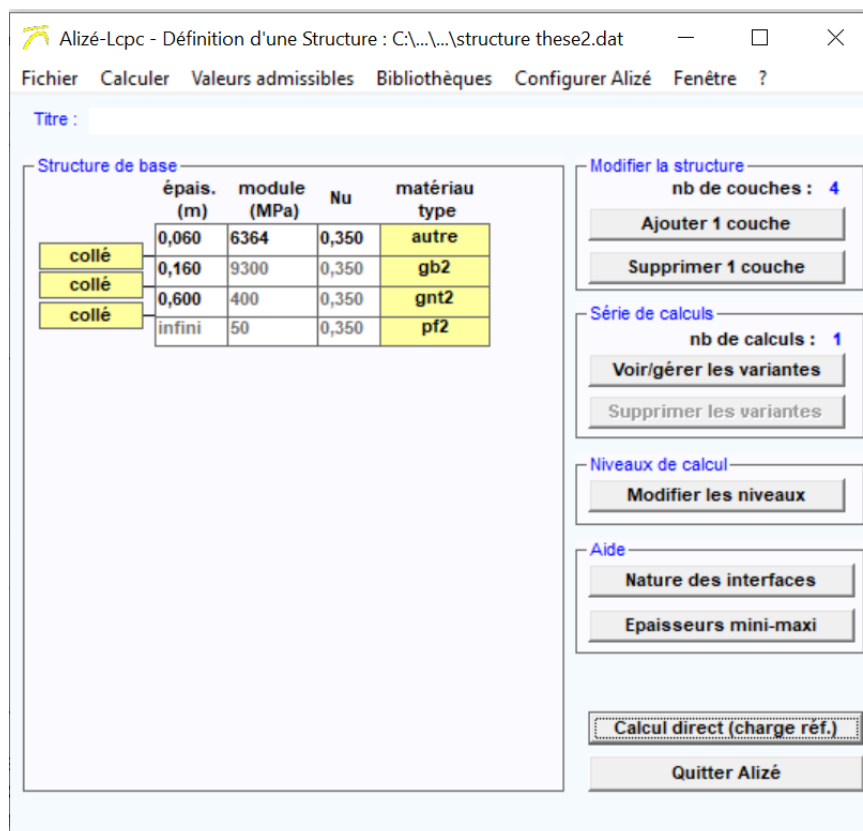
GNT 0/31,5 = 30 cm

GNT 0/63 = 30 cm

Sol support = infini

Données des matériaux comme indiqué dans la capture suivante :

- Pour RAP + 0% PEBD



Nous appliquons une charge standard d'un essieu de 13 T (6,5 x 2), nous obtenons le tableau des résultats comme suit :

Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran - cf. C:\...\structure these2.dat , Charge de ré...

C:\...\structure these2.dat variante 1: Durée= 00:00sec

épais. (m)	module (MPa)	coefficient Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdef)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdef)	SigmaZ (MPa)
0,060	6364,0 collé	0,350	0,000	38,0	0,496	-8,5	0,660
			0,060	16,8	0,352	34,5	0,586
0,160	9300,0 collé	0,350	0,060	16,8	0,503	16,4	0,586
			0,220	-71,3	-0,873	67,6	0,070
0,600	400,0 collé	0,350	0,220	-71,3	-0,001	172,4	0,070
			0,820	-75,3	-0,041	93,0	0,009
infini	50,0	0,350	0,820	-75,3	-0,001	194,1	0,009

Grandeurs affichées

tableau 1 tableau 2

tableau 3 tableau 4

tableau 5 tableau 6

tableau 7 tableau 8

Déflexion = 39,4 mm/100
entre-jumelage

Rdc = 977,2 m

Imprimer Enregistrer

Voir Chargt. Fermer

La déformation maximale générée sur la couche de roulement pour un mélange RAP à 0% de PEBD est de **38,0 µdef.**

- Pour RAP + 1% PEBD

Alizé-Lcpc - Définition d'une Structure : C:\...\structure these2.dat

Fichier Calculer Valeurs admissibles Bibliothèques Configurer Alizé Fenêtre ?

Titre :

Structure de base

	épais. (m)	module (MPa)	Nu	matériau type
collé	0,060	7395	0,350	autre
collé	0,160	9300	0,350	gb2
collé	0,600	400	0,350	gnt2
	infini	50	0,350	pf2

Modifier la structure

nb de couches : 4

Ajouter 1 couche

Supprimer 1 couche

Série de calculs

nb de calculs : 1

Voir/gérer les variantes

Supprimer les variantes

Niveaux de calcul

Modifier les niveaux

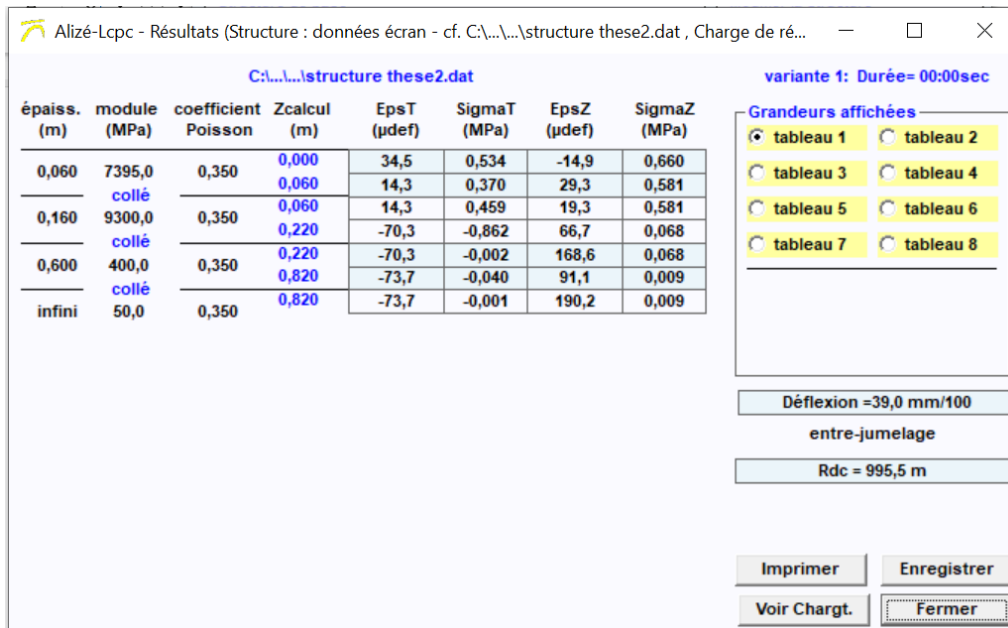
Aide

Nature des interfaces

Epaisseurs mini-maxi

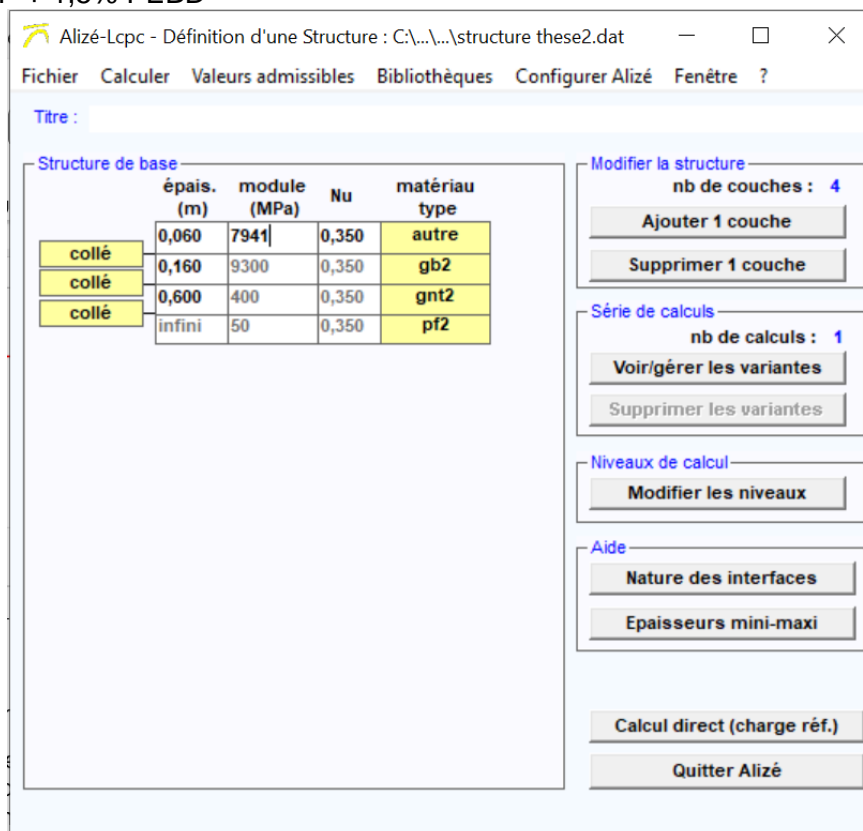
Calcul direct (charge réf.)

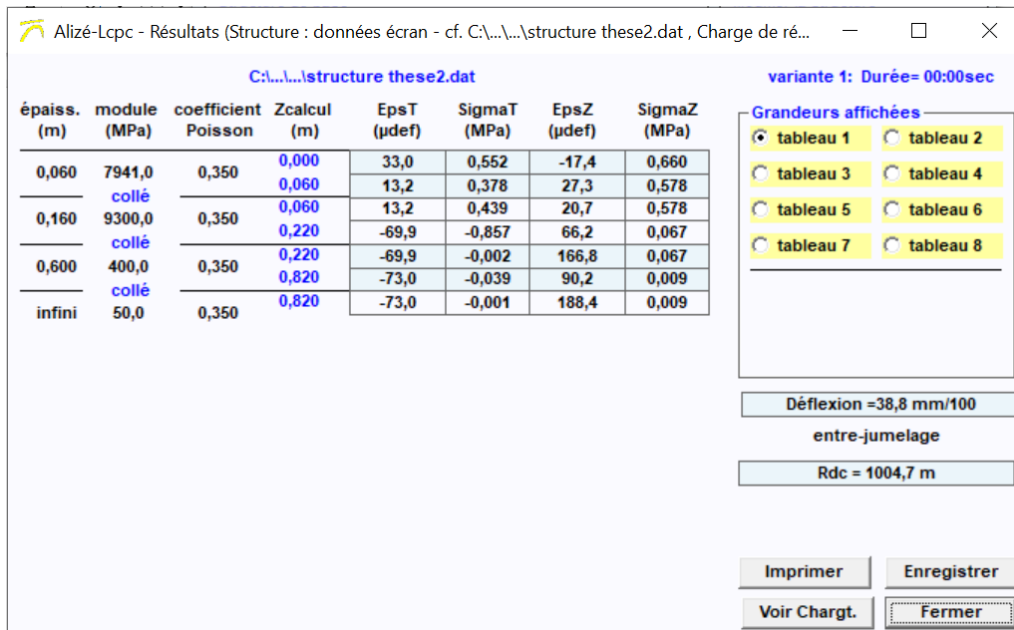
Quitter Alizé



La déformation maximale générée sur la couche de roulement pour un mélange RAP à 1% de PEBD est de **34,5 µdef.**

- Pour RAP + 1,5% PEBD





La déformation maximale générée sur la couche de roulement pour un mélange RAP à 1,5% de PEBD est de **33,0 µdef.**

- Pour RAP + 2% PEBD

Alizé-Lcpc - Définition d'une Structure : C:\...\...\structure these2.dat

Fichier Calculer Valeurs admissibles Bibliothèques Configurer Alizé Fenêtre ?

Titre :

Structure de base

	épais. (m)	module (MPa)	Nu	matériau type
collé	0,060	8598	0,350	autre
collé	0,160	9300	0,350	gb2
collé	0,600	400	0,350	gnt2
	infini	50	0,350	pf2

Modifier la structure

nb de couches : 4

Ajouter 1 couche

Supprimer 1 couche

Série de calculs

nb de calculs : 1

Voir/gérer les variantes

Supprimer les variantes

Niveaux de calcul

Modifier les niveaux

Aide

Nature des interfaces

Epaisseurs mini-maxi

Calcul direct (charge réf.)

Quitter Alizé

Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran - cf. C:\...\...\structure these2.dat , Charge de ré...

C:\...\...\structure these2.dat

variante 1: Durée= 00:00sec

épais. (m)	module (MPa)	coefficient Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdef)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdef)	SigmaZ (MPa)
0,060	8598,0	0,350	0,000	31,3	0,573	-19,8	0,660
collé			0,060	11,9	0,386	25,3	0,575
0,160	9300,0	0,350	0,060	11,9	0,415	22,2	0,575
collé			0,220	-69,4	-0,852	65,8	0,066
0,600	400,0	0,350	0,220	-69,4	-0,002	164,8	0,066
collé			0,820	-72,1	-0,039	89,2	0,009
infini	50,0	0,350	0,820	-72,1	-0,001	186,3	0,009

Grandeurs affichées

tableau 1 tableau 2

tableau 3 tableau 4

tableau 5 tableau 6

tableau 7 tableau 8

Déflexion =38,6 mm/100
entre-jumelage

Rdc = 1015,3 m

Imprimer Enregistrer

Voir Chargt. Fermer

La déformation maximale générée sur la couche de roulement pour un mélange RAP à 2% de PEBD est de **31,3 µdéf.**

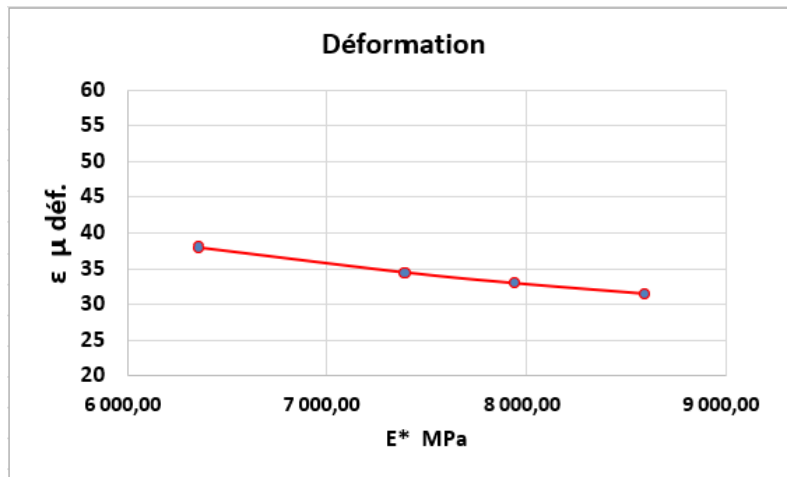


Figure 75 évolution de la déformation maximale générée dans la couche de roulement par rapport à l'augmentation du module E

3.3 Calcul de la durée de vie supplémentaire générée par les nouveaux paramètres (Module + Fatigue)

Rappel des classes de trafic selon la norme NF P98 036

Alizé-Lcpc - Cam, valeurs de la norme NF P98-086 (annexe C informative)

Classes de trafic														
Classe	T5	T4	T3		T2		T1		T0		TS		TEX	
Mg	5	35	65	115	175	245	390	615	950	1550	2450	3875	5920	
TMJA	1	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	3000	5000	7000

Nous partons toujours sur les données recueillies auprès de la DTP de Mila et nous retenons une classe de trafic T1+ avec un cumule des PL de plus de 5,7 millions unité pour une donnée de vie initiale du projet de 20 ans.

On calcul la déformation admissible EpsiT avec le trafic donné pour un enrobé standard de référence BBSG (Module, Fatigue(ϵ_6) = (5400 Mpa, 100 μ déf)

Alizé-Lcpc - Calcul des valeurs admissibles

Trafic PL cumulé : données

<input checked="" type="checkbox"/> Moyenne journalière annuelle (MJA) :	615
<input type="checkbox"/> Taux accroissement géométrique (%) :	2,56
<input checked="" type="checkbox"/> Taux accroissement arithmétique (%) :	3
<input checked="" type="checkbox"/> Durée de service (années) :	20
<input type="checkbox"/> Trafic cumulé PL :	5,7690E+6

Cocher au plus 3 cases

Aide

Coefficients d'agressivité CAM

Valeurs des risques R

Guide lcpc-sétra 94

Catalogue 1998

Norme NF P98-086

Valeurs admissibles : données

matériau type :	bb	fréquence (Hz) :	10 Hz
coefficient CAM :	0,5	Teta Equiv. (°C) :	15 °C
risque (%) :	5,0	E(10°,10Hz) (MPa) :	7200
trafic cumulé NE :	2,8845E+6	E(Teq,Freq) (MPa) :	5400
Epsilon6 (µdéf) :	100	Hstructurel MB (m) :	0,22
-1/b :	5	écart type Sh (m) :	0,025
		écart type SN :	0,250
		Kr (risque) :	0,765
		Kc (calage) :	1,1
		Ks : E(MPa) sousjacent compris dans [50,80[:	1/1,1

Calculer EpsiT admissible

Calcul inverse NE = f(EpsiT)

Calcul inverse Risk = f(EpsiT)

Bibliothèque des matériaux

Imprimer

Enregistrer

EpsilonT
71,5 µdéf

Annotation libre :
bb

Mémo ...
21 - EpsiT= 71,5 (bb)

effacer=dbl click

Restaurer

Fermer

Pour modifier les valeurs standard : cliquer sur "bb"

La déformation admissible pour le trafic T1+ sur 20 ans est de **71,5 µdéf**.

On calcule la déformation admissible EpsiT avec le même trafic pour l'enrobé de l'étude RAP+ % PEBD (Module, Fatigue(ϵ_6)). On fait monter le nombre d'années pour chaque couple jusqu'à obtenir la déformation admissible 71,5 µdéf générée par le trafic avec un enrobé standard sur 20 ans.

a) RAP+0% PEBD

Alizé-Lcpc - Calcul des valeurs admissibles

Trafic PL cumulé : données

<input checked="" type="checkbox"/> Moyenne journalière annuelle (MJA) :	615
<input type="checkbox"/> Taux accroissement géométrique (%) :	2,86
<input checked="" type="checkbox"/> Taux accroissement arithmétique (%) :	3
<input checked="" type="checkbox"/> Durée de service (années) :	6,95
<input type="checkbox"/> Trafic cumulé PL :	1,6993E+6

Cocher au plus 3 cases

Aide

Coefficients d'agressivité CAM

Valeurs des risques R

Guide lcpc-sétra 94

Catalogue 1998

Norme NF P98-086

Valeurs admissibles : données

matériau type :	bitumineux	E(10°,10Hz) (MPa) :	8636
coefficient CAM :	0,5	E(Teq,Freq) (MPa) :	6364
risque (%) :	5,0	écart type Sh (m) :	0,025
trafic cumulé NE :	8,4965E+5	écart type SN :	0,25
Epsilon6 (µdéf) :	75,40	Kr (risque) :	0,797
-1/b :	7,5834	Kc (calage) :	1,1
		Ks : E(MPa) sousjacent compris dans [50,80[1/1,1

Calculer EpsiT admissible

Calcul inverse NE = f(EpsiT)

Calcul inverse Risk = f(EpsiT)

Bibliothèque des matériaux

Imprimer

Enregistrer

EpsilonT
71,5 µdéf

Annotation libre :

Mémo ...

261 - EpsiT= 71,5 (bitumineux)

effacer=dbl click

Restaurer

Fermer

La durée de vie de l'enrobé seul (sans ajout de plastique) est de 7 ans (6,95 ans)

b) RAP+ 1%PEBD

Alizé-Lcpc - Calcul des valeurs admissibles

Trafic PL cumulé : données

<input checked="" type="checkbox"/> Moyenne journalière annuelle (MJA) :	615
<input type="checkbox"/> Taux accroissement géométrique (%) :	2,69
<input checked="" type="checkbox"/> Taux accroissement arithmétique (%) :	3
<input checked="" type="checkbox"/> Durée de service (années) :	14,1
<input type="checkbox"/> Trafic cumulé PL :	3,7870E+6

Cocher au plus 3 cases

Valeurs admissibles : données

matériau type :	bitumineux	E(10°,10Hz) (MPa) :	9857
coefficient CAM :	0,5	E(Teq,Freq) (MPa) :	7395
risque (%) :	5,0	écart type Sh (m) :	0,025
trafic cumulé NE :	1,8935E+6	écart type SN :	0,25
Epsilon6 (µdéf) :	89,43	Kr (risque) :	0,776
-1/b :	5,5942	Kc (calage) :	1,1
		Ks : E(MPa) sousjacent compris dans [50,80[1/1,1

Calculer EpsiT admissible

Calcul inverse NE = f(EpsiT)

Calcul inverse Risk = f(EpsiT)

Bibliothèque des matériaux

Imprimer

Enregistrer

Aide

Coefficients d'agressivité CAM

Valeurs des risques R

Guide lcpc-sétra 94

Catalogue 1998

Norme NF P98-086

EpsilonT
71,5 µdéf

Annotation libre :

Mémo ...

255 - EpsiT= 71,5 (bitumineux)

effacer=dbl click

Restaurer

Fermer

La durée de vie de l'enrobé + 1% de plastique PEBD est de 14 ans (14,1 ans)

c) RAP+1,5 PEBD

Alizé-Lcpc - Calcul des valeurs admissibles

Trafic PL cumulé : données

<input checked="" type="checkbox"/> Moyenne journalière annuelle (MJA) :	615
<input type="checkbox"/> Taux accroissement géométrique (%) :	2,57
<input checked="" type="checkbox"/> Taux accroissement arithmétique (%) :	3
<input checked="" type="checkbox"/> Durée de service (années) :	19,5
<input type="checkbox"/> Trafic cumulé PL :	5,5920E+6

Cocher au plus 3 cases

Aide

Coefficients d'agressivité CAM

Valeurs des risques R

Guide lcpc-sétra 94

Catalogue 1998

Norme NF P98-086

Valeurs admissibles : données

matériau type :	bitumineux	E(10°,10Hz) (MPa) :	10259
coefficient CAM :	0,5	E(Teq,Freq) (MPa) :	7941
risque (%) :	5,0	écart type Sh (m) :	0,025
trafic cumulé NE :	2,7960E+6	écart type SN :	0,25
Epsilon6 (µdéf) :	100,65	Kr (risque) :	0,766
-1/b :	5,0369	Kc (calage) :	1,1
		Ks : E(MPa) sousjacent compris dans [50,80[1/1,1

Calculer EpsiT admissible

Calcul inverse NE = f(EpsiT)

Calcul inverse Risk = f(EpsiT)

Bibliothèque des matériaux

Imprimer

Enregistrer

EpsilonT
71,5 µdéf

Annotation libre :
bitumineux

Mémo ...
250 - EpsiT = 71,5 (bitumineux)

effacer=dbl click

Restaurer

Fermer

La durée de vie de l'enrobé + 1,5% de plastique PEBD est de 19 ans (19,5 ans)

d) RAP+2% PEBD

Alizé-Lcpc - Calcul des valeurs admissibles

Trafic PL cumulé : données

<input checked="" type="checkbox"/> Moyenne journalière annuelle (MJA) :	615
<input type="checkbox"/> Taux accroissement géométrique (%) :	2,52
<input checked="" type="checkbox"/> Taux accroissement arithmétique (%) :	3
<input checked="" type="checkbox"/> Durée de service (années) :	21,8
<input type="checkbox"/> Trafic cumulé PL :	6,4203E+6

Cocher au plus 3 cases

Aide

Coefficients d'agressivité CAM

Valeurs des risques R

Guide lcpc-sétra 94

Catalogue 1998

Norme NF P98-086

Valeurs admissibles : données

matériau type : bitumineux

coefficient CAM : 0,5

risque (%) : 5,0

trafic cumulé NE : 3,2102E+6

Epsilon6 (µdéf) : 105,50

-1/b : 4,9539

E(10°,10Hz) (MPa) : 10837

E(Teq,Freq) (MPa) : 8598

écart type Sh (m) : 0,025

écart type SN : 0,25

Kr (risque) : 0,764

Kc (calage) : 1,1

Ks : E(MPa) sousjacent compris dans [50,80[: 1/1,1

EpsilonT : 71,5 µdéf

Annotation libre : 204 - EpsiT= 71,5 (bitumineux)

Mémo ...

effacer=dbl click

Calculer EpsiT admissible

Calcul inverse NE = f(EpsiT)

Calcul inverse Risk = f(EpsiT)

Bibliothèque des matériaux

Imprimer

Enregistrer

Restaurer

Fermer

La durée de vie de l'enrobé + 2% de plastique PEBD est de 22 ans (21,8 ans)

La figure 76 suivante illustre l'évolution de la durée de vie de l'enrobée de l'étude par rapport à l'augmentation du taux des déchets plastiques (PEBD)

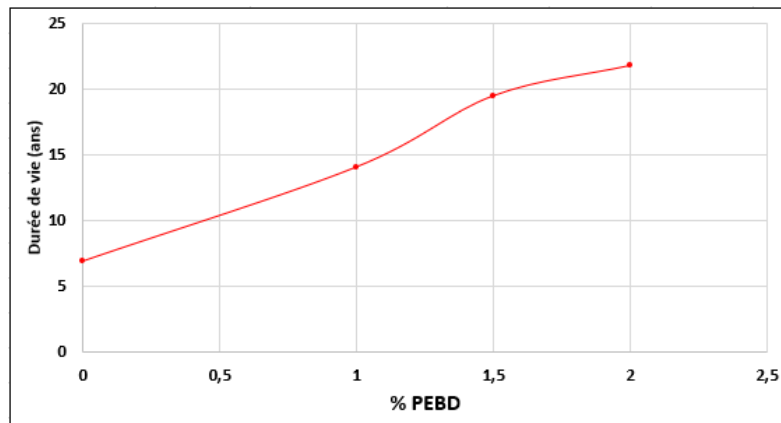


Figure 76 Evolution de la durée de vie de l'enrobé par rapport à l'augmentation de taux de PEBD

Conclusion de l'application numérique et la modélisation des déformations :

Nous constatons une amélioration de la durée de vie de l'enrobé RAP en ajoutant le plastique PEBD, en passant d'environ 7 ans au dosage de 0% (RAP seul) à environ 22 ans au dosage de 2%, donc une augmentation de 214%.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

D'après les résultats de divers essais de caractérisation réalisés sur des matériaux RAP renforcés par des feuilles de déchets plastiques, on constate globalement une nette amélioration des performances mécaniques à des dosages précis et pour certains types de plastiques. Cependant, les caractéristiques physiques, notamment l'indice de vide, se dégradent pour des dosages plastiques élevés. En effet, très peu de recherches similaires ont été menées sur des feuilles de plastique (0 à 15 mm), la plupart portant plutôt sur la modification du bitume (par voie humide) avec des grains de granulométrie inférieure (0 à 4 mm).

Nous avons dans un premier lieu mis en évidence l'épaisseur optimale des déchets plastiques à utiliser dans la présente recherche, en effet une épaisseur de 5 à 10 mm était celle qui donne les résultats les plus performants en termes de tenue à l'eau.

Ce qui est constaté d'après les différents résultats d'essais de la tenue à l'eau pour les trois types de plastique que la résistance à la compression (sèche et humide) augmente avec l'augmentation de taux de plastique. La sensibilité à l'eau commence à décliner à partir du taux de 1% pour le PEBD et le PEHD et décline à partir de 1,5% pour le PET.

Le fluage continue à baisser en augmentant le taux de plastique pour les trois types. L'indice des vides augmente avec l'augmentation de taux de plastique mais atteint des valeurs hors tolérance pour le PET au dosage au-delà de 1,5%.

L'amélioration des performances étudiées par l'essai DURIEZ est due à une meilleure liaison des différents composants du mélange apportée par l'ajout des plastiques. L'essai de compactibilité révèle que l'ajout de feuilles de déchets de tout type de plastique augmente l'indice de vide. Il a été constaté que le PET arrive en tête, suivi du PEHD puis du PEBD en termes d'augmentation des vides dans le matériau. Les valeurs d'indice de vide à un dosage de 1 % pour les trois types de plastiques sont conformes aux spécifications ; à un dosage de 1,5 %, les valeurs du mélange sont acceptables, sauf pour les matériaux contenant du PET. De plus, les mélanges contenant 2 % de PEHD et PET sont hors tolérance, ce qui signifie que la maniabilité commence à être compromise à partir de 1,5 % du dosage de plastique, où le compactage devient difficile.

L'essai de résistance à la déformation permanente a conclu que l'ajout de déchets plastiques au matériau RAP donne des résultats en faveur d'une excellente résistance à l'orniérage. Les mélanges soumis à l'étude correspondent bien aux normes BBSG/BBME de 3e classe à partir d'un dosage de 1,5 % de déchets plastiques pour tous les types utilisés.

Des essais de module complexe ont été réalisés avec un matériau RAP auquel nous ajoutons des déchets plastiques de type PEBD, il a été constaté que le matériau RAP seul présente initialement un module de rigidité plus élevé que celui d'un enrobé de référence, l'angle de phase diminue lorsque le dosage en plastique PEBD augmente, cela fait également augmenter le module complexe, le module normalisé (NF P98 086 mai 2019) à 15° C et 10Hz passe de 6 364,29 Mpa, 7 395,07 Mpa, 7 941,56 Mpa puis à 8 598,12 Mpa pour les dosages consécutifs de 0%, 1%, 1,5% et 2% en plastique, de ce fait le module augmente de 35,1 % entre un dosage de 0% et 2% de déchets en PEBD.

La résistance à la fatigue du matériau RAP avec différents types et dosages de plastique PEBD a été testée ; les résultats ont montré une nette amélioration de la résistance à la fatigue

avec l'augmentation du dosage de plastique. L'additif plastique utilisé dans le mélange joue un rôle essentiel dans la création de liaisons ou de ponts entre les granulats, consolidant ainsi la structure du matériau et lui permettant de mieux résister aux différentes contraintes.

La modélisation par le logiciel ALIZE du laboratoire LCPC a pu quantifier l'amélioration des caractéristiques mécaniques (Module & Fatigue) et a fait sortir une augmentation de durée de vie de plus de 200% d'un enrobé recyclé avec un dosage de 2% de PEBD.

Par ailleurs, les propriétés d'étanchéité et de résistance thermique observées suggèrent que ces enrobés recyclés enrichis en plastiques pourraient aussi trouver des applications dans le domaine du bâtiment, notamment pour les couches de protection des terrasses et comme matériaux innovants pour les façades en isolation thermique par l'extérieur (ITE). Cette extension d'usage démontre que les solutions développées ne se limitent pas aux routes, mais peuvent contribuer à une approche intégrée de la durabilité dans différents secteurs de la construction.

Notre recherche a permis de mettre en évidence l'amélioration des performances physiques et mécaniques d'un matériau 100 % RAP avec des plastiques recyclés en feuillets, notamment le PEBD et le PEHD à un dosage de 1 % maximum au-delà duquel l'aptitude au compactage devient difficile et le matériau devient sensible à l'eau et donc plus fragile.

REFERENCES

- Abdul Muqet & al. (2023). Structural Performance of Waste Plastic Bottles Modified Asphalt: A Review. *MDPI, Resources*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/resources12010010>
- Adetuyi, B. O., Mathew, J. T., Inobeme, A., Falana, Y. O., Adetunji, C. O., Shahnawaz, M., Oyewole, O. A., Eniola, K. I. T., Yerima, M. B., & Popoola, O. A. (2024). Tyres, Bitumen Wear and Plastic Bottles, Other Single Used Plastic as Major Sources of Microplastic. In Mohd. Shahnawaz, C. O. Adetunji, M. A. Dar, & D. Zhu (Eds.), *Microplastic Pollution* (pp. 141–160). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-8357-5_9
- Akinleye & al. (2020). Marshall Properties Evaluation of Hot and Warm Asphalt Mixes Incorporating Dissolved Plastic Bottle Modified Bitumen. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 7, 439–450. <https://doi.org/https://revue.umtmo.dz/index.php/JMES/article/view/2399>
- Al-Qadi, I. L., Elseifi, M., & Carpenter, S. H. (2007). *Reclaimed asphalt pavement, a literature review. FHWA-ICT-07-001*.
- Anderson & al. (1994). Binder Characterization and Evaluation, Volume 3 : Physical Characterization. Vol. 3. Washington, D.C. *National Research Council. (Strategic Highway Research Program)*.
- Antunes & al. (2019). A review on the effect of RAP recycling on bituminous mixtures properties and the viability of multi-recycling. *Construction and Building Materials*, 211, 453–469. <https://doi.org/doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.258>
- Attaelmanan & al. (2011). Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier. *Constr. Build. Mater.*
- Bartolomeo. (2003). *Vers une prévision de la durée de vie des polymères géosynthétiques - Principes de base - Etat de l'art*.
- Basim H. (2014). Utilization of Waste Plastic and Recycle Concrete Aggregate in Production of Hot Mix Asphalt. *Al-Qadisiya Journal For Engineering Sciences*.
- Bilema, M., Mohamed, A., Atiq, I., Maftah, S., & Alsaiti, A. (2024). Incorporating Waste Plastic Bottles as an Additive in Asphalt Mixtures through a Dry Method. *Slovak Journal of Civil Engineering*, 32, 42–49. <https://doi.org/10.2478/sjce-2024-0024>
- Branthaver & al. (1994). Binder Characterization and Evaluation. Volume 2. Washington, D.C. *Strategic Highway Research Program, National Research Council*.

- Bressi, S., Pittet, M., Dumont, A. G., & Partl, M. N. (2016). A framework for characterizing RAP clustering in asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 106, 564-574. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.132>
- Broere, D. J. C. (2015). *OLIGOTERPENES AS REJUVENATING AGENT IN ASPHALT*. <https://www.freepatentsonline.com/y2017/0349725.html>
- Brulé, B. (1987). *Relations composition–structure–propriété des bitumes routiers*. 148:69-81.
- Cardoso, J., Ferreira, A., Almeida, A., & Santos, J. (2023). Incorporation of plastic waste into road pavements: A systematic literature review on the fatigue and rutting performances. *Construction and Building Materials*, 407, 133441. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133441>
- Chiang, K. C. K., Zhu, B., Liu, L., Li, H., Chen, C., Tang, S., & Xing, C. (2024). Differences in Rejuvenation Mechanisms and Physical Properties of Aged Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)-Modified Bitumen by Mono-Epoxy and Di-Epoxy Compounds. *Polymers*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/polym17010086>
- Chin & Damen. (2019). *AP-T351-19 Viability of Using Recycled Plastics in Asphalt and Sprayed Sealing Applications*. 52.
- Cho L.F. (1982). *Oxidative Behavior of Hydrocarbon Lubricants*. United States: Pennsylvania State University.
- Colwill, D. (2001). *Recyclage des chaussées souples existantes (08.07.B-2)*. AIPCR.
- Costa & al. (2013). Incorporation of waste plastic in asphalt binders to improve their performance in the pavement'. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 6, no, pp.457-64.
- COTITA. (2012). Les enrobés recyclés à chaud: Utilisation des agrégats d'enrobés. Présentation: La route durable. Orléans, France. In *COTITA Normandie Centre, & SPRIR Routes du Centre*.
- Cui & al. (2018). Further Exploration of the Pavement Oxidation Model – Diffusion-Reaction Balance in Asphalt. *Construction and Building Materials*, 161: 132-40.
- Cussler, E. L. (1997). *Diffusion: Mass Transfer in Fluid Systems*. <https://doi.org/DOI:10.1017/CBO9780511805134>
- Delorme et al. (2007). *Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés*. 199.
- Denis & al. (1997). Physico-chimie des lubrifiants : analyses et essais. Technip. *Publications de l'Institut Français Du Pétrole*.
- Di Benedetto & Corté. (2005). *Matériaux routiers bitumineux 2: constitution et propriétés thermo-mécaniques des mélanges bitumineux, vol. 2* (Hermès Lav).
- Dony, A., Pouget, S., Nicolai, A., Faucon-Dumont, S., Poirier, J.E., Sauzéat, C., D., & J.A, Baudoin, S. (2019). *Multi recyclage des enrobés : Application à la méthode de formulation des enrobés*. *Revue RGRA N°968*.
- Duan, Y., Wu, K., Serrat, C., Arteaga-Larios, F., Brown, H., DuBois, C. J., Buttlar, W. G., & Deng, B. (2024). Assessment of microplastics production from waste plastics-modified asphalt pavement. *Resources, Conservation and Recycling*, 202, 107329. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107329>
- Elnaml, I., Liu, J., Mohammad, L., Dylla, H., Wasiuddin, N., Cooper, S., & Cooper, S. (2024). Recycling waste plastics in asphalt mixture: Engineering performance and environmental assessment. *Journal of Cleaner Production*, 453, 142180. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142180>

- Enfrin, M., & Giustozzi, F. (2022). Recent advances in the construction of sustainable asphalt roads with recycled plastic. *Polymer International*, 71. <https://doi.org/10.1002/pi.6405>
- Er. Dushyant & al. (2024). A Review Study: Mechanical and Environmental Benefits of Plastic-Modified Bitumen in Road Construction. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. <https://doi.org/https://doi.org/10.22214/ijraset.2024.63934>
- Farcas, F. (1996). *Etude d'une méthode de simulation du vieillissement sur route des bitumes -Paris 6-*.
- Fonseca & al. (2022). Influence of Plastic Waste on the Workability and Mechanical Behaviour of Asphalt Concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4), 2146. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app12042146>
- Fonseca, M., Capitão, S., Almeida, A., & Picado-santos, L. (2022). Influence of Plastic Waste on the Workability and Mechanical Behaviour of Asphalt Concrete. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12042146>
- Frolov & al. (2016). *The Steric Hardening and Structuring of Paraffinic Hydrocarbons in Bitumen*.
- Gaspar, M. S., Vasconcelos, K. L., Lopes, M. M., & Bernucci, L. L. (2020). Evaluation of binder blending on warm mix asphalt recycling. *Transportes*, 28(2), 87-99. <https://doi.org/DOI:10.14295/transportes.v28i2.2133>
- Ghabchi & al. (2021). Feasibility of using micronized recycled Polyethylene Terephthalate (PET) as an asphalt binder additive: A laboratory study. *Construction and Building Materials*, 292, 100085.
- Goli & Latifi. (2020). Evaluation of the effect of moisture on behaviour of warm mix asphalt (WMA) mixtures containing recycled asphalt pavement (RAP). *Construction and Building Materials*.
- Gürü & al. (2014). An approach to the usage of polyethylene terephthalate (PET) waste as roadway pavement material. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 302–310.
- Han, Z., Cong, P., & Qiu, J. (2022). Microscopic experimental and numerical research on rejuvenators: A review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 9(2), 180–207. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.01.002>
- Heydari & al. (2024). Assessment of Binder Modification in Dry-Added Waste Plastic Modified Asphalt. *Polymers*, 16(14), 1987. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym16141987>
- IDRRIM. (2021). *Recyclage des agrégats d'enrobés dans les mélanges bitumineux à chaud - État de l'art et recommandations - Juillet 2021 Born : CEREMA 2021. Collection: Références. ISBN: 978-2-37180-528-6*.
- Ilwandri & al. (2023). Development of asphalt mixture with plastic waste additives to improve road pavement performance. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*. <https://doi.org/https://doi.org/10.61991/inovasisosial.v1i1.24>
- Jalal J. (2016). Utilisation of waste plastic in bituminous mix for improved performance of roads. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s12205-015-0511-0>
- Jassim & al. (2014). Optimum Use of Plastic Waste to Enhance the Marshall Properties and Moisture Resistance of Hot Mix Asphalt. *International Journal of Engineering Trends and Technology*. <https://doi.org/10.14445/22315381/IJETT-V7P223>

- Jexembayeva & al. (2024). Performance Optimization Approach of Polymer-Modified Asphalt Mixtures with PET and PE Waste. *Polymers*, 3308, 16(23). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/polym16233308>
- Ji, H., Li, B., Li, X., Han, J., Liu, D., Dou, H., Fu, M., & Yao, T. (2024). Waste cooking oil as a sustainable solution for UV-aged asphalt binder: Rheological, chemical and molecular structure. *Construction and Building Materials*, 420, 135149. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135149>
- Jin & Glover. (2013). Modeling Asphalt Oxidation in Pavement With Field Validation. *Petroleum Science and Technology* 31 (13);, 1398-1405.
- Johnson, C., & Bahia, H. U. (2010). Evaluation of an accelerated procedure for fatigue characterization of asphalt binders. *Road Materials and Pavement Design*.
- Karlsson & Isacson. (2002). Bitumen rejuvenator diffusion as influenced by ageing. *Road Materials and Pavement Design*, 3(2), 167-182. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/14680629.2002.9689920>
- Karlsson & Ulf. (2006). Material-Related Aspects of Asphalt Recycling—State-of-the- Art. *Journal of Materials in Civil Engineering* 18 (1), 81–92.
- Karlsson, R., & Isacson, U. (2006). Material-related aspects of asphalt recycling—state-of- the-art. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 81–92. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2006\)18:1\(81\)](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2006)18:1(81))
- Koti.J. (2022). *Valorisation des coques de noix de palmiste dans la construction des routes à faible trafic-Doctorat dissertation - Limoges university.*
- Koudelka. (2018). *The use of rejuvenators as an effective way to restore aged binder properties.*
- Kowalski, K. J., McDaniel, R. S., & Olek, J. (2016). Reclaimed asphalt pavement limits to meet surface frictional requirements. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(1),. [https://doi.org/DOI: 10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001323](https://doi.org/DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001323)
- Lahjiri, F. (2020). *Etude de l'impact physico-chimique des liants dits " régénérants" sur la constructibilité (performance et durabilité) des enrobés recyclés (Doctoral dissertation, Université Montpellier).* [Université Montpellier]. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03370124>
- 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*,. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361\(00\)00121-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-2361(00)00121-6)
- Laomuad, A., Suddeepong, A., Horpibulsuk, S., Buritatum, A., Yaowarat, T., Akkharawongwhatthana, K., Pongsri, N., Phunpeng, V., Chinkulkijniwat, A., & Arulrajah, A. (2024). Evaluating polyethylene terephthalate in asphalt concrete with reclaimed asphalt pavement for enhanced performance. *Construction and Building Materials*, 422, 135749. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135749>
- Le Guern. (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.
- Lee, S.-Y., Kim, K.-W., Yun, Y., & Minh Le, T. H. (2024). Evaluation of eco-friendly asphalt mixtures incorporating waste plastic aggregates and additives: Magnesium, fly ash, and steel slag. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02756. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02756>

- Leng & al. (2018). Value-added application of waste PET based additives in bituminous mixtures containing high percentage of reclaimed asphalt pavement (RAP). *Journal of Cleaner Production* 196 (2018).
- Lesueur. (2012). *Les propriétés rhéologiques du bitume*. Enseignement : Ponts Formation Conseil, Ecole des Ponts ParisTech, Aix-en-Provence, France.
- Li, J., Wang, Z., Chen, C., & Zhang, Z. (2024). A novel reactive warm-mix rejuvenator and its effects of synergistic rejuvenation and temperature reduction on aged SBS modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 416, 135266. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135266>
- Lopez & al. (2015). *Bétons bitumineux recyclés et régénérés à fort taux de fraisats*. *Revue générale des routes et de l'aménagement (RGRA)*. (928), 22–27.
- Lu et Ulf. (2002). Effect of Ageing on Bitumen Chemistry and Rheology. *Construction and Building Materials*, 16(1) 15-22.
- Ma Y. & al. (2023). Investigation of the Rheological Properties and Storage Stability of Waste Polyethylene/Ethylene–Vinyl Acetate-Modified Asphalt with Crosslinking and a Silicone Coupling Agent. *Materials*, 16(9). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma16093289>
- Mangiafico, S. (2014). *Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends*. ENTPE-LYON.
- Mannan, U. A., Faisal, H. M., Hasan, M. M., & Tarefder, R. A. (2018). Evaluating the Effect of High RAP Content on Asphalt Mixtures and Binders Fatigue Behavior. *Journal of Testing and Evaluation*, 46(5), 1749–1761. <https://doi.org/10.1520/JTE20170248>
- Mariana & al. (2022). Influence of Plastic Waste on the Workability and Mechanical Behaviour of Asphalt Concrete. *MDPI, Applied Sciences*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app12042146>
- Marquez & al. (2021). Recycled Polyethylene Terephthalate as Reinforcement Additive of Asphalt Mixture for Pavement Application. *Philippine Journal of Science*, 150, 1061–1068.
- Moghaddam & Baaj. (2016). The use of rejuvenating agents in production of recycled hot mix asphalt: A systematic review. *Construction and Building Materials*, 114, 805–816.
- Mohankar R.H. (2024). Eco-Friendly Infrastructure Development Employing Plastic Waste for Road Development: A Review. *Indian Scientific Journal Of Research In Engineering And Management*, 08(10), 1–3. <https://doi.org/https://doi.org/10.55041/ijsrem37885>
- Mosa & al. (2018). Modification of the Properties of Warm Mix Asphalt Using Recycled Plastic Bottles. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 31, 1514–1520. https://doi.org/https://www.ije.ir/article_73287.html
- Mouillet & al. (2010). *Identification et dosage des fonctions oxygénées présentes dans les liants bitumineux. Analyses par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier*.
- Mouillet et al. (2008). *Durability of polymer modified bitumens : comparison of evolution due to conventional standardised ageing tests with the in situ ageing of binders in pavements*.
- Nahar & al. (2014). rheological and microstructural assessment of rejuvenated bitumen. *Transport. Res. Rec*, 52–62.

- NAPA. (2009). Black and Green: Sustainable Asphalt, Now and Tomorrow. Special Report Number 200. National Asphalt Paving Association, Lanham. *National Asphalt Paving Association*.
- Navaro, J. (2011). *Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques? (Doctoral dissertation, Arts et Métiers-ParisTech)*. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00613960>
- Nayak, P., & Sahoo, U. C. (2017). Rheological, chemical and thermal investigations on an aged binder rejuvenated with two non-edible oils. *Road Materials and Pavement Design*, 18(3), 612–629. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1182058>
- NGUYEN, M, L. (2009). *Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux*. INSA, LYON.
- Ogada, J. S. L., Mwea, S. K., & Matheri, G. (2023). Performance of Plastic Waste and Waste Engine Oil as Partial Replacements of Bituminous Asphalt Concrete in Flexible Pavement. *East African Journal of Engineering*, 6(1), 48–65. <https://doi.org/10.37284/eaje.6.1.1144>
- ONS. (2020). *Office National des Statistiques*. www.ons.dz
- Petersen. (1984). *Chemical Composition of Asphalt as Related to Asphalt Durability: State of the Art*.
- Petersen & al. (1998). Asphalt Aging: Dual Oxidation Mechanism and Its Interrelationships with Asphalt Composition and Oxidative Age Hardening. Transportation Research Record. *Journal of the Transportation Research Board*, 1638(1), 47–55.
- Petersen, J. C. (1975). « *Quantitative Method Using Differential Infrared Spectrometry for the Determination of Compound Types Absorbing in the Carbonyl Region in Asphalts* » *Analytical Chemistry*. 47(1): 112-17.
- Petersen, J. C. (2009). A Review of the Fundamentals of Asphalt Oxidation: Chemical, Physicochemical, Physical Property, and Durability Relationships. *Transportation Research Board*.
- Ponnada & Vamsi. (2020). Experimental investigation on modification of rheological parameters of bitumen by using waste plastic bottles. *Materials Today*. <https://doi.org/doi:10.1016/j.matpr.2020.03.243>
- Rad, γ, F. (2013). *Estimating blending level of fresh and RAP binders in recycled hot mix asphalt (Doctoral dissertation)*.
- Radeef & al. (2021). Enhanced Dry Process Method for Modified Asphalt Containing Plastic Waste. *Frontiers in Materials*, Volume 8-. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fmats.2021.700231>
- Rahman & al. (2020). Recycling of waste materials for asphalt concrete and bitumen: a review. *Materials*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/ma13071495>.
- RAMOND, G., & SUCH, C. (1990). Bitumes et bitumes modifiés – Relations structures, propriétés, composition. *Bulletin de Liaison Des Laboratoires Des Ponts et Chaussées*, 168-65–88.
- Ren & al. (2020). Evaluation of rheological behaviors and anti-aging properties of recycled asphalts using low-viscosity asphalt and polymers. *Journal of Cleaner Production*.
- Ren, S., Liu, X., Lin, P., & Erkens, S. s. (2024). *Functional Pavements; First Edition*.
- Roberts, F. L., P. S. Kandhal, E. R. Brown, D. Lee, and T. W. Kennedy. (1996). *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction, 2 nd Edition, Napa Education Foundation, Lanham, MD, 1996*.

- Sajid & al. (2024). Technical, Economic, and Environmental Sustainability Assessment of Reclaimed Asphalt and Waste Polyethylene Terephthalate Pavements. *Sustainability (Switzerland)*, 16(12), 4911. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su16124911>
- SETRA. (2008). *Utilisation des normes enrobés à chaud*.
- Sharp & al. (2017). *Review of future pavement technologies, WARRIP project no. 2016-006, Main Roads Western Australia, June*.
- Shi Chengxiang, S. Y. (2013). *Regeneration activator for old asphalt mixture of high type asphalt pavement*.
- Shu, S., Chen, G., Yan, J., Li, Z., Shen, W., Gong, K., & Luo, Y. (2023). Combined Use of Polyurethane Prepolymer and Aromatic Oil in Physicochemical Rejuvenation of Aged SBS Modified Bitumen for Performance Recovery. *Polymers*, 15(5). <https://doi.org/10.3390/polym15051120>
- Siddhart & al. (2022). Performance of waste polyethylene modified bituminous paving mixes containing reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 348. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128677>
- Siddiqui & Ali. (1999). *Studies on the Aging Behavior of the Arabian Asphalts, Fuel* 78 (9).
- 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. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.11.013>
- Silverstein, X. (1998). *Spectrométrie de composés organiques*. De Boeck Université.
- Smyth, K., Tan, S., Van Seters, T., Henderson, V., Passeport, E., & Drake, J. (2025). Pavement wear generates microplastics in stormwater runoff. *Journal of Hazardous Materials*, 481, 136495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.136495>
- Sofo, H., Mohammed, M., & Sidick, B. (2024). Recycling of Waste Plastic PET on Asphalt Concrete (AC) by Using Application of Response Surface Methodology: Effect of PET on AC Formulated by Duriez Model. *International Journal of Materials Science and Applications*, 13(3), 48–60. <https://doi.org/10.11648/j.ijmsa.20241303.13>
- Song & Huang. (2018). The Influence of warm-mix asphalt technology and rejuvenator on performance of asphalt mixtures containing 50% reclaimed asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 191–198.
- Suaryana, N., Nirwan, E., & Ronny, Y. (2018). Plastic Bag Waste on Hotmixture Asphalt as Modifier. *Material Engineering and Application*, 789, 20–25. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.789.20>
- Suksiripattanapong, C., Uraikhot, K., Tiyasangthong, S., Wonglakorn, N., Tabyang, W., Jomnonkwao, S., & Phetchuay, C. (2022). Performance of Asphalt Concrete Pavement Reinforced with High-Density Polyethylene Plastic Waste. *Infrastructures*, 7(5), 1–11. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7050072>
- Tarsi, G., Tataranni, P., Sangiorgi, C. (2020). *The Challenges of Using Reclaimed Asphalt Pavement for New Asphalt Mixtures: A Review. Materials (Basel)*. 12;13(18). <https://doi.org/doi:10.3390/ma13184052>. PMID: 32932617; PMCID: PMC7560297.
- Tauste & al. (2018). Understanding the Bitumen Ageing Phenomenon: A Review. *Construction and Building Materials*, 192:593-609.

- Tyrion.F.C. (2000). *Asphalt oxidation, Asphaltenes and Asphalts, Development in Petroleum Science*.
- Ullah & al. (2021). Characterization of physical & mechanical properties of asphalt concrete containing low- & high-density polyethylene waste as aggregates. *Construction and Building Materials*, 301, 124127. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124127>
- USIRF-Route de France. (2013). *Le bitume : histoire d'un matériau routier. Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française*.
- Vassaux, S. (2017). *Mouillabilité et miscibilité des bitumes : application au recyclage (Doctoral dissertation, Université Montpellier)*. Montpellier, (NNT : 2017MONT5008). (tel-01834590v2).
- Verhasselt. (1999). *The ageing of hydrocarbon binders and their simulation* (I. . Luxembourg., Ed.).
- Visintine & al. (2013). Effects of higher percentage of recycled asphalt pavement on pavement performance. *Road Materials and Pavement Design*, 14(2), 432–437.
- White. (2019). Evaluating recycled waste plastic modification and extension of bituminous binder for asphalt. *Proceedings 18th Annual International Conference on Pavement Engineering, Asphalt Technology and Infrastructure, Liverpool, United Kingdom*.
- Xiao & al. (2019). Performance grades, environmental and economic investigations of reclaimed asphalt pavement materials. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.126>
- Xinjun, L., Marasteanu, M., Williams, R., et Clyne, T. (2008). "Effect of RAP (Proportion and Type) and Binder Grade on the Properties of Asphalt Mixtures." *87th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C.* 92–97. <https://doi.org/https://doi.org/10.3141/2051-11>
- Xu, J., Hao, P., Zhang, D., & Yuan, G. (2018). Investigation of reclaimed asphalt pavement blending efficiency based on micro-mechanical properties of layered asphalt binders. *Construction and Building Materials*, 63, 390-401. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.030>
- Xu, S., Xu, B., Liulin, S., Cai, S., Tang, G., & Pan, S. (2024). Performance Evaluation of Multiple Aging-Regeneration of SBS-Modified Bitumen Regenerated by a Composite Rejuvenator. *Buildings*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/buildings14072185>
- Xu, Y., Chou, Z., Li, Y., Ji, J., & Xu, S. F. (2019). Effect of blending degree between virgin and aged binder on pavement performance of recycled asphalt mixture with high RAP content. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2019/5741642>
- Yin, P., & Pan, B. (2022). Effect of RAP content on fatigue performance of hot-mixed recycled asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 328, 127077. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127077>
- ZAUMANIS & al. (2014). *100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. Resources, Conservation and Recycling*. 92, 230–245.
- Zhou & al. (2019). Rutting and fatigue cracking performance of SBS-RAP blended binders with a rejuvenator. *Construction and Building Materials* 203 (2019), 294–303.
- Ziade Elio. (2023). *Université de Limoges ED 609-Sciences et Ingénierie des Matériaux, Mécanique, Énergétique (SIMME) GC2D-Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité*.

