

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Kasdi Merbah Ouargla
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
Département de Génie Civil et Hydraulique
THÈSE DE DOCTORAT



Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat LMD en Génie Civil

Option : Matériaux

Présenté par

MELIK Mohamed

Thème

Soutenue publiquement le 03/05/2025 à la salle de conférences devant le jury composé de :

**CONTRIBUTION A L'AMELIORATION DES BETONS
BITUMINEUX EN SABLE DE DUNES A BASE DE BITUME
MODIFIE AUX DECHETS DE CAOUTCHOUC**

CHAIB Hachem	MCA	UKM Ouargla	Président
KEBAILI Nabil	MCA	UKM Ouargla	Directeur de thèse
ABANI Said	MCA	UKM Ouargla	Co-encadreur
MEKHERMECHE Abdessalam	MCA	UKM Ouargla	Examineur
KAAB Mohamed Zohair	MCA	Université d'El oued	Examineur
MANI Mohamed	MCA	Université d'El oued	Directeur de thèse

Année universitaire : 2024 / 2025

Remerciements

Mes premiers remerciements, et sans doute les plus sincères, vont à mon directeur de thèse, le docteur Nabil KEBAIL, ainsi qu'à mon Co-encadrant, le docteur Said ABANI, pour leur soutien constant tout au long de mon travail. Leurs conseils et orientations ont grandement contribué à la réussite de cette thèse.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Abdelouahed KRIKER, doyen de la Faculté des Sciences Appliquées et Directeur du laboratoire de recherche EVRNZA, pour sa disponibilité et pour l'ensemble des essais et analyses réalisés au sein de son laboratoire. Je suis particulièrement reconnaissant envers le Professeur Mohamed Tahar BENTEBBA, mon premier directeur de thèse, qui m'a apporté une aide précieuse.

Je remercie chaleureusement l'ensemble du personnel du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS) à Ghardaïa, en particulier le docteur Mohamed BOUCHERBA, pour m'avoir facilité la réalisation d'une partie de mes recherches.

Un grand merci à mon ami FERJENI Nizar, directeur du Laboratoire de Travaux Publics NIZOLAB, ainsi qu'à tout le personnel de ce laboratoire pour leur soutien.

Je souhaite également remercier l'ensemble du personnel du Laboratoire et Bureau d'Études des Travaux Publics (LBTP) d'El-Oued pour leur aide précieuse, en particulier le Directeur du LBTP, monsieur REDOUANI Abdelazize.

Un grand merci à Monsieur SDIRA Abdelhamid, directeur du Laboratoire de Travaux Publics à El-Oued, ainsi qu'à tout le personnel de ce laboratoire pour leur soutien.

Enfin, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Monsieur Othmen BELGOT, Directeur de l'Institut National de la Formation Professionnelle d'El-Oued, ainsi qu'à tous mes collègues à l'institut pour leur soutien constant.

DÉDICACE

À ma mère FATMA

À mon père HASSAN

À ma FEMME MERIEM

À ma sœur CHAYMA

À mon fils ZINEDDINE

À mes filles MAYAR et RAHAË

À tous mes frères BRAHIM, ALI et KOUSSAY

À tous mes amis et collègues....

MELIK Mohamed

Abstract

The southern region of Algeria is renowned for its abundance of dune sand which covers a vast portion of its Saharan territory. This sand possesses properties that make it suitable for use in road construction particularly in the production of bituminous concrete. The primary objective of this study is to enhance the dune sand from the Ouargla region for use in semi-coarse bituminous concrete by improving it with two types of fines: limestone fillers and crushed dune sand. Additionally, an improved binder was produced using crumb rubber derived from used tires, which was incorporated into the bituminous concrete made with dune sand to compensate for the weaknesses associated with using this sand. The results showed that the use of 38% dune sand with 2% crushed dune sand along with the use of raw 40/50 bitumen modified with 12% crumb rubber, led to a significant improvement in the mechanical performance and resistance of the bituminous concrete to deformations under repeated loads.

Keywords: Dune sand, crumb rubber, bituminous concrete, rubber-bitumen, mechanical performance, water sensitivity, stiffness modulus.

ملخص

يشتهر الجنوب الجزائري بوفرة الكثبان الرملية التي تغطي جزء كبير من أراضيه والتي تجعلها تحديا كبيرا في استخدامه في مجال الطريق وخاصة في الخرسانة الأسفلتية. الهدف من هذه الدراسة هو تحسين الخرسانة الأسفلتية القائمة على الكثبان الرملية لمنطقة ورقلة وذلك باستخدام نوعين من الحشوات (مسحوق الحجر الجيري ومطحون رمال الكثبان) بنسب 2 و 4%. من جهة أخرى قمنا بتحسين أداء الرابط الأسفلتي باستخدام مطحون المطاط المتأتي من الإطارات المستعملة بنسب 4، 8، 12 و 16% واستخدمناه في تحسين أداء الخرسانة الأسفلتية القائمة على رمال الكثبان وذلك لتعويض الضعف الناتج عن استخدام رمل الكثبان. أظهرت النتائج أن استخدام 38% من رمل الكثبان مع 2% من مطحون رمل الكثبان وباستخدام الرزق الخام 50/40 المعدل بـ 12% مسحوق المطاط تحسن كبير في الأداء الميكانيكي ومقاومة الخرسانة الأسفلتية للتشوهات تحت تأثير الأحمال المتكررة والحرارة المرتفعة.

الكلمات المفتاحية: رمل الكثبان، مسحوق المطاط، الخرسانة الأسفلتية، الرزق المطاطي، الأداء الميكانيكي، حساسية الماء، معامل الصلابة.

Résumé

Au sud de l'Algérie une grande quantité de sable de dunes est rencontrée dans une vaste partie de la région saharienne. Le sable de duness présente des caractéristiques qui le rendent adaptable à l'utilisation dans les constructions routières, plus précisément dans le Béton Bitumineux. Cette étude a pour but, dans un premier temps, de promouvoir le sable de duness de la région d'Ouargla dans le BBSG, en l'améliorant à travers deux types de fines : les fillers de calcaire (FC) et le sable de duness broyé (SDB). Nous avons ensuite produit un liant amélioré avec de la poudrette de caoutchouc (PC) provenant de pneus usés, utilisé dans le béton bitumineux à base de sable de duness. Cela pour obtenir un enrobé compensant la faiblesse causée par ce sable. Les résultats montrent que l'utilisation de 38% de sable de duness, avec 2%

de sable de duness broyé et du bitume brut 40/50 modifié par 12% de poudre de caoutchouc, améliore significativement les performances mécaniques et la résistance du béton bitumineux aux déformations sous charges répétées.

Mots clés : Sable de dunes, poudrette caoutchouc, béton bitumineux, bitume-caoutchouc, performance mécanique, sensibilité à l'eau, module de rigidité.

SOMMAIRE

Remerciements-----	I
DÉDICACE -----	II
Abstract -----	III
SOMMAIRE -----	V
Liste des tableaux-----	X
Liste des Figures -----	XII
INTRODUCTION GENERALE-----	- 17 -
I. SABLE DE DUNES -----	- 21 -
Introduction-----	- 21 -
I.1. Définition -----	- 21 -
I.2. Forme-----	- 21 -
I.4. La porosité-----	- 23 -
I.5. Nature de sable de dunes -----	- 23 -
I.6. Couleur-----	- 25 -
I.7. Utilisation-----	- 26 -
I.8. Applications du Sable de dunes dans les Constructions Routières -----	- 26 -
I.9. Recherches Récentes sur l'utilisation de Sables de Dune dans béton bitumineux -----	- 28 -
Conclusion-----	- 39 -
Introduction-----	- 42 -
I.10. Définitions des matériaux bitumineux -----	- 42 -
I.11. Origine :-----	- 43 -
I.12. Constituent chimique et structure -----	- 44 -
I.12.1. Composition élémentaire-----	- 44 -
I.12.2. Fractions chimiques du bitume – SARA-----	- 44 -
I.12.2.2. Les maltènes-----	- 45 -
I.12.2.3. Les asphaltènes -----	- 45 -
I.12.3. Structure du bitume -----	- 47 -
I.13. Vitrification et cristallisation des bitumes -----	- 48 -
I.13.1. Vitrification-----	- 48 -
I.13.2. Cristallisation-----	- 48 -
I.14. Propriétés de bitume -----	- 48 -
I.14.1. Adhésivité -----	- 49 -
I.14.2. Cohésion -----	- 49 -
I.14.3. Viscoélasticité-----	- 49 -
I.14.4. Réactivité -----	- 50 -
I.15. Le vieillissement de bitume-----	- 50 -
I.15.1. Le vieillissement physique : -----	- 51 -

I.15.2. Le vieillissement chimique-----	- 52 -
I.16. Les essais -----	- 53 -
I.16.1. Les essais technologiques -----	- 53 -
I.16.1.1. Essai de pénétrabilité -----	- 54 -
I.16.1.2. Point de ramollissement (TBA) -----	- 54 -
I.16.1.4. Densité relative -----	- 56 -
I.16.1.5. Essai d'éclair appareil CLEVELAND à vase ouvert -----	- 56 -
I.16.1.7. Essai de ductilité-----	- 57 -
I.16.1.8. Résistance au durcissement RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) -----	- 57 -
I.16.1.9. L'essai PAV "Pressure Aging Vessel" -----	- 58 -
I.16.2. Propriétés rhéologiques-----	- 59 -
I.16.2.2. Viscosité des bitumes-----	- 60 -
I.16.2.3. Essai de fluage en flexion à basse température BBR « Bending Beam Rheometer » - -	- 61 -
I.16.2.4. Traction SHRP-----	- 61 -
I.16.2.5. Module complexe -----	- 62 -
Conclusion-----	- 64 -
II. Les Déchets De Caoutchouc Issus Des Pneus Usés-----	- 66 -
Introduction-----	- 66 -
II.1. Historiques sur le caoutchouc et les pneus -----	- 66 -
II.2. Constituants des pneus-----	- 67 -
II.2.1. Zone de sommet -----	- 67 -
II.2.2. Zone flanc-----	- 67 -
II.2.3. Zone basse-----	- 68 -
II.3. Compositions des pneus -----	- 68 -
II.3.1. Le caoutchouc naturel (NR) :-----	- 69 -
II.3.2. Le caoutchouc synthétique : -----	- 70 -
II.3.3. Les caoutchoucs à usages généraux :-----	- 71 -
II.3.3.1. Les caoutchoucs à usages spéciaux : -----	- 72 -
II.3.3.2. Les caoutchoucs à usages très spéciaux : -----	- 73 -
II.3.3.3. Les élastomères thermoplastiques TPE :-----	- 73 -
II.4. Gestion des déchets de pneus-----	- 73 -
II.4.1. Quantité de pneus usés-----	- 73 -
II.4.2. Effets des déchets de pneumatiques sur l'environnement -----	- 74 -
II.4.3. Modes de gestion des déchets de pneus-----	- 75 -
II.4.3.1. Catégories des pneus usagés-----	- 75 -
II.4.3.2. Les filières de valorisation des pneumatiques usagés-----	- 76 -
II.5. Valorisation des pneus usées dans la couche de roulement-----	- 79 -
II.5.1. Effet de la valorisation des pneus usés sur le liant bitumineux-----	- 80 -
II.5.3. Effet de la valorisation des pneus usés sur le béton bitumineux -----	- 94 -
Conclusion-----	- 106 -

III.	STRUCTURES ROUTIERS ET ENROBES BITUMINEUX -----	108 -
III.1.	STRUCTURES ROUTIÈRES-----	108 -
III.1.1.	Définition -----	108 -
III.1.2.	Couches de chaussée-----	108 -
III.1.2.1.	Couche de surface -----	108 -
III.1.2.2.	Couche d'assise-----	109 -
III.1.2.3.	Couche de forme-----	109 -
III.1.3.	Catégories de Structures des Chaussées -----	109 -
III.1.3.1.	Chaussées souples -----	109 -
III.1.3.2.	Chaussées bitumineuses épaisses -----	110 -
III.1.3.3.	Chaussées à assise traitée au liant hydraulique -----	110 -
III.1.3.4.	Chaussées à structure mixte-----	110 -
III.1.3.5.	Chaussées à structure inverse-----	111 -
III.1.3.6.	Chaussées en béton de ciment-----	111 -
III.2.	LES ENROBES BITUMINEUX -----	112 -
III.2.1.	Définition -----	112 -
III.2.2.	Les composants -----	112 -
III.2.2.1.	Les granulats -----	112 -
III.2.2.2.	Mastic bitumineux-----	114 -
III.2.2.2.1.	Définition d'un mastic bitumineux -----	114 -
III.2.2.2.2.	Les Fines « ou les fillers » -----	114 -
III.2.3.	Les différents types d'enrobés -----	115 -
III.2.3.1.	Les enrobés à froid « Cold Mix Asphalt »-----	115 -
III.2.3.2.	Les enrobés semi-tièdes « Half-Warm Mix Asphalt »-----	116 -
III.2.3.3.	Les enrobés tièdes « Warm Mix Asphalt »-----	116 -
III.2.3.4.	Les enrobés à chaud « Hot Mix Asphalt »-----	116 -
III.2.3.4.1.	Enrobés pour assise de chaussée -----	117 -
III.2.3.4.2.	Enrobés pour couche de liaison (B.B.L)-----	117 -
III.2.3.4.3.	Enrobé pour couche de roulement -----	118 -
III.2.4.	Formulation des enrobés -----	120 -
III.2.4.1.	Teneur en liant -----	120 -
III.2.4.2.	Compacité -----	122 -
III.2.4.3.	Méthode de Formulation -----	123 -
III.2.4.4.	Autre méthode de formulation -----	125 -
III.2.5.	Comportement des enrobés bitumineux-----	126 -
III.2.5.1.	Généralités-----	126 -
III.2.5.2.	Grandes classes de comportement -----	126 -
III.2.5.3.	Hypothèses -----	128 -
IV.	PRÉSENTATION DES MATÉRIAUX ET DES FORMULATIONS-----	131 -
	Introduction-----	131 -

IV.1. Matériaux utilisés-----	131 -
IV.1.1. Le bitume -----	131 -
IV.1.2. Les graviers-----	131 -
IV.1.3. Le sable -----	133 -
IV.1.4. Les fines-----	136 -
IV.1.4.1. Le filler de calcaire-----	137 -
IV.1.4.2. Les fines de sable de dunes -----	138 -
IV.1.5. Poudrette de caoutchouc-----	139 -
IV.2. Programme Expérimental -----	141 -
IV.2.1. Étude de formulation de béton bitumineux à base de sable de dunes -----	141 -
IV.2.2. Modification du bitume avec de la poudrette de caoutchouc -----	141 -
IV.2.3. Étude du béton bitumineux à base de sable de dunes et de bitume modifié avec de la poudrette de caoutchouc-----	142 -
IV.3. Formulations des enrobés -----	144 -
IV.3.1. Composition granulaire-----	144 -
IV.3.2. Teneur en liant -----	145 -
IV.3.2.1. Coefficient correcteur α -----	145 -
IV.3.2.2. Module de richesse K-----	146 -
IV.3.2.3. Surface spécifique de mélange Σ -----	146 -
IV.3.3. Essai Marshall-----	147 -
IV.4. Conclusion-----	148 -
V. INFLUENCE DES FINES SUR LE COMPORTEMENT DU BETON BITUMINEUX A BASE SABLE DE DUNES -----	150 -
Introduction-----	150 -
V.1. Essai à la Presse à cisaillement Giratoire (PCG) -----	150 -
V.2. Essai Marshall-----	155 -
V.3. Essai Duriez (Sensibilité à l'eau) -----	158 -
V.4. Résistance à l'orniérage -----	161 -
V.5. Essai module de rigidité-----	164 -
Conclusion-----	168 -
VI. INFLUENCE DE CAOUTCHOUC SUR LE COMPORTEMENT DE BITUME ET DE BETON BITUMINEUX A BASE SABLE DE DUNES-----	170 -
Introduction-----	170 -
VI.1. Fabrication de bitume modifié par le caoutchouc -----	170 -
VI.1.1. Paramètres de malaxage -----	170 -
VI.1.2. Matériels utilisés (Figure VII.1)-----	170 -
VI.1.3. Démarche de modification -----	172 -
VI.3. Influence de poudrette de caoutchouc sur le comportement de bitume -----	174 -
VI.3.1. Pénétrabilité -----	174 -
VI.3.2. Point de ramollissement -----	175 -

VI.4. Influence de poudrette de caoutchouc sur le comportement de béton bitumineux à base sable de dunes -	176 -
VI.4.1. Essai à la Presse à cisaillement Giratoire (PCG) -----	176 -
VI.4.2. Essai Marshall-----	179 -
VI.4.4. Essai Duriez (Sensibilité à l'eau) -----	184 -
VI.4.6. Résistance à l'orniérage -----	186 -
VI.4.7. Essai module de rigidité -----	189 -
Conclusion-----	194 -
CONCLUSION GENERALE -----	196 -
Perspectives-----	200 -
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES -----	A

Liste des tableaux

Tableau I. 1. Tableau résultats de l'analyse quantitative XRF -----	25 -
Tableau I. 2. Résultats obtenus sur la RN 3 Stil- El Oued -----	27 -
Tableau I. 3. Formulations de planche d'essai étudier par DTP et CTP -----	28 -
Tableau I. 4. Résultats de planche d'essai étudier par DTP et CTP -----	28 -
Tableau I. 5. Formulations testées par Siala et al. -----	28 -
Tableau I. 6. Composition des mélanges bitumineux -----	31 -
Tableau I. 7. Enrobé bitumineux avec différents pourcentages de sable de dunes -----	33 -
Tableau I. 8. Influence de l'ajout de sable de dunes sur le Fluage et la stabilité -----	33 -
Tableau I. 9. Résultats de l'essai Duriez -----	33 -
Tableau I. 10. Variation des stabilités Marshall -----	34 -
Tableau I. 11. Composition des mélanges -----	35 -
Tableau I. 12. Pourcentages des vides à 80 girations -----	36 -
Tableau I. 13. Résultats de l'essai PCG -----	38 -
Tableau I. 14. Résultats de l'essai Duriez -----	38 -
Tableau I. 15. Résultats de l'essai de module -----	39 -
Tableau III. 1. Composition du caoutchouc naturel -----	70 -
Tableau III. 2. Classification des déchets pneumatiques en Europe -----	77 -
Tableau III. 3. Propriétés des mélanges bitumineux -----	100 -
Tableau IV. 1. Classification suivant la granularité -----	113 -
Tableau V. 1. Caractéristiques de bitume -----	131 -
Tableau V. 2. Composition élémentaire de gravier -----	132 -
Tableau V. 3. Composition élémentaire de sable de dunes -----	134 -
Tableau V. 4. Caractéristiques des agrégats -----	135 -
Tableau V. 5. Analyse chimique des fines -----	139 -
Tableau V. 6. Caractéristiques physiques des fines -----	139 -
Tableau V. 7. Caractéristiques de la poudrette de caoutchouc utilisée -----	139 -
Tableau V. 8. Composition chimique de la poudrette de caoutchouc utilisée -----	139 -
Tableau V. 9. Coefficient correcteur des mélanges étudiées -----	146 -
Tableau V. 10. Surfaces spécifiques des mélanges étudiées -----	146 -
Tableau V. 11. Teneurs en liant pour différentes valeurs du module de richesse -----	147 -
Tableau V. 12. Evolution de résultats de l'essai Marshall avec le teneur de filler de -----	147 -

Tableau V. 13. Evolution de résultats de l'essai Marshall avec le teneur de sable-----	147 -
Tableau VI. 1. Indice de vide en fonction de nombre de giration -----	152 -
Tableau VI. 2. Profondeurs d'orniérage en % -----	162 -
Tableau VI. 3. Modules de rigidité moyenne à 15, 20 et 30°C -----	167 -
Tableau VII. 1. Indice de vide en fonction de nombre de giration -----	177 -
Tableau VII. 2. Profondeurs d'orniérage en % des enrobés modifiées -----	186 -
Tableau VI. 4. Modules de rigidité moyenne à 15, 20 et 30°C pour les enrobés -----	193 -

Liste des Figures

Figure I. 1. Structure Photos prises au Microscope Electronique à Balayage MEB (x300) -----	- 22 -
Figure I. 2. Trois configurations d'arrangement pour des sphères de taille uniforme -----	- 23 -
Figure I. 3. Modelés XRD du sable des dunes de Ouargla -----	- 24 -
Figure I. 4. Couleur de sable de dunes. Les échantillons opaques noirs, gris et laiteux sont-----	- 25 -
Figure I. 5. Evolution de Fluage et stabilité Marshall avec l'ajout de Sable de dunes-----	- 29 -
Figure I. 6. Résultats de l'essai Duriez-----	- 30 -
Figure I. 7. Influence de sable de dunes sur les caractéristiques mécanique de béton -----	- 30 -
Figure I. 8. Évolution du coefficient de friction pour différents taux de sable de duness -----	- 31 -
Figure I. 9. Variation des caractéristiques des bétons bitumineux avec ajout de Fraisât -----	- 32 -
Figure I. 10. Evolution des performances mécaniques en fonction du taux de chaux-----	- 32 -
Figure I. 11. Variation du fluage en fonction de la teneur en bitume-----	- 34 -
Figure I. 12. Résistance à la compression avant et après immersion -----	- 35 -
Figure I. 13. Distribution granulaire des mélanges -----	- 36 -
Figure I. 14. Evaluation de pourcentage des vides en fonction de nombres de girations -----	- 37 -
Figure I. 15. Profondeurs d'orniérage selon le nombre de cycles-----	- 37 -
Figure I. 16. Composition minérale de mélange et leur courbe granulométrique-----	- 38 -
Figure I. 17. Pourcentage d'orniérage en fonction du nombre de cycles-----	- 39 -
Figure II. 1. Schéma de séparation chimique des constituants du bitume SARA -----	- 44 -
Figure II. 2. Les compositions chimiques de bitume SARA -----	- 46 -
Figure II. 3. Exemple de composition d'un bitume -----	- 46 -
Figure II. 4. Représentation schématique de la structure de bitume -----	- 47 -
Figure II. 5. Comportement des bitumes en fonction de $ \varepsilon $ et T-----	- 50 -
Figure II. 6. Evolution de la viscosité et de la composition chimique du bitume au cours de son --	- 51 -
Figure II. 7. Schéma d'essai pénétrabilité -----	- 54 -
Figure II. 8. Schéma du test Température Billa Anneau (TBA)-----	- 55 -
Figure II. 9. Schéma d'essai de fragilité FRAASS -----	- 56 -
Figure II. 10. Moule pour l'échantillon destiné à l'essai de ductilité-----	- 57 -
Figure II. 11. Schéma de principe d'essai RTFOT -----	- 58 -
Figure II. 12. Processus & Equipements pour l'essai PAV -----	- 58 -
Figure II. 13. Schémas d'essais rhéologiques -----	- 59 -
Figure II. 14. Viscosité dynamique -----	- 60 -
Figure II. 15. Comportement de bitume en fonction du taux de cisaillement -----	- 60 -
Figure II. 16. Schéma de principe d'un essai BBR mesurant le fluage par flexion sur -----	- 61 -
Figure II. 17. Forme des éprouvettes de traction pour tests à haute (gauche) et basse-----	- 62 -
Figure II. 18. Essai de traction compression sur cylindre de bitume -----	- 63 -
Figure II. 19. Schéma de principe du DSR -----	- 63 -
Figure III. 1. Les composants d'un pneu pneumatique de voiture-----	- 67 -

Figure III. 2. Composition typique d'un pneu de véhicule -----	69 -
Figure III. 3. Structure du caoutchouc naturel -----	70 -
Figure III. 4. Structure du polyisoprène synthétique -----	71 -
Figure III. 5. Incendie de milliers de pneus usagés à Beauceville -----	75 -
Figure III. 6. Formes de déchets pneumatiques (a) avant classification ; (b) particules de -----	77 -
Figure III. 7. Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail (à gauche) [83] ; Ouvrage de-----	79 -
Figure III. 8. CR produit par broyage à température ambiante (à gauche) et par broyage -----	81 -
Figure III. 9. Effet de la vitesse de cisaillement sur la performance de base -----	82 -
Figure III. 10. Effet de la température de cisaillement sur la performance de base -----	82 -
Figure III. 11. Effet de temps de cisaillement sur la performance de base -----	83 -
Figure III. 12. Effet de temps de développement sur la performance de base-----	84 -
Figure III. 13. Essai de pénétration avec différentes quantités de poudrette caoutchouc-----	84 -
Figure III. 14. Essai de TBA avec différentes quantités de poudrette caoutchouc -----	85 -
Figure III. 15. Courbe granulométrique des poudrettes de caoutchouc étudié par -----	85 -
Figure III. 16. Effet des poudrette F et G sur la pénétrabilité des bitumes -----	86 -
Figure III. 17. Effet des poudrette F et G sur le point de ramollissement des bitumes -----	86 -
Figure III. 18. Viscosité des bitumes et des bitumes modifiés au caoutchouc -----	87 -
Figure III. 19. Rigidité en flexion (a) bitume A ; (b) bitume B-----	87 -
Figure III. 20. Point de ramollissement du bitume avant et après modification -----	88 -
Figure III. 21. Pénétration du bitume avant et après modification -----	88 -
Figure III. 22. Les valeurs de rigidité en flexion du bitume avant et après -----	89 -
Figure III. 23. Effet de température sur la pénétrabilité el la ductilité de bitume-----	90 -
Figure III. 24. Effet de température sur la TBA el la récupération élastique de bitume -----	90 -
Figure III. 25. Effet de taux de caoutchouc sur la pénétrabilité el la ductilité de bitume-----	91 -
Figure III. 26. Effet de taux de caoutchouc sur la TBA el la récupération élastique de -----	91 -
Figure III. 27. Les courbes maîtresses du module complexe et de l'angle de phase pour -----	93 -
Figure III. 28. Masse volumique apparente par la méthode SSD en fonction du contenu en-----	94 -
Figure III. 29. Vides d'air en fonction du contenu en bitume -----	95 -
Figure III. 30. Résistance à la traction indirecte (ITS) avec différentes tailles de -----	96 -
Figure III. 31. Vides d'air en fonction du contenu en bitume-----	97 -
Figure III. 32. Résistance à la traction indirecte (ITS) avec différentes tailles de caoutchouc -----	98 -
Figure III. 33. L'effet de la taille des (CR) sur le rapport de résistance à la traction-----	98 -
Figure III. 34. Résultats de l'essai Marshall en fonction de teneur en caoutchouc -----	99 -
Figure III. 35. Résultats de l'essai Marshall ; Stabilité (à gauche) ; Fluage (à droite)-----	101 -
Figure III. 36. L'effet du PC sur la sensibilité à l'eau-----	101 -
Figure III. 37. Comportement de la Déformation Permanente des Mélanges à 40 °C -----	102 -
Figure III. 38. Comportement de la Déformation Permanente des Mélanges à 50 °C -----	102 -
Figure III. 39. Résultats de l'essai Marshall ; (a) Stabilité, (b) Fluage et (c) vides d'air -----	103 -
Figure III. 40. Relation entre la profondeur d'orniérage et les teneurs en PEHD et en CR -----	104 -
Figure III. 41. Effet de caoutchouc broyé sur la stabilité Marshall -----	104 -

Figure III. 42. Effet de pourcentage de caoutchouc sur la résistance à l'orniérage -----	105 -
Figure III. 43. Effet de l'ajout de CR sur la résistance à l'orniérage des chaussées-----	105 -
Figure III. 44. Résultat du l'essai de sensibilité à l'eau -----	105 -
Figure III. 45. Effet de pourcentage de CR sur module de rigidité -----	106 -
Figure IV. 1. Structure de chaussée-----	108 -
Figure IV. 2. Structure de chaussée souple -----	109 -
Figure IV. 3. Structure de chaussée bitumineuse épaisse -----	110 -
Figure IV. 4. Structure de Chaussées à assise traitée au liant hydraulique -----	110 -
Figure IV. 5. Structure de Chaussées à structure mixte-----	110 -
Figure IV. 6. Structure de Chaussées à structure inverse-----	111 -
Figure IV. 7. Structure de Chaussées en béton de ciment -----	111 -
Figure IV. 8. Température de fabrication des enrobés en fonction de l'énergie de -----	115 -
Figure IV. 9. Différence entre MVA et MVR-----	122 -
Figure IV. 10. Formulation 04 niveau-----	124 -
Figure IV. 11. Comportement “type” des bétons bitumineux -----	127 -
Figure V. 1. Fractions granulaire 8/15 et 3/8 utilisées -----	132 -
Figure V. 2. Spectre EDS de gravier montrant les pics caractéristiques des éléments-----	132 -
Figure V. 3. Sable de dunes utilisé-----	133 -
Figure V. 4. Spectre EDS de sable de dunes montrant les pics caractéristiques des éléments -----	134 -
Figure V. 5. Courbes granulométriques des agrégats utilisées -----	136 -
Figure V. 6. Les fines utilisées ; A) Filler de calcaire, B) Sable de dunes broyé -----	136 -
Figure V. 7. Observation de filler de calcaire par microscope-----	137 -
Figure V. 8. Images MEB de filler de calcaire montrant la morphologie de la surface à une -----	137 -
Figure V. 9. Observation de sable de dunes broyé par microscope -----	138 -
Figure V. 10. Images MEB de sable de dunes broyé montrant la morphologie de la surface à -----	138 -
Figure V. 11. Poudrette de caoutchouc utilisée -----	139 -
Figure V. 12. Courbe granulométrique de poudrette de caoutchouc-----	140 -
Figure V. 13. Programme expérimental de l'étude -----	143 -
Figure V. 14. Compositions granulaire désignées -----	144 -
Figure V. 15. Courbes granulométriques des mélanges et fuseau de référence de BBSG 0/14 -----	145 -
Figure VI. 1. Eprouvette soumise au compactage par l'appareil PCG -----	151 -
Figure VI. 2. Évolution des indices de vide en fonction de nombre de giration -----	153 -
Figure VI. 3. Indice de vide à 10, 80 et 200 girations-----	154 -
Figure VI. 4. Indice des vides en fonction de teneur des fines-----	155 -
Figure VI. 5. Compacité Marshall en fonction de teneur des fines -----	156 -
Figure VI. 6. Eprouvette soumise à l'essai Marshall -----	156 -
Figure VI. 7. Stabilité Marshall en fonction de teneur des fines -----	157 -
Figure VI. 8. Fluage en fonction de teneur des fines -----	157 -
Figure VI. 9. Quotient Marshall en fonction de teneur des fines-----	158 -
Figure VI. 10. Résultats de l'essai Duriez -----	159 -

Figure VI. 11. Compacité Duriez et masse volumique des formulations étudiées-----	160 -
Figure VI. 12. Compacteur pour préparation des éprouvettes de l'essai d'orniérage -----	161 -
Figure VI. 13. Ornièreur LCPC -----	162 -
Figure VI. 14. Profondeur d'orniérage en fonction du nombre de cycles -----	162 -
Figure VI. 15. Epreuve soumise à l'essai d'orniérage -----	163 -
Figure VI. 16. Profondeur d'orniérage dans 1000,3000, 10000 et 30000 cycles -----	164 -
Figure VI. 17. Module de rigidité à 15°C -----	165 -
Figure VI. 18. Module de rigidité à 20°C -----	166 -
Figure VI. 19. Module de rigidité à 30°C -----	167 -
Figure VII. 1. Matériels utilisés pour la production de bitume caoutchouté-----	171 -
Figure VII. 2. Contrôle de température de mélange-----	172 -
Figure VII. 3. Malaxage de bitume caoutchouc-----	173 -
Figure VII. 4. Influence de pourcentage caoutchouc sur la pénétrabilité de liant -----	174 -
Figure VII. 5. Influence de pourcentage en caoutchouc sur la pénétrabilité de liant-----	175 -
Figure VII. 6. Epreuve compacté avec appareil PCG-----	176 -
Figure VII. 7. Évolution des indices de vide en fonction de nombre de giration -----	178 -
Figure VII. 8. Indice de vide à 10, 80 et 200 girations -----	178 -
Figure VII. 9. Epreuves Marshall-----	179 -
Figure VII. 10. Evolution de l'indice de vide en fonction de teneur en PC -----	180 -
Figure VII. 11. Compacité Marshall en fonction de teneur en PC -----	180 -
Figure VII. 12. Evolution de Stabilité Marshall en fonction de teneur en PC -----	181 -
Figure VII. 13. Fluage en fonction de teneur en PC -----	182 -
Figure VII. 14. Résultats de l'essai Duriez des enrobés modifiées -----	185 -
Figure VII. 15. Profondeur d'orniérage en fonction du nombre de cycles des enrobés modifiées -	186 -
Figure VII. 16. Profondeur d'orniérage des BB modifiées dans 1000,3000, 10000, 30000 et ----	187 -
Figure VII. 17. Epreuve soumise à l'essai de Module -----	189 -
Figure VII. 18. Module de rigidité des enrobés modifiées à 15°C -----	190 -
Figure VII. 19. Module de rigidité des enrobés modifiées à 20°C -----	191 -
Figure VII. 20. Module de rigidité des enrobés modifiées à 30°C -----	192 -

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

La disponibilité de sable est une question cruciale à l'échelle mondiale en raison de son rôle indispensable dans des variétés industries notamment la construction. Face à une utilisation croissante et à une exploitation non raisonnable les approvisionnements en sable de haute qualité diminuent provoquant des impacts environnementaux dangereuses tels que l'érosion des rivières et la destruction des habitats aquatiques. En Algérie le sable est abondamment disponible dans les régions sahariennes où les dunes couvrent des vastes surfaces. L'exploitation de ces dunes offre une opportunité significative pour répondre à la demande croissante. La valorisation du sable de dunes présente nombreux avantages dans les infrastructures routières. Le sable de dunes simplement accessible dans de plusieurs régions désertiques minimise les coûts de transport et d'exploitation comparé au sable de carrière ou de rivière. Lorsqu'il est correctement mélangé et traité avec d'autres matériaux le sable de dunes peut améliorer les propriétés mécaniques des routes. Les caractéristiques du sable de dunes peuvent également améliorer flexibilité et l'adhérence la du béton bitumineux. En outre, les coûts de transport du gravier une composante clé du béton bitumineux peuvent être réduits en utilisant du sable de dunes localement disponible diminuant ainsi les dépenses totales liées aux matériaux.

La valorisation du sable de dunes représente une occasion stratégique pour l'Algérie au régions désertiques. Elle permet de répondre à la demande croissante de matériaux de construction tout en promouvant des pratiques de construction routière économiquement et durables. Cependant ce matériau comporte également certaines faiblesses. Le sable de dunes caractérisé par des grains lisses et ronds peut réduire la cohésion et l'adhérence dans le mélange de béton bitumineux ce qui peut entraîner une diminution de la résistance mécanique et une susceptibilité accrue à l'usure et à la déformation permanente sous des charges de trafic élevées. Ces caractéristiques peuvent limiter les performances et la durabilité des routes construites à base de sable de dunes.

Pour corriger la faiblesse causée par le sable de dunes l'incorporation de poudrette de caoutchouc provenant de pneus usés s'avère être une solution prometteuse. Les pneus usés représentent un défi environnemental majeur à l'échelle mondiale. Chaque année, des millions de tonnes de pneus usés sont générés posant des problèmes de stockage de gestion des déchets et de pollution. Leur accumulation dans les décharges peut entraîner des risques d'incendie des nuisances visuelles et des habitats pour les vecteurs de maladies. En Algérie, la situation est similaire avec une quantité considérable de pneus usés produits annuellement accentuant les enjeux de gestion durable de ces déchets.

L'incorporation l'issu de broyage des pneus usées en particulier dans le domaine d'infrastructures routières offre des nombreuses avantages techniques, économiques et environnementaux. L'intégration de cette poudrette dans la construction des routes permet de recycler ces matériaux tout en améliorant la performance des enrobés bitumineux. En utilisant les pneus usés on diminue significativement le volume de déchets qui seraient envoyés en décharge contribuant ainsi à une gestion plus durable des déchets. La substitution de matériaux traditionnels par des pneus usés permet de conserver des ressources naturelles précieuses.

Les substances provenues de pneus usés comme le caoutchouc broyé peuvent améliorer les propriétés mécaniques des enrobés surtout leur résistance à la fissuration à la déformation permanente et leur durabilité. L'utilisation des pneus usés dans la couche de roulement en particulier en béton bitumineux présente des avantages spécifiques pour la construction de routes durables et résistantes. Le béton bitumineux amélioré avec du caoutchouc de pneus usés offre une meilleure résistance à l'usure aux intempéries et aux déformations prolongeant ainsi la durée de vie des routes. Les propriétés améliorées du béton bitumineux qui contient du caoutchouc savent à réduire les coûts de maintenance à long terme en diminuant la fréquence et l'ampleur des réparations nécessaires. De plus l'incorporation de caoutchouc de pneus usés améliore la flexibilité et l'adhérence du béton bitumineux offrant une meilleure performance sous des conditions de trafic variées et intense. En intégrant ce matériau on peut renforcer la cohésion et l'adhérence des particules de sable de dunes ce qui améliore la performance du mélange.

En résumé, bien que le béton bitumineux à base de sable de dunes présente des défis en termes de performance mécanique ces faiblesses peuvent être corrigées par l'utilisation de poudrette de caoutchouc provenant de pneus usés. Cette approche non seulement améliore les caractéristiques techniques des infrastructures routières mais favorise également des pratiques de construction plus durables et écologiquement responsables.

Dans le but de structurer de manière logique et progressive l'ensemble de cette recherche, la thèse a été divisée en deux parties complémentaires. La partie théorique comporte quatre chapitres. Le premier est consacré à l'étude du sable de dunes, en abordant ses caractéristiques, son origine et ses potentialités dans les matériaux de construction. Le deuxième chapitre traite du bitume, en détaillant ses propriétés, ses performances et son rôle fondamental dans les enrobés bitumineux. Le troisième chapitre porte sur les déchets de caoutchouc issus des pneus usés, en mettant en lumière les enjeux liés à leur gestion et les possibilités de leur valorisation. Enfin, le quatrième chapitre est dédié aux structures routières et enrobés bitumineux, avec une analyse des différentes couches de chaussées, des types d'enrobés et des exigences techniques.

La partie expérimentale, quant à elle, comprend trois chapitres. Le premier chapitre présente les matériaux utilisés et les formulations développées dans le cadre de cette étude. Le deuxième chapitre examine l'influence des fines (notamment les fines calcaires et le sable de dunes broyé) sur le comportement du béton bitumineux à base de sable de dunes. Enfin, le troisième chapitre analyse l'effet de l'ajout de caoutchouc sur le comportement du bitume ainsi que sur les performances du béton bitumineux élaboré à partir de sable de dunes.

CHAPITRE I :

Les dunes et les sables de dune

I. SABLE DE DUNES

Introduction

Le sable de dunes est largement disponible dans les régions désertiques dans le monde. Cette abondance en fait une ressource accessible pour diverses utilisations. Plusieurs recherches se concentrent sur l'optimisation de l'utilisation du sable de dunes dans des enrobés bitumineux y compris le béton bitumineux semi grenue. Ces études cherchent d'améliorer la durabilité, la résistance, et la rentabilité des matériaux de construction en utilisant du sable de dunes contribuant ainsi à des solutions de construction plus économiquement et durables particulièrement dans les régions désertiques.

Ce chapitre explore en profondeur les caractéristiques de sable de dunes. Il aborde également les particularités du sable de dunes en mettant l'accent sur sa forme, sa porosité et sa nature ainsi que ses diverses utilisations notamment dans le domaine de la construction. Les applications spécifiques du sable de dunes sans les constructions routières sont également examinées soulignant son importance. Enfin une attention particulière est portée sur les recherches récentes concernant l'utilisation du sable de dunes dans le béton bitumineux reflétant l'évolution des pratiques et des connaissances dans ce domaine.

I.1. Définition

Les sables de dune sont généralement presque sphériques et bien arrondis, parce que l'action du vent transporte sélectivement les grains plus sphériques et arrondis et le terme « graine de millet » a été largement utilisé pour décrire ces grains [1]. Les sables de dune sont généralement à grain fin et moyennement bien triés. Il ne couvre qu'environ 20% des surfaces désertiques, la plupart dans de vastes nappes de sable et des mers de sable. En Afrique du Nord, ces mers de sable sont appelées ergs [2].

I.2. Forme

Les premiers chercheurs aient suggéré que les sables de dune étaient de forme arrondie ou bien arrondie mais des études plus récentes indiquent que dans les sables la véritable rondeur dans de taille dominant de 125-250 μm est rare et la plupart des grains sont de forme subangulaire à subarrondie. Les surfaces des grains de sable du désert peuvent avoir des caractéristiques distinctives lorsqu'elles sont observées à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Certaines de ces caractéristiques sont : (1) l'arrondi des bords sur toutes les formes de grains, (2) les « plaques retournées » résultant de la rupture du quartz le long des plans de clivage dans le réseau cristallin, (3) les dépressions allongées résultant de fractures conchoïdales lors de collisions entre les grains

; (4) surfaces lisses résultant de la dissolution et de la re-précipitation de silice, et (5) fractures arquées, circulaires ou polygonales résultant de collisions et/ou d'altération [3].

L'analyse de Zouaouid et Gheriani montre que la taille des granules des sables de dune d'Ouargla est supérieure à celle des dunes d'Adrar. Les mesures par granulométrie de type Laser scattering (LA-980 HORIBA) donnent les valeurs (58,953-777,141 μ m) avec une valeur moyenne de 213,386 μ m pour le sable d'Ouargla et (74,219-198,531 μ m) avec une valeur moyenne de 132,684 μ m pour le sable de dunes d'Ouargla. Comme montre la Figure I.1 les granules de sable de l'Adrar sont arrondis et de sphéricité moyenne, et subangulaires et de faible sphéricité dans la région de Ouargla. L'espace entre les granules ou la porosité dans les sables de dune d'Ouargla est supérieur à celui d'Adrar. Des études antérieures ont montré que la forme sphérique des granules augmente avec l'augmentation de la distance de transfert des sédiments de leur source d'origine aux sites de sédimentation. Il a également été observé que les sédiments éoliens étaient plus sphériques que les sédiments hydriques [4].

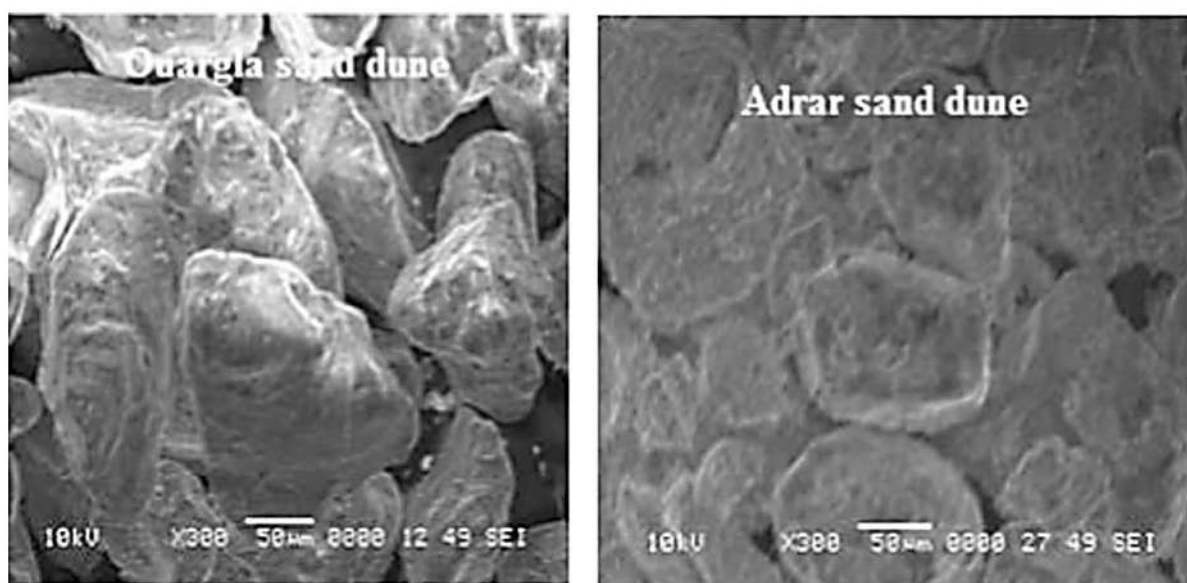


Figure I. 1. Structure Photos prises au Microscope Electronique à Balayage MEB (x300) ; (a) sable de duness d'Ouargla (b) sable de duness d'Adrar [4]

I.4. La porosité

Les sols sableux se caractérisent par une porosité naturellement élevée, ce qui favorise une évacuation rapide de l'eau après une pluie, en raison des larges espaces entre les particules et de la faible capacité du sable à retenir l'humidité [5]. Cette porosité peut atteindre jusqu'à 45 % dans le cas de sables dunaires bien triés et de taille moyenne, selon la forme des grains et leur agencement. En particulier, les grains sphériques peuvent adopter différents modes de disposition qui influencent fortement la porosité globale. Un agencement en empilement cubique, où les grains sont rangés de manière régulière, génère une porosité maximale avoisinant les 48 %, tandis qu'un empilement en configuration rhomboédrique, plus compact, réduit cette porosité à un minimum d'environ 26 % [1]. Cette porosité élevée influence directement le comportement des bétons bitumineux élaborés avec ces sables, notamment en termes d'adhérence entre le liant bitumineux et les granulats. Elle peut également affecter la compacité finale de l'enrobé et sa résistance à la pénétration d'eau, durabilité et la performance mécanique des revêtements routiers. [6], [7]

I.5. Nature de sable de dunes

Le minéral dominant que l'on trouve dans le sable des dunes est le quartz. Cependant, dans certaines dunes, des fragments volcaniques ou des grains de carbonate de calcium, de gypse ou de feldspath dominant ou forment une grande partie des grains [2]. La Figure I.2 illustre les motifs DRX d'un échantillon naturel de sable des dunes d'Ouargla dans la plage 2θ [10° - 90°]. De forts pics de diffraction ont pu être observés, indiquant que le sable des dunes d'Ouargla a une nature hautement cristalline.

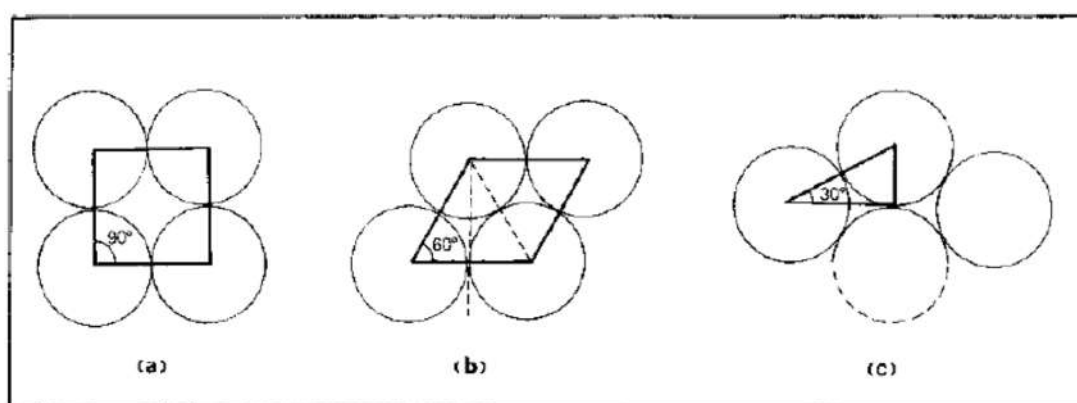


Figure I. 2. Trois configurations d'arrangement pour des sphères de taille uniforme : (a) configuration d'arrangement cubique ; (b) arrangement de tassement orthorhombique, et (c) arrangement de tassement rhombique incliné qui crée une pente de surface de 30° [1]

Plusieurs études ont été montrées que le sable des dunes de Ouargla, à l'état naturel, est constitué de deux compositions cristallographiques dominantes, le α -quartz (SiO_2) et le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),

et de faibles concentrations de compositions non cristallines comme la kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) et hématite (Fe_2O_3), en plus de quelques traces de compositions organiques [4], [8], [9], [10].

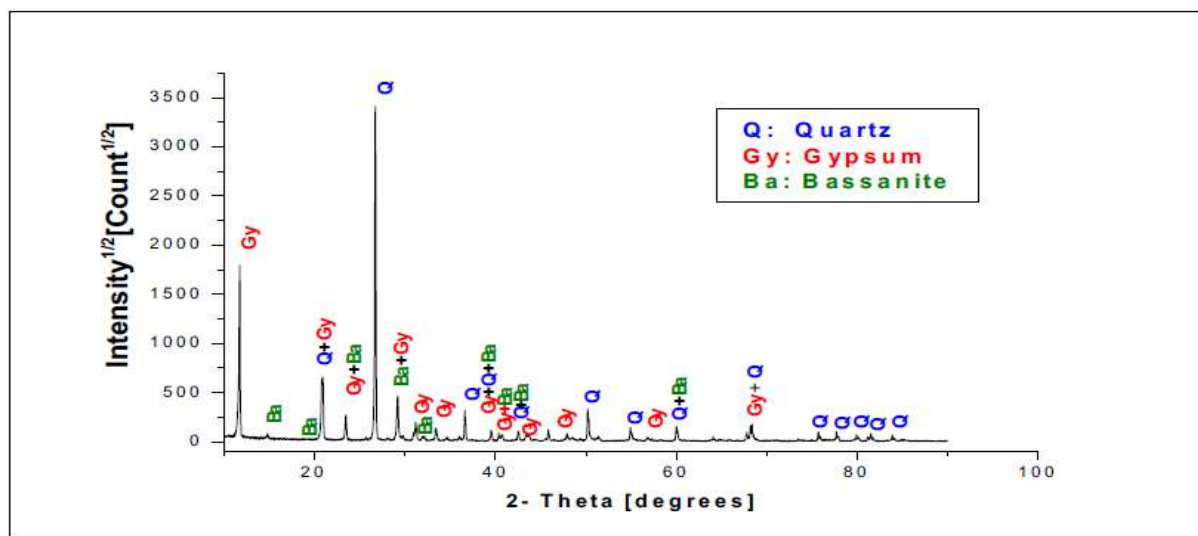


Figure I. 3. Model s XRD du sable des dunes de Ouargla [11]

Beddiaf et al ont montré que l'analyse des spectres DRX a montré que la concentration de quartz était inégale dans les différentes fractions granulaires de sable. Le sable très fin (0,063-0,100 mm) possédait la concentration de quartz la plus élevée de 82,05 %, tandis que la valeur la plus faible de 18,02 % a été trouvée dans le sable très grossier (1-2 mm) Figure I.3. Ces résultats ont été corroborés par la spectroscopie FTIR, où la bande d'absorption du quartz dans l'échantillon de sable très fin était la plus intense. La taille des cristallites de sable de duness de la région d'Ouargla est comprise entre 80,98 et 181,98 nm. Des particules nanométriques, inférieures à 100 nm, ont été trouvées dans le type sable fin, avec un grand intérêt pour les industries nanométriques. Les résultats de Beddiaf et al d'analyse quantitative XRF des échantillons triés chromatiquement sont résumés dans le tableau I.1 [8].

Tableau I. 1. Tableau résultats de l'analyse quantitative XRF [8]

Oxides	Opaque samples					Transparent samples		
	Black	Gray	Milky	White	Red	Yellow	Orange	Red
SiO ₂	5.91	4.53	3.83	19.41	34.38	93.49	92.07	92.12
CaO	55.52	56.21	56.98	38.55	32.82	4.06	3.22	3.88
Fe ₂ O ₃	0.33	0.09	nd	0.57	1.06	4.96	5.20	5.34
Al ₂ O ₃	nd	nd	nd	0.03	0.24	nd	nd	nd
SO ₃	0.58	0.65	0.50	1.65	0.38	nd	nd	nd
Na ₂ O	1.15	1.15	1.17	0.89	0.77	0.32	0.31	0.33
MgO	1.26	1.57	1.55	5.91	0.36	nd	nd	nd

I.6. Couleur

Les couleurs de sable de dunes varient considérablement d'une mer de sable à l'autre et même au sein d'une même mer de sable. Certains sables les plus foncés et les plus rouges se trouvent dans les déserts du Kalahari et de Simpson-Strzelecki où les couleurs du sable vont du rouge au rouge jaunâtre. Des couleurs relativement pâles sont associées aux dunes dans certains déserts côtiers et d'Amérique du Nord sont composés de sable de couleur relativement pâle. Sable du nord-ouest du Sahara Libye, le centre de la mer de sable du Namib et de l'Arabie est de couleur intermédiaire avec des couleurs jaune rougeâtre à rouge jaunâtre [3]. De même, les grains de même sable de dunes ont des couleurs différents, la Figure I.4. présente les couleurs d'un même sable de dunes, Mahdadi et al. ont trié chromatiquement manuel à l'aide d'une loupe et d'une pince à épiler pointue un échantillon du sable d'Ouargla tamisé par un tamis de 0,315 mm. Cet échantillon a été trié, selon ses couleurs dominantes, en huit échantillons : grains transparents (rouge, orange et jaune) et grains opaques (blanc, laiteux, gris, noir et rouge) [10].



Figure I. 4. Couleur de sable de dunes. [10]

I.7. Utilisation

Le sable est extrait des systèmes dunaires à plusieurs usages différents. Les sables des dunes qui se composent de silice de haute pureté sont exploités pour la fabrication de verre et de céramique. Les sables siliceux de moindre qualité peuvent également être utiles comme sables verriers après enrichissement, mais sont plus largement utilisés à des fins de construction et comme sables de fonderie. Certains sables dunaires constituent également des ressources importantes de feldspath et de minéraux lourds [1]. Le sable de dunes est largement utilisé en fonderie pour la fabrication de moules, aussi dans l'industrie du verre, la production de fibres de verre, la fracturation hydraulique, le sablage, la filtration d'eau et la fabrication d'alliages [12]. L'utilisation des sables de dune en techniques routières n'est pas une nouveauté. De nombreuses études et réalisations ont été effectuées. Cependant, les sables de dune présentent des particularités qui nécessitent des études spécifiques, car les directives et recommandations générales ne s'appliquent pas toujours. Bien que le sable de dunes soit facile à manipuler pour le reprofilage son utilisation seule n'est généralement pas envisageable en raison de l'incertitude de sa stabilité de surface ce qui peut augmenter la résistance au roulement et parfois entraîner des enlissements. Néanmoins, il peut être envisagé de le mélanger avec d'autres matériaux pour améliorer ses propriétés [13].

I.8. Applications du Sable de dunes dans les Constructions Routières

La rareté des matériaux de construction dans les régions du sud de l'Algérie a conduit les ingénieurs routiers à le remplacer par des sables de dune pour les revêtements. En 1965, la route RN 48 Stil-El-Oued, longue de 140 km et orientée nord-sud, reliant la RN 3 à la ville d'El-Oued, a été réalisée. Elle est constituée d'un corps de chaussée en sable gypseux et d'un revêtement en sable bitumeux. En l'absence d'autres types de sable, le sable de dunes a constitué l'élément principal du matériau utilisé.

La formulation théorique réalisée au LCPC a révélé les résultats suivants : le mélange était composé de 94 % de sable de dunes (Sif El Menadi), 5 % de filler d'apport, 1 % de chaux, et 6,2 % de bitume pur 80/100. Les mesures de stabilité Hubbard-Field ont montré une stabilité de 1624 kg à 25°C et de 170 kg à 60°C. Trois ans après la réalisation de la route, plusieurs échantillons ont été prélevés, et les analyses ont montré que les stabilités obtenues avec les matériaux prélevés, réchauffés, remaniés et recompressés dans le moule Hubbard-Field étaient de 1327 à 2065 kg à 25°C et de 172 à 365 kg à 60°C.

Lors de l'étude de renforcement menée en 1986, plusieurs observations ont été faites. La dégradation visuelle de la route s'est avérée presque généralisée, avec des fissurations longitudinales et transversales ainsi que quelques faïençages, parfois accompagnés d'ornières de

faibles amplitudes. Les dégradations sont particulièrement prononcées sur les tronçons traversant les Chotts et les bas-fonds, où le sol reste constamment humide. En ce qui concerne la mesure de déflexion, elle dépasse rarement les centièmes de millimètre, à l'exception des zones correspondant aux bas-fonds. Les résultats obtenus sur les carottes prélevées un an après l'exécution du tapis en sable bitumineux sont regroupés dans le tableau [14]

Tableau I. 2. Résultats obtenus sur la RN 3 Stil- El Oued [14]

PK	38	43	60	65	75	98	118	138	**
Bitume (%)	6,1	7,9	6,2	6,4	5,1	5,35	3,75	4,6	6,2
Filler (%)	13,1	8,3	10,4	6,4	4,3	10,4	2,9	5,8	7
Module K	3,4	-	3,3	3,6	-	-	-	-	3,45
Densité apparente	1,88	-	1,78	1,73	1,70	1,64	1,82	1,8	-
Compacité (%)	78	-	73	71	69,7	68,4	72,8	73,3	-
Densité réelle	1,87	1,85	1,84	1,82	1,86	1,88	1,81	1,81	181
Stabilité à 25°C	1327	1330	1600	1757	2065	-	1200	-	1624
Stabilité à 60°C	227	181	197	172	355	210	60	95	170

En 1999, la Direction des Travaux Publics de Ouargla a initié une expérimentation en sollicitant l'Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP) afin de formuler un sable enrobé optimisé pour offrir les meilleures performances mécaniques à partir de matériaux locaux. Cette démarche comprenait également le suivi de la réalisation d'une planche expérimentale de 300 mètres de longueur, réalisée dans le cadre du chantier de renforcement de la RN49. Ce chantier couvre une distance totale de 42 km, répartie entre les points kilométriques (PK) 120+00 à 155+00, puis de PK 167+00 à 173+00. Les principaux matériaux utilisés dans la formulation des mélanges étaient le sable de dunes, le sable alluvionnaire, le sable de concassage 0/3, ainsi que du bitume 40/50. Les formulations étudiées sont présentes dans le tableau I.3 [15].

Tableau I. 3. Formulations de planche d'essai étudié par DTP et CTTP [15]

Mélanges	100% SD	85% SD+15% SK	70% SD+30% SK
Teneur en bitume (%)	6	6.5	7

Cependant, les résultats obtenus, présentés dans le tableau I.4, révèlent des insuffisances notables en termes de stabilité et de compacité.

Ces limitations sont principalement attribuables aux caractéristiques intrinsèques des sables étudiés, notamment :

- La forme arrondie des grains, entraînant un manque de granularité et donc un faible interverrouillage entre les particules.
- Une granulométrie trop serrée, favorisant le réarrangement des grains sous l'effet du compactage, ce qui limite la densification optimale du mélange.

Tableau I. 4. Résultats de planche d'essai étudiier par DTP et CTTP [15]

Essais	Caractéristiques	Résultats		Spécification FR T<1000 v/j
Marshall	Stabilité (Kg)	20	100	≥ 300
	Compacité (%)	71	81	87-95
Hubbard Field	Stabilité (Kg)	265	402	≥ 500
	Compacité (%)	69	80	88-95
Duriez	R (Kg)	230	350	≥ 500
	r (Kg)	160	140	≥ 200

I.9. Recherches Récentes sur l'utilisation de Sables de Dune dans béton bitumineux

Siala et al [16] ont mis au point cinq formules de béton bitumineux à granulométrie continue avec différents pourcentages de sable de dunes, à savoir 0%, 5%, 7%, 10% et 12%. La formule BB0SD est une formule témoin sans sable de dunes. Le tableau I.5 présente le pourcentage de chaque constituant pour les différentes formules testées.

Tableau I. 5. Formulations testées par Siala et al. [16]

Composants	BB0SD	BB5SD	BB7SD	BB10SD	BB12SD
Sable 0/3 (%)	50	45	43	40	38
Gravier 4/7 (%)	13	13	13	13	13
Gravier 7/12 (%)	37	37	37	37	37
Sable de dune (%)	0	5	7	10	12
Bitume (%)	4,7/ 5/ 5,3	4,7/ 5/ 5,3	4,7/ 5/ 5,3	4,7/ 5/ 5,3	4,7/ 5/ 5,3
Module de richesse	2,93/3,11/3,30	2,90/3,09/3,27	2,89/3,07/3,26	2,82/3,00/3,18	2,78/2,96/3,14

La Figure I.5 présente les résultats des essais Marshall sur les mélanges à différents pourcentages de sable de dunes étudiée par les auteures qui montrent que la stabilité augmente avec l'augmentation du taux de sable de dunes, atteignant une valeur optimale à 10 % de sable de dunes. L'ajout de sable de dunes améliore donc le comportement du mélange granulaire, augmentant ainsi la compacité. De plus, le squelette plus dur du matériau permet de réduire le fluage pour tous les pourcentages étudiés. L'ajout de sable de dunes augmente le pourcentage de fines tout en améliorant le squelette du mélange avec un pourcentage plus élevé de matériaux légèrement plus grossiers. Cet apport a un double avantage : une diminution du pourcentage de vides grâce à une plus grande quantité de fines, et l'apport d'un matériau granulaire de bonne résistance mécanique.

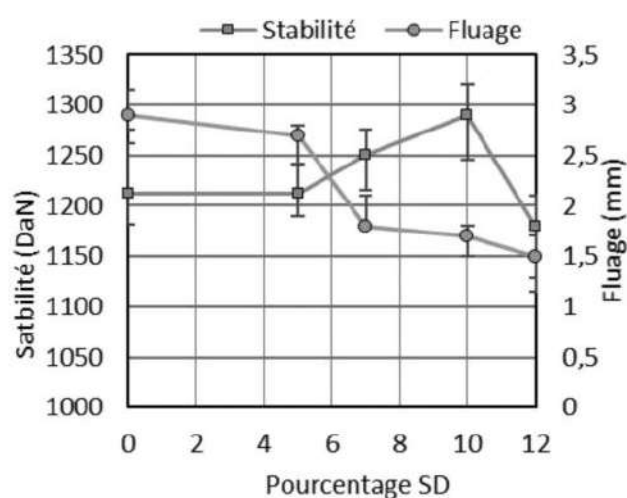


Figure I. 5. Evolution de Fluage et stabilité Marshall avec l'ajout de Sable de dunes [16]

Les résultats des essais Duriez confirment les résultats de l'essai Marshall. En effet, les résistances à l'air et dans l'eau ainsi que leurs rapports sont améliorées par l'ajout de sable de dunes avec un maximum de résistance qui atteint 10 % de sable de dunes.

Tous les résultats des essais aillent à indiquer que le pourcentage optimal de sable de dunes pour améliorer le comportement mécanique de l'enrober le fluage et la résistance à la sensibilité à l'eau est de 10 %. La Figure I.6 illustre les résultats des essais Duriez pour la formule optimale à 10% de sable de dunes en comparaison avec la formule de référence BB0SD. Ces variations révèlent une amélioration notable du fluage ainsi que des résistances à l'air et à l'eau. Plus précisément, le fluage a diminué d'environ 41 %, tandis que les résistances à l'eau et à l'air ont augmenté respectivement de 19 % et 11,6 %. Ces changements reflètent les comportements souhaités pour remédier aux problèmes de dégradation de la chaussée.

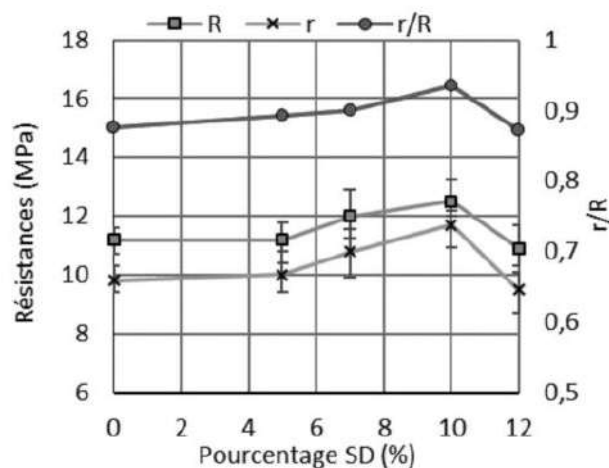


Figure I. 6. Résultats de l'essai Duriez [16]

Une autre étude menée par Akacem M et al. [17] a démontré que l'utilisation de 10 % et 20 % de sable de dunes améliore les résultats des tests Duriez et Marshall Figure I.7 Cela s'explique par le fait qu'un ajout de sable dans cette plage de valeurs tend à réduire les vides et à augmenter la rigidité du mélange bitumineux. Cependant, au-delà de 20 % l'effet du sable devient négatif et les performances mécaniques tendent à se détériorer. Malgré cela, les résultats des tests Duriez et Marshall restent supérieurs aux seuils fixés par les exigences algériennes. Les bétons bitumineux étaient composés de 20 % de gravier 3/8, entre 30 % et 35 % de gravier 8/15, entre 10 % et 38 % de sable 0/3, et de 5,6 % à 5,9 % de bitume pur 40/50. Le tableau I.6 résume les pourcentages des constituants des mélanges étudiés.

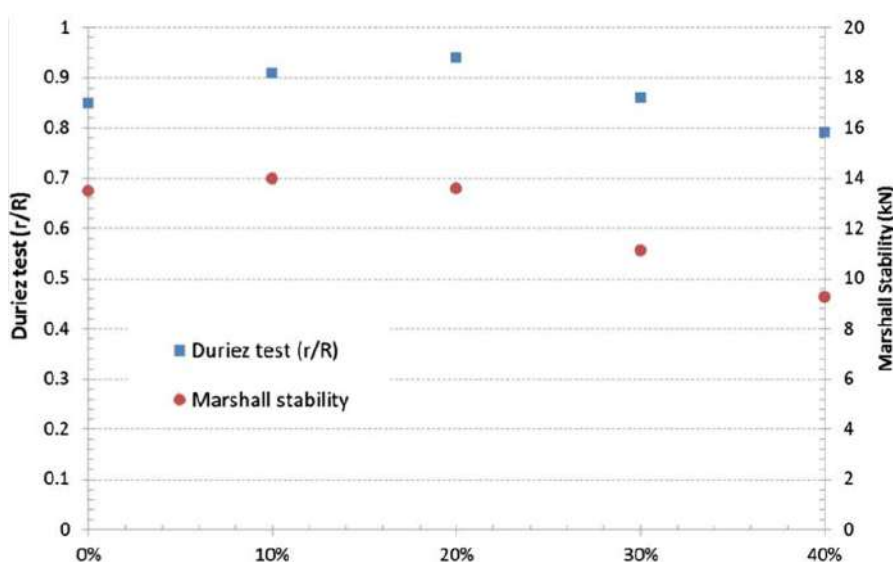
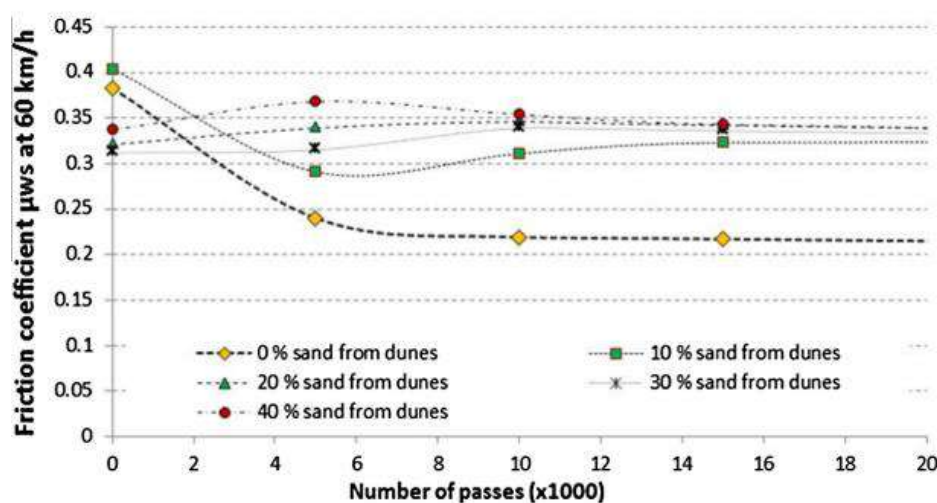


Figure I. 7. Influence de sable de dunes sur les caractéristiques mécanique de béton bitumineux [17]

Tableau I. 6. *Composition des mélanges bitumineux* [17]

Dunes sand (%)	Sand 0/3 (%)	Aggregates 3/8 (%)	Aggregates 8/15 (%)	Bitumen 40/50 (%)	Theoretical density (t/m ³)
10	38	20	32	5.9	2.23
20	28	20	32	5.8	2.26
30	15	20	35	5.7	2.30
40	10	20	30	5.6	2.33

Les chercheurs ont aussi étudié la résistance au dérapage des mélanges de béton bitumineux. L'essai de polissage a été effectué avec la machine Wehner & Schulze, qui permet de simuler l'usure due au trafic. L'évolution du coefficient de friction pendant le polissage a été analysée. La Figure I.8 illustre les mesures de friction réalisées sur mélange bitumineux contenant différents taux de sable de dunes (10-40 %) ont montré une augmentation du niveau des performances. Les valeurs de friction les plus élevées sont obtenues avec 10 % de sable de dunes et sont comparables à celles obtenues avec du béton bitumineux contenant des granulats de meilleure qualité. Néanmoins les valeurs de friction obtenues avec 20 % de sable de dunes restent acceptables.

Figure I. 8. *Évolution du coefficient de friction pour différents taux de sable de dunes* [17]

La deuxième étude de Siala et al. [18] vise à améliorer les performances de ces enrobés en étudiant plusieurs formulations contenant du fraisât d'enrobés et du sable de dunes. Les résultats de cette étude ont montré une amélioration significative des performances mécaniques des enrobés, notamment avec l'ajout simultané de 40 % de fraisât de 10 % de sable de dunes et de 1 % de chaux. La Figure I.9 montre que l'ajout de sable de dunes a amélioré la stabilité Marshall et réduit le fluage de l'enrobé. De plus les résistances à l'air et à l'eau se sont encore améliorées. Le sable de dunes riche en silice apporte une dureté et une rigidité supplémentaires au mélange, améliorant ainsi son comportement à l'eau.

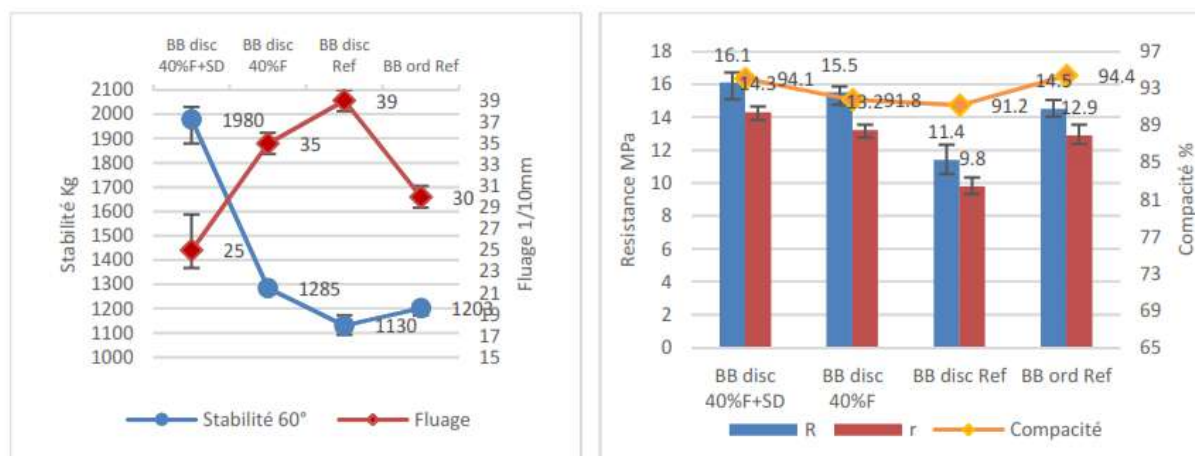


Figure I. 9. Variation des caractéristiques des bétons bitumineux avec ajout de Fraisât [18]

La Figure I.10 présente l'évolution des caractéristiques mécaniques de l'enrober avec l'ajout de chaux. Il est clair que l'ajout de 1 % de chaux au mélange bitumineux contenant 10 % de sable de dunes a amélioré les caractéristiques mécaniques de la formulation étudiée.

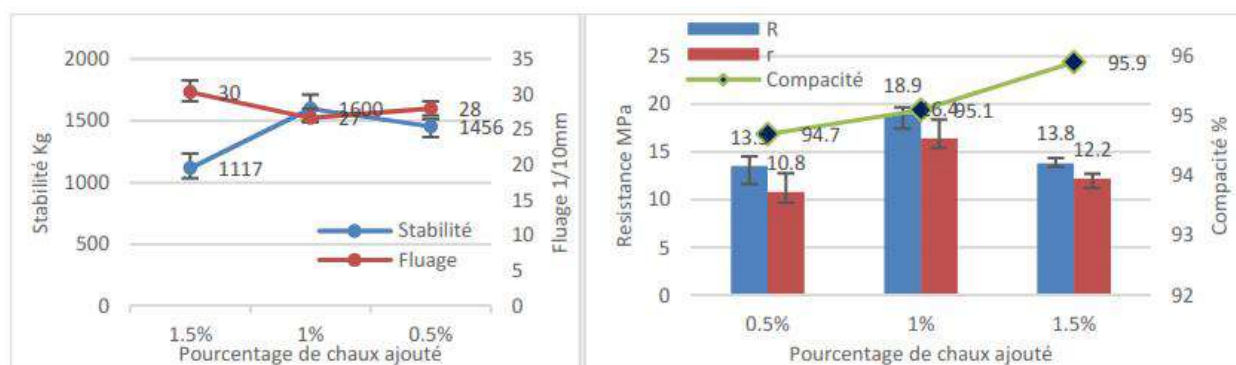


Figure I. 10. Evolution des performances mécaniques en fonction du taux de chaux [18]

Une deuxième étude de Akacem et al [19] vise à étudier l'influence de la substitution de la fraction 0/3 mm du sable concassé généralement utilisé dans le béton bitumineux par du sable de dunes sur les performances mécaniques y compris la stabilité Duriez et Marshall. Pour chaque taux d'ajout de sable de dunes (10, 20, 30 et 40 %), trois mélanges ont été étudiés en laboratoire avec différentes teneurs en bitume afin de choisir la formulation qui donne les meilleures performances. Le tableau I.7 regroupe les formulations étudiées par les chercheurs.

Tableau I. 7. Enrobé bitumineux avec différents pourcentages de sable de dunes [19]

Dune sands (%)	Sand 0/3 (%)	Gravel (%)		Bitumen 40/50 (%)	Density (kN/m ³)
		3/8	8/15		
10	38	20	32	5.9	22.3
20	28	20	32	5.8	22.6
30	15	20	35	5.7	23.0
40	10	20	30	5.6	23.3

En ce qui concerne la stabilité Marshall, bien que celle-ci diminue avec l'ajout de sable de dunes dans la formulation du béton bitumineux 0/14, elle reste dans les normes ($\geq 10,5$ kN) jusqu'à un pourcentage de sable de dunes de 20 %.

Tableau I. 8. Influence de l'ajout de sable de dunes sur le Fluage et la stabilité Marshall [19]

Dune sands (%)	0	10	20	30	40
Stability Value (kN)	13.5	14.0	13.6	11.1	9.3
Flow value (mm)	1.35	1.36	1.38	1.42	1.44

On peut voir suivant le tableau I.8 et le tableau I.9 que l'addition de sable de dunes jusqu'à un pourcentage de 30 % augmente la résistance à la compression de l'essai Duriez dans les deux types de conservation : à sec ou en immersion de 3 % et 12 % respectivement tableau I.6. De plus, pour la sensibilité à l'eau calculé par le rapport immersion/compression, on observe une amélioration prometteuse allant jusqu'à 20 % avec l'ajout de sable de dunes. Cela s'explique par le fait que l'incorporation de sable jusqu'à ce teneur contribue à la réduction des vides tout en accroissant la compacité et la densité du mélange bitumineux. Au-delà de cette pourcentage la conséquence devient négatif sur les performances mécaniques de béton bitumineux a base sable de dunes.

Tableau I. 9. Résultats de l'essai Duriez [19]

Dune sands (%)	0	10	20	30	40
Dry compressive stress (Mpa) R	8.84	9.10	9.10	9.10	8.84
Compressive Stress after immersion (Mpa) r	7.54	8.32	8.58	7.80	7.02
r/R	0.85	0.91	0.94	0.86	0.79

Kebaili et al [20] ont mené une étude pour examiner principalement les performances mécaniques d'un enrobé bitumineux partiellement composé de sables de dune. L'approche adoptée consiste à substituer le gravier 0/3 souvent utilisée dans les bétons bitumineux algérienne, par le sable de dunes provenant de sud algérien exactement la région d'Ouargla avec l'ajout d'un autre sable alluvionnaire local.

Le tableau I.10 montre que les stabilités Marshall obtenues pour les bétons bitumineux contenant du sable de dunes sont inférieures à celles des BB ordinaires et en dessous des normes algériennes, qui exigent des stabilités supérieures à 1050 kg pour un enrobé semi-grenu 0/14.

Tableau I. 10. Variation des stabilités Marshall [20]

	AM ordinaire				AM (avec SD)			
Bitume (%)	5.58	5.75	5.92	6.09	5.08	5.22	5.36	5.49
Stabilité (Kg)	1216	1293	1326	1259	849	841	933	745

Le fluage présenté dans la Figure I.11 varie en fonction des dosages en bitume pour chaque mélange. On observe que les résultats du fluage des bétons bitumineux (BB) à base de sable de dunes sont inférieurs à ceux des BB ordinaires mais restent acceptables selon les normes.

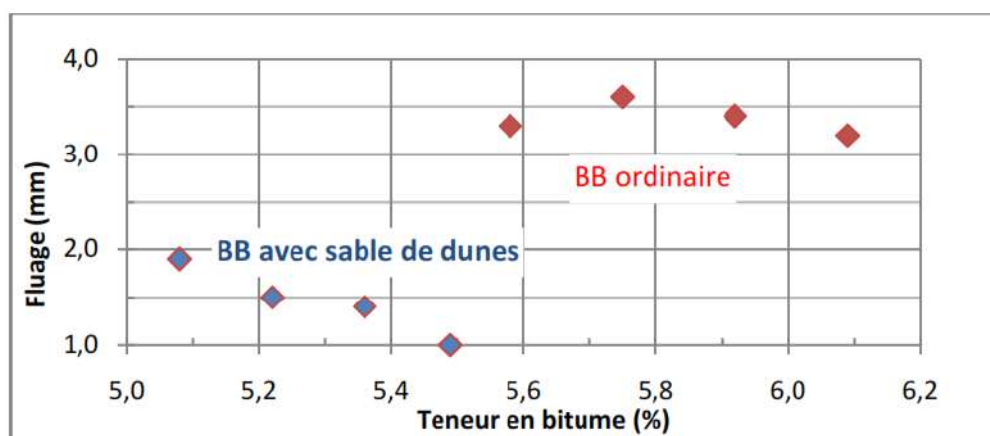


Figure I. 11. Variation du fluage en fonction de la teneur en bitume [20]

Les auteurs ont réalisé l'essai Duriez sur des éprouvettes contenant les pourcentages en bitume optimales déterminées à partir de de l'essai de stabilité Marshall. Selon la Figure I.12 la résistance à la compression les bétons bitumineux en de sable de dunes les résistances sont proportionnellement en dessous des normes 70 kg/cm². Les résultats de la résistance à la compression après conservation à l'eau pour le béton bitumineux en base de sable de dunes sont inférieurs à ceux des BB ordinaires mais restent suffisants par rapport aux valeurs recommandées ($r > 56 \text{ kg/cm}^2$).

Enfin le facteur r/R dans les deux cas sont satisfaits et acceptables vis-à-vis des valeurs conseillées ($r/R > 0,8$).

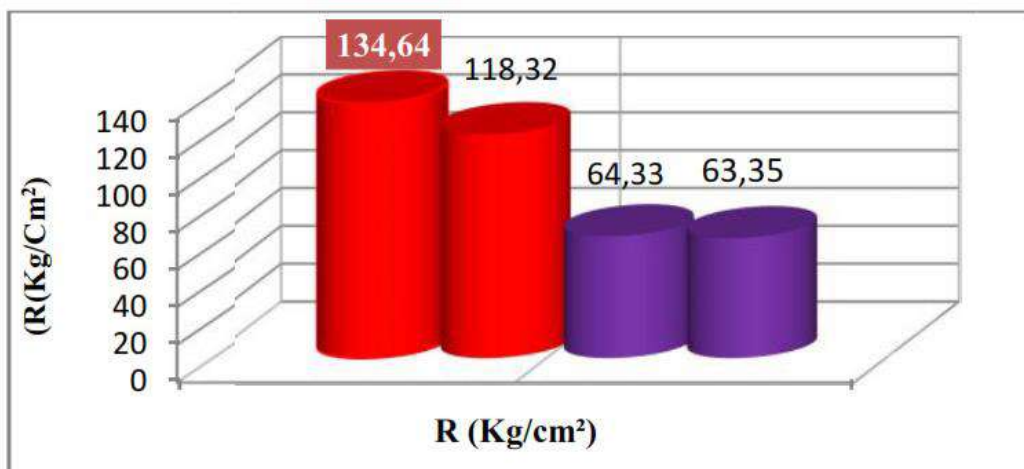


Figure I. 12. Résistance à la compression avant et après immersion [20]

Une nouvelle étude de Bentata et al [21] propose cinq (05) mélanges pour étudier l'effet de sable de dunes sur le béton bitumineux 0/14 : E0 (mélange témoin), E1, E2, E3 et E4. La composition en pourcentage de chaque mélange est décrite dans le tableau I.9.

Tableau I. 11. Composition des mélanges [21]

	E0 (réf.)	E1	E2	E3	E4
DS* (%)	00	05	15	15	15
Lime (%)	00	00	00	00	05
Filler (%)	00	00	00	05	00
Gravel 0/3	41	36	26	21	21
Gravel 3/8	25	25	25	25	25
Gravel 8/15	34	34	34	34	34

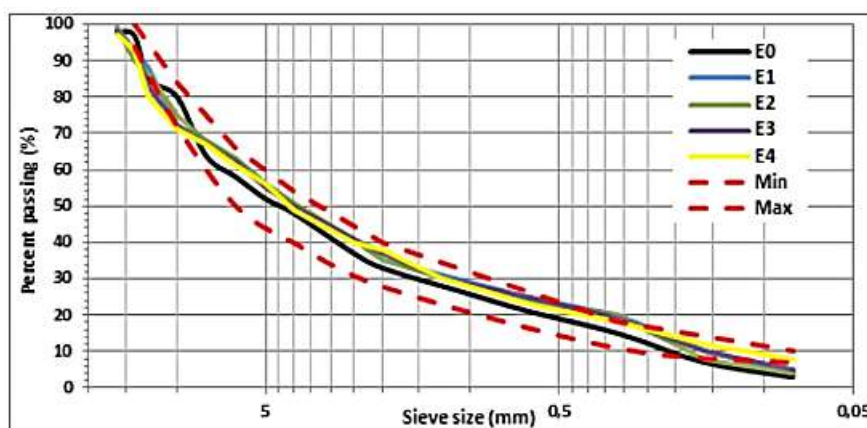


Figure I. 13. Distribution granulatoire des mélanges [21]

Conformément au tableau I.11, la Figure I.13 présente les courbes granulométriques de chaque mélange ainsi que la zone de référence pour un mélange semi-grenu 0/14 selon les recommandations SETRA-LCPC. Les courbes granulométriques des mélanges sont bien continues dans le fuseau de référence.

Selon les résultats de l'essai de presse de cisaillement giratoire présentés dans le tableau I.12 le contenu en vides correspondant à 80 girations tous les mélanges produits sont compactables et donc facilement mis en œuvre, respectant parfaitement les normes, c'est-à-dire dans l'intervalle [4%-9%] à 80 girations.

Tableau I. 12. Pourcentages des vides à 80 girations [21]

Mixture n°	E0	E1	E2	E3	E4	Standards
Void (%)	4,90	4,91	6,71	7,03	6,24	4,0% - 9,0%

La Figure I.14 montre la diminution du pourcentage de vides en fonction de l'augmentation du nombre de girations selon une échelle logarithmique. Il est à noter que tous les mélanges ont un comportement similaire, la compacité augmentant d'environ 10 % entre 10 et 100 girations. Le mélange E0 semble être le plus compactable par rapport aux autres mélanges.

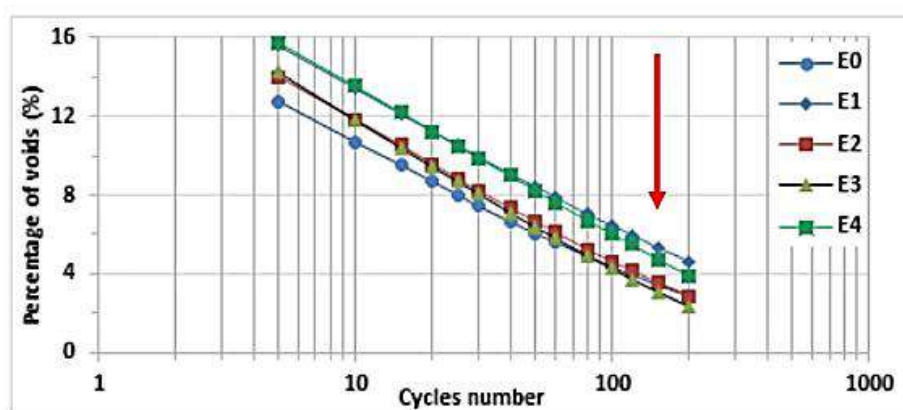


Figure I. 14. Evaluation de pourcentage des vides en fonction de nombres de girations [21]

Les chercheurs ont évalué le comportement de déformation des enrobés bitumineux par la résistance à l'orniérage qui se forme produit par le passage répété d'une roue roulante à température constante. Selon la Figure I.15, il apparaît que les mélanges E3 et E4 présentent les meilleures performances en termes de profondeur d'orniérage produite lors du passage du roue en fonction du nombre de cycles, ce qui reflète l'importance de l'utilisation de filler et la teneur relativement faible en bitume.

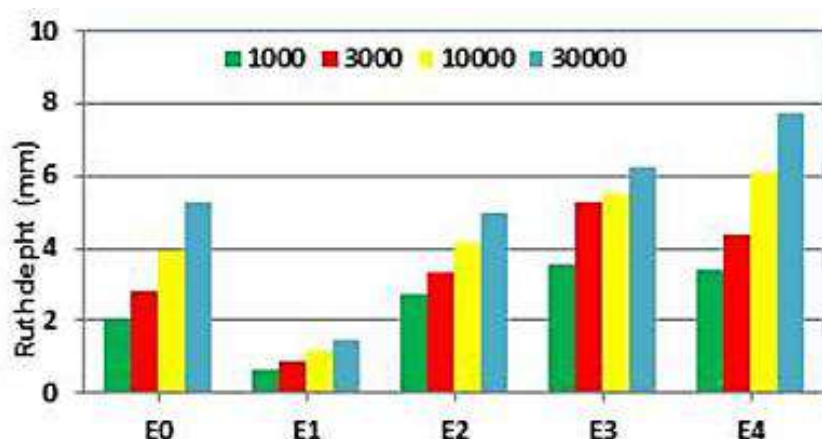


Figure I. 15. Profondeurs d'orniérage selon le nombre de cycles [21]

Une étude très intéressante de Boucherba et al. [22] propose une méthode pour valoriser le sable de dunes dans le béton bitumineux à module élevé. Les chercheurs ont utilisé trois fractions de granulats : 0/3, 3/8 et 8/15 couramment utilisées en Algérie. Ils ont effectué des modifications pour former d'autres fractions et les trier en fin de processus. Les nouvelles fractions sont 1/3 obtenue à partir du sable 0/3 en retirant la fraction 0/1 et en la remplaçant par du sable de dunes ainsi que 2/6 et 6/14 obtenues à partir des fractions 3/8 et 8/15 par tamisage puis séparation Figure I.16. Afin de pallier le problème du manque des fines dans le sable de dunes les auteures ont opté pour l'utilisation du filler provenant du sable de dunes lui-même. Pour ce faire, ils ont procédé au broyage du sable de dunes en utilisant une machine Micro Deval à sec. Les deux mélanges préparés avec 5,8 % et 6,3 % de bitume

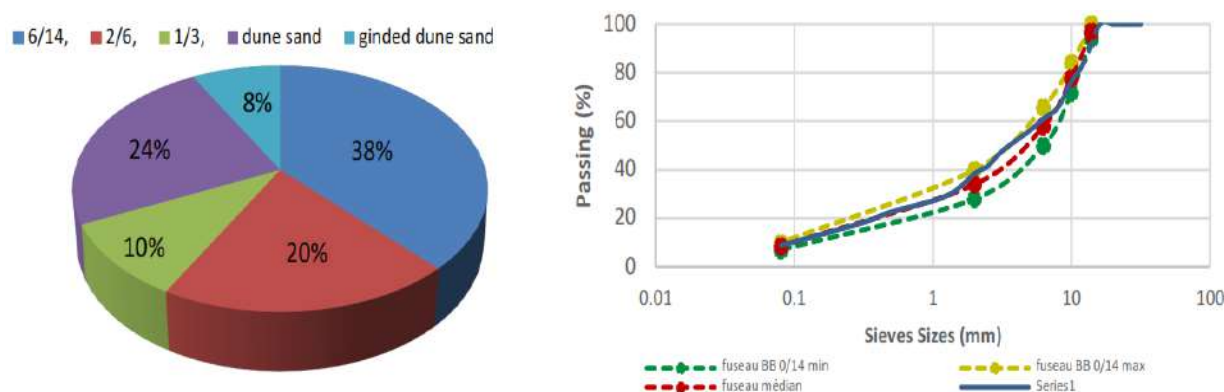


Figure I. 16. Composition minérale de mélange et leur courbe granulométrique [22]

Le tableau I.13 présente les résultats de l'essai de presse de cisaillement giratoires. Les valeurs de deux mélanges ont un teneur en vides conforme à la norme de spécification. Selon la norme il est recommandé que la teneur en vides après 10 girations soit supérieure ou égale à 10 % pour éviter les risques de déformations permanentes telles que l'orniérage.

Tableau I. 3. Résultats de l'essai PCG [22]

B.ratio (%)	5.8 %		6.3 %		Specs.EN 13108 – 1
Gyration	Bulk density (kg/m ³)	Void content (%)	Bulk density (kg/m ³)	Void content (%)	
5	1999.7	17.49	2040.7	15.06	
10	2075.9	14.35	2106.8	12.31	V ≥ 10 %
15	2121.6	12.46	2145.5	10.69	
20	2155.0	11.08	2173.7	9.52	
25	2181.1	10.01	2195.2	8.62	
30	2201.9	9.14	2211.2	7.96	
40	2234.3	7.81	2236.9	6.89	
50	2257.2	6.86	2254.2	6.17	
60	2275.2	6.12	2268.6	5.57	
80	2300.9	5.06	2289.9	4.68	Vide: 4 à 9 %

Concernant la sensibilité à l'eau les deux mélanges proposés par boucherba et al conformes aux normes. La résistance de ces échantillons de béton bitumineux après immersion dans l'eau est supérieure à celle des échantillons conservés à l'air à la même température (18°C) tableau I.14. Ce phénomène s'explique par la rigidification du sable broyé après contact avec l'eau similaire à l'effet du ciment dans la composition minérale.

Tableau I. 4. Résultats de l'essai Duriez [22]

	5.8 %		6.30 %		Specification
	Bulk density (g/cm ³)	Compression strength (bars)	Bulk density (g/cm ³)	Compression strength (bars)	
Air	2.21	109.13	2.22	105	70 bars
Water	2.22	130.35	2.23	122.02	-
Water sensitivity (i/C)	1.19		1.16		i/C ≥ 0.75

Dans le cas d'un enrobés bitumineux basé sur de granulats de classe 0/14, la norme EN 13108-1 spécifie que le teneur d'orniérage à 30 000 cycles doit être moindre ou égal à 5 % pour la classe 03 de béton bitumineux à module élevé (BBME) ce qui est notre cas pour les deux ratios de bitume. La Figure I.17 suivante montre l'évolution de la déformation d'orniérage en fonction du nombre de cycles.

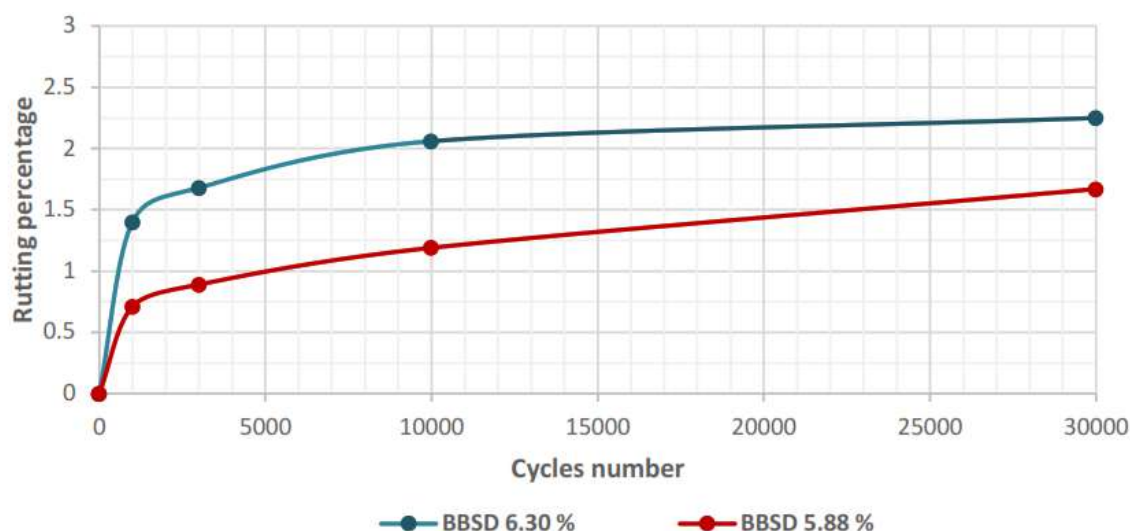


Figure I. 17. Pourcentage d'orniérage en fonction du nombre de cycles [22]

Le tableau I.15 illustre les résultats de l'essai de Module de mélange sur deux échantillons. On remarque mélange bitumineux étudié par les chercheurs est conforme aux normes EN 13108–1 qui classe les types de béton bitumineux en fonction de leurs valeurs de module de rigidité à 15°C avec une fréquence de 10 Hz. Nous avons trois classes dans chaque catégorie : la première où $|E^*| \geq 9\,000$ MPa pour le 'BBME' et $\geq 5\,500$ MPa pour le 'BBSG' la deuxième et la troisième où la valeur du module de rigidité doit être supérieure ou égale à 11000 MPa pour le 'BBME' et supérieure ou égale à 7 000 MPa pour le 'BBSG'.

Tableau I. 5. Résultats de l'essai de module [22]

		Specimen 1	Specimen 2	Average
Rigidity modulus (MPa) $ E^* $		10412	10411	10411.5
Dephasing angle φ	(°)	19.53	19.50	19.52
	Rad	$\pi/9.2$	$\pi/9.2$	$\pi/9.2$
Dynamic modulus E1		9820	9821	9820.5
Loss modulus E2		3462	3455	3458.5

Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière les caractéristiques distinctives du sable de dunes et son potentiel dans les applications routières, notamment dans les régions désertiques où cette ressource est abondante. Composé majoritairement de quartz, le sable de dunes se distingue par sa granulométrie fine, sa forme subarrondie à subangulaire, et sa porosité élevée (jusqu'à 45 %), influençant directement ses propriétés mécaniques et son interaction avec les liants bitumineux. Sa nature cristalline, enrichie parfois de gypse ou de minéraux lourds, et ses variations

chromatiques en font un matériau aux multiples facettes, mais présentant des défis spécifiques en ingénierie.

Les recherches récentes sur l'utilisation de sables de dune dans le béton bitumineux démontrent des résultats encourageants sur la performance des enrobés bitumineux. Les différentes études exposent que l'ajout de sable de dunes particulièrement à un taux de 10% optimise la stabilité et la compacité des mélanges tout en réduisant le fluage et en améliorant la résistance de compression à l'air et à l'eau. Toutefois il est important de respecter un pourcentage optimal pour éviter une dégradation des performances. Ces avancées ouvrent de nouvelles perspectives pour l'utilisation durable et efficace des ressources naturelles locales dans les routes.

CHAPITRE II :

Le Bitume

LE BITUME

Introduction

Le bitume a été utilisé entre par les anciens Egyptiens et Syriens. Les sources de bitume les plus importantes depuis 4000 à 5000 ans se trouvent en Irak. Les Egyptiens utilisaient le bitume naturel pour l'imperméabilisation, la momification et de la construction. Il provenait de la mer Morte et d'une source près de la rivière du Jourdain, au Liban [23], [24].

Vers l'an 1500, les Incas furent parmi les premiers à utiliser le goudron pour la construction d'un vaste réseau routier et leurs chaussées avaient l'allure de nos macadams à pénétration. A la suite de la découverte de dépôts d'asphalte en suisse et en France, au début du XIXe siècle, plus précisément vers 1830, l'emploi de l'asphalte s'est généralisé en Europe, puis en Amérique [24]. Avant le milieu des années 1850, l'asphalte provenait des lacs naturels trouvés dans divers endroits à travers le monde, comme l'asphalte du lac Trinidad, qui est encore exploité[25].

C'est seulement vers 1870 que l'on construisit les premières routes d'asphalte en Amérique. Les matériaux asphaltiques utilisés alors étaient le goudron, l'asphalte de roche et l'asphalte naturel [24]. Cependant, avec la découverte et le raffinage du pétrole en Pennsylvanie, l'utilisation du bitume est devenue répandue. En 1907, plus de bitume provenait des raffineries que des gisements naturels. Aujourd'hui, pratiquement tous les bitumes proviennent de pétrole raffiné [25].

I.10. Définitions des matériaux bitumineux

Goudron : Le goudron est une substance visqueuse, partiellement fluide, au parfum pénétrant et au goût amer. Il résulte de la combustion et de la distillation de diverses parties des pins et sapins, généralement lorsque ces arbres sont trop âgés pour produire de la térébenthine par incision.[26].

Le goudron de bois, également connu sous le nom de goudron végétal, est obtenu par carbonisation ou distillation des bois. Par exemple, la distillation du hêtre produit de la créosote. En dermatologie, les goudrons de bois comme ceux provenant du genévrier (huile de cade), du pin ou de houille (coaltar) sont utilisés pour leurs propriétés antiseptiques et cicatrisantes. Le goudron de houille, en particulier, est une substance noire, épaisse et collante souvent intégrée dans certains shampoings, crèmes et pommades [27].

Asphalte : bitume solide, sec et friable qui se trouve particulièrement sur les bords du lac asphaltique ou mer Morte. *ASPHALT* ne doit pas jamais traduire par asphalte. En américain, il désigne tout bonnement le *BITUME*, par contraction de l'expression officielle *ASPHALT CEMENT*. De même, asphaltic se traduit par bitumineux [26].

Bitume : les bitumes se sont des substances organiques de couleur variant de noir au brun foncé (solide, semi-solide, ou visqueux), se liquéfiant progressivement sous l'action de la chaleur et composées principalement d'hydrocarbures de haut poids moléculaire qui proviennent de la distillation du pétrole [28], [29]. Le teneur en bitume du pétrole brut est très variable suivant les régions, la nature des terrains et la profondeur des gisements [30].

Le ciment bitumineux : bitume qui est raffiné de manière a été conforme aux spécifications requises pour le pavage et certains besoins industriels. Sa pénétration varie ordinairement entre 40 et 300 [23].

Les liants bitumineux : ce sont des mélanges d'hydrocarbures provenant de la distillation fractionnée des pétroles bruts. Ils se divisent en trois classes : les bitumes liquides, les bitumes solides et les émulsions bitumineuses [31].

I.11. Origine :

Le bitume provient de procédés non pyrolytiques, ce qui le distingue des matériaux de pyrolyse tels sous forme de goudron de houille et de brai. Le goudron de houille est souvent confondu avec le bitume en raison de leur noir similaire et les aspects visqueux. Néanmoins, les propriétés chimiques du bitume sont très différentes de celles de goudron de houille.

Le bitume peut être trouvé dans la nature soit dans des roches naturellement imprégnées (asphalte rocheux), soit dans dépôts de surface bien défini (asphalte lacustre). En raison de son insuffisance, le bitume naturel est rarement utilisé dans le domaine routier [32], [33].

Le bitume est produit par raffinage des pétroles bruts et représente la partie la plus lourde après distillation. Tous les pétroles ne sont pas adaptés à la production de bitume ; les bruts légers, par exemple, manquant d'asphaltènes, peuvent produire une quantité insuffisante de bitume. En fonction de la qualité du brut, divers procédés de fabrication peuvent être employés, mais la distillation est toujours une étape incontournable. Selon les applications et les caractéristiques requises, le bitume peut être utilisé pur ou mélangé avec d'autres constituants tels que des modificateurs, fluidifiants, fluxants, eau ou émulsifiants. [34].

I.12. Constituent chimique et structure

I.12.1. Composition élémentaire

Le bitume est composé d'hydrocarbures du poids moléculaire très élevé appartenant en majorité aux groupe aliphatiques et naphéniques, donc à chaînes droites plus ou moins ramifiées ou cycliques et saturés [26]. Plus précisément, le bitume contient majoritairement (82-88%) de carbone C, (8-11%) d'hydrogène H, (0-1.5%) d'oxygène O, (0-6%) du soufre S et de (0-4%) d'azote N ainsi que divers métaux tel que fer, vanadium, nickel, aluminium, silicium à l'état de traces [32], [35], [36], [37], [38]. Il n'y a pas de molécule de bitume unique, mais il est possible de séparer ses composants en deux grands groupes génériques séparables selon leur solubilité dans le n-heptane appelés asphaltènes et maltènes, en fonction de leur solubilité et de leur polarité. Les maltènes peuvent être encore subdivisés en trois groupes que sont les saturés, les aromatiques et les résines [32], [33], [36], [39], [40], [41], [42].

I.12.2. Fractions chimiques du bitume – SARA

Les techniques de chromatographie sont largement utilisées pour définir les constitutions du bitume par une méthode appelée fractionnement SARA car elle permet d'identifier fractions de saturés, d'aromatiques, de résines et d'asphaltènes (Figure II.1).

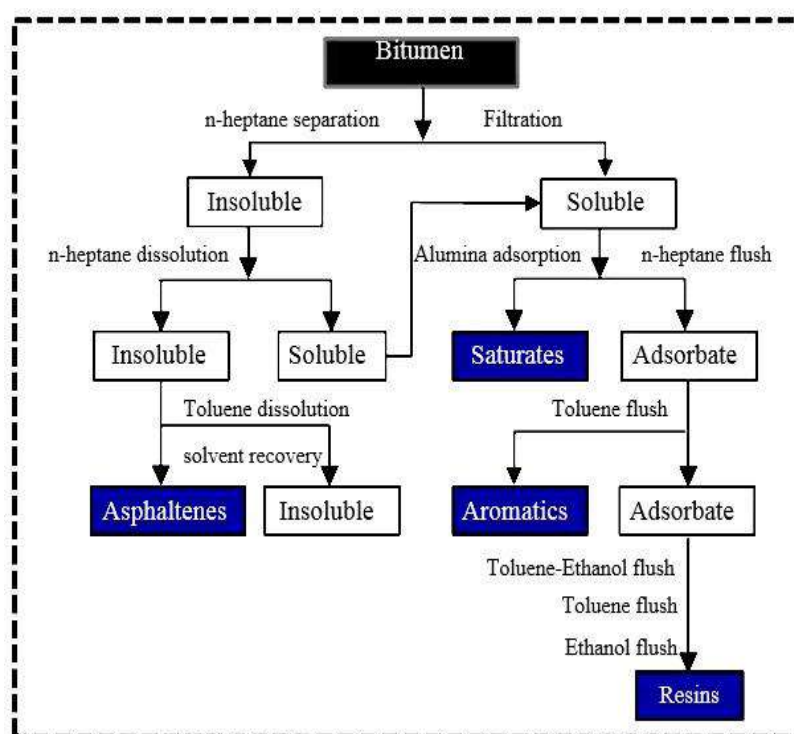


Figure II. 1. Schéma de séparation chimique des constituants du bitume SARA [43]

I.12.2.2. Les maltènes

Les maltènes créent une phase huileuse dans lequel les asphaltènes sont dissous. Elles sont composées essentiellement d'huiles saturées, d'huiles aromatiques et de résines. Les maltènes, en raison de leurs molécules plus petites que celles des asphaltènes, permettent de maintenir ces derniers en suspension dans le mélange. [33], [41].

- **Les saturés** : Les saturés dans un bitume sont constitués principalement de molécules paraffiniques, pouvant aussi inclure des cycles naphthéniques. Ils sont généralement incolores ou légèrement jaunâtres, et leur consistance varie de liquide à pâteux, selon l'origine du bitume et le taux de paraffines linéaires cristallisables [26]. Cette fraction représente généralement moins de 10 % du bitume. Les saturés ont une masse moléculaire allant de 300 à 2000 g/mole [32], [33], [36] et sont principalement composés de carbone et d'hydrogène, avec un rapport H/C variant de 1,9 à 2. Les autres éléments présents sont présents en traces. [40][44].
- **Les aromatiques** : comptent environ 30% de leurs atomes de carbones inclus dans des cycles aromatiques, ce sont des huiles visqueuses, de couleurs rouge brun sombre [26], [45] rapport H/C voisin de 1,5 [44]. Les aromatiques représentent 40 à 65% de la masse de bitume. Leur masse moléculaire est du même ordre que celle des saturés [32], [36].
- **Les résines** : Les résines sont des solides noirs qui fondent lorsqu'elles sont chauffées et représentent environ 10 % d'un bitume routier. Elles se caractérisent par des molécules plus grandes et une proportion plus élevée d'hétéroatomes. La distribution de leur masse moléculaire s'étend de 500 à 50 000 g/mole, et leur taille est comprise entre 1 et 5 nm [33], [45]. Les résines contiennent plusieurs cycles aromatiques condensés par molécule, avec des teneurs en azote et oxygène pouvant atteindre de 0,8 % à 1 %. Le rapport H/C des résines varie de 1,3 à 1,4 [44].

I.12.2.3. Les asphaltènes

Les asphaltènes se distinguent des résines principalement par leur insolubilité dans un hydrocarbure donné. Ils sont essentiellement aromatiques et plus polaires, se présentant sous forme de solides noirs, cassants et pratiquement infusibles. Leur masse molaire est très élevée, variant de 1000 à 100 000 g/mole, et ils représentent généralement entre 5 et 30 % du bitume [26]. La masse molaire des asphaltènes est très élevée (1000 à 100 000 g/mole) [36], [40] ils représentent généralement entre 5 et 30 % du bitume [45]. Les molécules d'asphaltènes peuvent se manifester sous deux états : sous forme de micelles (entités élémentaires composées de quelques feuillets de molécules) ou sous forme d'agglomérats, qui sont des ensembles de micelles. Les asphaltènes

jouent un rôle crucial dans les propriétés rhéologiques du bitume ; une augmentation de leur concentration rend le bitume plus dur et plus visqueux [33], [44].

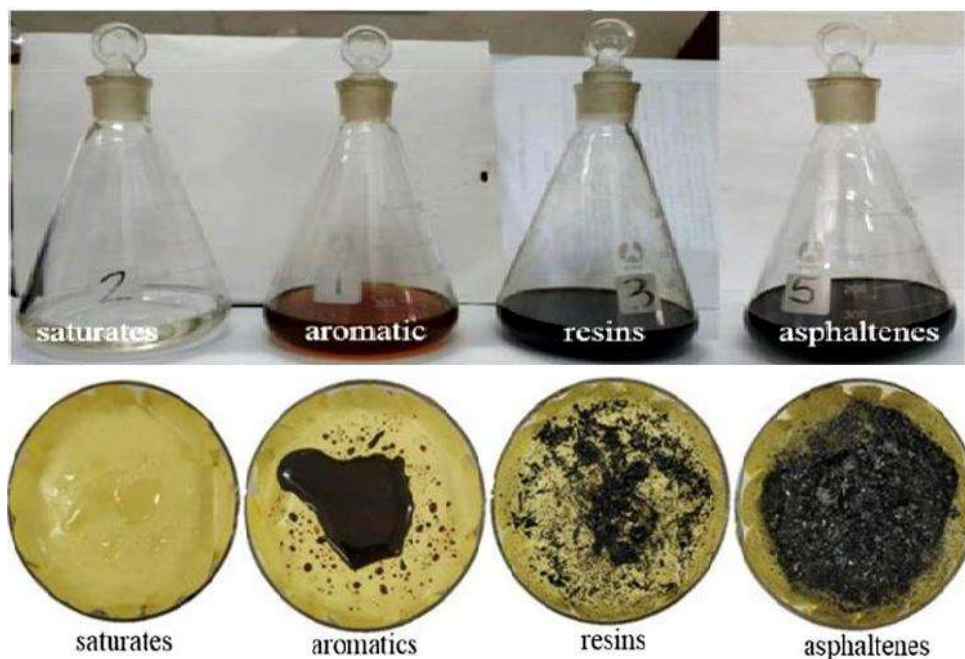


Figure II. 2. Les compositions chimiques de bitume SARA [43]

Le rapport $\frac{\text{asphaltène}}{\text{malthène}}$ croît dans les bitumes quand ces derniers vieillissent par suite d'une évaporation partielle des maltènes ou de leur transformation progressive en asphaltènes sous des polymérisations ou oxydations [46].

Les pourcentages des différentes familles dépendent de plusieurs facteurs : origine, mode de fabrication et grade du bitume pour un bitume donné, les proportions de ces différentes familles dépendent aussi très fortement de la méthode de séparation utilisée [26], [36]. La Figure II.3. Montre un exemple de composition chimique d'un bitume.

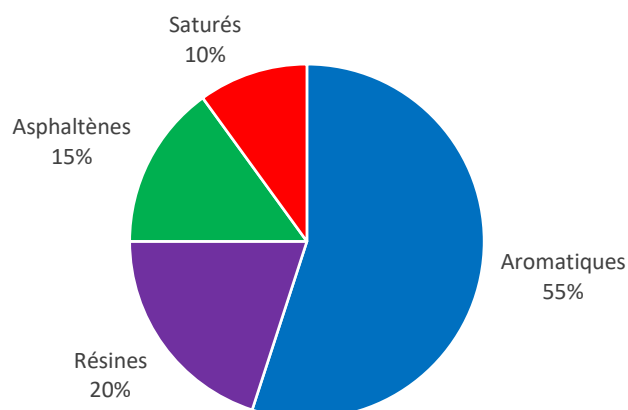


Figure II. 3. Exemple de composition d'un bitume [26]

I.12.3. Structure du bitume

Le bitume s'expose comme un système colloïdal dans lequel les asphaltènes peptisés par les résines créent les micelles, tandis que les huiles dessinent la phase intermicellaire [26]. Les maltènes composent la phase continue, dans laquelle les asphaltènes constituent la phase dispersée. La structure colloïdale des bitumes leur confère des propriétés pour la construction routière telles que l'adhésivité, la cohésion, et la viscoélasticité [40]. Selon le taux de dispersion et de rangement des micelles dans la phase dispersante, on différencie deux classes de structure pour le bitume ; on peut considérer le système comme un « sol » montrant les caractéristiques des liquides newtoniens [26], [47] dans ce système on a une dispersion complète, bitume riche en huiles aromatiques et résines (milieu solvant) et pauvres en huiles saturées (milieu floculant) et asphaltènes [33], [39], [48]. A des degrés variables, le bitume se comporte comme un « gel » se possède les caractéristiques des liquides non newtoniens [26], [47] c'est le cas de dispersion partielle, bitume pauvre en aromatiques et résines mais riche en huiles saturées et asphaltènes, cas des bitumes fortement soufflés (Figure II.4) [33], [39], [48].

Les bitumes ayant un caractère Sol résiste très bien aux sollicitations rapides, mais ils sont plus délicats aux sollicitations très lentes ainsi qu'aux changements de température. D'autre part, le caractère Gel confère une bonne résistance aux charges de longue durée par fortes températures [36]. Les bitumes routiers ont régulièrement un comportement moyen entre la structure sol et la structure gel. Les agrégats de micelles d'asphaltènes et les autres formations structurales baignent dans un milieu dispersant. Le rangement de la structure est donc intermédiaire entre celle des milieux dispersant sol et gel [33], [39].

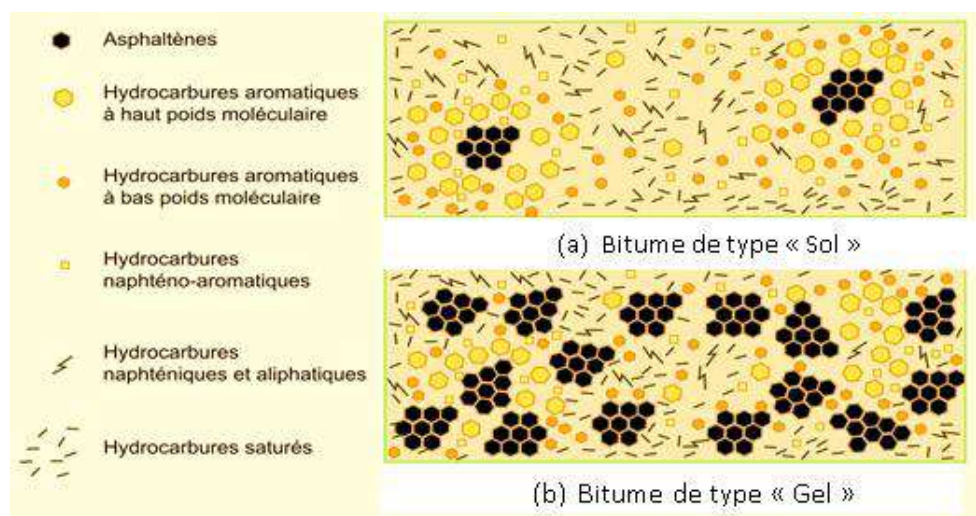


Figure II. 4. Représentation schématique de la structure de bitume [26], [36], [49]

Pour connaître l'emplacement des bitumes produits par rapport aux deux états extrêmes Sol et Gel, on fait référence à l'indice d'instabilité colloïdal « IC », défini comme suit [33], [36], [44], [50]:

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

I.13. Vitrification et cristallisation des bitumes

I.13.1. Vitrification

La vitrification concerne la phase huileuse des maltènes, qui ne cristallisent pas mais passent à un état vitreux à basse température. Ce phénomène peut être observé à l'aide de techniques telles que la calorimétrie différentielle ou les mesures diélectriques. Typiquement, la température de transition vitreuse d'un bitume se situe entre -50 et -10 °C et s'étend sur une dizaine de degrés [33], [44].

I.13.2. Cristallisation

La cristallisation dans le bitume concerne principalement les paraffines cristallisables, des alcanes linéaires à faible masse molaire, qui fondent brutalement entre 40 et 60 °C. Dans cette plage de température, les bitumes présentent un comportement thixotrope. Les paraffines cristallisables peuvent être distinguées des autres dérivés saturés à l'aide de techniques calorimétriques.

Cependant, la teneur en paraffines n'est pas le seul facteur influençant les propriétés mécaniques et physiques des bitumes. Il est également crucial de considérer leur état de dispersion dans le bitume, leur structure, et leur capacité à interagir avec les asphaltènes [33], [44].

I.14. Propriétés de bitume

Le rôle du bitume dans un enrobé est d'enrober les particules de granulat, assurant ainsi la cohésion et l'imperméabilité de l'ensemble. Bien que la proportion de bitume soit relativement faible par rapport au granulat, généralement de 10 à 15 % du volume total de l'enrobé, ses caractéristiques jouent un rôle crucial dans les variations de rigidité de l'enrobé, qui sont influencées par les sollicitations du trafic et les variations de température [51].

I.14.1. Adhésivité

L'un des intérêts essentiels du bitume est de permettre l'agglomération et la construction de mélanges minéraux stables. Ses propriétés d'adhésivité à ces matériaux en font une colle de grande qualité permettant ainsi de lier les fractions minérales entre elles et donc de réaliser ces mélanges routiers dénommés « enrobés bitumineux ». Le bitume agglomère la plupart des roches telles que calcaires, porphyres, quartzites, basaltes pouvant être utilisées pour la construction des revêtements routiers. L'adhésivité du bitume se manifeste de deux manières. De manière active, elle assure le collage solide des granulats secs et propres entre eux. De manière passive, elle contribue à la résistance aux phénomènes de désenrobage causés par l'eau et les attaques chimiques. Les produits chimiques dérivés du pétrole, comme le kérosène et le gazole, sont les seuls à pouvoir endommager l'enrobé. [26], [39].

I.14.2. Cohésion

La constitution et la robustesse des enrobés routiers est non seulement réalisée grâce à la propriété précédente mais aussi assurée et maintenue par des propriétés à la fois de cohésion et de résistance mécanique particulières. La cohésion du bitume est ce qui l'empêche de se désunir ou de se désagréger sous l'effet des forces exercées sur l'enrobé lui-même. La faculté de ductilité du bitume assurant un écoulement lent de l'enrober et non une rupture fragile, ainsi que celle de ténacité assurant une résistance suffisante sous l'effet des contraintes de traction [26], [39].

I.14.3. Viscoélasticité

La consistance de bitume est grandement affectée par la température, il devient dur et cassant à basse température et mou à haute température [25]. Cette plage de variation de sa consistance avec la température, appelée susceptibilité thermique. Le bitume se présente comme un liquide newtonien, peu visqueux à haute température (au-dessus de 80°C), et comme un solide vitreux élastique à basse température (au-dessous de 80°C) [40].

A partir de Figure II.5 on peut identifier les principaux comportements des bitumes en fonction de l'amplitude de la déformation $|\epsilon|$ et de la température T , pour une vitesse de déformation fixée [37], [41].

On y distingue :

- Les domaines fragile et ductile, où la résistance à la traction σ_p peut être mesurée.
- La rupture fragile, qui peut être caractérisée par la ténacité K_c ou l'énergie de rupture G_c (mécanique linéaire de la rupture).

- Le comportement élastique linéaire, caractérisé par les modules E et G .
- Le domaine viscoélastique linéaire, caractérisé par les modules complexes E^* et G^* .
- Le comportement purement visqueux (newtonien), caractérisé par la viscosité η .
- Pour des déformations de l'ordre de quelques pour cent, le domaine où le comportement est fortement non linéaire.

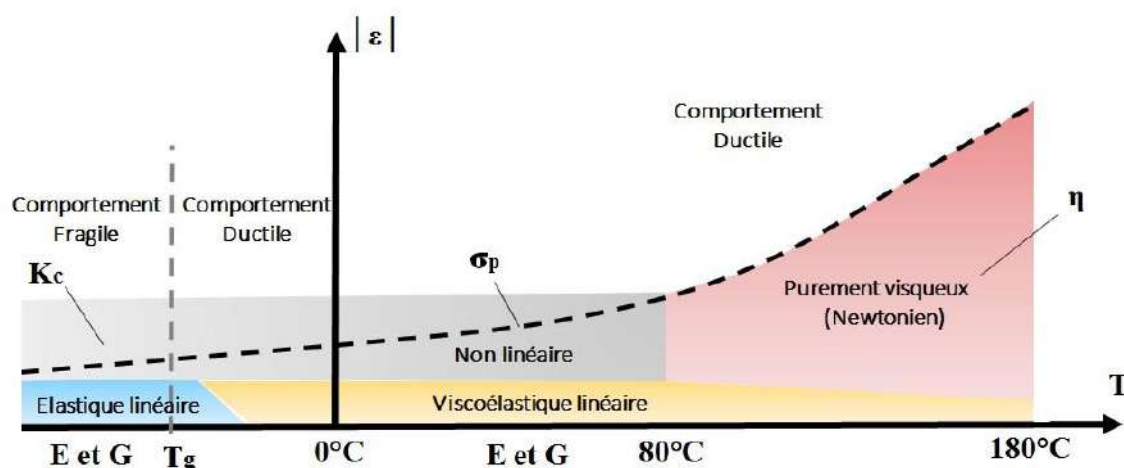


Figure II. 5. Comportement des bitumes en fonction de $|\epsilon|$ et T

I.14.4. Réactivité

Généralement le bitume est chimiquement inerte vis-à-vis de la plupart des composés hydrocarbonés. Cependant, les composés aromatiques présents dans le bitume peuvent réagir avec l'oxygène, une réaction utilisée dans la préparation des bitumes soufflés ou oxydés. En outre, à des températures supérieures à 160 °C et en présence de H_2S , des réactions de condensation peuvent se produire. Les acides présents dans les résines du bitume sont également sensibles à certaines attaques basiques [39].

I.15. Le vieillissement de bitume

Pratiquement le vieillissement du bitume se manifeste par une augmentation significative de sa viscosité ce qui peut entraîner la perte de plusieurs grades. Les principales causes de ce vieillissement sont l'oxydation des différentes familles de composants du bitume et la désorganisation du système colloïdal. Ce vieillissement affecte toutes les familles présentes dans le bitume. Le vieillissement varie en fonction de l'opération à laquelle le bitume est soumis, qu'il s'agisse de stockage, d'enrobage, de répandage ou de vieillissement in situ sur la chaussée. Deux types d'évolution doivent être considérés : les évolutions physiques et le vieillissement chimique. [39].

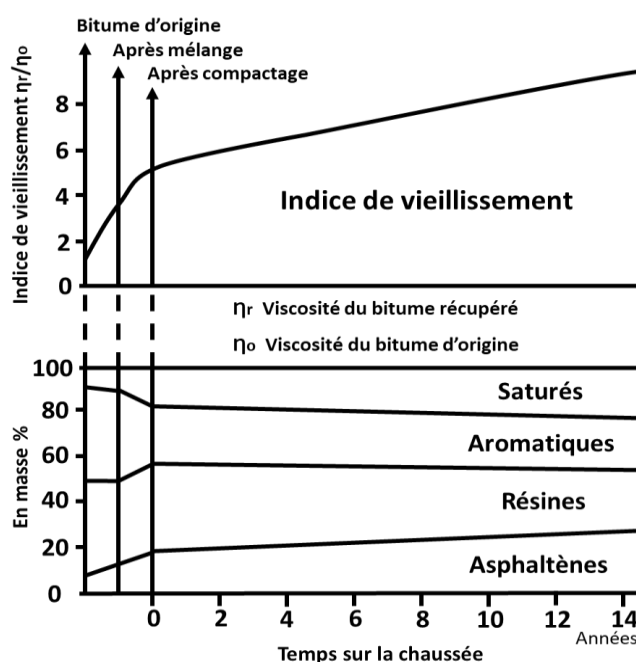


Figure II. 6. Evolution de la viscosité et de la composition chimique du bitume au cours de son cycle de vie depuis la phase d'enrobage jusqu'à son évolution dans la chaussée

I.15.1. Le vieillissement physique :

Le vieillissement physique du bitume se traduit par une augmentation de la viscosité sans modification chimique des constituants. Lorsqu'un déséquilibre survient dans les proportions de micelles et d'agglomérats, comme lors du chauffage pendant l'enrobage, la remise en structure est lente et dépend de la viscosité des huiles. Ce phénomène est comparable à l'évolution d'un yaourt après agitation. La thixotropie, qui est un phénomène lent et variable en intensité selon la classe et la nature des bitumes, peut entraîner une modification significative du comportement viscoélastique du bitume et, pour des épaisseurs faibles, conduire à un comportement viscoplastique. La seconde évolution physique est liée à la migration des huiles légères vers les pores des granulats et des fines. Bien que cette migration soit généralement faible, elle ne doit pas être négligée, car elle crée un déséquilibre dans le bitume et favorise la formation de particules de grande taille, principalement des asphaltènes. La cinétique de ce phénomène est également lente [50].

L'évaporation des fractions les plus volatiles du bitume constitue un autre type de vieillissement physique, également irréversible. La vitesse d'évaporation dépend de la nature et de la quantité de produits volatils présents ainsi que des conditions de traitement [40].

I.15.2. Le vieillissement chimique

Les bitumes, composés principalement de molécules organiques contenant du carbone et de l'hydrogène, réagissent avec l'oxygène de l'air à travers un processus appelé « oxydation ». Cette réaction modifie la composition et la structure des molécules de bitume, entraînant un durcissement progressif du matériau à mesure qu'il est exposé à l'oxygène. Ce durcissement par oxydation peut accroître l'apparition de fissures sur la chaussée [52]. Les principaux facteurs responsables de l'oxydation du bitume sont :

- La lumière : L'exposition du bitume à la lumière entraîne des réactions de photo-oxydation, dont la vitesse dépend de la longueur d'onde du rayonnement et de son intensité. Ces réactions de photo-oxydation ont des effets similaires à ceux de l'oxydation par l'oxygène, notamment la polymérisation des résines en asphaltènes. Cependant, il est important de noter que les radiations lumineuses ne pénètrent dans le bitume que sur quelques micromètres de profondeur [45].
- La température : L'oxydation du bitume est fortement influencée par la température, le temps d'exposition à l'air ambiant et l'épaisseur du film de bitume. Au-dessus de 100°C, le degré d'oxydation double pour chaque élévation de 10°C. Cette sensibilité accrue à la température accélère le processus d'oxydation et contribue au durcissement du bitume [53].
- L'eau : Que ce soit à l'état liquide ou gazeux, l'eau favorise la dégradation du bitume. Elle peut être décomposée en agents oxydants sous l'effet de radiations ionisantes, ce qui contribue à la dégradation du bitume. De plus, l'eau entraîne les produits de dégradation solubles dans l'eau. Cependant, il est important de noter que la solubilité de l'eau dans le bitume pur est très faible, de l'ordre de 0,001 % à 0,01 % de percolat.
- L'oxygène : Il pénètre très lentement dans le bitume par diffusion. À des températures très élevées, les composants de forte masse moléculaire du bitume peuvent subir une déshydrogénation, produisant de l'eau. La quantité d'oxygène qui reste liée au bitume est faible. À des températures plus basses ou ambiantes, l'oxygène est chimiquement lié au bitume, et l'oxydation se manifeste par la formation d'un film dur protecteur qui limite la diffusion de l'oxygène dans les couches sous-jacentes. La profondeur de pénétration de l'oxygène dépend de la vitesse de diffusion et de la vitesse de réaction, mais elle ne dépasse généralement pas 2,5 mm, même après des durées d'oxydation très longues. À des températures plus élevées, cette profondeur a tendance à diminuer. D'autres oxydants,

comme les composés aromatiques nitrés, peuvent également produire des effets similaires. [45].

L'oxydation des bitumes expliqué par un changement des aromatiques en résines et des résines en asphaltènes, et d'autre part, l'accroissement de la quantité d'asphaltènes est moins important que celle des résines [53]. La résistance du bitume au vieillissement dépendait de son indice d'instabilité colloïdale *IC* voir formule I.1. Plus ce rapport faible, la résistance au vieillissement est meilleure [26].

I.16. Les essais

Un bitume doit satisfaire à plusieurs critères en termes de propriétés physiques et mécaniques. Il doit d'abord posséder une rigidité suffisante aux températures d'utilisation pour garantir la cohésion de l'enrobé et réduire les risques d'orniérage causés par le fluage. De plus, il doit avoir une viscosité suffisamment basse à haute température, lors de son application, pour faciliter son pompage et sa manipulation, ainsi que pour garantir un enrobage efficace des granulats. Enfin, ses propriétés viscoélastiques doivent permettre au bitume de gérer les contraintes dues aux cycles de dilatation et de contraction, engendrés par le passage des véhicules et les variations de température. De bonnes propriétés viscoélastiques permettent au bitume de résister à la fissuration par fatigue et au retrait thermique [48].

Pour caractériser les bitumes, divers essais peuvent être réalisés. Parmi ceux-ci, deux catégories principales se distinguent [33]:

Les essais standards de caractérisation (ou technologiques) : Développés dans les années 1920, ces essais permettent de mesurer la consistance du bitume dans des conditions normalisées.

Les essais rhéologiques : Introduits dans les années 1940, ces essais évaluent des grandeurs physiques spécifiques, telles que le module, la complaisance et la viscosité.

I.16.1. Les essais technologiques

Les bitumes sont caractérisés conventionnellement par une liste d'essais tels que la pénétrabilité, le point de ramollissement bille et anneau, le point de fragilité Fraass, l'essai de vieillissement, l'essai de fluage en flexion qui permettent d'évaluer leur consistance [35], d'autres essais caractérisent le bitume tel que la densité qui est une information pratique pour son utilisation commerciale ou la nécessité de convertir poids en volume ou inversement pour le calcul du taux de liant en centrale d'enrobage, le point éclair qui est une information concernant la sécurité d'utilisation, la ductilité, l'évolution au chauffage et la solubilité dans certains solvants [26].

I.16.1.1. Essai de pénétrabilité

C'est la profondeur d'enfoncement, exprimée en dixièmes de millimètre, d'une aiguille normalisée, de 1 mm de diamètre, sous une charge de 100 g, appliquée pendant 5 s à 25°C [54] Figure II.7. La valeur empirique de la pénétrabilité sert à classer les bitumes selon leur consistance et nous informe de la plasticité des bitumes [55]. Le bitume est plus mou lorsque la température est plus haute, et la pénétration plus forte. Pfeiffer a montré en 1936 l'existence d'une relation linéaire entre le logarithme de la pénétration et la température [34].

$$\log P = AT + C \quad I.2$$

Avec A est la susceptibilité thermique « varie entre 0.015 à 0.06 ».

On peut calculer l'indice de pénétrabilité par la mesure des pénétrabilités à deux températures différents « méthode dite LCPC » puis on applique la formule suivante [26]:

$$\frac{\log P_1 - \log P_2}{T_1 - T_2} = \frac{20 - IP}{50(10 + IP)} \quad I.3$$

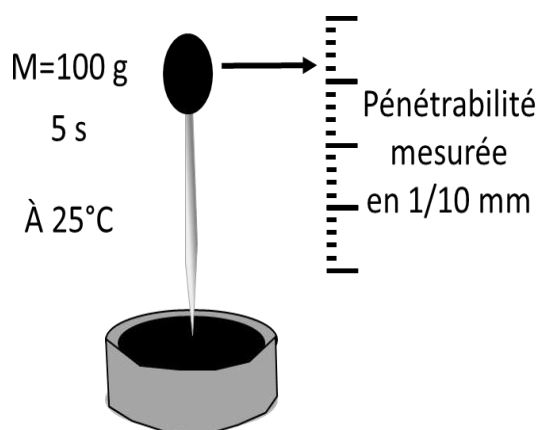


Figure II. 7. Schéma d'essai pénétrabilité

I.16.1.2. Point de ramollissement (TBA)

Les bitumes ne sont pas des substances pures et ne possèdent pas de point de fusion distinct. Leur consistance diminue à mesure que la température augmente. L'essai du point de ramollissement, qui s'effectue à l'aide de la méthode bille et anneau, permet de déterminer ce point pour les bitumes dont la plage de ramollissement varie entre 30 et 200 °C. Deux disques de bitumes, moulés dans des anneaux de 15,9 mm ayant une embase, sont chauffés selon une température déterminée dans un bain d'eau ou de glycérine. Le point de ramollissement est la moyenne des températures selon laquelle le disque de bitume se ramollit et s'affaisse de 25mm ± 0.4mm sous la masse de bille d'acier égale 3,5 g Figure II.8. Dans cet essai, plus le point de ramollissement est élevé plus le bitume est dur [54], [55].

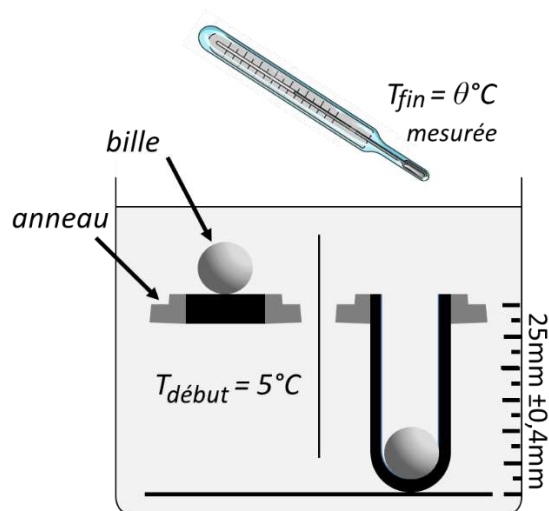


Figure II. 8. Schéma du test Température Billa Anneau (TBA)

Le point de ramollissement TBA des bitumes, peut être exprimé en termes de pénétration à la fois par extrapolation linéaire de $\log P$ en fonction de T , et par mesure directe à la température TBA [34].

$$A = \frac{\log pen_T - \log 800}{T - TBA} \quad I.2$$

A: la susceptibilité thermique

TBA: température de ramollissement de bille et anneau en °C.

A partir des mesures de pénétration à deux températures T_1 et T_2 , les valeurs de A peut être calculée [34]:

$$A = \frac{\log pen_1 - \log pen_2}{T_1 - T_2} \quad I.3$$

On peut calculer l'indice de pénétrabilité par la mesure du point de ramollissement et d'une pénétrabilité « méthode dite Pfeiffer ». La pénétrabilité d'un bitume à la température du point de ramollissement correspond en moyenne pour la plupart des bitumes à une valeur de 800 0.1mm. La formule est donc la suivante [26]:

$$\frac{(\log 800 - \log P)}{(TBA - T)} = \frac{150(20 - IP)}{(10 + IP)} \quad I.4$$

I.16.1.4. Densité relative

La densité relative est le rapport entre la masse d'un volume donné du matériau et celle d'un volume égal d'eau (le matériau et l'eau doivent être à la même température). Tous les liquides et la plupart des solides subissent des changements de volume selon le changement de température. Ils se dilatent quand ils sont chauffés et ils se contractent au refroidissement. Pour ces raisons, quand on effectue un essai de densité relative, il faut mentionner la température [55]. La densité relative des bitumes sera déterminée à l'aide d'un pycnomètre à 25°C. la valeur de la densité relative servira à [29], [33], [55]:

- Calculer les rapports entre les masses et les volumes dans les mélanges bitumineux.
- Calculer le pourcentage des vides dans les mélanges bitumineux.
- Corriger le volume lorsque le bitume est utilisé à des températures élevées.

I.16.1.5. Essai d'éclair appareil CLEVELAND à vase ouvert

Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle les vapeurs s'enflamment à l'approche de la flamme. Le point de feu est déterminé à partir du moment où l'huile prend feu et brûle pendant au moins 5 s. on remplit le vase avec le bitume jusqu'au niveau spécifié. On augmente rapidement la température de l'échantillon au début et on réduit l'intensité de la chaleur lorsqu'on frise le point d'éclair. A des intervalles spécifiés, on approche une flamme de l'échantillon [33], [55].

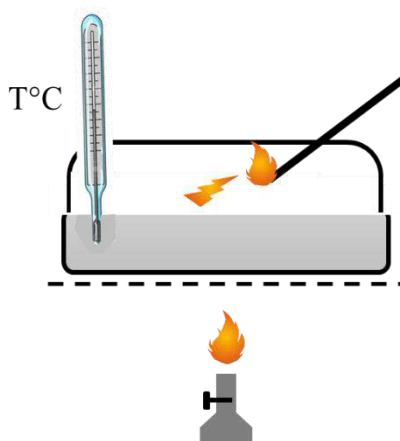


Figure II. 9. Schéma d'essai de fragilité FRAASS

I.16.1.7. Essai de ductilité

La ductilité d'un matériau bitumineux est l'allongement qui le caractérise avant qu'il se rompe. Elle se mesure en étirant, en une vitesse spécifiée et à une température donnée, les deux extrémités d'un échantillon du bitume ayant la forme d'un éprouvette Figure II.10. À moins d'avis contraire, l'essai est effectué à une température de $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ et à une vitesse de $5 \text{ cm/min} \pm 5\%$ [55].

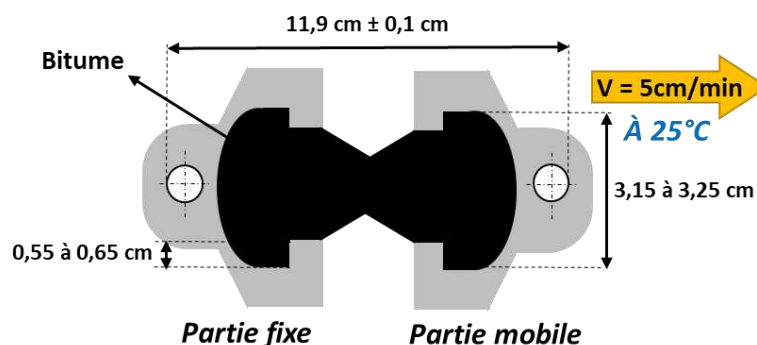


Figure II. 9. Moule pour l'échantillon destiné à l'essai de ductilité

I.16.1.8. Résistance au durcissement RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test)

Lors de l'enrobage, les granulats chauffés à environ 160°C sont mélangés avec le bitume chaud, qui forme un film mince autour des granulats, entraînant ainsi un vieillissement du liant. L'oxydation chimique est accentuée en raison de l'apport énergétique élevé, combinant température et oxygène de l'air [35], [56]. L'essai RTFOT (Rolling Thin-Film Oven Test) est conçu pour simuler les changements que subit le bitume pendant la fabrication et la mise en place d'un enrobé. Le bitume est placé en film mince dans un cylindre horizontal tournant et exposé à un courant d'air à 163°C pendant 75 minutes. Les paramètres mesurés après l'essai sont [26]:

- La variation du poids de l'échantillon.
- L'augmentation du point de ramollissement.
- La température de ramollissement.
- La pénétrabilité restante.

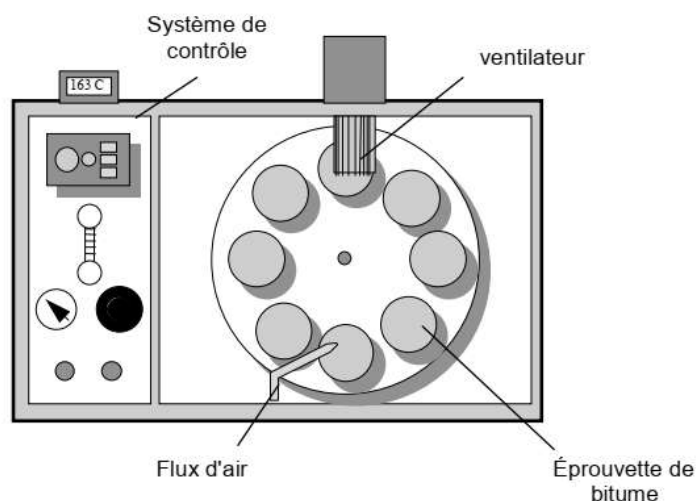


Figure II. 10. Schéma de principe d'essai RTFOT [29], [33], [41]

I.16.1.9. L'essai PAV "Pressure Aging Vessel"

Cet essai est utilisé pour évaluer le vieillissement des bitumes in situ après une période de service de 3 à 5 ans. Le résidu de l'essai RTFOT est chauffé et versé dans des coupelles métalliques contenant environ 50 g de bitume, qui servent d'éprouvettes pour l'essai PAV (Pressure Aging Vessel). Ces coupelles sont ensuite placées dans un rack et immergées dans une enceinte thermique.

Pendant l'essai, à une température comprise entre 90 et 110°C, une pression d'air de 300 psi (2,1 MPa) est appliquée dans le récipient. Après vingt heures, la pression est réduite lentement sur une période de 8 à 10 minutes. Les coupelles sont ensuite mises dans un four à 163°C pendant 30 minutes. Après refroidissement, les propriétés habituelles du bitume sont mesurées : pénétrabilité et température de ramollissement. Ces valeurs, obtenues après l'essai PAV, sont comparées aux valeurs initiales ainsi qu'à celles obtenues après l'essai RTFOT. La Figure II.12, illustre le processus d'essai.

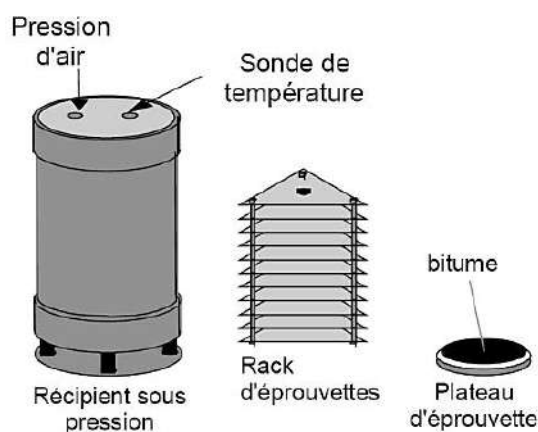


Figure II. 11. Processus & Equipements pour l'essai PAV [33]

I.16.2. Propriétés rhéologiques

Le bitume est un matériau viscoélastique, ce qui signifie que son comportement mécanique dépend des conditions de sollicitation, telles que la vitesse et la durée de la charge. Il est également sensible à la température. À faible temps d'application de la charge et à basse température, le bitume se comporte comme un solide élastique. À long terme sous charge et à haute température, il adopte un comportement de liquide visqueux. Pour des temps de charge et des températures intermédiaires, le bitume présente un comportement viscoélastique. [44].

Des essais de type mécanique permettent de mesurer une grandeur physique définie (module, complaisance, viscosité). Ce sont essentiellement Figure II.13. [26]:

- Des essais comportant un échelon de sollicitation créé instantanément, traction directe par exemple.
- L'essai de relaxation à déformation constante.
- L'essai de fluage à contrainte et sa recouvrance.
- Des essais à sollicitations périodiques.

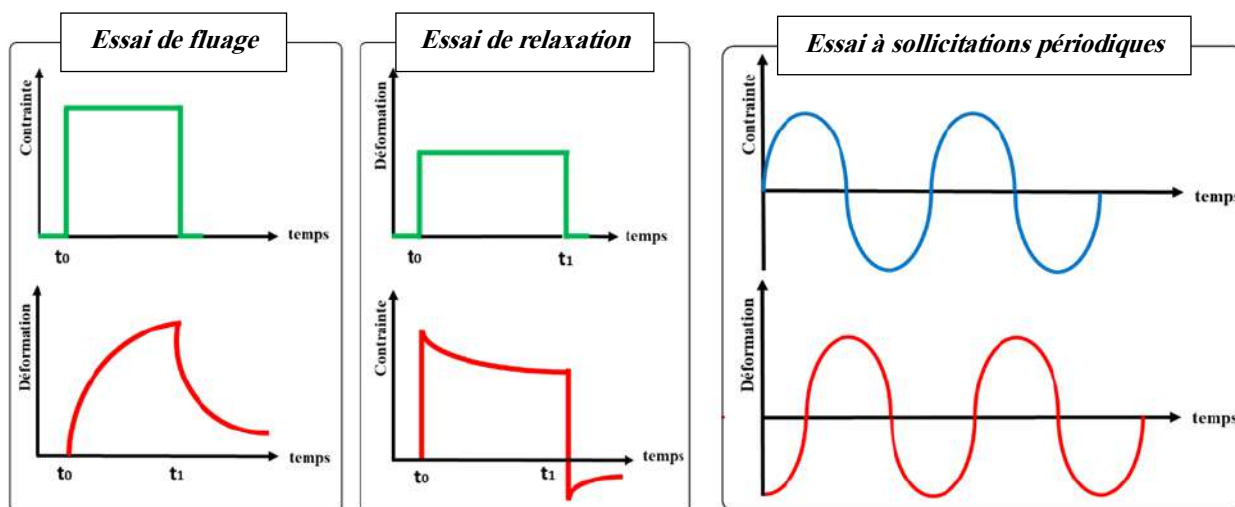


Figure II. 12. Schémas d'essais rhéologiques

I.16.2.2. Viscosité des bitumes

a) Viscosité dynamique :

Elle est définie comme la propriété d'un fluide d'opposer une résistance à tout déplacement ou changement de forme. Il y a une relation entre la température et la viscosité de bitume. La viscosité de bitume diminue lorsque la température augmente [25].

Soit deux plaques de surface « S » situées à une distance « e » et se déplaçant parallèlement l'une par rapport à l'autre sous l'effet d'une force « F » à une vitesse « V » Figure II.14. La résistance à l'écoulement d'un fluide par la relation de Newton [26], [33]:

$$\tau = \eta \times D \quad I. 15$$

Avec :

$\tau = \frac{F}{S}$: est la contrainte de cisaillement exprimée en [N/m²] ou en [Pa]

$D = \frac{V}{e}$: est le taux de cisaillement exprimé en [s⁻¹]

η : viscosité dynamique

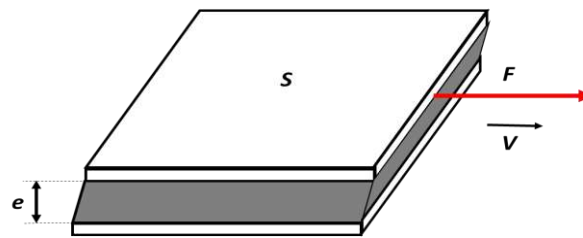


Figure II. 13. Viscosité dynamique

La viscosité de bitume dépend toujours de la température et parfois de taux de cisaillement. La Figure II.15 montre un exemple de comportement de viscosité de bitume en fonction de taux de cisaillement [26].

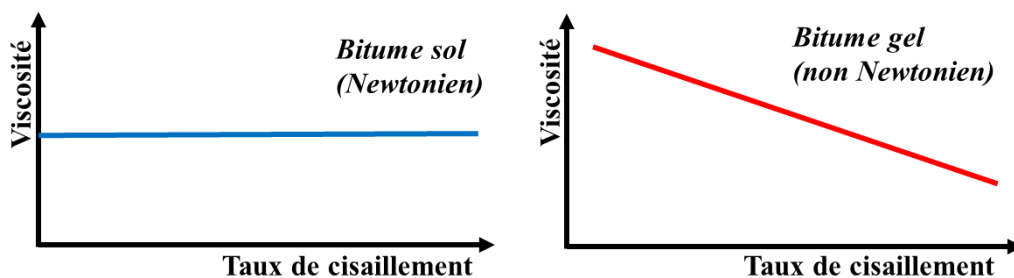


Figure II. 14. Comportement de bitume en fonction du taux de cisaillement

c) Viscosité cinématique :

Elle est le rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique. Pratiquement, on mesure la viscosité cinématique par des équipements simples utilisés dans l'industrie de pétrole comme le viscosimètre capillaire et le viscosimètre à coupe. A titre d'exemple on mesure le temps d'écoulement d'une quantité connue de bitume dans les conditions normalisées [26].

I.16.2.3. Essai de fluage en flexion à basse température BBR « Bending Beam Rheometer »

Dans le domaine des basses températures, la courbe de fluage du bitume est déterminée en mesurant la flexion d'un barreau de bitume placé sur deux appuis et soumis à une charge centrale (voir Figure II.16). Cet essai est réalisé à l'aide d'un équipement spécialisé appelé "Bending Beam Rheometer" (BBR), développé dans le cadre du programme américain SHRP-Superpave pour établir des critères de performance à basse température.

Pour effectuer l'essai, le barreau de bitume est immergé dans un bain dont la température est maintenue au niveau requis. Une charge constante de 100 grammes est appliquée sur le barreau pendant 240 secondes, et durant cette période, la déflexion du barreau est mesurée [35], [56].

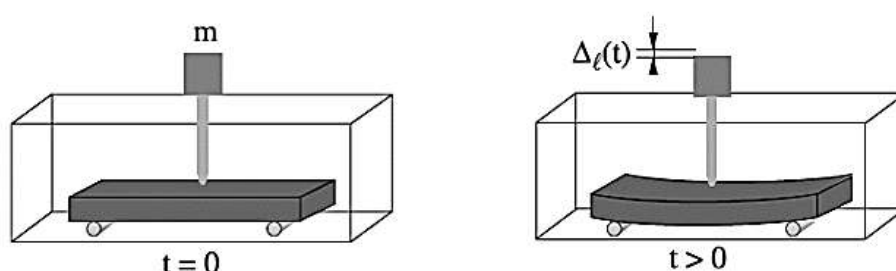


Figure II. 15. Schéma de principe d'un essai BBR mesurant le fluage par flexion sur barreau de bitume [35]

I.16.2.4. Traction SHRP

L'essai de rupture à basse température est effectué à une vitesse de déplacement de 1 mm/min, avec des taux de déformation variant de l'ordre de 10^{-3} (quelques mm/m) à des valeurs maximales de 4 à 5 % (voir Figure II.17). Développé pour évaluer le comportement en traction des liants bitumineux à basse température, cet essai fournit des résultats qui restent encore dispersés et ne sont pas pleinement corrélés avec le comportement observé en conditions routières dans les régions très froides [35].

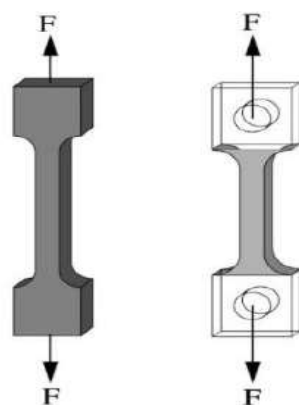


Figure II. 16. Forme des éprouvettes de traction pour tests à haute (gauche) et basse (droite) température [35]

I.16.2.5. Module complexe

Un des moyens permettant de décrire le comportement viscoélastique linéaire du bitume est de calculer expérimentalement et de tracer l'évolution du module complexe. Pour ce faire, on utilise un chargement sinusoïdal de fréquence f et de pulsation $\omega=2\pi f$ [41], [50]. Selon C. Van der Poel, qui a étudié le module de rigidité de plusieurs matériaux, les bitumes en général, ne sont ni des solides élastiques idéaux répondant à la loi de Hooke, ni des liquides visqueux idéaux « newtoniens », mais présentent des propriétés combinées de l'un et de l'autre, en fonction du temps d'application de la charge et de la température à laquelle ils sont soumis [33]. On peut mesurer le module complexe sur le bitume à basse température, en traction-compression sur des éprouvettes cylindriques, ce module identifié en traction-compression est symbolisé par E , à plus haute température, en cisaillement annulaire (cylindres coaxiaux coulissant l'un dans l'autre), on a un module de cisaillement symbolisé par G [34] ;

Pour les matériaux homogènes et isotropes on a [33], [34]:

$$E = 2(1 + \mu)G \quad I.16$$

Avec :

E : le module de Young $E = 3G$;

μ : le coefficient de Poisson $\mu = \frac{1}{2}$;

G : le module de cisaillement.

Dans l'essai de traction-compression sur cylindre de bitume, les dimensions du corps d'éprouvette sont de l'ordre de $h = 16$ mm et $e = 8$ mm Figure II.18. Ce type d'essai est réalisé pour les températures inférieures d'au moins 30°C à la TBA [35].

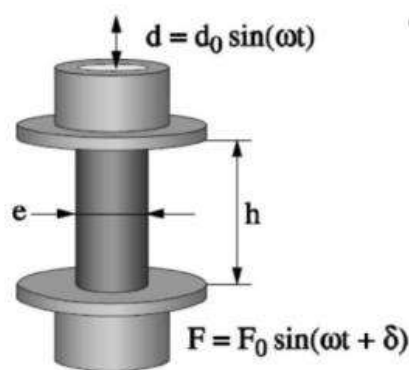


Figure II. 17. Essai de traction compression sur cylindre de bitume [35]

Pour des températures supérieures et intermédiaires, Le rhéomètre à cisaillement dynamique « Dynamic Shear Rheometer » est utilisé pour déterminer les comportements visqueux et élastique des bitumes à températures intermédiaire et hautes. Le DSR mesure le module complexe en cisaillement, noté G^* , ainsi que l'angle de phase δ d'un bitume. Ces deux paramètres sont déterminés pour une température et une fréquence de sollicitation données [52]. Ces essais sont exécutés à chaud (52°C à 76°C) sur les bitumes avant et après étuvage accéléré en couche mince (RTFOT), comme ils peuvent être exécutés à froid (4°C à 25°C) dans le cas des bitumes ayant soutenu la simulation de vieillissement sous pression (PAV) Figure II.19 [33].

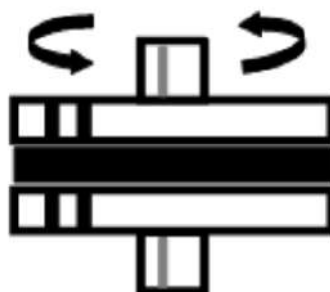


Figure II. 19. Schéma de principe du DSR [33]

Conclusion

Le bitume joue un rôle fondamental dans la fabrication des bétons bitumineux. En tant que liant le bitume donne au béton bitumineux ses propriétés de cohésion et d'adhérence assurant ainsi la liaison des granulats pour former une structure compacte et résistante. Cette caractéristique est cruciale pour la performance des revêtements routiers qui doivent supporter des charges importantes et résister aux variations climatiques. En plus les propriétés viscoélastiques du bitume permettent au béton bitumineux d'absorber et de dissiper les contraintes induites par le trafic réduisant ainsi le risque de fissuration et d'endommagement. Le bitume contribue également à l'étanchéité du revêtement empêchant l'infiltration de l'eau et la dégradation de la chaussée.

CHAPITRE III :

**LES DECHETS DE CAOUTCHOUC
ISSUS DES PNEUS USES**

II. Les Déchets De Caoutchouc Issus Des Pneus Usés

Introduction

L'exploitation des pneus usés dans les infrastructures routières représente une technique innovatrice pour gérer les déchets de pneumatique tout en améliorant la performance des structures routière. En intégrant les pneus recyclés sous forme de granulats ou de poudrette dans les mélanges bitumineux en améliore la résistance des chaussées aux fissures et réduit les nuisances sonores et prolonge la durée de vie des revêtements routiers. Cette technique d'intégration ne contribue pas à la réduction dès l'impact écologique seulement en diminuant la quantité de déchets mais elle favorise une économie circulaire en transformant un problème environnemental ont une ressource pour l'industrie de la construction routière.

II.1. Historiques sur le caoutchouc et les pneus

Les peuples autochtones d'Amérique du Sud et d'Amérique centrale ont été les premiers à utiliser des produits en caoutchouc. Leur appellation de l'arbre de caoutchouc *Hévéa brasiliensis* était "cahu-chu" signifiant un arbre qui pleure, d'où les autochtones incisaient le latex. En Europe, l'introduction du matériau en caoutchouc est attribuée à l'explorateur français Charles-Marie de la Condamine au seizième siècle. Le nom "caoutchouc" a été dérivé de "cahu-chu" ou "caoucchuc" en Angleterre, d'après le mot « extrêmement baveux » lorsque les gens ont découvert que la gomme de caoutchouc effacée du crayon effacé semble extraordinairement baveuse [57], [58].

Néanmoins l'utilisation généralisée du caoutchouc ne commença qu'au dix-neuvième siècle lorsque Charles Goodyear découvrit accidentellement en 1839 que chauffer une pièce de caoutchouc en présence de soufre augmentait considérablement son élasticité. Le matériau obtenu n'était plus cassant à basse température ni collant à haute température ouvrant ainsi un large éventail d'applications pour les produits en caoutchouc, tels que les tissus imperméables [59], [60]. Au commencement de l'histoire du domaine automobilistique les premiers pneus qui ne constituaient d'un segment de caoutchouc fixée à la roue et recouvert d'un matériau. L'invention des pneus gonflés remonte aux alentours du brevet de John Boyd Dunlop en 1887 qui a réussi à fabriquer les premiers pneus gonflables destinés au vélo. Quatre ans après André et Édouard Michelin ont initié une innovation inédite les pneus pour vélo qui pouvaient être facilement substitués. Par la suite les pneumatiques ont été conçus pour l'emploi dans les véhicules. Pour améliorer les propriétés mécaniques des composés de caoutchouc telles que la résistance à l'abrasion et la résistance à la traction du noir de carbone est incorporé dans les pneus au début des années 1900 [57], [61].

Parmi des plusieurs autres évolutions de la technique des pneus on peut nommer la diffusion du caoutchouc synthétique qui commença après les améliorations significatives apportées pendant la Seconde Guerre mondiale. La technologie du pneu radial fut développée par Michelin et lancée à la fin des années 40 [61], [62].

II.2. Constituants des pneus

La structure et la composition des différentes parties d'un pneu reflètent le rôle joué par chaque partie et les propriétés requises en fonction des sollicitations rencontrées. Les principaux constituants d'un pneu sont représentés dans la Figure III.1 et détaillés ci-dessous [61]:

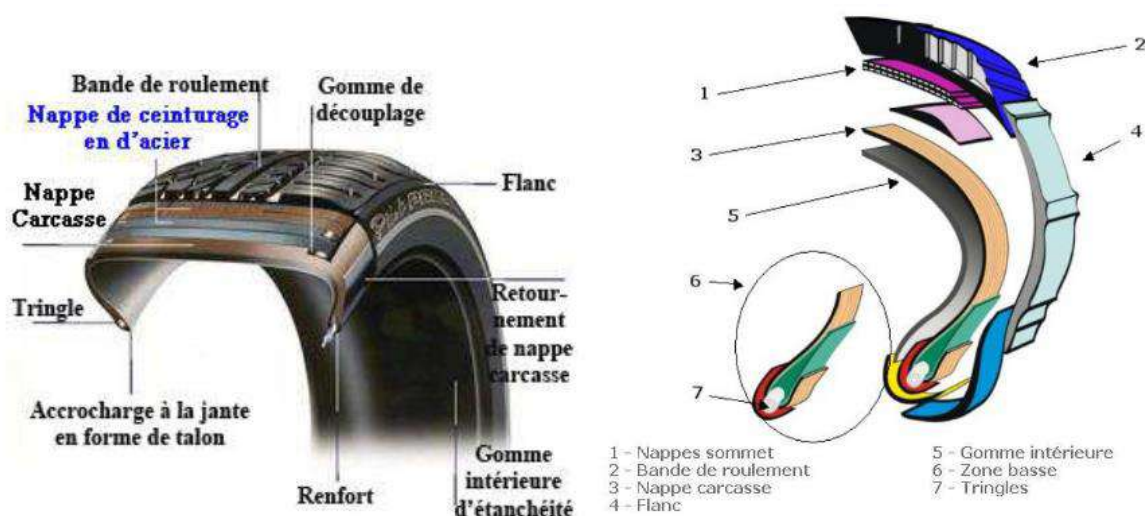


Figure III. 1. Les composants d'un pneu pneumatique de voiture [61]

II.2.1. Zone de sommet

La bande de roulement est la partie du pneu en contact direct avec le sol.

Sa sculpture conçue en fonction de l'environnement d'utilisation, permet d'évacuer la chaleur, l'eau, la neige et la poussière. La performance du pneu est déterminée par la sollicitation sous la bande de roulement.

Les nappes de ceinturage situées à l'extérieur, sont en acier et ont pour rôle de renforcer la rigidité du pneu et de résister aux éventuelles pénétrations de projectiles externes.

La gomme de découplage agit comme un amortisseur pour les nappes de ceinturage en acier.

II.2.2. Zone flanc

La nappe carcasse a pour rôle de maintenir la forme du pneu et de contenir l'air lors de l'inflation.

L'épaule est une couche de gomme extérieure située dans la zone de transition entre la zone sommet et la zone flanc, permettant de dissiper la chaleur générée lors du roulement.

Le flanc se trouvant entre l'épaule et les tringles, a pour fonction de protéger la nappe carcasse.

II.2.3. Zone basse

Les tringles sont des renforts en acier situés dans la partie du pneu qui s'accroche à la jante, assurant une fixation solide.

L'accrochage est conçu pour protéger contre les dommages lors de l'installation du pneu.

La gomme inférieure d'étanchéité a pour rôle de prévenir les fuites d'air et d'eau. Elle est fabriquée en caoutchouc synthétique, tel que le butyle (BU).

II.3. Compositions des pneus

Le caoutchouc qu'il soit synthétique ou naturel est un élément principal dans la fabrication des pneus. Il constitue environ 48% du poids total d'un pneu. Le latex est la matière première du caoutchouc naturel ainsi que les caoutchoucs synthétiques qui est dérivés du pétrole ont permis d'améliorer les performances des pneus. Les pneus sont également consolidés par des armatures métalliques qui représentent 15% de leur poids afin d'augmenter leurs performances. De plus des fibres textiles sont utilisées pour alléger le poids des pneus tout en conservant leurs caractéristiques d'endurance. Ces fibres représentent environ 5% du poids total du pneu [63].

Les pneus d'abord étaient manufacturés seulement à partir de caoutchouc naturel. Cependant, le développement de la fabrique chimique a permis la première synthèse de caoutchouc à l'année 1909. Aujourd'hui la formulation du caoutchouc utilisé pour la confection des pneus comprend des centaines de composants tel que les accélérateurs les antioxydants l'antiozone les charges les agents de vulcanisation les pigments les plastifiants les agents de renforcement et les résines [59], [64].

Un pneu est composé de différentes couches de caoutchoucs synthétiques et naturels chacun présentant des propriétés distinctives. La composition d'un pneu modifie peu entre les pneus de poids lourds et les pneus de tourisme à l'exception de la nature chimique des élastomères. La fabrication des pneus est un processus complexe qui nécessite une grande variété de matériaux et de technologies [65]. La Figure III.2 illustre la typique d'un pneumatique de véhicule.

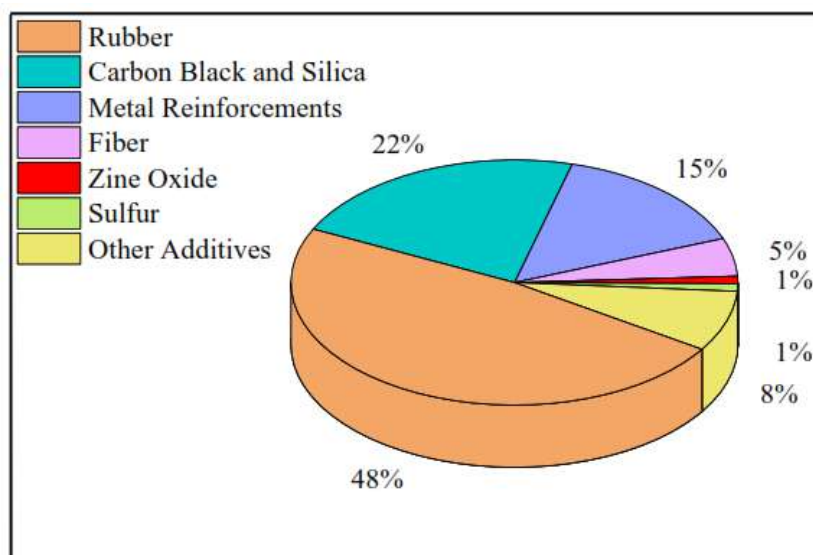


Figure III. 2. Composition typique d'un pneu de véhicule [66]

II.3.1. Le caoutchouc naturel (NR) :

Le mot élastomère est utilisé pour désigner tous les types de caoutchoucs qu'ils soient ce caoutchouc d'origine naturelle c-à-dire dérivant de l'hévéa ou synthétique issus de l'industrie chimiquement qui possèdent une élasticité propre au caoutchouc. Pour qu'une substance soit mécaniquement reconnu comme un caoutchouc il doit être flexible et très deformable élastique et résilient [67]. Le caoutchouc naturel connu sous le nom de NR (natural rubber) provient de la coagulation du latex produit par l'Hevea Brasiliensis. Bien que cet arbre soit natif de l'Amazonie on peut également trouver ses plantations en Asie du Sud-Est exactement en Malaisie en Indonésie et en Thaïlande ainsi qu'en Afrique comme Libéria au Nigéria et en Côte d'Ivoire [33], [58], [59]. En 2009 la consommation mondiale de caoutchouc était d'entour 21,8 millions de tonnes dont 9,6 millions de tonnes de caoutchouc naturel et le reste de matières synthétiques [68]. Le caoutchouc naturel est un polyisoprène de forte masse molaire (>10 g/mol) remarquablement stéréorégulier (100% 1,4-cis) qui admet une à trois unités trans en tete de chaîne. La Figure III.3 montre la structure du cis-1,4-polyisoprène composée d'unités d'isoprène répétitives C_5H_8 . Il adopte une conformation irrégulière à l'état solide est incapable de cristalliser dans des conditions normales, et existe donc sous forme de matériau amorphe et caoutchouteux. En raison de son origine végétale, le latex de caoutchouc naturel (NRL) contient non seulement du cis-1,4-polyisoprène mais aussi des composants non caoutchouteux qui varient selon la source [64], [69].

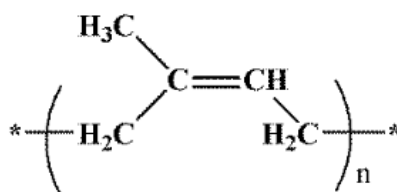


Figure III. 3. Structure du caoutchouc naturel [69]

Le caoutchouc naturel vulcanisé offre une élasticité et une résilience ainsi qu'une grande résistance à la rupture, l'abrasion et à la déchirure. Sa bonne adhérence aux métaux et aux textiles combinés à sa large plage d'utilisation en température (-50°C à 70°C) en fait un matériau essentiel dans la fabrication des pneumatiques [70].

Tableau III. 1. Composition du caoutchouc naturel [59], [70]

Composition	Fraction massique (%)
Particules de caoutchouc	93.7
Lipides	3.4
Protéines	2.2
Carbohydrates	0.4
Autres	0.3

La composition typique du caoutchouc naturel (NR) est présentée dans le tableau III.1. En raison de son origine végétale, bien que la structure du NR soit similaire en ce qui concerne les chaînes de cis-1,4-polyisoprène, la présence de divers composants non caoutchouteux tels que des acides aminés des protéines, glucides, lipides neutres et polaires ainsi que des substances organiques peut modifier sa réactivité chimique et ses propriétés physiques et mécaniques [69].

II.3.2. Le caoutchouc synthétique :

Le caoutchouc synthétique ou artificiel provient de l'industrie pétrochimique. Il a été conçu dans la première moitié du 20^e siècle par le chercheurs allemand Fritz Hofmann. Notamment connus pour ses travaux sur les caoutchoucs synthétiques. Le caoutchouc synthétique confère des propriétés qui augmentent la durée de vie des pneus et améliorant leur résistance au roulement. Il est utilisé davantage dans les zones des pneus qui subissent le plus de contraintes comme les bandes de roulement et contribue aussi à offrir une bonne adhérence. [71]. Parmi les caoutchoucs synthétiques les plus utilisés pour fabriquer les pneus, on trouve plusieurs types courants. Ces matériaux peuvent être regroupés en quatre grandes catégories. [64], [67]:

II.3.3. Les caoutchoucs à usages généraux :

Ils constituent approximativement 12 % de la consommation mondiale et peuvent remplacer le caoutchouc naturel dans toutes ses applications ordinaires. Les principaux types qui représentent environ 82 % de cette consommation mondiale sont le polyisoprène de synthèse (IR) le copolymère butadiène-styrène couramment utilisé dans la fabrication des bandes de roulement de pneus, et le polybutadiène.

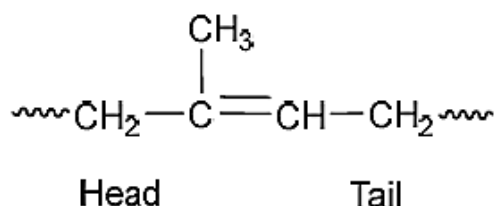


Figure III. 4. Structure du polyisoprène synthétique [72]

Le polyisoprène synthétique (IR) est directement proche au caoutchouc naturel. Il soutient bien la contrainte de traction a une bonne tenue à l'abrasion et résiste au déchirement ainsi absorbe les chocs et permet d'amollissement des vibrations. Toutefois comme le caoutchouc naturel il résiste mal à la lumière à l'ozone et à la chaleur et il n'a aucune résistance aux huiles et aux carburants.

Le copolymère statistique styrène-butadiène (SBR) il conserve sa stabilité lorsqu'il est mélangé avec des huiles minérales ou des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques ou chlorés dans la plage de températures entre -40 °C à +100 °C. Il est principalement employé dans les bandes de roulement des véhicules légers en combinaison avec du caoutchouc naturel en raison de sa grande résistance à l'abrasion au vieillissement et à l'ozone.

Le polybutadiène (PB) est un élastomère dont le 1,4-cis-polybutadiène constitue le principal concurrent du caoutchouc naturel. Il lui est très semblable en termes de haute résistance à l'abrasion de bonne absorption des chocs et de capacité à atténuer les vibrations. En plus il offre une bonne tenue au froid ce qui en fait l'un des meilleurs caoutchoucs d'usage général. Néanmoins sa résistance à la contrainte est inférieure à celle du caoutchouc naturel.

Le (PB) est un thermoplastique dont la température de fusion est de 140 °C. Il présente une mauvaise résistance à la lumière à l'ozone et à la chaleur en raison de son oxydation. Sa faible adhérence sur sol mouillé peut provoquer le phénomène d'aquaplaning. Par conséquent il est souvent mélangé avec le SBR ou le caoutchouc naturel. Ce type de caoutchouc est également utilisé pour la fabrication de ceintures et durites et joints.

II.3.3.1. Les caoutchoucs à usages spéciaux :

Représentant environ 6% de la consommation mondiale ces caoutchoucs sont conçus pour remplacer le caoutchouc naturel dans des applications spécifiques où ils offrent de meilleures performances. Ils se distinguent par des propriétés telles que la résistance aux huiles (copolymère butadiène-nitrile, NBR), l'imperméabilité aux gaz (copolymère isobutène-isoprène, IIR), la résistance à l'ozone (copolymère éthylène/propylène, EPM, et copolymère éthylène/propylène/diène, EPDM), ainsi qu'une excellente résistance au vieillissement et à la chaleur (polychloroprène, CR).

Le caoutchouc nitrile, ou le copolymère de butadiène-nitrile (NBR) (composé à 75% de butadiène en masse), est particulièrement apprécié pour son excellente résistance aux huiles et aux solvants aromatiques. Cependant, il présente des défis de mise en œuvre. Ce type de caoutchouc est également utilisé pour la fabrication des Tuyaux et joints pour carburants, revêtements de cylindre, semelles résistantes aux huiles.

Le caoutchouc butyle ou le copolymère isobutène-isoprène (IIR) est un copolymère de butadiène avec environ 2% d'isoprène. Il présente une excellente résistance aux intempéries à la chaleur au froid, aux bases et aux acides forts ainsi qu'aux diélectriques. Bien que cet élastomère soit peu élastique et ne résiste ni aux huiles ni aux carburants, il se distingue par sa très bonne imperméabilité aux gaz. Son principal usage réside dans la fabrication de chambres à air. En plus le caoutchouc butyle est souvent utilisé comme matériau isolant dans les câbles et trouve d'autres applications dans la fabrication de tuyaux pour la vapeur l'eau chaude et les gaz. Ce type de caoutchouc est également utilisé pour la fabrication des enveloppes interne des pneumatiques.

Les copolymères d'éthylène-propylène-diène monomère (EPDM) sont des élastomères spéciaux. Ces copolymères amorphes sont obtenus en copolymérisant l'éthylène (composant entre 60 et 85 % du terpolymère) et le propylène avec un faible taux de diène non combiné. La polymérisation utilise seulement une des doubles liaisons du diène tandis que l'autre située latéralement à la chaîne moléculaire permet de réaliser une vulcanisation conventionnelle au soufre. Un taux d'insaturation élevé accélère la vitesse de vulcanisation au soufre mais augmente également la sensibilité du matériau au vieillissement. Ces élastomères sont de couleur blanche et se caractérisent par une excellente résistance à l'oxydation (ozone, air), aux intempéries, à la lumière et au froid, ainsi qu'une très bonne résistance aux acides. Ils possèdent des propriétés mécaniques moyennes et sont sensibles aux huiles et aux essences. Ce type de caoutchouc est également utilisé pour la fabrication des joints, profilés, pièces de freinage, câblerie.

II.3.3.2. Les caoutchoucs à usages très spéciaux :

Environ 6% de la consommation mondiale de caoutchouc est dédiée aux caoutchoucs à usages très spéciaux. Ce groupe comprend des types de caoutchouc qui se distinguent par leur exceptionnelle résistance à la chaleur au vieillissement et aux huiles conservant leurs propriétés essentielles même à des températures élevées. Bien que ces matériaux soient très coûteux leur utilisation se limite à des applications très spécifiques telles que les joints, les tubes et d'autres produits soumis à des températures élevées.

II.3.3.3. Les élastomères thermoplastiques TPE :

On distingue deux principales catégories de matériaux : les copolymères, tels que le SBS (styrène-butadiène-styrène), le SIS (styrène-isoprène-styrène), le TPU (polyuréthane thermoplastique), et le PEBA (polyamide-polyéther bloc), qui combinent différentes propriétés élastomériques et thermoplastiques. Ensuite, il y a les mélanges qui comprennent un élastomère souple, vulcanisé ou non, intégré dans une phase thermoplastique rigide, comme les TPO (polyoléfine-EPDM), les TPO vulcanisés (polyoléfine-EPDM vulcanisé dynamiquement), et les mélanges comme le PP/NR vulcanisé (polypropylène-caoutchouc naturel vulcanisé), entre autres exemples.

II.4. Gestion des déchets de pneus

II.4.1. Quantité de pneus usés

Les pneus usagés produisent un volume croissant de déchets ce qui crée un problème environnemental alarmant. Il est habituel de voir des pneus usagés assemblés dans les décharges. Ce cas entraîne des problèmes environnementaux sérieux et il est donc essentiel de procéder à l'échelle mondiale pour résoudre ce problème. Annuellement environ 8 millions de tonnes de pneus usagés sont produits. Différentes approches sont utilisées pour gérer ces pneus en fin de vie : réutilisation, valorisation énergétique et recyclage en matière. En 2021 53,8 millions de pneumatiques ont été mis sur le marché de totalisant plus de 567000 tonnes de matériaux variés [73]. Chaque année plus de 6 pneus arrivent en fin de vie chaque seconde en Europe soit 200 millions de pneus usés. Comme exemple à la France 42000000 de tonnes de pneus finissent chaque année dans des décharges publiques sans compter les milliers de tonnes qui sont jetées illégalement dans des décharges sauvages [74]. En Afrique la gestion des pneus usagés représente un défi majeur et chaque année environ 244 millions de tonnes de déchets solides sont produits sur le continent soit presque le double des chiffres de 2012. Malheureusement seulement 7 % de ces déchets sont recyclés ou récupérés tandis que 69 % sont versés à ciel ouvert et fréquemment brûlés [75].

En Algérie la problématique des pneus usagés est un sujet préoccupant. Selon une étude statistique estimative du gisement des Pneus Usagés Non Réutilisables la quantité générée annuellement est d'environ 1439514 unités soit 25918 tonnes par an. Ces pneus proviennent d'environ 3500000 véhicules en 2007. De plus depuis 2004 l'Algérie importe en moyenne 49620 tonnes de pneumatiques en caoutchouc chaque année selon l'Agence Nationale de Promotion du Commerce Extérieur. Il est essentiel de trouver des solutions durables pour gérer ces pneus usagés en favorisant la valorisation énergétique et d'autres méthodes de traitement respectueuses de l'environnement [65]. Selon l'Agence Nationale des Déchets le pays génère environ 249000 tonnes de déchets pneumatiques par an. Cependant seulement 4 % de ces déchets sont valorisés soit environ 9600 tonnes chaque année. Le reste des pneus usagés est souvent abandonné dans des décharges à ciel ouvert posent des risques environnementaux et sanitaires significatifs. Malgré la présence de quelques initiatives de recyclage celles-ci restent insuffisantes pour faire face au volume croissant de pneus usagés. Des efforts accrus sont nécessaires pour améliorer la collecte le recyclage et la valorisation des pneus usagés afin de réduire leur impact négatif sur l'environnement et de promouvoir une économie circulaire plus durable en Algérie [76], [77].

Les pneus usagés ne se décomposent pas naturellement. Lorsqu'ils s'accumulent dans les décharges ou les dépôts ils peuvent libérer des produits chimiques dans l'air, le sol et l'eau changeant ainsi l'écosystème. Même exposés au soleil les pneus usagés émettent du méthane un gaz à effet de serre qui contribue au changement climatique. En plus les particules de pneus qui se détachent lors de leur usure peuvent avoir des effets nocifs sur les écosystèmes d'eau douce et les estuaires côtiers. Il est donc crucial de trouver des solutions pour gérer correctement les pneus usagés et réduire leur impact environnemental [78], [79].

II.4.2. Effets des déchets de pneumatiques sur l'environnement

L'évolution et l'accroissement du parc automobile produisent chaque année des centaines de millions de pneus usagés à travers le monde produisent ainsi de graves préjudices à l'environnement. Avec la prise de conscience de la communauté internationale, nous avons assisté ces dernières décennies à une évolution de la réglementation encadrant et gérant les divers problèmes engendrés par les déchets pneumatiques. Néanmoins une grande quantité de ces déchets reste sans valorisation en particulier dans les pays en développement et émergents provoquant de sérieux problèmes environnementaux [80].

Les pneus usagés sont des substances non biodégradables et leur inflammabilité et leurs caractéristiques chimiques en font une source principale de fumées dangereuses de plus leurs produits chimiques toxiques s'infiltrant dans le sol et l'eau. Malgré toutes les différentes façons

possibles de gérer les pneus en fin de vie l'approche la plus courante est de les déposer dans des décharges ce qui entraîne une accumulation de déchets. L'élimination inappropriée de grandes quantités de pneus usagés peut causer de graves problèmes environnementaux tels que des incendies Figure III.5, la pollution des sols, etc [66].



Figure III. 5. Incendie de milliers de pneus usagés à Beauceville [81]

II.4.3. Modes de gestion des déchets de pneus

II.4.3.1. Catégories des pneus usagés

Les pneus usagés sont classés en deux catégories. Cette classification est basée sur la profondeur de la sculpture et la totalité de la structure de la carcasse :

- Les Pneus Usagés Réutilisables (PUR) peuvent être sous-classés en deux catégories [64]:
 - Le pneu réutilisable : Habituellement destiné à l'exportation ou à la marché de l'occasion. Il s'agit d'un pneu usagé dont la profondeur de la majorité des sculptures supérieure à 1,6 mm et qui après inspection de la solidité de la structure de la carcasse peut être utilisé en toute sécurité.
 - Le pneu rechapable : Il s'agit d'un pneu usagé qui après inspection de la solidité de la structure de la carcasse peut être soumis à la vulcanisation d'une nouvelle bande de roulement afin de pouvoir être réutilisé. Cette technique permet d'offrir au pneu une seconde voire une troisième vie.
- Les Pneus Usagés Non Réutilisables (PUNR) est désigné un pneu qui ne peut plus assurer la mobilité d'un véhicule motorisé tout en respectant les normes de sécurité requises. La dégradation de ces pneus est généralement telle qu'il est impossible de les reconditionner pour

une nouvelle utilisation [64], [65]. Les PUNR ne peuvent pas être rechapés. Cependant ils peuvent être valorisés de différentes manières : énergétiquement (dans les cimenteries, les centrales thermiques), comme matière première (sous forme de granulats, de fibres) ou simplement éliminés dans les décharges [82].

II.4.3.2. Les filières de valorisation des pneumatiques usagés

❖ Le rechapage

Le processus de rechapage est une technique qui augmente la durée de vie du pneu et consiste principalement en la remise nouvelle. Pour la production d'un nouveau pneu de voiture il faut 28 litres d'huile sont nécessaires mais pour le rechapage d'un pneu de voiture uniquement 5,5 litres d'huile sont utilisés. Pour rechaper un pneu il est nécessaire que la carcasse du pneu soit en bon état sinon ce processus n'est pas applicable au des pneus usagés. Le rechapage du pneu de voiture n'est effectué qu'une seule fois dans le cycle de vie d'un pneumatique. Dans le technique de rechapage la vieille bande de roulement du pneu est retirée par un processus appelé le détalonnage. Après ce détalonnage une surface plane est formée sur laquelle une nouvelle bande de roulement est vulcanisée [65], [83].

❖ Le broyage

Le broyage des pneus usées consiste à déchiqueter les pneus en particules de différentes formes et tailles. Aujourd'hui le broyage des pneus permet d'obtenir des grains de caoutchouc recyclé d'une bonne qualité après avoir séparé les textiles et les fils. L'extraction de l'acier se fait à l'aide d'aimants tandis que les fibres de tissu sont récupérées par des aspirateurs industriels. Grâce aux progrès des broyeurs de caoutchouc il est désormais possible de produire des particules de caoutchouc issues du broyage des pneus contenant des quantités négligeables de fils métalliques avec un taux résiduel inférieur à 0,05 %.

Ces grains de caoutchouc recyclé peuvent être utilisés dans diverses applications notamment comme drain dans terrains sportifs et pour contrôler l'isolation thermique. De plus les fils métalliques récupérés des pneumatiques ont été utilisés sous forme de fibres dans les bétons pour améliorer leurs propriétés mécaniques [82], [83].

Le Tableau III.2 montre des classifications de déchets pneumatiques. Elles sont basées sur les dimensions de particules obtenues après le déchiquetage.

Tableau III. 2. Classification des déchets pneumatiques en Europe, Post-Consumer tirée de Maerls, CEN (2004), et aux Etats Unis, ASTM (1998) [84]

prEN 14243:2004 (Europe)		ASTM D6270-98 (Etats Unis)	
Désignation	Dimension	Désignation	Dimension
poudre fine	< 500 μ m	granulé	425 μ m- 12mm
poudrette	< 1 mm	broyé	425 μ m- 2mm
granulé	1-10 mm	copeaux	12-50 mm
copeaux	10-50 mm	déchiqueté	50- 305 mm
déchiquetât	50-300 mm	copeaux rugueux	50x50x50 < X < 762<50<100

Dans une étude récente de Flores-Medina et al. [85] ont établi une classification simple fondée sur l'homogénéité du produit obtenu après le déchiquetage Figure III.6. Les particules de caoutchouc issues de cette étape (granulats, poudrette) peuvent être utilisées comme granulats dans des bétons destinés aux revêtements aux salles de sport aux aires de jeux ou aux routes. Elles servent également à la fabrication de tapis et de semelles de chaussures.

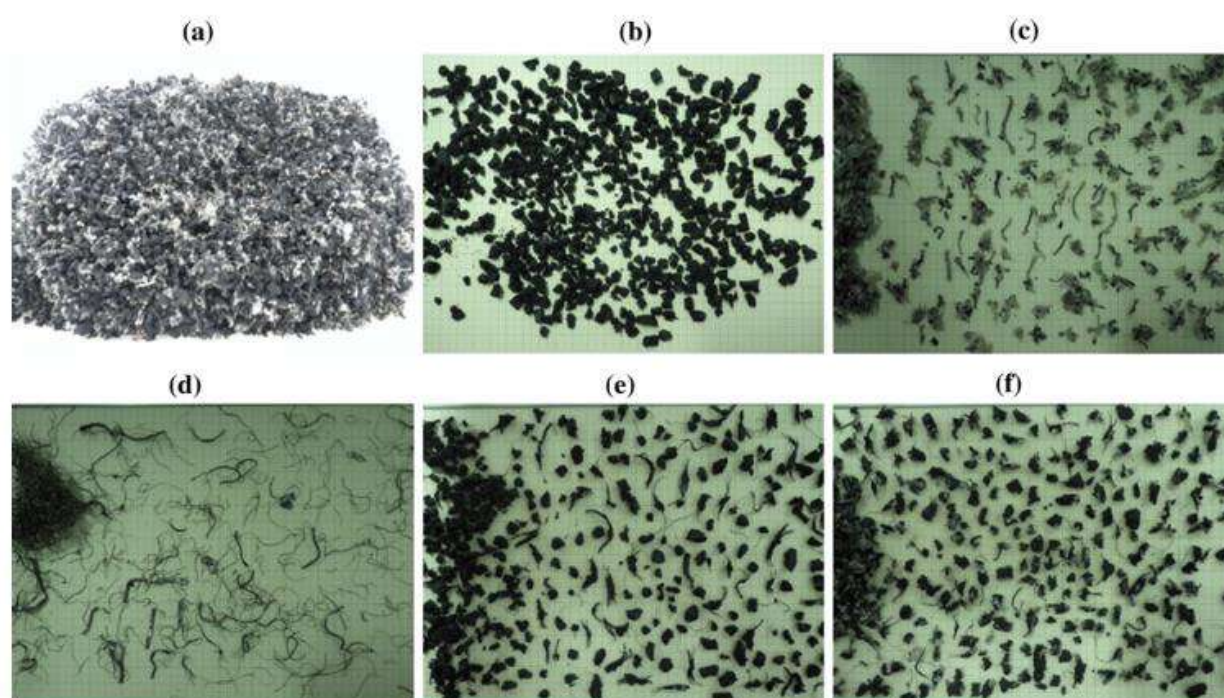


Figure III. 6. Formes de déchets pneumatiques (a) avant classification ; (b) particules de caoutchouc ; (c) textile, caoutchouc et fibres d'acier ; (d) fibres d'acier ; (e & f) fibres d'acier avec caoutchouc [85]

❖ La valorisation énergétique

L'utilisation des pneus usagés comme combustible de pour production d'énergie est notamment connue sous le nom de récupération d'énergie. Cette technique a été introduit en 1865 à Grande-Bretagne avec le "British Destructor" et ainsi exporté aux États-Unis et après en Europe. De plus l'incinération est largement utilisée dans de nombreux pays développés particulièrement ceux ayant peu d'espace pour les décharges comme le Japon et plusieurs pays européens. La Chine comme exemple compte plusieurs usines d'incinération domestique dont celle de Shanghai qui est supposée être la plus grande du pays. Cette installation a une capacité de traitement quotidienne de 3000 tonnes de déchets et environ 270 millions de kilowattheures d'électricité par an [86]. L'utilisation des pneus usagés comme carburant dans les cimenteries aussi présente plusieurs avantages. D'abord leur pouvoir calorifique est élevé: un kilogramme de déchets pneumatiques peut fournir jusqu'à 32 mégajoules (MJ) d'énergie. Comparé au charbon qui a un pouvoir calorifique nettement inférieur les pneus usagés sont compétitifs en tant que source d'énergie. De plus la combustion des pneus dans les fours à ciment est respectueuse de l'environnement. Elle émet beaucoup moins de poussières de dioxyde de carbone et d'oxydes d'azote par rapport à la combustion du charbon. De plus elle génère moins de métaux lourds comme le zinc [83].

❖ La valorisation sous forme de matières premières

Poudrettes : Ce sont des particules de caoutchouc dont les dimensions sont inférieures à 2 mm. Leur coût de production varie en fonction de leur finesse de leur composition chimique et de la présence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges dans des mélanges pour produire des pièces ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées. Par exemple, elles sont employées dans la fabrication de bandages et de roues pleines (caddies, poubelles, tondeuses, brouettes...), ainsi que pour la modification des revêtements routiers (réduction du bruit et de l'aquaplanage grâce à un drainage en surface) [65]. Les poudrettes peuvent être obtenues par plusieurs méthodes. En général les caoutchoucs sont fragmentés en morceaux de 1 à 5 mm de diamètre. Ces morceaux sont ensuite mélangés avec d'autres réactifs dans une extrudeuse bi-vis ou dans un mélangeur interne pour obtenir des poudrettes de 300 à 500 µm de diamètre. Il existe aussi des méthodes plus anciennes pour produire des poudrettes, utilisant soit des températures élevées, soit des températures très basses (méthodes cryogéniques) [64].

Granulés : Ces particules de caoutchouc sont plus grandes que les poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés avec des résines, colorés ou non et permettent de réaliser facilement des feuilles ou des plaques par moulage. Ils sont utilisés dans les aires de jeux, les pavés antidérapants,

et les revêtements pour terrains de sport (surfaces souples, réduction des nuisances sonores...) [64], [65].

❖ Pneus entiers en technique Pneusol

Le “Pneusol” est un mélange de pneus et de sol utilisé comme renfort du sol Figure III.7. Les pneus, soit entièrement, soit partiellement découpés, sont associés en nappes ou en couches superposées à l’aide d’attaches métalliques. Cette technique permet de renforcer la structure du sol pour supporter des efforts de traction importants [87].



Figure III. 7. Chantier expérimental Pneusol à Bou-Smail (à gauche) [88] ; Ouvrage de Mostaganem RN11 (à droite) [87]

En outre les pneus usagés présentent une résistance à la déformation et une forte porosité ce qui les rend intéressants pour la construction de bassins de rétention des eaux pluviales. Ils confèrent à la structure une rigidité tout en conservant un volume d’eau important le tout à moindre coût par rapport à d’autres matériaux [89].

II.5. Valorisation des pneus usées dans la couche de roulement

L’enrobé modifié par caoutchouc peut être préparé par trois procédés : à sec, humide et par mélange terminal. Dans le procédé à sec le caoutchouc agit comme un agrégat de remplacement fonctionnant essentiellement comme un agrégat élastique. Le caoutchouc et l’agrégat chaud sont mélangés avant d’être mélangés avec le bitume. Ce procédé est limité aux applications des enrobés à chaud. Dans le procédé humide le caoutchouc fin est mélangé avec le bitume à une température élevée pendant une courte période avant d’être mélangé avec l’agrégat chaud fonctionnant essentiellement comme un modificateur de liant majeur pour améliorer les propriétés du bitume. Pour le mélange terminal le caoutchouc à granulométrie est digéré avec le bitume sur une période prolongée. La différence notable entre le procédé humide et le mélange terminal est que le premier est un mélange à 2 phases (non homogène) (composé du caoutchouc solide et du bitume liquide)

tandis que le second est un mélange à 1 phase (homogène) (le caoutchouc est dissous par le bitume). [66], [90]

II.5.1. Effet de la valorisation des pneus usés sur le liant bitumineux

L'utilisation de caoutchouc broyé provenant de pneus usagés est depuis longtemps soutenue par les agences environnementales et gouvernementales pour réduire le problème de l'élimination des pneus usagés. Depuis le début des années 1950 des tentatives ont été faites pour Incorporer du caoutchouc naturel comme matériau flexible dans le système de chaussée. Dans les années 1960 CH McDonald a introduit une procédure pour incorporer du caoutchouc dans le liant d'asphalte par ce qui est maintenant connu sous le nom de procédé humide. En 2008 aux États-Unis la Louisiane a opté pour l'utilisation de caoutchouc broyé dans les mélanges d'asphalte pour pallier une pénurie de liant d'asphalte modifié aux polymères [91]. Les pneus usagés sont introduits dans la construction de chaussées sous forme de particules de caoutchouc recyclé de tailles allant de 4,75 mm à 0,075 mm. Le CR est obtenu en broyant mécaniquement des morceaux de pneus déchiquetés à différentes tailles par des procédés de broyage à température ambiante et cryogénique sous différentes conditions de production. La Figure III.8 montre la morphologie de surface du CR à travers un esaii MEB. Les particules de CR obtenues par broyage à température ambiante ont des formes irrégulières et des surfaces rugueuses et poreuse ce qui leur confère des surfaces spécifiques plus élevées et capable d'absorber l'huile et la résine dans le bitume. Cependant le CR a une texture lâche et une surface poreuse ce qui augmente la possibilité de vieillissement sous l'exposition à la chaleur et à l'oxygène. Les particules de CR peuvent immédiatement gonfler lorsqu'elles sont immergées dans le bitume et ces pores seront remplis de composants légers pour former un ensemble dense [66].

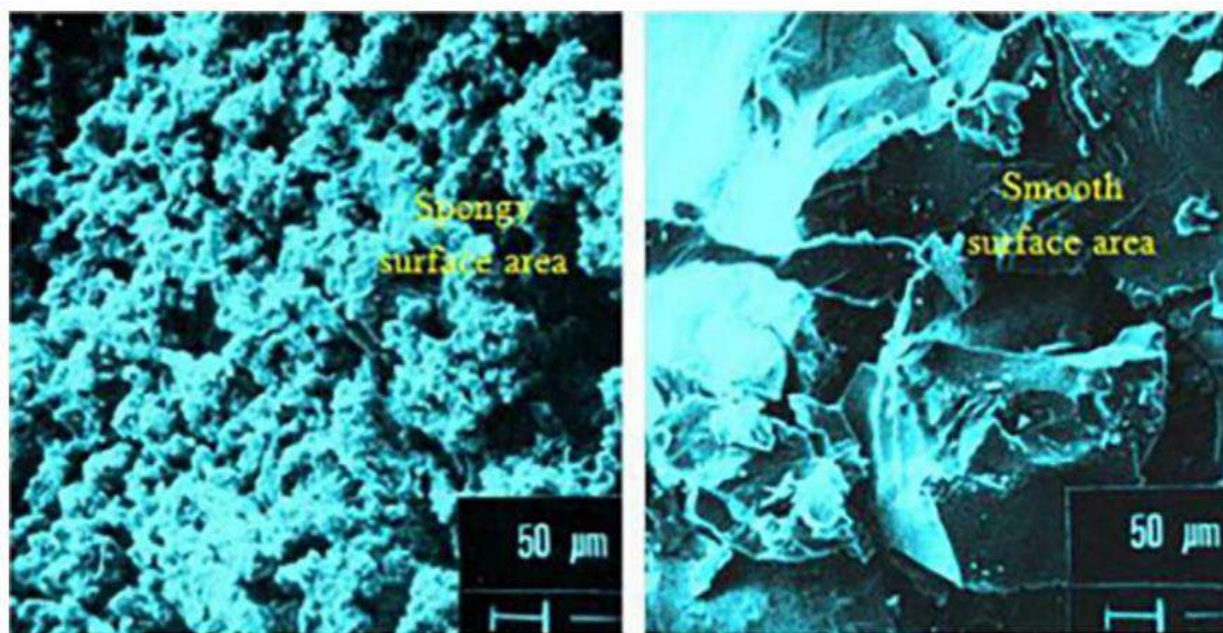


Figure III. 8. CR produit par broyage à température ambiante (à gauche) et par broyage cryogénique (à droite) [66]

L'ajout de caoutchouc améliore la performance à haute température du liant bien que le type de caoutchouc, la teneur, la taille des particules et le temps de réaction soient des facteurs influençant le niveau d'amélioration. L'augmentation de la rigidité a un effet positif sur la performance à haute température du liant modifié au caoutchouc. [92]

Sheng et al. [93] ont évalué la performance du bitume caoutchouté fabriqué avec divers contenus de poudre de caoutchouc (liant en caoutchouc 20 mailles, liant en caoutchouc 40 mailles) sous différentes conditions : temps et température de cisaillement, vitesse de cisaillement et temps de développement.

Les Figure III.9 et III.10 montrent les résultats des essais conventionnelles du bitume en fonction de la vitesse et la température de cisaillement. Les résultats indiquent que le taux de cisaillement et la température de cisaillement ont un effet négligeable sur la pénétration à l'aiguille. Le point de ramollissement et la ductilité ont montré des changements semblables à mesure que le taux de cisaillement et la température accroissant. Le point de ramollissement a augmenté avec l'augmentation du taux de cisaillement de 3000 tr/min à 5000 tr/min et de la température de cisaillement de 150 °C à 170 °C puis il a maintenu une légère augmentation avec l'augmentation du taux de cisaillement de 5000 tr/min à 9000 tr/min. cependant a diminué avec l'augmentation de la température de cisaillement de 170 °C à 190 °C. La ductilité a varié de manière similaire au point de ramollissement avec la seule différence étant la réduction relativement petite lorsque la température de cisaillement augmentait de 170 °C à 190 °C. Les valeurs maximales du point de

ramollissement et de la ductilité à 5 °C ont été atteintes lorsque la température de cisaillement a atteint 170 °C à 180 °C.

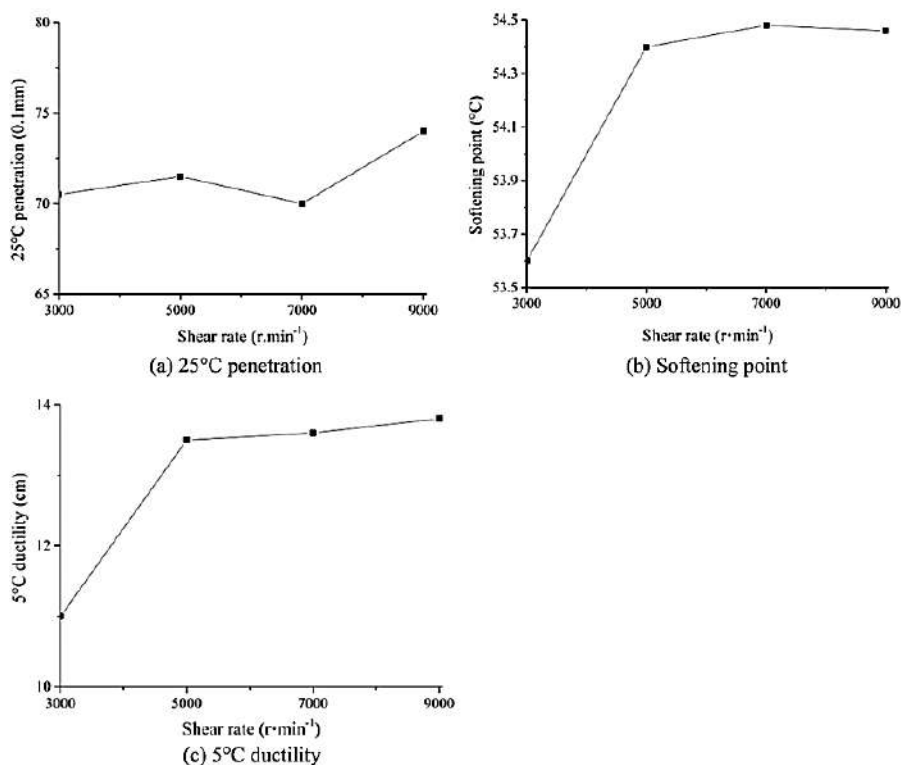


Figure III. 9. Effet de la vitesse de cisaillement sur la performance de base [93]

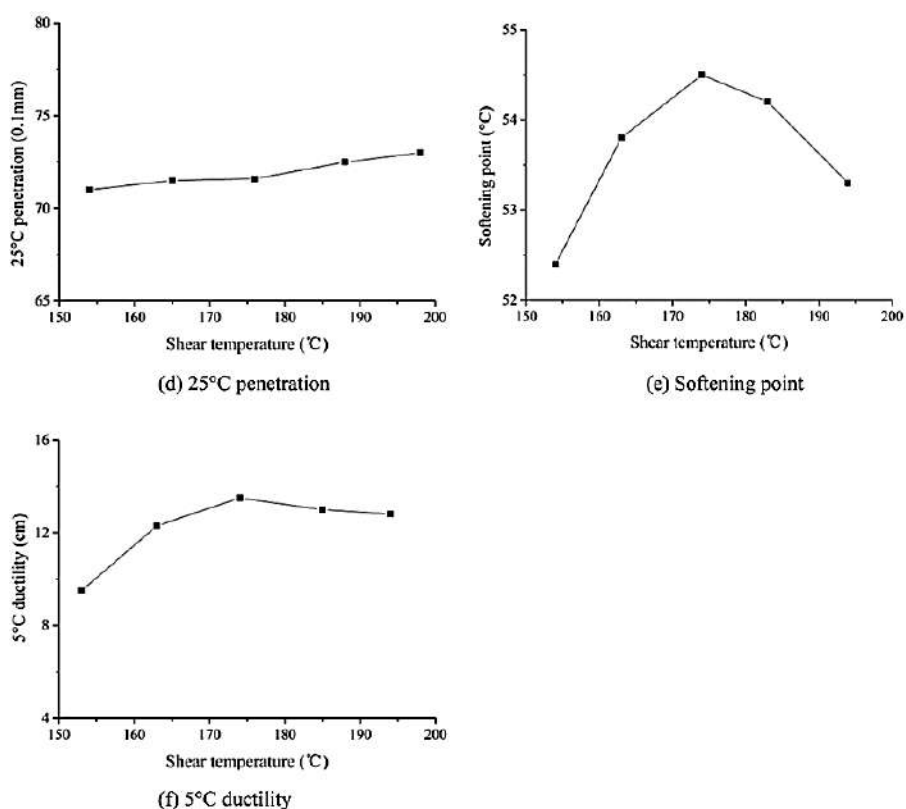


Figure III. 10. Effet de la température de cisaillement sur la performance de base [93]

Les Figures III.11 et III.12 montrent les effets du temps de cisaillement et du temps de développement sur les caractéristiques du liant. Les données indiquent que ces deux paramètres ont un impact évident sur les propriétés avec des tendances de variation similaires pour les indices de performance de base. Les résultats montrent que le temps de cisaillement et le temps de développement ont peu d'impact sur la pénétration. Le point de ramollissement et la ductilité ont montré des changements similaires. Les valeurs maximales du point de ramollissement et de la ductilité ont été observées lorsque le temps de cisaillement et le temps de développement atteignaient entre 45 et 60 minutes.

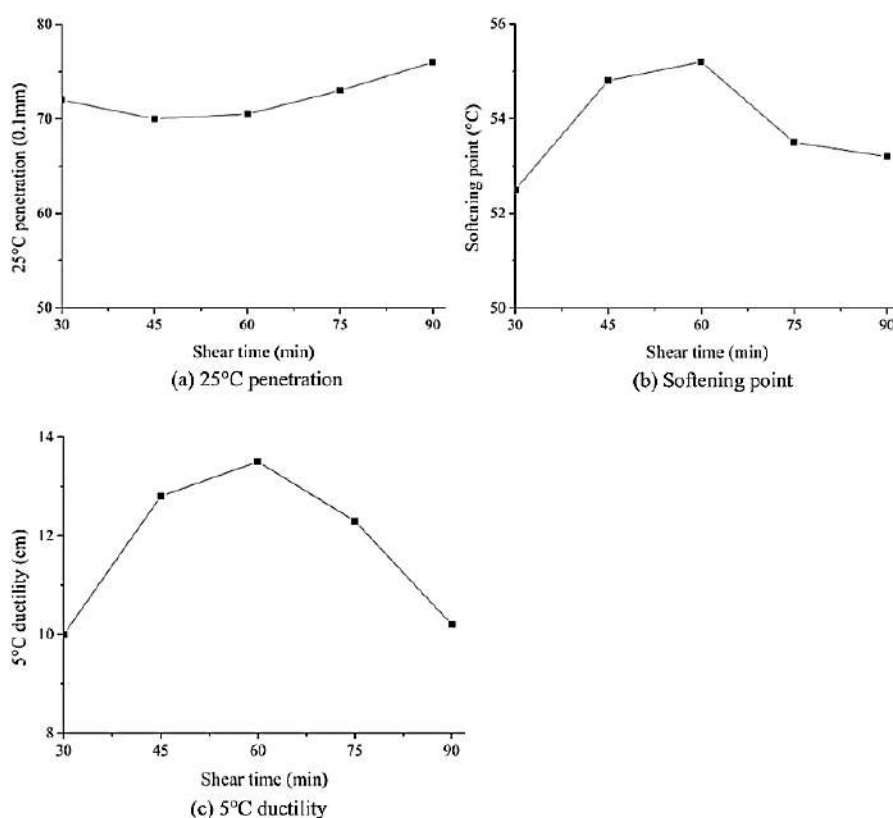


Figure III. 4. Effet de temps de cisaillement sur la performance de base [93]

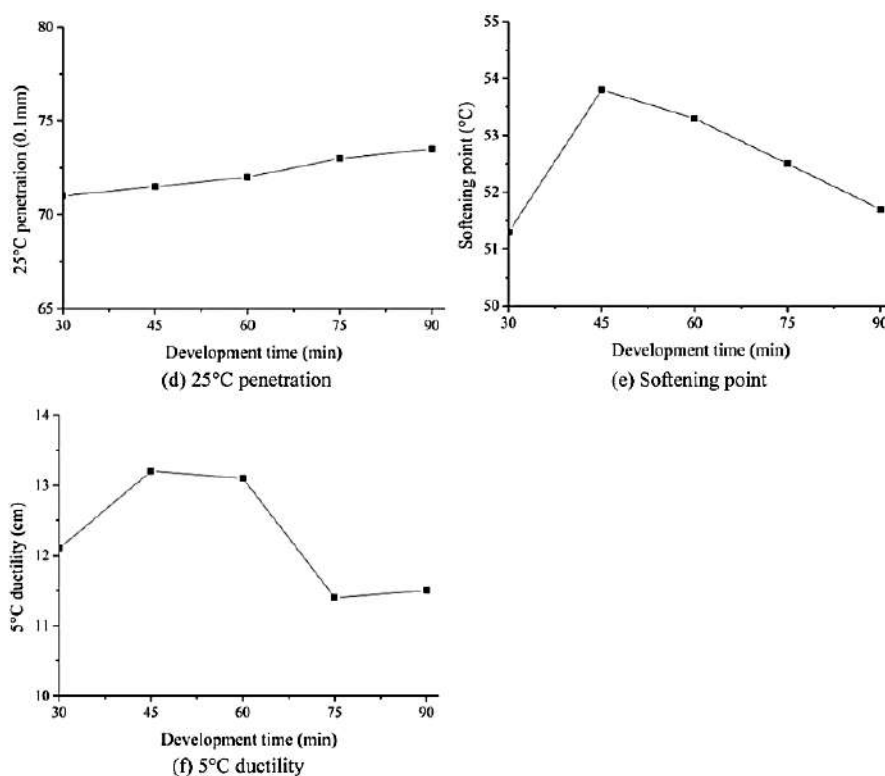


Figure III. 5. Effet de temps de développement sur la performance de base [93]

Dans leur étude, Yigezu et al. [94] ont évalué l'effet de l'ajout de caoutchouc issu de pneus usés dans le bitume sur les performances de béton bitumineux. Ils ont testé différents pourcentages de caoutchouc (0 %, 5 %, 10 %, 15 %, 20 %) pour en analyser les propriétés rhéologiques de bitume, notamment la pénétration, le point de ramollissement et la ductilité. Les résultats montrent qu'une augmentation du taux de caoutchouc réduit la pénétration de 68,5 mm à 58,5 mm (Figure III.13) indiquant un bitume plus dur et moins sensible aux variations de température.

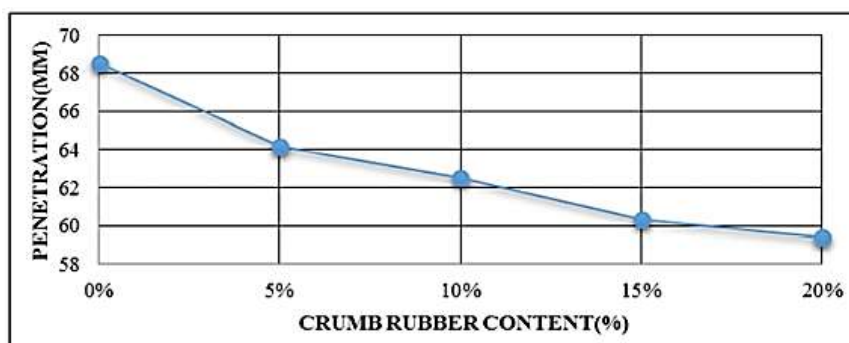


Figure III. 13. Essai de pénétration avec différentes quantités de poudrette caoutchouc [94]

La Figure III. 14 présente l'évolution du point de ramollissement du bitume en fonction du teneur de caoutchouc recyclé ajouté. Une augmentation progressive et quasi linéaire de ce paramètre : il passe d'environ 46 °C pour le bitume non modifié à environ 53 °C lorsque 20 % de caoutchouc est incorporé. Cette hausse indique une amélioration de la résistance thermique du liant bitumineux. En effet, un point de ramollissement plus élevé signifie que le bitume devient moins sensible aux fortes températures, ce qui limite les risques de déformation des chaussées.

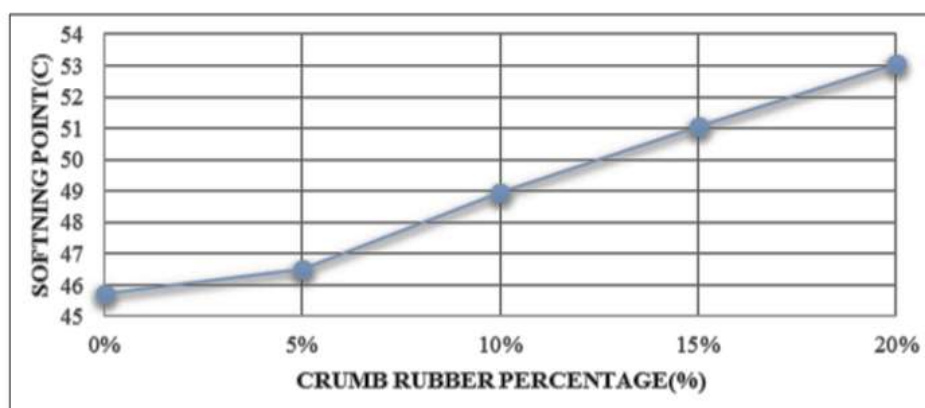


Figure III. 14. Essai de TBA avec différentes quantités de poudrette caoutchouc [94]

Une étude de Kebaili et al [95] met l'accent sur l'analyse du comportement de deux types de bitume pur 40/50 modifiés par l'ajout de deux variétés de poudres fines de caoutchouc ayant des granularités différentes.

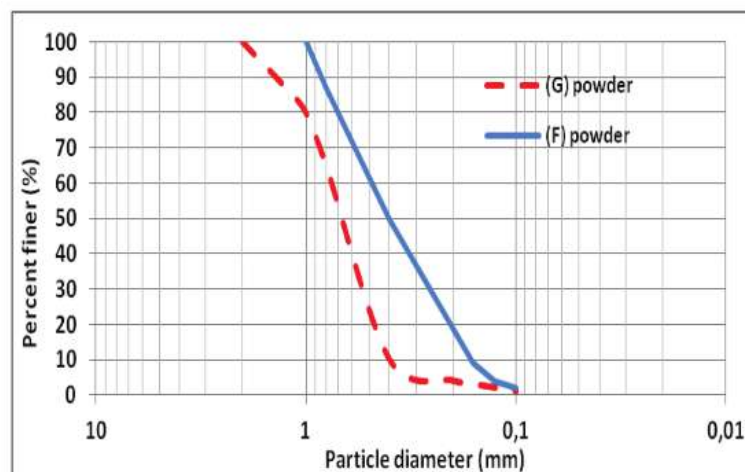


Figure III. 6. Courbe granulométrique des poudrettes de caoutchouc étudiées par Kebaili et al [95]

Suivant la Figure III.16 l'ajout de poudre fine ou grossière au bitume a entraîné une réduction de la pénétrabilité avec l'augmentation du contenu en poudre indiquant que la pénétrabilité et le contenu en poudre sont inversement proportionnels pour les deux types de bitume. La réduction de la pénétrabilité est similaire pour les deux bitumes testés.

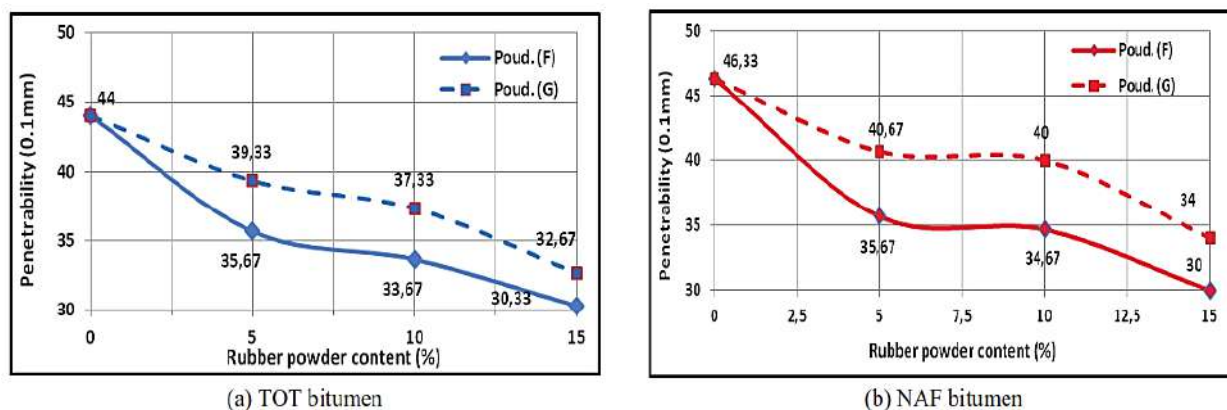


Figure III. 7. Effet des poudrette F et G sur la pénétrabilité des bitumes [95]

Selon la Figure III.17, les chercheurs ont également noté que la température de ramollissement (TBA) et le contenu en poudre sont proportionnels. L'augmentation de la poudre fine entraîne une augmentation de la TBA pour les deux types de bitume. L'augmentation de la TBA entre 0 et 15 % de poudre fine varie de 14 % à 19 % selon le type de bitume. Cependant la variation de la TBA dans l'intervalle de 5 à 10 % de poudre fine est pratiquement négligeable. De plus Kebaili et al ont également noté qu'une courbe en cloche reflète la variation de la TBA du bitume en fonction du contenu en poudre (G). La TBA augmente d'environ 11 % dans l'intervalle de 0 à 5 %, puis diminue de manière moins accentuée. Un maximum de la TBA est enregistré autour de 6 % de poudre (G).

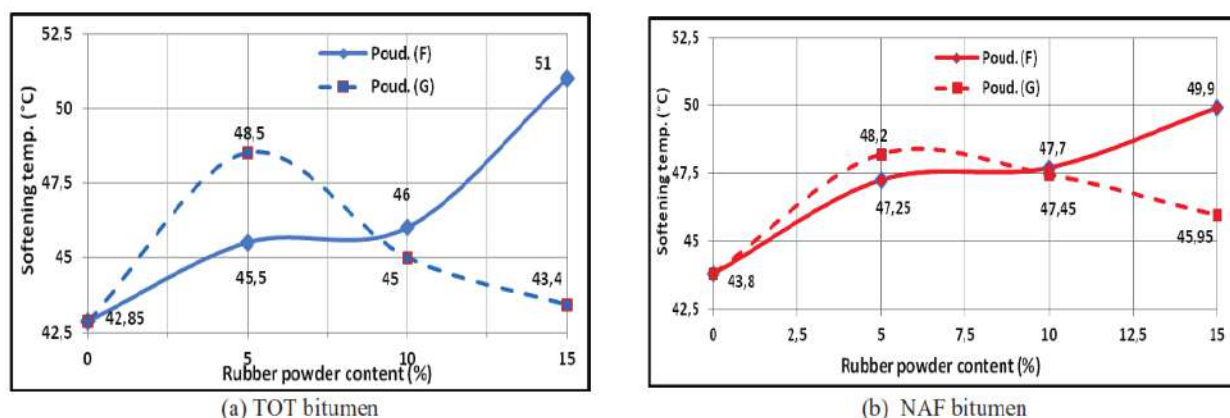


Figure III. 8. Effet des poudrette F et G sur le point de ramollissement des bitumes [95]

Une étude de Chang et al. [96] a utilisé trois types de caoutchouc recyclé avec des compositions et des morphologies différentes pour modifier deux bitumes (bitumes A et B avec un indice de pénétration de 70 (0,1 mm) et 90 (0,1 mm)). Selon la Figure III.18 on remarque qu'avec l'augmentation de la température la viscosité de tous les liants a diminué mais celles des liants modifiés au caoutchouc ont diminué plus lentement et ont eu tendance à être moins sensibles au

changement de température lorsque celle-ci dépassait 180 °C en raison de la fonction des particules de caoutchouc recyclé.

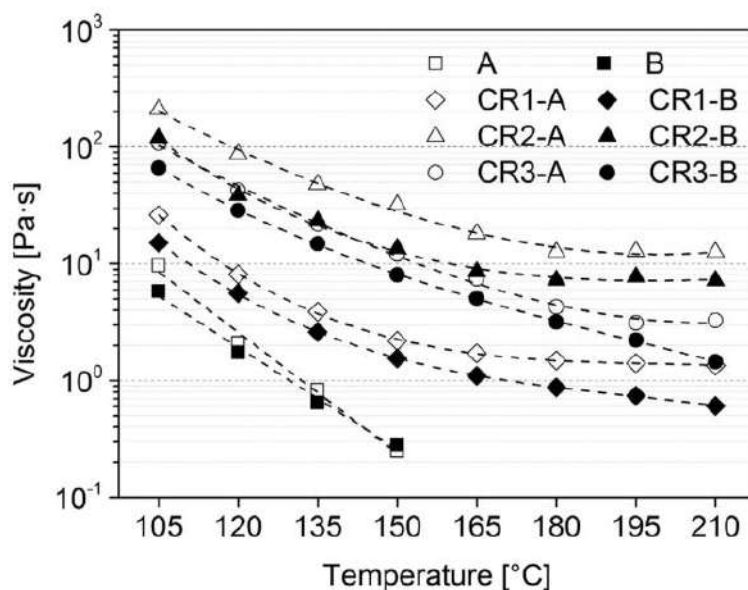


Figure III. 9. Viscosité des bitumes et des bitumes modifiés au caoutchouc [96]

Les chercheurs ont aussi montré que comme indiqué dans la Figure III.19, l'ajout de caoutchouc a diminué la rigidité en flexion des bitumes. Cela indique que l'ajout de caoutchouc peut augmenter significativement la flexibilité du liant et améliorer sa résistance à la fissuration à basse température.

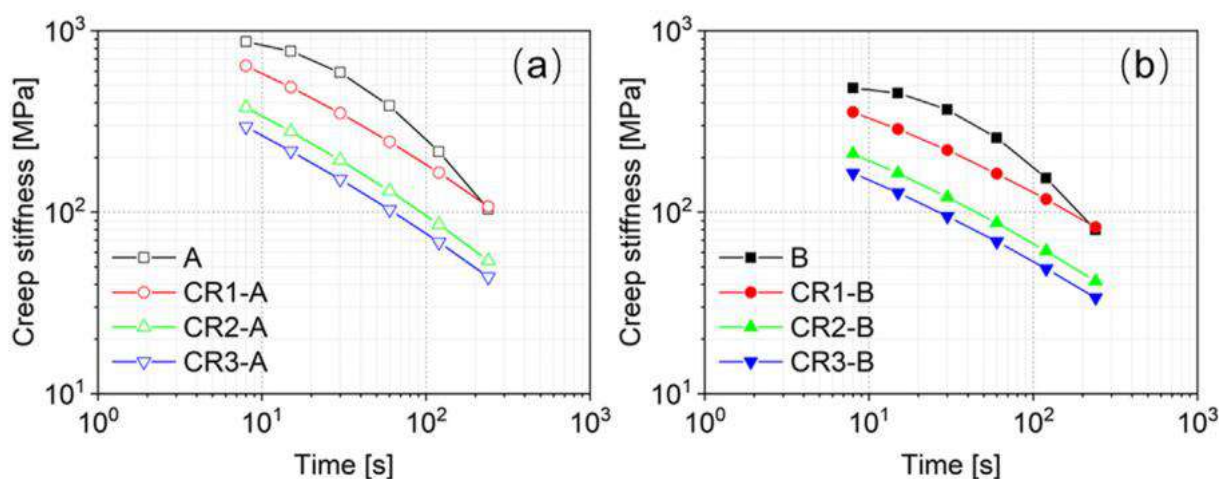


Figure III. 10. Rigidité en flexion (a) bitume A ; (b) bitume B [96]

Zhanyong et al. [97] ont développé une méthode de modification intégrée en utilisant proportionnellement du caoutchouc recyclé provenant de pneus de véhicules et du polyéthylène (PE) issu de films plastiques de serre usagés dans le bitume afin de modifier ses performances

pour les revêtements routiers. Les auteurs ont mesuré les propriétés physiques conventionnelles telles que le point de ramollissement et la pénétration et les résultats sont présentés respectivement dans le Figure III.20 montre que le point de ramollissement augmente avec l'ajout de caoutchouc ou de PE, indiquant ainsi une amélioration des performances à haute température. En revanche, la Figure III.21 révèle que les résultats de pénétration suivent une tendance inverse avec une diminution des valeurs en présence de caoutchouc ou de PE. L'ajout de caoutchouc entraîne l'absorption de la phase huileuse par les particules ce qui augmente la composante d'asphalte du bitume et par conséquent sa rigidité. Les particules de PE sont gonflées par le composant huileux formant deux phases continues entrelacées ce qui améliore la rigidité et la résistance à l'orniérage. Les bitumes modifiés au PE présentent ainsi un point de ramollissement significativement plus élevé et une pénétration plus faible comparés aux bitumes modifiés au caoutchouc.

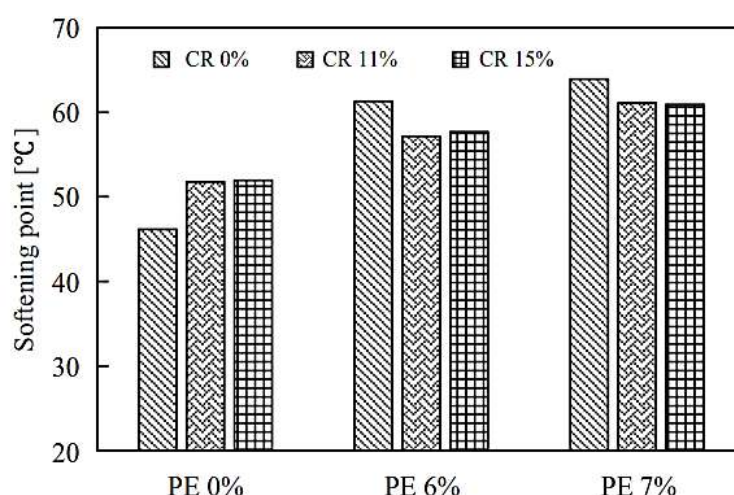


Figure III. 11. Point de ramollissement du bitume avant et après modification [97]

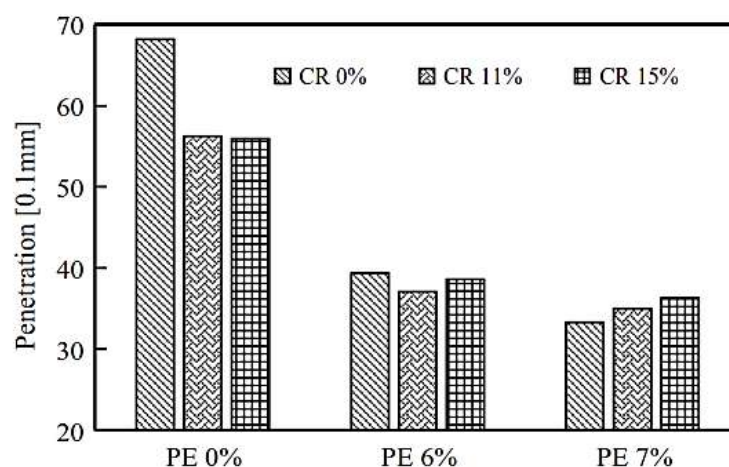


Figure III. 21. Pénétration du bitume avant et après modification [97]

Les chercheurs ont aussi réalisé le test BBR à 18 °C pour évaluer les performances à basse température du bitume en mesurant la rigidité en flexion présentées dans la Figure III.22. Un bitume avec une rigidité en flexion plus faible et/ou des valeurs m plus élevées est considéré comme ayant de meilleures performances à basse température. L'ajout de caoutchouc provoque une diminution régulière de la rigidité en flexion. Il est à noter qu'à une teneur en caoutchouc augmentée à 15 % la rigidité en flexion du bitume modifié peut diminuer presque autant que celle du bitume modifié au SBS. Les résultats montrent que le caoutchouc améliore la flexibilité du bitume et conduit à de meilleures performances à basse température.

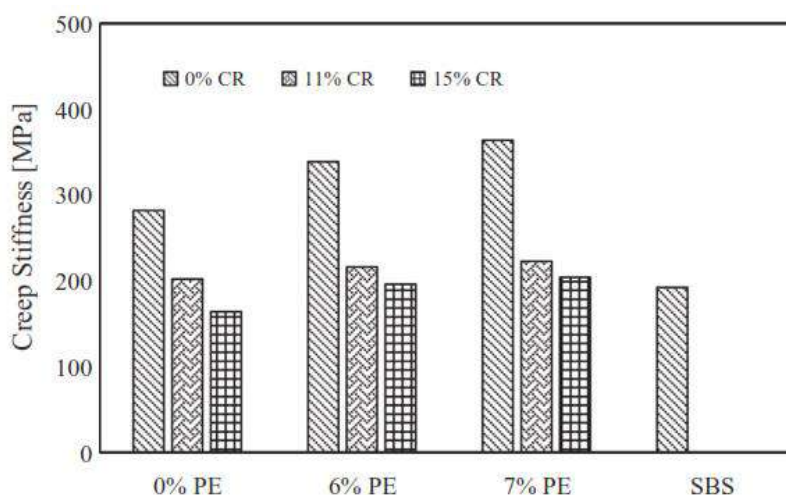


Figure III. 22. Les valeurs de rigidité en flexion du bitume avant et après modification à -18 °C [97]

Une recherche de Shengjie [98] vise à étudier les facteurs influent sur le liant modifié par caoutchouc granulé. Le liant est produit par de caoutchouc granulé par différentes températures de malaxage (160, 180, 200 et 220 °C) différentes mailles de caoutchouc granulé (40, 60, 80, 100) et différents pourcentages de caoutchouc (15, 20, 25 et 30 % en poids du liant bitumineux). Les résultats de cette étude indiquent que les températures de mélange, les mailles de caoutchouc et les pourcentages de caoutchouc ont une grande influence sur les propriétés du liant bitumineux.

Comme présentent les Figure III.23 et III.24 la pénétration la ductilité le point de ramollissement et la récupération élastique sont nettement affectés par les températures de mélange. Il est important de noter qu'en dessous de 180 °C ces propriétés s'améliorent avec l'augmentation de la température de mélange. Une fois que la température de mélange dépasse 180 °C le point de ramollissement et la récupération élastique commencent à montrer une tendance à l'abaissement tandis que la pénétration et la ductilité continuent d'accroître mais à une cadence plus lente. Ces observations soulignent l'importance de contrôler régulièrement la température lors de la

production de liants modifiés par caoutchouc pour optimiser leurs propriétés et garantir une performance améliorée des mélanges bitumineux.

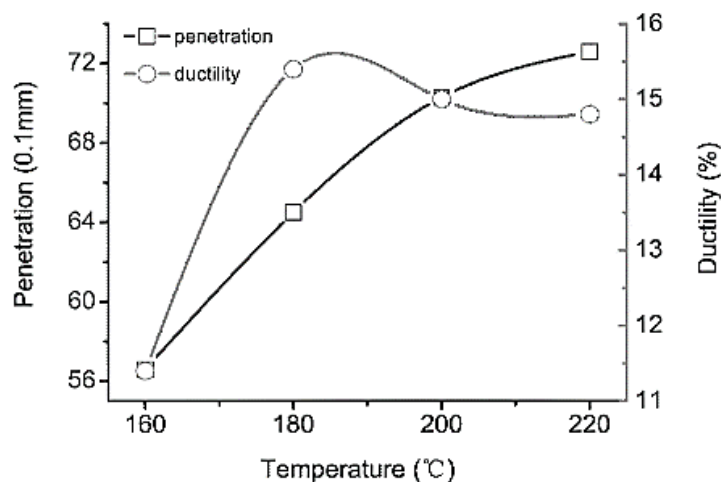


Figure III. 12. Effet de température sur la pénétrabilité et la ductilité de bitume [98]

Lorsque la température de mélange est inférieure à 180 °C la réaction de mélange s'accélère le caoutchouc absorbe les constituants légers du liant bitumineux ce qui affecte les propriétés d'ingénierie du modificateur de caoutchouc granulé et entraîne une augmentation du point de ramollissement, de la pénétration et de la ductilité. Mais lorsque la température dépasse 180 °C la diminution de la pénétration et de la ductilité pourrait être liée à l'évaporation des constituants légers absorbés par le caoutchouc rendant le liant bitumineux plus dur et plus cassant.

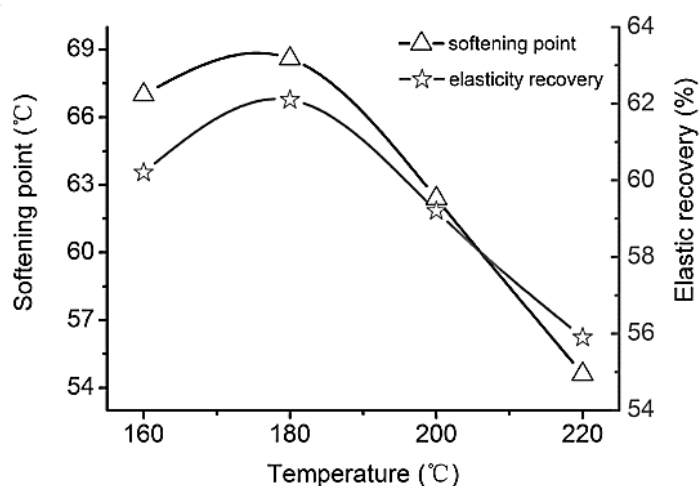


Figure III. 13. Effet de température sur la TBA et la récupération élastique de bitume [98]

Comme indiqué dans les Figure III.25 et III.26 lorsque le taux en caoutchouc est inférieur à 25 % le point de ramollissement, la ductilité et la récupération élastique augmentent avec l'augmentation du caoutchouc. Cela indique qu'une quantité appropriée de caoutchouc granulé est inférieure à 25

% permet une meilleure absorption des constituants légers par le caoutchouc. Cependant il est également observé que la pénétration diminue à mesure que le contenu en caoutchouc granulé augmente. Cette diminution peut s'expliquer par le fait que le caoutchouc absorbe une grande quantité de constituants légers rendant la phase résiduelle du liant bitumineux plus rigide. De plus les particules de caoutchouc elles-mêmes sont rigides ce qui affecte le test de pénétration réalisé sur le bitume modifié par caoutchouc. Lorsque le contenu en caoutchouc dépasse 25 % la relation entre la ductilité, la récupération élastique et le taux en caoutchouc granulé n'est plus la même qu'auparavant. Ces résultats soulignent l'importance de trouver un équilibre dans la formulation des liants modifiés par caoutchouc granulé pour optimiser les propriétés du liant tout en évitant les effets négatifs d'un excès de caoutchouc.

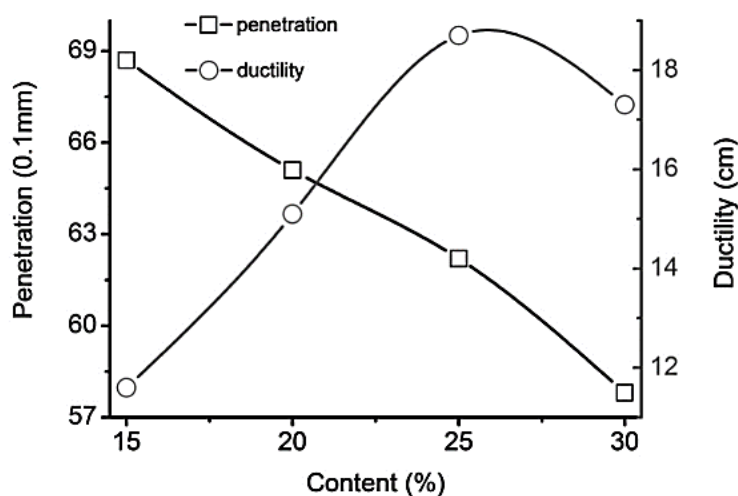


Figure III. 14. Effet de taux de caoutchouc sur la pénétrabilité et la ductilité de bitume [98]

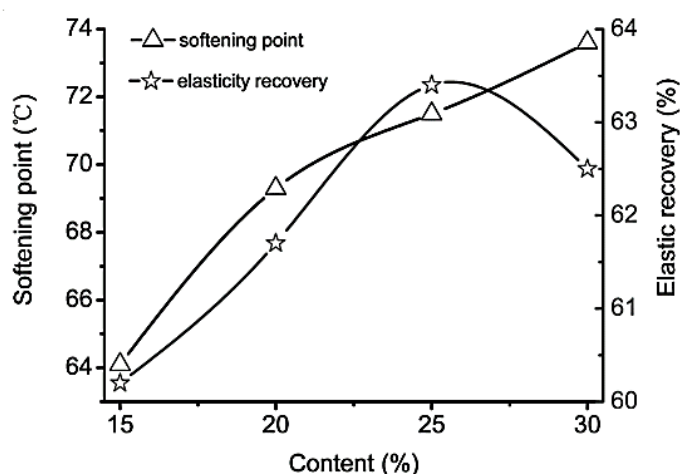


Figure III. 15. Effet de taux de caoutchouc sur la TBA et la récupération élastique de bitume [98]

Haopeng et al. [99] ont mené une étude approfondie pour examiner les effets du vieillissement à court et à long terme en laboratoire sur la chimie et la rhéologie du bitume modifié par caoutchouc granulé. Les résultats de leur recherche ont révélé que les liants caoutchoutés montrent une meilleure résistance au vieillissement par rapport au bitume pur ainsi que le moindre changement dans les paramètres rhéologiques. Une résistance accrue contre le vieillissement a été obtenue en augmentant la teneur en caoutchouc.

Le vieillissement est connu pour modifier les propriétés rhéologiques du bitume provoquant une augmentation du module complexe et une diminution de l'angle de phase à certaines fréquences. La Figure III.27 présente les courbes maîtresses du module complexe et de l'angle de phase du bitume pur et du bitume modifié avec différentes teneurs en caoutchouc à la fois dans des états frais et vieillis. En général avec l'augmentation du degré de vieillissement (du court au long terme) la courbe maîtresse du module complexe se déplace vers le haut tandis que la courbe maîtresse de l'angle de phase se déplace vers le bas ce qui indique une réponse plus rigide et plus élastique du bitume après vieillissement. Les écarts entre les courbes maîtresses du module complexe pour différents états de vieillissement deviennent plus petits avec l'ajout de caoutchouc dans le bitume. Lorsque la teneur en caoutchouc atteint 22% les courbes maîtresses du module complexe des bitumes modifiés au caoutchouc frais et vieillis se chevauchent presque indiquant une moindre influence du vieillissement. Pour des teneurs élevées en CRM de 15% et 22% les courbes maîtresses de l'angle de phase des bitumes modifiés au caoutchouc dans les états frais et vieillis étaient entrelacées ce qui montre la complexité de la structure chimique du bitume modifié au caoutchouc vieilli.

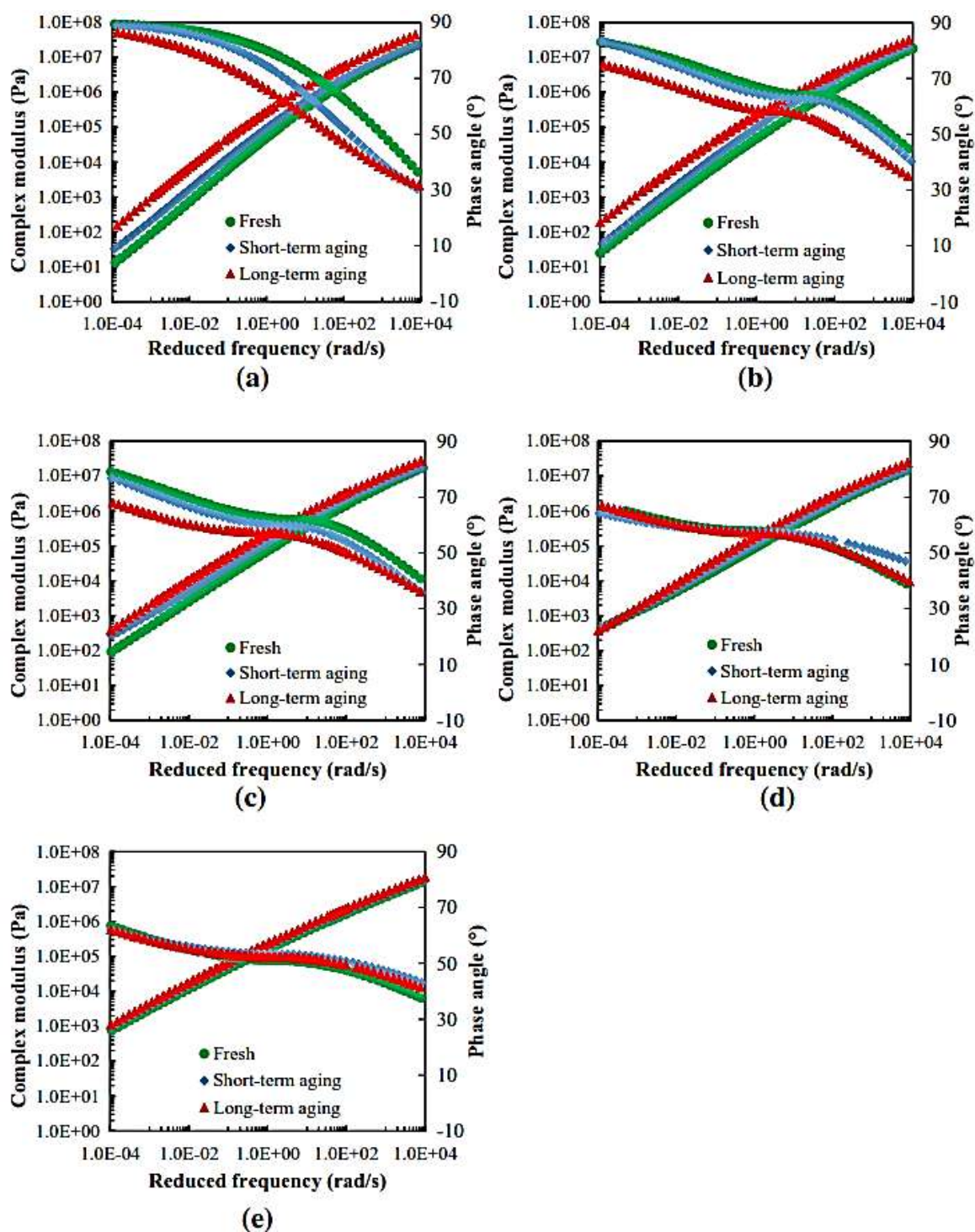


Figure III. 16. Les courbes maîtresses du module complexe et de l'angle de phase pour différents liants étudiées à différents états vieillissement [99]

II.5.3. Effet de la valorisation des pneus usés sur le béton bitumineux

Le contenu en caoutchouc des pneus dépasse 50 %, et le bitume modifié avec du caoutchouc broyé peut améliorer efficacement la résistance à la déformation à haute température, aux fissures à basse température et à la fatigue des chaussées bitumineuses [96], de plus l'amélioration des performances globales des chaussées, la réduction des coûts du cycle de vie des chaussées, et la possibilité d'obtenir des mélanges durcis à des températures de service élevées [100]. Des études antérieures ont indiqué que les liants caoutchoutés peuvent produire des chaussées en asphalte présentant une diminution du bruit de circulation, une réduction des coûts de maintenance, ainsi qu'une résistance à l'orniérage. [93], [101]

Pérez et Pasandín [102] ont utilisé des pourcentages de 0 %, 35 % et 42 % de granulats de béton recyclé en remplacement des agrégats naturels pour la fabrication l'enrobé à chaud. Deux types de bitume ont également été utilisés : un bitume conventionnel de grade de pénétration B40/50 et un bitume modifié par du caoutchouc recyclé BC40/50. Ce dernier est préparé avec 600g bitume B50/70 a été chauffé dans un bain d'huile à 180°C puis 10 % en poids de caoutchouc a été ajouté. Ce mélange a été agité pendant 60 minutes à 4000 tr/min à une température constante de 180°C. Le BC40/50 résultant avait une pénétration de $38 \pm 0,1$ mm à 25°C et un point de ramollissement de 64°C.

La Figure III.28 montre la masse volumique apparente en fonction du contenu en bitume pour chaque pourcentage de granulats de béton recyclé. Comme on peut le voir les mélanges fabriqués avec le B40/50 affichent des densités spécifiques apparentes plus élevées que ceux fabriqués avec le BC40/50 pour le même contenu en liant et le même pourcentage de granulats recyclés. Ces résultats soulignent que la viscosité plus élevée du BC40/50 rend la compaction plus difficile.

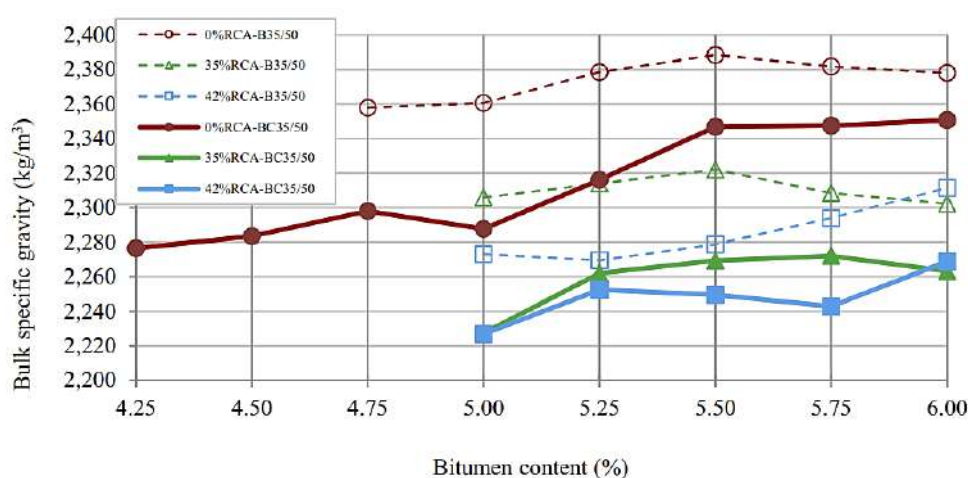


Figure III. 28. Masse volumique apparente par la méthode SSD en fonction du contenu en bitume [102]

La Figure III.29 montre les teneurs des vides d'air en fonction du contenu en bitume pour chaque pourcentage de granulat de béton recyclé. Le contenu en vides d'air est plus élevé dans les mélanges fabriqués avec le BC40/50 pour tous les pourcentages de granulat recyclé et tous les pourcentages en bitume. La viscosité plus élevée du BC40/50 qui entrave la compaction de l'enrobé à chaud semble être principalement responsable de cette performance.

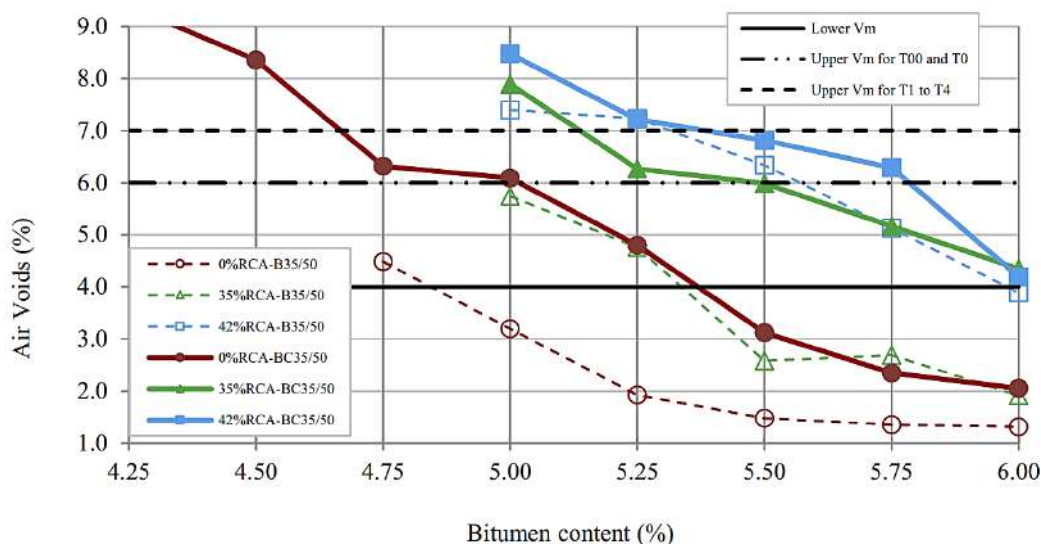


Figure III. 29. Vides d'air en fonction du contenu en bitume [102]

Yigezu Tefera et al. [94] ont étudié l'effet de différents liants sur les vides dans les granulats minéraux (VMA) dans des mélanges d'asphalte modifiés avec du caoutchouc Figure III.30. Les résultats montrent une tendance générale à l'augmentation du VMA avec l'augmentation du taux de caoutchouc dans le mélange. Or, un VMA minimal est nécessaire pour permettre une teneur suffisante en bitume afin d'assurer un enrobage adéquat des granulats et ainsi garantir la durabilité du revêtement. Les mélanges sans caoutchouc présentent les VMA les plus faibles, ce qui implique une plus faible teneur en bitume effectif, rendant ces enrobés potentiellement moins durables. En revanche, les mélanges contenant 15 % à 20 % de caoutchouc présentent des VMA plus élevés, ce qui améliore l'enrobage des granulats et augmente la teneur en bitume effectif, contribuant à une meilleure durabilité du mélange bitumineux.

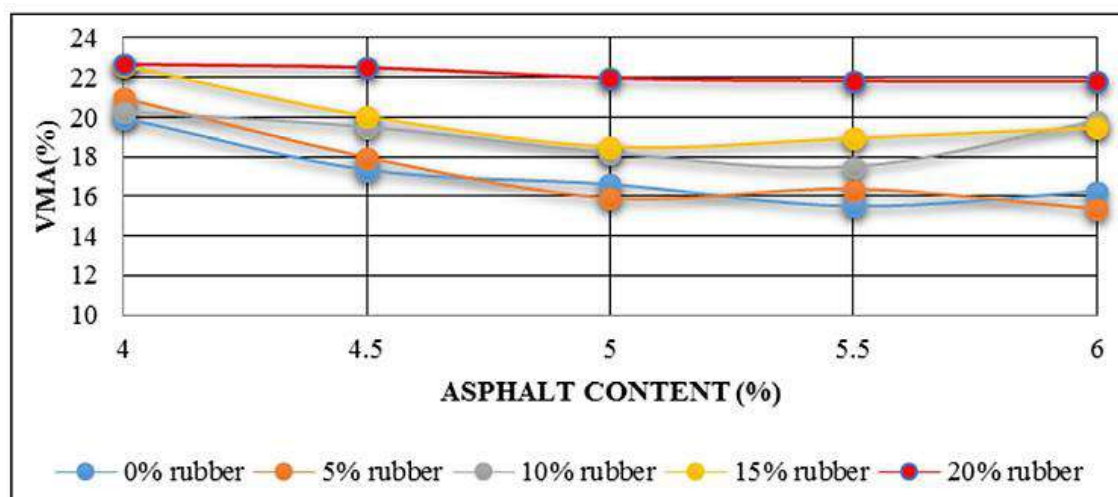


Figure III. 30. Effet de la teneur en caoutchouc sur les vides dans les agrégats minéraux à différentes teneurs en asphalte [94]

Swaney et al. [103] ont étudié l'utilisation du caoutchouc recyclé (CR) issu de pneus usagés, en particulier ceux provenant de voitures particulières (PCT). Cette recherche a comparé les performances de bitumes modifiés avec du CR issu de PCT, de TT, et du liant commercial S45R. Les tests physiques, chimiques et rhéologiques ont montré que le CR de PCT, ajouté entre 13 % et 16 % du poids du bitume, permettait d'obtenir des résultats comparables au liant S45R, notamment en termes de rigidité, d'élasticité et de résistance au fluage et à la fatigue. Lors de la mise en œuvre de mélanges bitumineux avec 15 % et 20 % de CR, les courbes de compactage ont révélé une bonne similarité entre les PCT-15 % et TT-15 %, indiquant une compactibilité équivalente. En revanche, les mélanges à 20 % de CR ont montré une baisse notable de la compactibilité, plus marquée pour le CR issu de PCT. Cela est attribué à la résistance au compactage engendrée par les particules résiduelles de caoutchouc. Malgré ces différences, les auteurs concluent que le CR provenant de pneus de voitures particulières est techniquement adapté à la modification du bitume par voie humide, et constitue une solution viable et durable pour la valorisation de ces déchets (Figure III.31.).

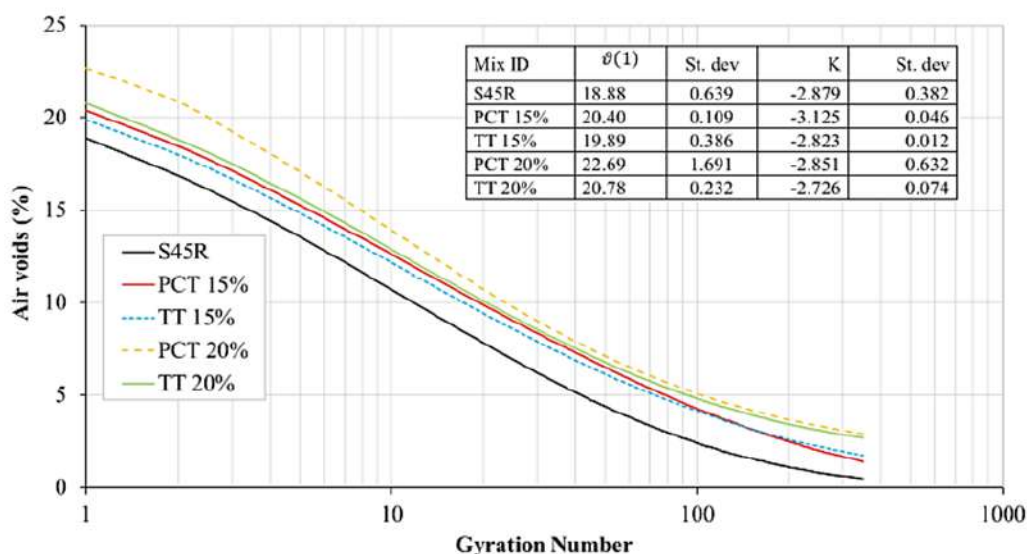


Figure III. 31. Vides d'air en fonction du contenu en bitume [102]

Bilema et al. [100] ont mené une étude où 5 % de caoutchouc recyclé en poids total de liant ont été ajoutés au mélange bitumineux. Les auteurs ont appliqué la méthode humide pour mélanger le caoutchouc recyclé CR avec du bitume de grade 60/70. Les résultats de l'essai de la résistance à la traction indirecte sont présentés dans la Figure III.32. L'ajout de CR a conduit à une augmentation de la résistance à la traction. Plus précisément l'ajout de 5% de CR de taille 0,075 mm a augmenté l'ITS de 5,4% par rapport au mélange témoin (0% CR). De plus un ajout de 5% de CR de taille 0,15 mm a augmenté l'ITS de 9% par rapport au mélange témoin. La valeur la plus élevée d'ITS a été observée avec un ajout de 5% de CR de taille 0,3 mm qui entraînant une augmentation de l'ITS de 12% par rapport au mélange de bitume vierge. La valeur élevée d'ITS pour le mélange d'asphalte avec 0,3 mm de CR est attribuée au fait que les particules de CR ne fondent pas complètement lors du processus de mélange avec le liant bitumineux. L'augmentation de la taille du CR entraîne une augmentation de la valeur ITS du mélange bitumineux. Il est donc possible de conclure que la résistance du mélange est améliorée par la taille du CR.

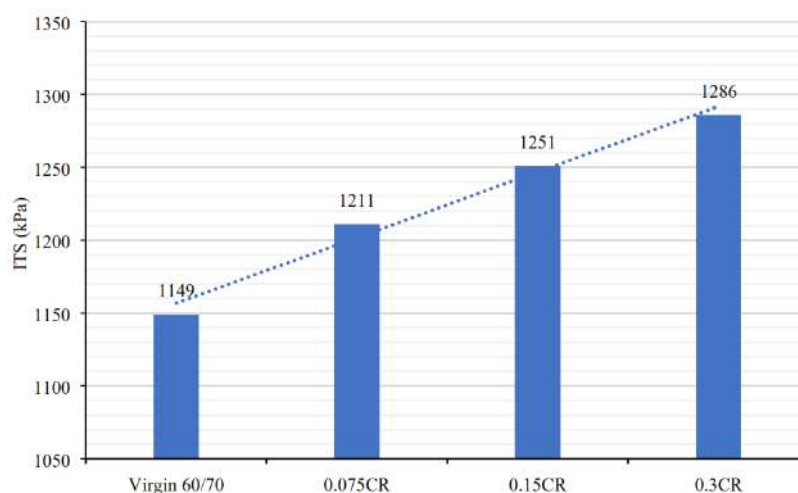


Figure III. 32. Résistance à la traction indirecte (ITS) avec différentes tailles de caoutchouc recyclé [100]

Le coefficient de résistance à la traction indirecte (TSR) a été utilisé pour évaluer la susceptibilité à l'humidité des mélanges bitumineux incorporant différentes tailles de particules de caoutchouc recyclé. La Figure III.33 montre le TSR de différentes tailles de CR. On peut observer que l'ajout de 5% de CR a entraîné une légère réduction du TSR du mélange. De plus la plus petite taille de CR (0,075CR) a produit le TSR le plus élevé. Cela pourrait être attribué à la petite taille du CR qui peut remplir davantage de vides d'air entraînant ainsi un niveau d'eau plus faible dans le mélange. L'augmentation de la taille du CR a également entraîné une légère réduction du TSR du mélange d'asphalte. La Figure III.32 montre que tous les mélanges bitumineux respectaient les limites du test de dommages causés par l'humidité avec un TSR supérieur à 80%. La taille des particules de CR affecte de manière significative les performances du mélange d'asphalte.

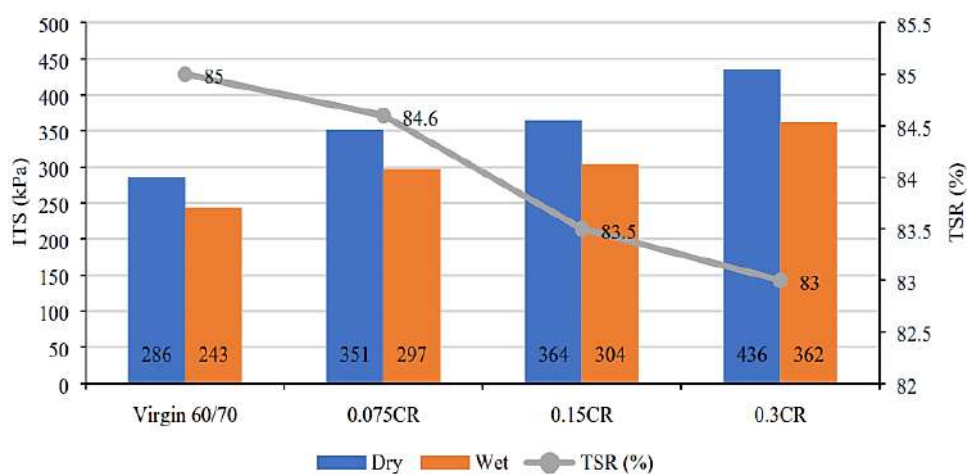


Figure III. 33. L'effet de la taille des (CR) sur le rapport de résistance à la traction [100]

Al-Rubaie et al. [104] s'intéressent à l'amélioration des performances de l'enrobé bitumineux à travers l'utilisation d'additifs et le remplacement des liants pur par des matériaux recyclés. Leur étude se concentre sur les mélanges bitumineux modifiés, en particulier avec du caoutchouc recyclé provenant de pneus usagés, qui est l'un des matériaux secondaires les plus fréquemment utilisés. En analysant différentes proportions de caoutchouc broyé (2,5 %, 5 %, 7,5 %, 10 %, 15 % et 20 % en poids de bitume), ils évaluent son impact sur les propriétés mécaniques et dynamiques des enrobés, notamment la résistance à l'orniérage.

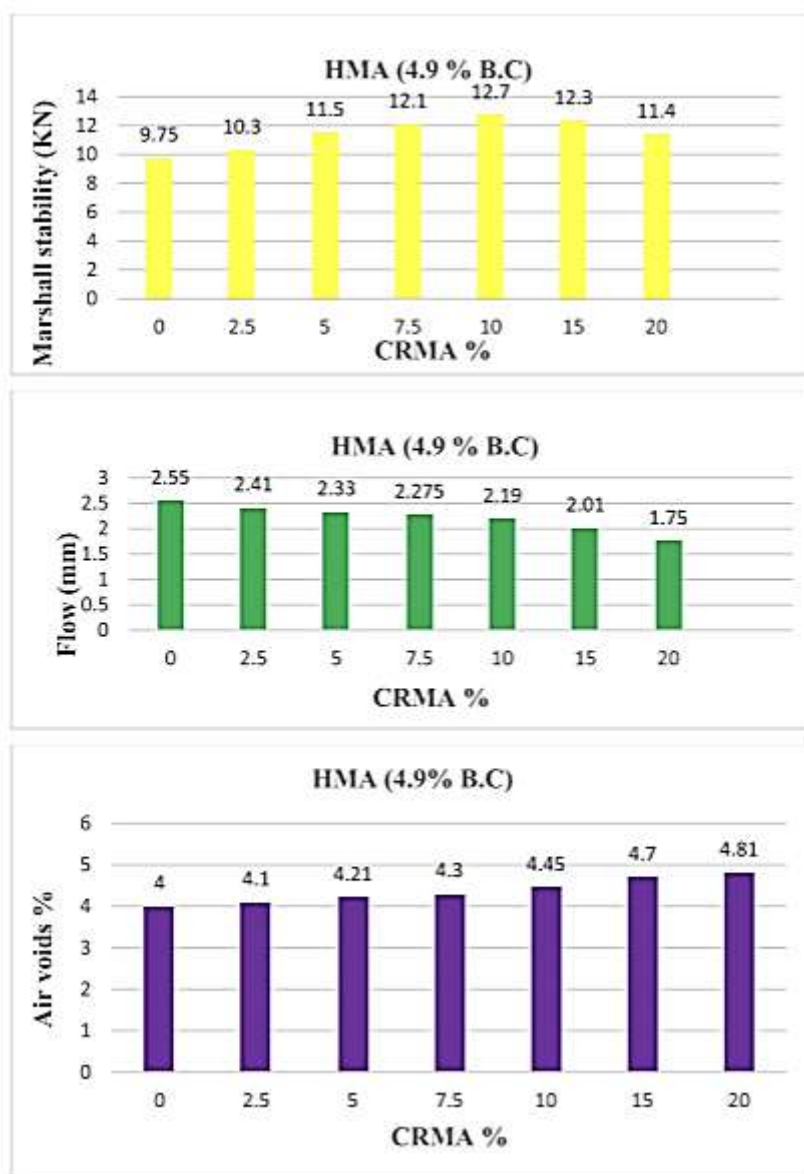


Figure III. 34. Résultats de l'essai Marshall en fonction de teneur en caoutchouc [104]

Dans leur étude, les auteurs ont évalué la stabilité et le fluage des enrobés bitumineux, conventionnels et modifiés par du caoutchouc recyclé. Les résultats présentes dans la figure III. 34 montrent que l'ajout de caoutchouc broyé améliore nettement la stabilité des mélanges

bitumineux, en durcissant le liant et en réduisant sa sensibilité aux températures élevées, grâce à l'interaction entre le caoutchouc et les fractions légères du bitume. Cependant, l'utilisation de pourcentages élevés (jusqu'à 20 %) de caoutchouc très fin peut entraîner un sur-durcissement du liant, réduisant l'adhésion entre les granulats et le liant, ce qui affecte négativement la résistance à la fatigue et au fluage. Par conséquent, un bitume à grade de pénétration plus élevé est recommandé pour les mélanges modifiés. En parallèle, les valeurs du fluage diminuent avec l'augmentation du taux de caoutchouc en raison de la dureté accrue du mélange. Les vides dans les enrobés augmentent également jusqu'à 4,81 % à 20 % de caoutchouc.

Teba Tariq et al. [105] ont adopté un programme expérimental qui comprenait l'utilisation de trois pourcentages différents en poids de bitume pur 40/50 provenant du granulat de caoutchouc recyclé (5 %, 10 % et 15 %). À partir du tableau III.3 on peut observer que la densité apparente des mélanges conventionnels et des mélanges améliorés avec des caoutchouc recyclé augmente avec l'augmentation de la teneur en CR. Les valeurs des vides d'air (V_a) pour tous les mélanges sont inférieures à celles du mélange conventionnel et sont significativement affectées par le pourcentage de bitume dans le mélange et la densité apparente. Cependant il est à noter qu'il n'y a pas de différence significative entre les vides dans l'agrégat minéral (VMA) et les vides remplis de bitume (VFA) dans le mélange conventionnel et les mélanges CR.

Tableau III. 3. Propriétés des mélanges bitumineux [105]

Mixture Type	Asphalt Content (%)	Bulk Density gm/cm ³	AV%	VMA%	VFA%
Conventional	4.8	2.345	4.24	15.21	72.1
CRM1	5	2.348	4.19	15.28	72.56
CRM2	5.2	2.352	4.15	15.31	72.89
CRM3	5.6	2.362	4.11	15.31	73.16

Les auteurs indiquent que l'augmentation suivant la Figure III.35 de la teneur en CR dans les mélanges a conduit à une amélioration de la stabilité Marshall et à une réduction du fluage Marshall par rapport au mélange conventionnel. Ces augmentations des valeurs de stabilité Marshall pour le matériau CR peuvent être liées au fait que le mélange devient plus rigide que le mélange conventionnel et peuvent être associées à un bon verrouillage entre le bitume et les particules d'agrégats ce qui a conduit à une réduction de la fluidité du liant une augmentation de la stabilité et une amélioration d'autres propriétés.

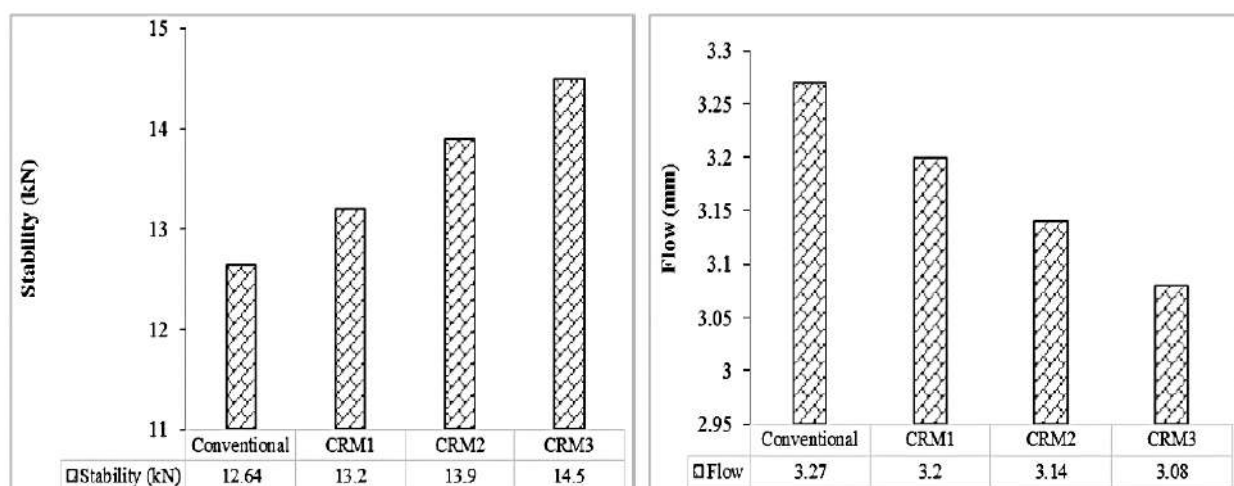


Figure III. 35. Résultats de l'essai Marshall ; Stabilité (à gauche) ; Fluage (à droite) [105]

Les auteurs ont analysé aussi l'effet de l'humidité (Figure III.36) en mettant l'accent sur l'amélioration de la résistance à l'eau grâce à l'ajout de caoutchouc recyclé CR dans les mélanges bitumineux. Les chercheurs ont utilisé l'essai de résistance indirecte à la traction (ITS). Les résultats montrent que les échantillons modifiés avec du CR présentent une ITS plus élevée que les mélanges conventionnels, aussi bien dans les conditions sèches qu'humides. Cette amélioration est attribuée à l'augmentation de la viscosité du liant modifié, qui renforce l'adhésion entre le bitume et les granulats, réduisant ainsi l'absorption d'eau et augmentant la résistance aux dommages causés par l'humidité.

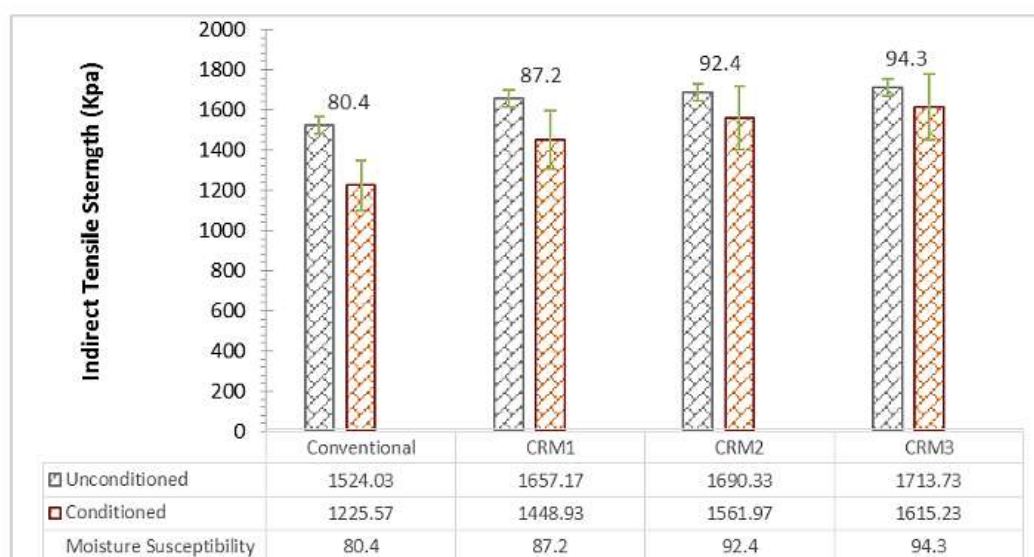


Figure III. 36. L'effet du PC sur la sensibilité à l'eau [105]

Comme le montrent les Figure III.37 et III.38 les échantillons conventionnels ont montré une déformation permanente plus importante que les autres échantillons modifiés. On peut observer

que la déformation permanente a accru de manière remarquable pendant les premiers 4 000 cycles puis cette croissance devient plus progressive. Il est important de signaler que la température peut affecter de manière significative la déformation permanente indépendamment de la teneur en caoutchouc ce qui signifie que la déformation permanente à 50°C est plus importante que celle à 40°C. Mais on peut constater que l'ajout de caoutchouc a joué un rôle important dans la réduction de l'effet de la température sur la déformation permanente du mélange. L'enrobé bitumineux contenant de caoutchouc recyclé est plus efficace pour améliorer la résistance à la déformation permanente que le mélange conventionnel.

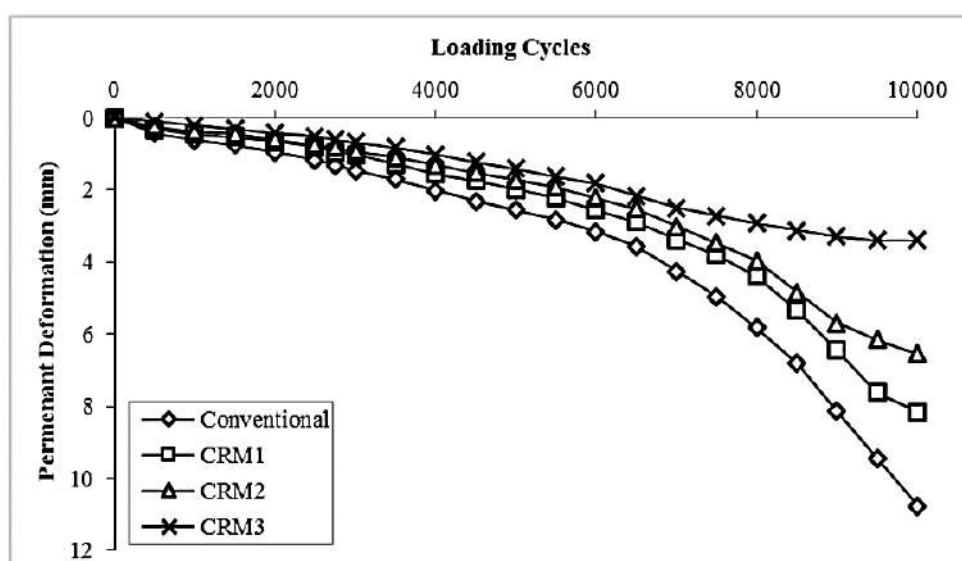


Figure III. 37. Comportement de la Déformation Permanente des Mélanges à 40 °C [105]

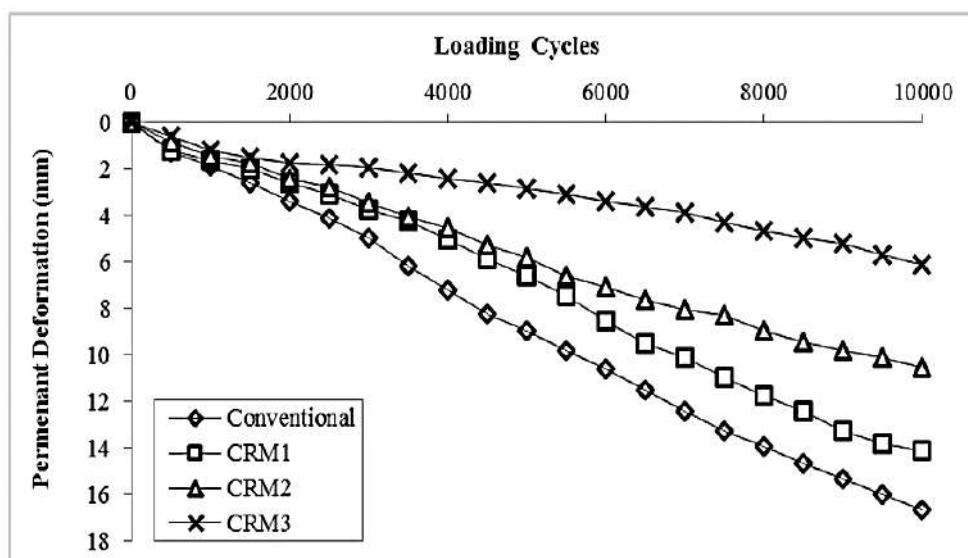


Figure III. 38. Comportement de la Déformation Permanente des Mélanges à 50 °C [105]

Une étude de Gibreil et Fengi [106] a utilisé trois concentrations (4 %, 5 % et 6 %) de PEHD et trois concentrations (5 %, 10 % et 15 %) de poudrette de caoutchouc basées sur le poids de de bitume de grade 60/70. Les résultats sont présentés dans la Figure III.38. La Figure (a) montre que lorsque 5 % de PEHD et 10 % de poudrette de caoutchouc ont été utilisés comme modificateurs ils ont augmenté la stabilité Marshall du mélange bitumineux de 32,92 %. En revanche la valeur de fluage a diminué avec l'ajout des modificateurs pour toutes les teneurs en PEHD et CR Figure III.39 (b). La Figure III.39 (e) montre que pour toutes les teneurs en PEHD et PCR le volume des vides d'air était dans les limites (3-5 %).

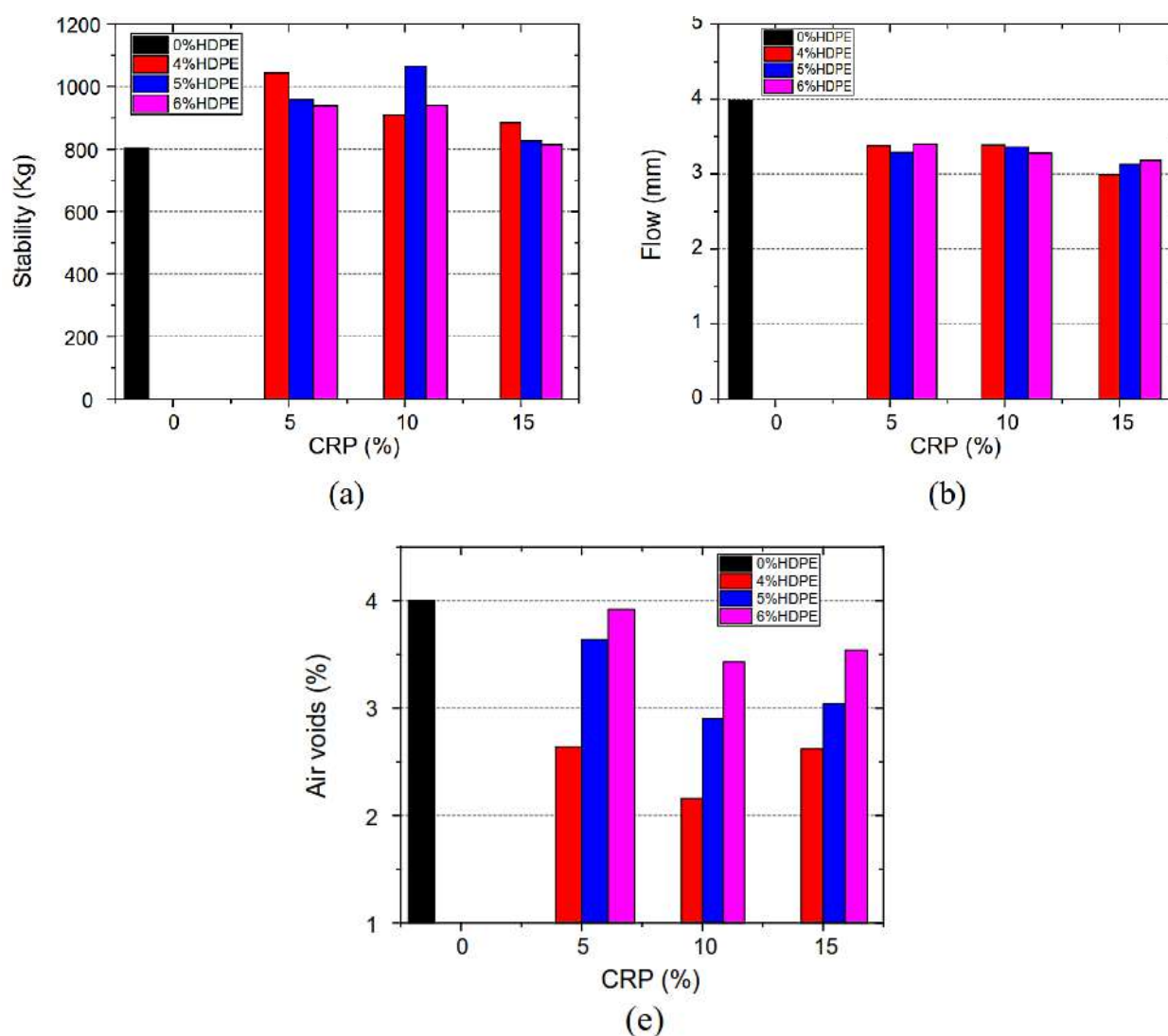


Figure III. 39. Résultats de l'essai Marshall ; (a) Stabilité, (b) Fluage et (e) vides d'air [106]

Les chercheurs ont observé que la profondeur des ornières diminue avec l'augmentation des teneurs en PEHD et en PCR Figure III.40. Cela indique que la résistance à la déformation permanente (c'est-à-dire la résistance à l'orniérage) des mélanges bitumineux augmente en raison

du durcissement du mélange d'asphalte ; cela indique une augmentation de la capacité du mélange à résister aux déformations accumulées sous les charges de trafic.

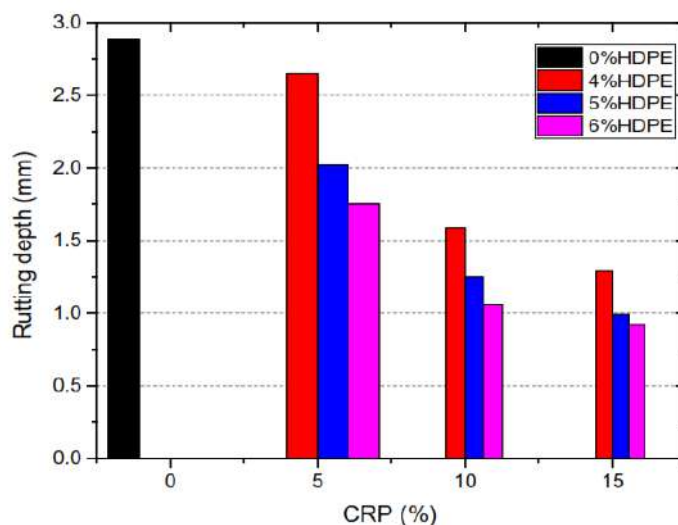


Figure III. 40. Relation entre la profondeur d'orniérage et les teneurs en PEHD et en CR [106]

D'après les résultats de Eltwati et al. [107] la stabilité augmente légèrement à mesure que le contenu en CR dans le mélange Figure III.41. La stabilité du mélange bitumineux est largement influencée par la friction interne des agrégats et la viscosité du bitume. En effet la viscosité du liant augmente en raison de l'ajout de caoutchouc broyé dans le bitume.

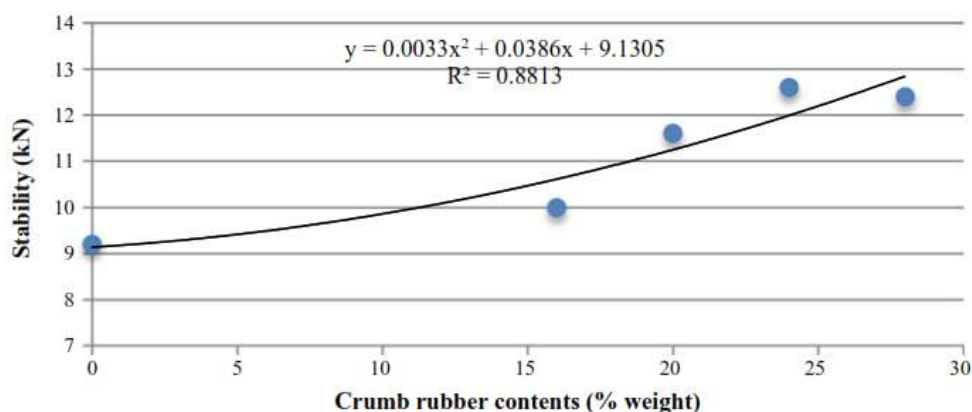


Figure III. 41. Effet de caoutchouc broyé sur la stabilité Marshall [107]

Les auteurs aussi ont montré que à mesure que la quantité de caoutchouc broyé augmente la profondeur de l'orniérage diminue ce qui confirme que le mélange d'asphalte avec du CR améliore les performances du revêtement Figure III.42. La Figure III.43 révèle que la profondeur de la déformation atteint sa valeur la plus basse à 24 % de CR puis augmente à nouveau. Par conséquent le mélange bitumineux conventionnel AC16 avec 24 % de caoutchouc broyé offre la plus grande résistance à l'orniérage dans le revêtement.

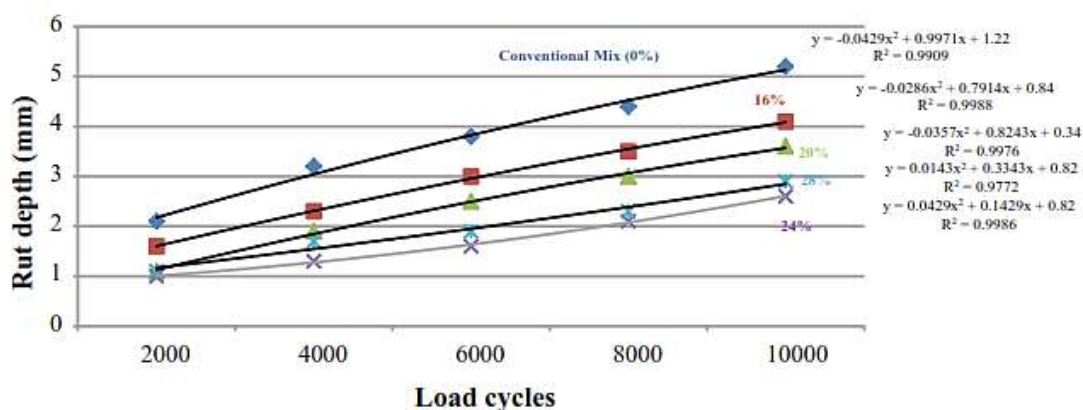


Figure III. 42. Effet de pourcentage de caoutchouc sur la résistance à l'orniérage [107]

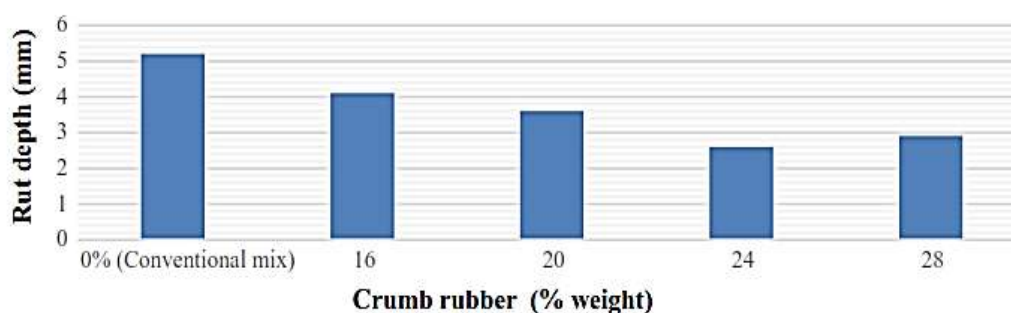


Figure III. 43. Effet de l'ajout de CR sur la résistance à l'orniérage des chaussées (après 10 000 cycles) [107]

Les chercheurs ont évalué la sensibilité à l'eau avec le rapport de résistance à la traction. La Figure III.44 montre clairement que les enrobés contenant du caoutchouc recyclé ont des valeurs de TSR plus élevées que les mélanges conventionnels sans caoutchouc ce qui indique que les mélanges bitumineux modifiés ont une meilleure résistance aux dommages causés par l'humidité. Les résultats montrent que le bitume mélangé avec 20% de caoutchouc recyclé a produit la valeur de TSR la plus élevée montrant ainsi la meilleure résistance aux dommages causés par l'humidité.

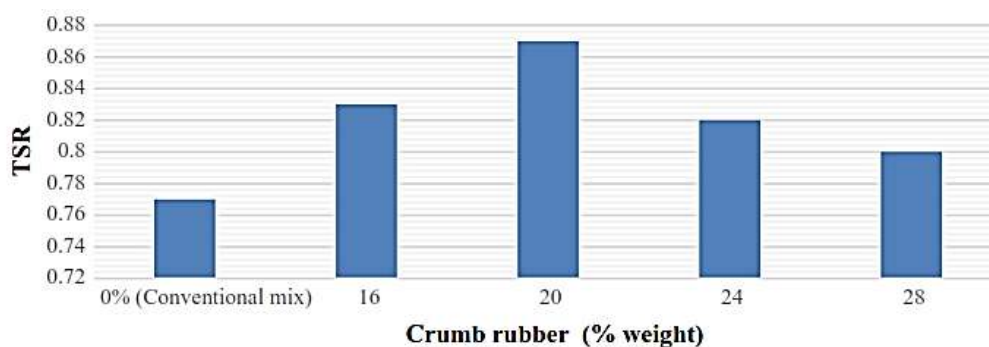


Figure III. 44. Résultat du l'essai de sensibilité à l'eau

La Figure III.45 révèle que les mélanges avec caoutchouc recyclé avaient un module de rigidité plus élevé que ceux sans CR. Cela indique que les mélanges modifiés avec du caoutchouc recyclé sont plus résistants à l'orniérage que les bétons bitumineux conventionnels.

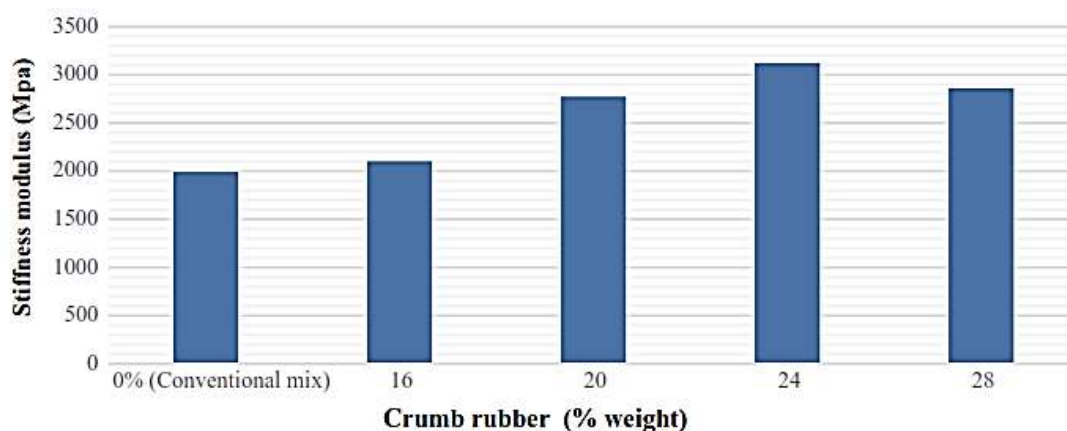


Figure III. 45. Effet de pourcentage de CR sur module de rigidité [107]

Conclusion

Ce chapitre a exploré la problématique des déchets de pneus usagés, en mettant en évidence leur valorisation dans les infrastructures routières comme solution à la fois écologique et performante. Les études présentées prouvent que l'ajout de caoutchouc au bitume par voie humide améliore significativement les propriétés des liants et des enrobés bitumineux. Cependant certains défis techniques demeurent notamment l'optimisation des procédés de modification (taille des particules, dosage, température et la durée de malaxage).

L'intégration de la poudrette de caoutchouc dans le béton bitumineux par voie humide dans une proportion optimale située entre 12 % et 15 %, offre un équilibre efficace entre performance mécanique et durabilité du matériau. À ce pourcentage la poudrette améliore significativement les propriétés mécaniques du béton bitumineux augmentant sa résistance aux charge répétés et sa capacité à résisté à haute température. Cette plage d'utilisation permet également de maximiser les bénéfices environnementaux en recyclant les pneus usés tout en garantissant la qualité et la longévité des infrastructures routières. Le choix de cette proportion reflète une approche optimale pour allier durabilité et performance dans la construction routière.

CHAPITRE IV :

STRUCTURES ROUTIERS ET ENROBES BITUMINEUX

III. STRUCTURES ROUTIERS ET ENROBES BITUMINEUX

III.1. STRUCTURES ROUTIÈRES

III.1.1.Définition

La norme [NF P 98086] définit la chaussée routière comme une structure représentée par des différentes couches reposant sur un support. Ces structures incluent des matériaux traités aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques et/ou des matériaux non traités [108].

III.1.2.Couches de chaussée

La Figure IV.1 présente une coupe de la structure de chaussée, il comprend trois couches avec d'éventuelles sous-couches :

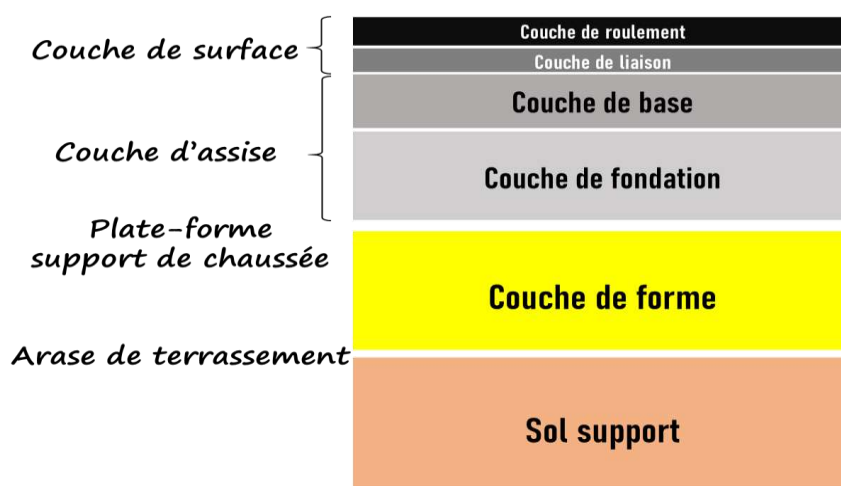


Figure IV. 1. Structure de chaussée

III.1.2.1. Couche de surface

Elle est composée de deux sous-couches :

a) Couche de roulement :

Appelée aussi couche d'usure, supporte directement le trafic. Elle doit offrir à l'utilisateur le confort, donc une surface sans rugosité, et la sécurité, donc une surface antidérapante. Un excès de bitume dans les mélanges peut causer un glissement ainsi que le polissage des granulats. En plus elle doit être imperméable et posséder une résistance à la fissuration [31].

La couche de roulement composé généralement des matériaux bitumineux de granulométrie 0/14 ou 0/10 voire 0/6 [46].

b) Couche de liaison :

Les couches de liaison assurent la transition entre les couches d'assise et le couche de roulement, Elles sont constituées de matériaux de granulométrie 0/14 ou 0/20. Le couche de liaison contribuent à l'amélioration de l'uni de la chaussée, elles doivent être anti-orniérantes et présenter une forte cohésion vis-à-vis les efforts de cisaillement [109].

III.1.2.2. Couche d'assise

Elles sont l'élément structurel primordial de la chaussée [110]. Les couches d'assise, incluant la couche de fondation et la couche de base, répartissent les charges verticales dues au trafic sur la plate-forme de support de la chaussée pour minimiser les déformations dans des limites acceptables. Elles contribuent à la résistance mécanique de la structure face aux charges et jouent un rôle structurel crucial [111].

III.1.2.3. Couche de forme

La couche de forme assure la transition entre la structure de la chaussée et la partie supérieure des terrassements. Son interface avec la couche d'assise est appelée plate-forme de chaussée, et elle a pour rôle de répartir les efforts dus à la circulation des véhicules de manière à éviter tout dommage au sol. L'interface entre la couche de forme et le sol support est désignée comme arase de terrassement [110].

III.1.3. Catégories de Structures des Chaussées

Selon les matériaux de construction utilisés dans le revêtement, les chaussées peuvent être classées suivant les six catégories [112], [113]:

III.1.3.1. Chaussées souples

Également appelées chaussées flexibles dans la littérature nord-américaine, cette catégorie de structure de chaussées est la plus couramment utilisée de nos jours dans le monde Figure IV.2. Dans cette catégorie, des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés sont utilisés pour la construction des couches supérieures [29]. L'épaisseur totale de la chaussée est en général comprise entre 30 et 60 cm [110], [112].

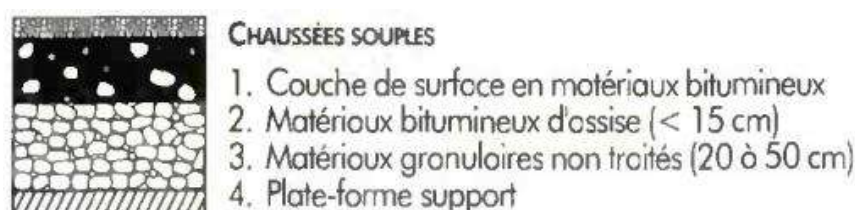


Figure IV. 2. Structure de chaussée souple

III.1.3.2. Chaussées bitumineuses épaisses

Ces structures sont constituées d'une couche de roulement bitumineuse reposant sur un corps de chaussée constitué de matériaux traités aux liants hydrocarbonés, comprenant généralement une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise varie généralement entre 15 et 40 cm [110], [112].

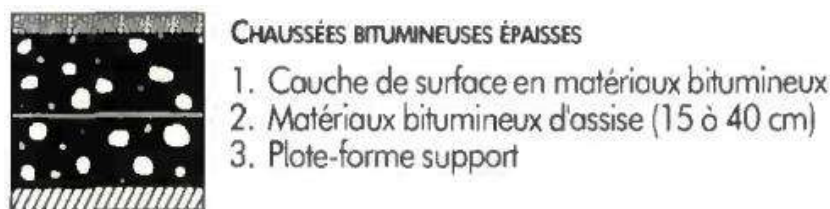


Figure IV. 3. Structure de chaussée bitumineuse épaisse

III.1.3.3. Chaussées à assise traitée au liant hydraulique

Ces structures sont qualifiées couramment de "semi-rigide". Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm [110], [112].

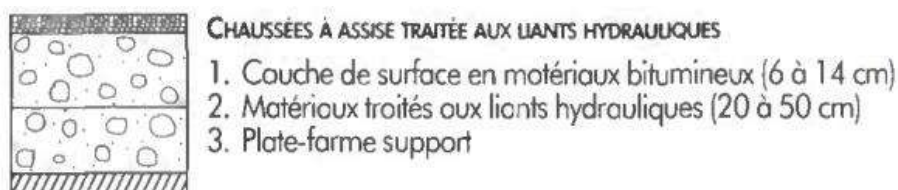


Figure IV. 4. Structure de Chaussées à assise traitée au liant hydraulique

III.1.3.4. Chaussées à structure mixte

Ces structures comprennent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (avec une épaisseur de la base variant de 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (de 20 à 40 cm d'épaisseur). Les structures dites mixtes sont caractérisées par un rapport de l'épaisseur des matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de la chaussée d'environ $\frac{1}{2}$ [110], [112].

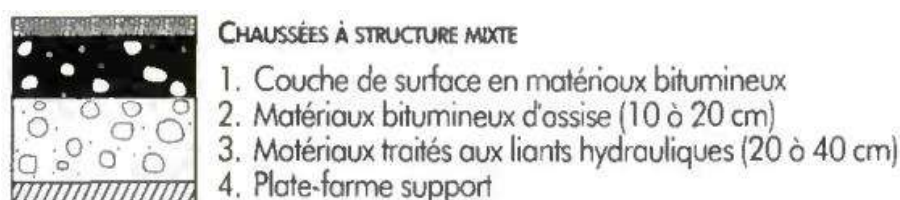


Figure IV. 5. Structure de Chaussées à structure mixte

III.1.3.5. Chaussées à structure inverse

Ces structures se composent de couches bitumineuses d'une épaisseur totale d'environ quinze centimètres, reposant sur une couche de grave non traitée d'environ 12 cm, elle-même posée sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale de la structure atteint entre 60 et 80 cm [110], [112].

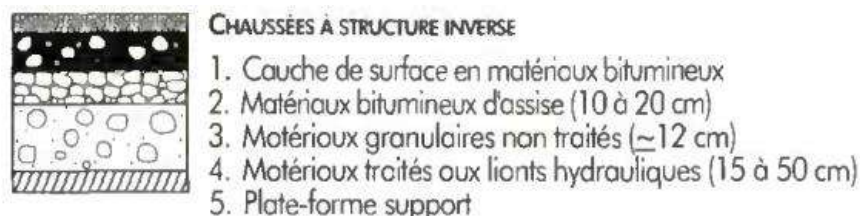


Figure IV. 6. Structure de Chaussées à structure inverse

III.1.3.6. Chaussées en béton de ciment

La structure d'une chaussée rigide (voir Figure IV.7) se compose généralement d'une couche de fondation granulaire reposant sur la couche de forme, surmontée par une dalle en béton de ciment. Une très fine couche de roulement en enrobé bitumineux peut être ajoutée pour réduire le bruit et améliorer l'adhérence, sans toutefois jouer un rôle structurel [29]. L'épaisseur de la couche en béton de ciment varie de 15 à 40 cm [112].

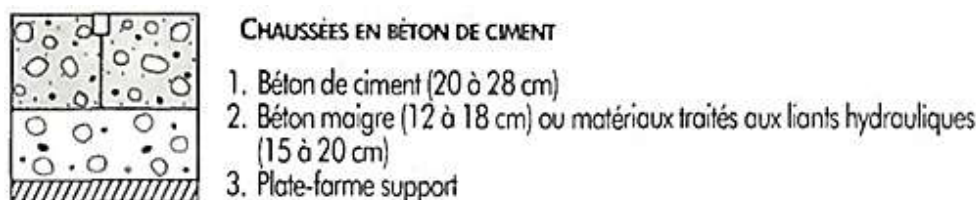


Figure IV. 7. Structure de Chaussées en béton de ciment

III.2. LES ENROBES BITUMINEUX

III.2.1.Définition

Un enrobé bitumineux est formé d'agrégats qui sont des matériaux granulaires et de mastic qui est un mélange de bitume et de fines [24], [35]. Ils sont des matériaux viscoélastiques thermosusceptibles ayant des propriétés adhésives et cohésives, principalement utilisés dans la construction et l'entretien des chaussées [114]. Généralement la composition d'un enrobé bitumineux la plus utilisé en couche de roulement est comme suit [29]:

- **Granulats** : (environ 90% en poids) composés de plusieurs fractions en pourcentages variables :
 - Les fines < 80 μm
 - Les sables (0/3)
 - Les graves (3/8, 8/15)
- **Bitumes** : (5 à 7 % en poids)
- **Vides** : (de 2 à 20% selon les matériaux).

III.2.2.Les composants

III.2.2.1. Les granulats

Les granulats sont le principal constituant des mélanges bitumineux représentant environ 95% de la masse totale du matériau et 80% à 85% de son volume [32], [56], [114]. Un granulat représente un ensemble de particules de matière solide, provenant de roches meubles ou consolidées ou de matériaux recyclés [53]. Les granulats sont répartis en différentes classes granulaires normées qui sont définies par le diamètre minimal d et le diamètre maximal D du granulat (norme P18-101). Les granulats sont ainsi classés en fines, sables, gravillons, cailloux et graves (Tableau IV.1) [115]. On distingue [56], [116]:

- Les granulats de type 0/D dont la grosseur des grains est comprise entre 0 et D mm (par exemple 0/20).
- Les granulats constitués par une classe granulaire d/D (par exemple : gravillons 6,3/10).

Tableau IV. 1. Classification suivant la granularité [56], [116]

Classes de produits	Dimensions (mm)
Fines	0/D où $D \leq 0,080$
Sables	0/D où $D \leq 6,30$
Gravillons	d/D où $d \geq 2,00$ et $D \leq 31,50$
Cailloux	d/D où $d \geq 20,00$ et $D \leq 80,00$
Graves	0/D où $6,30 < D \leq 80,00$

Les granulats peuvent provenir de gisements (gravière, alluvions fluviales ou lacustres) ou être extraits d'une roche mère compacte (carrière). Selon leur origine, les granulats présentent des propriétés géométriques différentes : un aspect roulé s'ils proviennent d'un gisement et un aspect concassé s'ils sont issus de l'extraction. Ils peuvent être utilisés comme matériaux en vrac ou après transformation (concassage, tamisage, dépoussiérage, lavage, etc.). Ils forment alors une classe granulaire qui peut être employée seule ou en combinaison avec d'autres classes granulaires pour constituer le squelette granulaire d'un mélange bitumineux [37].

Le squelette minéral, constitué par les grains en contact dans le mélange, doit garantir une répartition adéquate des contraintes et transmettre efficacement les charges aux couches inférieures de la chaussée. Les caractéristiques géométriques des granulats, telles que leur forme, leur angularité et l'état de leur surface, influencent directement la résistance aux mouvements et aux rotations relatives des grains, jouant ainsi un rôle crucial. De plus, les granulats doivent présenter une bonne résistance aux efforts statiques et dynamiques pour éviter leur détérioration sous les charges. Ils doivent résister aux chocs et à la fragmentation, comme évalué par l'essai Los Angeles, ainsi qu'à l'usure et à l'attrition, mesurées par l'essai micro-Deval. La compatibilité des granulats avec le liant est également essentielle, se traduisant par la qualité de l'adhésion entre les granulats et le liant hydrocarboné. Cette compatibilité est influencée par la polarité naturelle de la surface des granulats, leur porosité et leur propreté [117].

III.2.2.2. Mastic bitumineux

III.2.2.2.1. Définition d'un mastic bitumineux

Le mastic bitumineux est formé d'un mélange de liant bitumineux plus de filler (appelé aussi « fines »). Ce mastic, composé de la suspension des fines dans le bitume, devient le véritable liant au sein d'un squelette granulaire. Les granulats d'un enrobé ne sont pas enrobés uniquement par le bitume, mais par le mélange de liant et de filler. Le mastic bitumineux peut être considéré comme une suspension régie par des lois connues sur les suspensions, à condition que les particules minérales n'entrent pas en contact. Cela impose que la fraction volumique du filler reste inférieure à la fraction d'empilement maximum. Dans le cas contraire, les propriétés rhéologiques du mastic deviennent similaires à celles des enrobés bitumineux, avec un module limite élastique à haute température plutôt qu'un écoulement newtonien. Le fait que le mastic bitumineux soit considéré comme une suspension, alors que le bitume est lui-même une suspension colloïdale, est dû à la différence de taille entre les asphaltènes (quelques nanomètres) et les fines minérales (quelques micromètres). Cela conduit à l'hypothèse que le bitume est un milieu homogène vis-à-vis du filler [41], [114].

III.2.2.2.2. Les Fines « ou les fillers »

Selon la norme EN 13043 : 2003, le terme « fines » ou « filler » correspond aux granulats minéraux les plus fins, dont la taille est inférieure ou égale à 63 μm . Il est courant de distinguer parmi les fines, celles qui sont naturellement présentes dans le sable (fines naturelles) et celles qui sont ajoutées en complément.

La teneur en fines est cruciale car elle est directement liée à la teneur en liant. Plus la proportion de filler est élevée, plus la teneur en liant augmente, ce qui confère d'enrober des caractéristiques optimales en termes de consistance, de viscosité et de rigidité. De plus, le filler améliore la compatibilité du mélange et permet un dosage plus élevé en liant, ce qui augmente la cohésion et l'imperméabilité de l'enrobé sans risque de ressuage [118].

La nature chimique des fines influence directement la compatibilité entre les grains de filler et le bitume, ainsi que leur adhérence à l'interface. En particulier, l'utilisation de filler « actif » c'est-à-dire un filler ayant une interaction significative avec certains bitumes semble améliorer les propriétés du mastic et, par conséquent, celles de l'enrobé. Les fillers actifs ont un impact beaucoup plus prononcé sur le bitume et, par extension, sur le mastic, comparé aux fillers inertes c'est-à-dire sans interaction avec le bitume [41].

III.2.3. Les différents types d'enrobés

Le terme « enrobé hydrocarboné » désigne tout mélange de granulats et de liant hydrocarboné. Parmi ces enrobés, on distingue les enrobés bitumineux, où le liant hydrocarboné est le bitume. Ainsi, un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux (compris entre 3 et 7 % en masse), de granulats et de fines (ou filler, de taille inférieure à 63 μm).

Comme l'illustre la Figure IV.8, les diverses méthodes d'enrobage bitumineux utilisés dans ces assises de chaussée se répartissent en quatre catégories, selon leur température de confection : les enrobés à froid, les enrobés semi-tièdes, les enrobés tièdes et les enrobés à chaud. Ces classes se distinguent par le type de liant employé et par la température des granulats durant la fabrication [119].

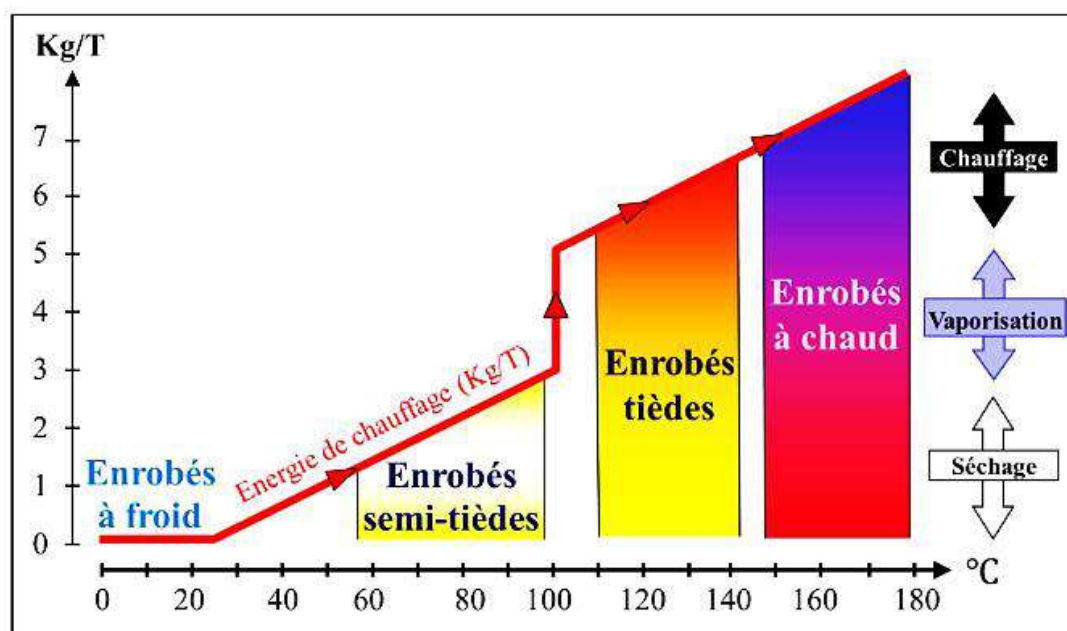


Figure IV. 8. Température de fabrication des enrobés en fonction de l'énergie de fabrication [119]

III.2.3.1. Les enrobés à froid « Cold Mix Asphalt »

Les enrobés à froid sont conçus à partir de granulats, d'un liant hydrocarboné, et éventuellement de dopes ou d'additifs, permettant leur fabrication sans nécessiter le séchage ou le chauffage des granulats. Le liant, qui peut être du bitume ou du bitume modifié par des polymères, est généralement sous forme d'émulsion ou de mousse. Il peut également être fluidifié avec des produits pétroliers ou végétaux. La fabrication de ces enrobés se fait à des températures proches de l'ambiante, généralement entre 10 °C et 40 °C. Après la rupture de l'émulsion, le liant joue un rôle essentiel dans la maniabilité et la compactibilité de l'enrobé [109], [120]. Certains enrobés sont produits avec des granulats ayant déjà été enrobés : il s'agit alors d'un enrobé à froid à double

enrobage. La technique de mise en œuvre nécessite un finisseur si l'enrobé à froid a été complété avec de la résine ou s'applique directement dans les trous [116].

III.2.3.2. Les enrobés semi-tièdes « Half-Warm Mix Asphalt »

Les enrobés semi-tièdes LEA®, fabriqués à environ 95°C et mis en œuvre à 70-90°C, représentent une nouvelle génération d'enrobés combinant les avantages environnementaux des enrobés à froid (réduction significative des impacts environnementaux de la centrale d'enrobage sur chantier) et les performances des enrobés à chaud [56]. Les enrobés semi-tièdes LEA® (Low Energy Asphalt) sont proposés par les sociétés EIFFAGE Infrastructures, FAIRCO, et leur filiale commune LEA-CO. Ils résultent de deux procédés brevetés : EBE® (Enrobés Basse Énergie) et ETB® (Enrobés Basse Température), initialement développés en France puis étendus à l'international [120].

III.2.3.3. Les enrobés tièdes « Warm Mix Asphalt »

Les procédés de fabrication des enrobés à des températures plus basses que celles des enrobés à chaud traditionnels, mais supérieures à 100 °C, sont appelés enrobés « tièdes ». Le principe des enrobés tièdes consiste à abaisser la température d'enrobage tout en préservant la maniabilité du mélange pour le répannage et le compactage. Cela nécessite l'utilisation de procédés spécifiques, tels que l'ajout d'additifs, le double enrobage, l'enrobage séquentiel, des liants spéciaux, le moussage avec du sable humide, ou encore l'ajout d'eau, afin de maintenir la viscosité du liant pendant toute la période d'application, qui peut durer jusqu'à 3 ou 4 heures, y compris en cas de retards imprévus. Cette approche assure un compactage efficace, avec une teneur en vides conforme aux spécifications, ainsi qu'une bonne mise en place de l'enrobé, garantissant sa texture, son uniformité et son homogénéité [121].

III.2.3.4. Les enrobés à chaud « Hot Mix Asphalt »

La fabrication à chaud des enrobés aux liants hydrocarbonés s'est industrialisée autour des années 1930 et a connu une croissance spectaculaire en France à la fin des années 1960, en raison des grands projets d'aménagement routier. Les enrobés bitumineux à chaud sont produits en mélangeant un liant hydrocarboné (bitume) avec des granulats. Le bitume et les granulats sont chauffés, généralement entre 140°C et 180°C, pour sécher complètement les granulats et modifier l'état rhéologique du bitume afin d'atteindre une viscosité adaptée à l'enrobage. Ensuite, les constituants sont malaxés ensemble [120]. Les enrobés à chaud sont classés en trois catégories selon leur usage : enrobés pour les couches de surface (couche de roulement) comme le béton

bitumineux, enrobés pour couche de liaison et enrobés employés pour les couches d'assise (couche de base) comme le grave bitumineux.

III.2.3.4.1. Enrobés pour assise de chaussée

❖ Graves bitumes GB

Développée au début des années 1970, cette technique est aujourd'hui la principale méthode de construction d'assises de chaussées sur le réseau autoroutier. La conception de ces enrobés repose sur des observations faites entre 1950 et 1970. La stabilité est obtenue en utilisant un bitume relativement dur (40/50) à un dosage modéré et des granulats entièrement concassés. Pour garantir une compacité adéquate, on applique ce matériau en couches de 12 à 18 cm d'épaisseur[122].

❖ Enrobés à module élevé (EME)

Ces enrobés examinent les assises de chaussées (couche base et couche fondation) ainsi que les couches de liaison. Les enrobés à module élevé possèdent un module de rigidité supérieur à celui des graves bitumes, permettant ainsi une réduction notable des épaisseurs (de 8 à 12 cm). Ils sont également riches en liant, ce qui augmente leur résistance aux déformations en fond de couche grâce à un meilleur comportement en fatigue, et leur film de liant plus épais et la teneur en vide réduite contribuent à cette performance. L'origine des enrobés à module élevé repose sur deux concepts principaux : d'une part, la substitution du bitume classique 40/50 par un bitume plus dur 20/30, ce qui augmente remarquablement le module de rigidité de l'enrobé ; d'autre part, l'augmentation de la proportion de bitume sans aucun risque d'orniérage à cause de l'emploi d'un liant très rigide, ce qui améliore la tenue à la fatigue [109].

❖ Les sables bitumes (S.B)

Ce mélange est constitué de sable naturel (fréquemment de forme arrondie), de sable concassé, et de bitume trop dur, ce dernier compensant l'insuffisance de stabilité du sable naturel. Cet enrobé, de granulométrie 0/4 ou 0/6, est principalement utilisé en couche de fondation. Il n'a pas rencontré un grand succès en raison de sa faible résistance à l'orniérage et de son coût élevé, lié à la nécessité d'une forte teneur en liant [109].

III.2.3.4.2. Enrobés pour couche de liaison (B.B.L)

La couche de liaison, servant de transition entre la couche de base et la couche de surface, possède une formulation moyenne entre celles de ces deux assises. Généralement, il s'agit d'un

enrobé 0/14 contenant approximativement 5 % de bitume 40/50. Ce béton bitumineux de liaison (B.B.L) est appliqué dans des couches de 5 à 8 cm d'épaisseur [122].

III.2.3.4.3. Enrobé pour couche de roulement

❖ Béton bitumineux souple BBS

Ces enrobés sont généralement composés de sable roulé ou alluvionnaire semi-concassé et d'un bitume pur plutôt mou de type 70/100, plus rarement 50/70, à un dosage élevé afin d'obtenir un enrobé déformable et adaptable au support. Leur mise en œuvre et les opérations de compactage sont facilitées par la forte maniabilité de ces enrobés souples. Cependant, ils présentent une très faible résistance à l'orniérage. Leur utilisation est donc réservée aux chaussées souples qui supportent un trafic réduit (≤ 1500 v/j) et à faible vitesse [109].

❖ Béton bitumineux semi-grenu (BBSG)

Les béton bitumineux semi-grenu peuvent être utilisés en couche de roulement et parfois en couche de liaison, avec des épaisseurs de mise en œuvre de 5 à 7 cm ou de 6 à 9 cm. Ils ont une granularité de 0/10 ou 0/14, généralement de type continu. Les épaisseurs minimales sont de 4 ou 5 cm. En général, on utilise un bitume dur ou spécial [116].

❖ Béton bitumineux mince (BBM)

Les liants couramment utilisés sont principalement des bitumes purs, mais des liants spéciaux ou modifiés sont aussi employés pour améliorer le comportement des enrobés sous des conditions de trafic intense. Les performances des Bétons Bitumineux Minces (BBM) sont évaluées selon plusieurs critères, tels que l'orniérage, l'adhérence et l'imperméabilisation. Cette technique est fréquemment appliquée sur les routes nationales. Les BBM se classifient en cinq types selon leur granulométrie : BBM A 0/10 mm, BBM A 0/14 mm, BBM B 0/10 mm, BBM B 0/14 mm et BBM C 0/10 mm. Les types A présentent une courbe granulométrique discontinue entre 2 mm et 6,3 mm, les types B entre 4 mm et 6,3 mm, et le type C possède une courbe granulométrique continue. Les bétons bitumineux minces sont surtout utilisés dans les voiries urbaines pour restaurer la rugosité des chaussées vieillies et satisfaire aux contraintes de gabarit [116].

❖ Béton bitumineux très mince (BBTM)

Il s'agit d'un enrobé à chaud appliqué en une épaisseur de 25 cm, dont la formulation se caractérise par une forte discontinuité : le mélange type est composé d'environ 25 à 27 % de sable

0/2, de 70 à 72 % de gravillon 6/10 et de 2 à 5 % de fines d'apport. L'utilisation d'un bitume modifié à un dosage d'environ 6 % est essentielle ; ces liants modifiés incluent des bitumes polymères, des bitumes avec poudrettes de caoutchouc ou des bitumes avec fibres synthétiques. Les résultats obtenus avec cette couche de roulement, développée vers 1985, sont remarquables en termes de rugosité, d'uniformité et de durabilité. Ce dernier point est particulièrement important car ce type d'enrobé est atypique et ne suit pas les grands principes des enrobés à chaud. Ce résultat très favorable s'explique par la théorie du pralinage, selon laquelle les gravillons sont enrobés par un mastic bitumineux constitué du liant et des éléments fins du sable. Les gravillons sont collés les uns aux autres par ce mastic, ce qui leur permet de bien résister à l'arrachement grâce à l'utilisation d'un liant modifié [122].

❖ Béton bitumineux ultra-minces (BBUM)

Les premières applications des bétons bitumineux ultra-minces ont été réalisées en 1988. Ces matériaux tirent leur technique de la composition des (BBTM) et des enduits superficiels, en se distinguant par leur faible épaisseur. Leur granularité est de 0/10 ou 0/6 sont discontinues 2/6 ou 2/4, avec un liant généralement modifié et un dosage de sable compris entre 20 et 25 %. En termes de performances, ce revêtement offre un excellent compromis entre les BBTM et les enduits superficiels, tout en évitant leurs inconvénients tels que l'usure et le bruit de roulement. Il garantit une adhérence et une drainabilité élevées, qui restent satisfaisantes au moins pendant 7 à 8 ans de suivi [109].

❖ Béton bitumineux drainant (BBD_r)

Un enrobé drainant est une couche de surface de 4 cm d'épaisseur avec une taux des vides comprise entre 20 et 25 %. Ayant une granulométrie de 0/10 ou 0/14, le mélange contient seulement 10 à 12 % de sable 0/2, les gravillons de 6/10 à 10/14 constituant l'essentiel de la structure. La faible teneur en sable limite le dosage en bitume à environ 4,5 à 4,8 %. Cette couche de roulement est perméable à l'eau, permettant à celle-ci de traverser le revêtement et de s'écouler à la base de la couche pour ressortir sur le côté de la chaussée [122].

❖ Béton bitumineux à module élevé (BBME)

Le Béton Bitumineux à Module Élevé (BBME) est un enrobé « structurant » conçu pour les couches de liaison ou de roulement exposées à des sollicitations importantes, telles que celles

rencontrées sur des chaussées à fort trafic ou dans les rond-points. Pour fabriquer cet enrobé, il est essentiel d'utiliser un bitume très dur (20/30) ou même extrêmement dur (10/20), afin d'augmenter le module de rigidité de l'enrobé et ainsi réduire le problème de l'orniérage [116].

III.2.4. Formulation des enrobés

Nous concentrons ici sur les matériaux traités à chaud avec des liants hydrocarbonés, tels que les bétons bitumineux, les graves bitumeuses et les sables bitumineux. La formulation des enrobés bitumineux implique l'ajustement de la composition des granulats et du liant, tant en termes qualitatifs que quantitatifs, afin d'optimiser les performances par rapport à un standard donné pour chaque type d'enrobé. En termes simples, ce processus est souvent désigné comme la formulation d'enrobé bitumineux [24], [26], [33], [114]. Trouver une formulation optimale pour les enrobés bitumineux est un défi complexe, car il s'agit souvent de trouver un compromis entre différentes propriétés. Par exemple, les matériaux roulés améliorent la maniabilité de l'enrobé mais peuvent réduire sa résistance. En revanche, les matériaux concassés augmentent la résistance mais nécessitent plus d'énergie pour le compactage, ce qui augmente les coûts. De plus, des facteurs externes comme la température peuvent influencer ces interactions, rendant encore plus difficile le choix de la formulation idéale [115].

III.2.4.1. Teneur en liant

La teneur en liant T_L est le rapport de la masse de liant, à la masse de granulats secs, « liant non compris » exprimé en pour cent extérieur [26], [45]. La méthode Duriez est basée sur le fait que tous les grains doivent être enrobés d'un film de liant dont l'épaisseur est une fonction croissante (mais non linéaire) de l'épaisseur du grain [46], [122]:

$$T_L = K \times \alpha \sqrt[5]{\Sigma} \quad I.1$$

où : K : module de richesse.

Σ : la surface spécifique des granulats.

α : coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats $\alpha = \frac{2.65}{MVR}$ avec MVR étant la masse volumique des granulats en g/cm³.

La teneur en liant t_l est le rapport de la masse de liant à la masse de mélange total exprimé en pour cent intérieur. T_L est utilisée pour la plupart des enrobés et t_l est utilisé pour les asphaltes coulés [26]. Les nouvelles normes ont adopté des valeurs de teneur en liant minimales ainsi que des enveloppes de granularité pour chaque type d'enrobé, mais une teneur en liant trop forte favorise l'orniérage. La teneur en liant t_{lint} est définie par [36]:

$$t_l = 100 \times \frac{\text{Masse de bitume}}{\text{Masse granulats secs} + \text{Masse de bitume}} \quad I.2$$

Elle peut s'exprimer aussi par :

$$t_l = \frac{100 \times K \times \alpha \sqrt[5]{\Sigma}}{100 + K \times \alpha \sqrt[5]{\Sigma}} \quad I.3$$

TL et tl sont reliés par la formule I.2 [26].

$$t_l = \frac{T_L}{100 + T_L} \quad I.4$$

a) Module de richesse :

Ce module est défini comme une grandeur proportionnelle à l'épaisseur conventionnelle du film de liant autour des granulats [29], [114]. Le module de richesse a une grande importance pour l'usager car c'est la richesse en liant qui commande la souplesse du revêtement, sa faculté d'adaptation et d'autoréparation, de même que sa rigidité et son indéformabilité. Un module de richesse choisi trop faible peut donner un revêtement cassant et friable, un module de richesse trop élevé donne un revêtement très souple, adaptable, autoréparable, mais déformable et manquant de stabilité sous trafic [46].

b) Surface spécifique conventionnelle :

La surface spécifique d'un granulat désigne la surface totale des particules par unité de volume de granulat, exprimée en m^2/m^3 . Cette mesure permet de comparer la surface totale des différents granulats. Pour faciliter les comparaisons entre matériaux ayant des densités différentes, la surface spécifique peut également être exprimée en m^2/kg , ce qui standardise les résultats en fonction de la masse du matériau [29]. Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique [26], [29], [36], [45], [46], [114] :

$$100\Sigma = 0.25G + 2.30S + 12s + 135f \quad I.5$$

Où :

G : proportion des éléments supérieurs à 6.3 mm.

S : proportion des éléments compris entre 0.315 mm et 6.3 mm.

s : proportion des éléments compris entre 0.08 mm et 0.315 mm.

f: proportion des éléments inférieure à 0.08 mm

III.2.4.2. Compacité

La compacité « C% » d'un mélange hydrocarboné est le rapport, exprimé en pour cent, du volume du corps d'épreuve sans tenir compte des vides accessibles, au volume apparent du mélange :

$$C\% = 100\% - V\% \quad I.6$$

Ce pourcentage des vides est calculé à partir de la masse volumique réelle (MVR) et de la masse volumique apparente (MVA) de l'enrobé. La masse volumique réelle (MVR) coïncide à la densité qu'aurait l'enrobé sans des vides [26], [45].

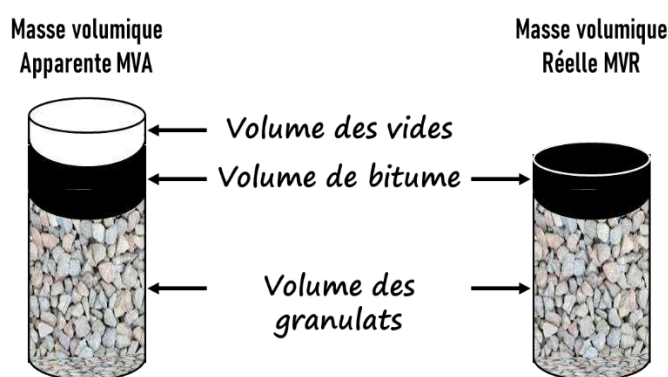


Figure IV. 9. Différence entre MVA et MVR

La masse volumique apparente de mélange est le rapport de la masse de corps d'une épreuve, au volume du corps d'épreuve. Le volume peut être mesuré par des méthodes géométriques on obtient MVA, ou par des méthodes hydrostatiques on obtient dans ce cas MVA. La masse volumique réelle est le rapport de la masse d'un corps d'épreuve au volume du mélange sans tenir compte des vides. Pour les épreuves de formulation MVR est calculée à partir des masses volumiques des composants [26].

$$MVR = \frac{100 + T_L}{\frac{\%G_1}{\rho_1} + \frac{\%G_2}{\rho_2} + \dots + \frac{T_L}{\rho_{Liant}}} \quad I.7$$

où %Gi sont les pourcentages des fraction granulaires et pi leur masse volumiques respectives.

V%, C% et les masses volumiques sont reliés par les formules suivantes :

$$C\% = 100 \times \frac{MVA}{MVR} \quad I.8$$

$$V\% = 100 \left[1 - \frac{MVA}{MVR} \right] \quad I.9$$

Dans la conception des mélanges bitumineux caoutchouté un pourcentage élevé de vides dans les granulats minéraux est nécessaire pour permettre l'espace pour l'asphalte caoutchouté en raison du film de liant plus épais dans le mélange. Cela détermine que la conception des mélanges caoutchouté est différente de celle des mélanges bitumineux conventionnels. Pour les mélanges caoutchoutés les granulométries à gradation discontinue et à gradation ouverte sont largement utilisées en pratique. Les granulats à gradation discontinue/ouverte fournissent suffisamment de vides pour accueillir les particules de caoutchouc gonflées. Les résultats expérimentaux indiquent que les VV et VMA sont les deux paramètres clés qui affectent la performance de l'orniérage des mélanges bitumineux caoutchouté. Cela souligne l'importance de sélectionner correctement les VV et VMA dans la conception des mélanges caoutchouté. [123].

III.2.4.3. Méthode de Formulation

Il y'a nombreux méthodes de formulation des enrobés bitumineux couramment utilisées actuellement :

a) Méthode Hveem :

La méthode Hveem consiste à déterminer, à l'aide de la méthode CKE, la teneur requise en bitume d'un mélange et à en vérifier les propriétés mécaniques à l'aide des essais au stabilomètre et au cohésiomètre. La méthode CKE (Centrifuge Kerosene Equivalent) est basée sur la surface spécifique du granulat. Les essais au stabilomètre et au cohésiomètre utilisent des éprouvettes cylindriques compactées à l'aide d'un piston de forme spéciale dont la section n'est qu'une fraction de celle de l'éprouvette [24], [46].

b) Méthode Marshall :

Cette methode existe depuis plusieurs décades. Elle est connue dans le monde entier et elle est encore largement utilisée par les laboratoires et les bureaux d'ingénieurs. Son principe consiste à optimiser la teneur en liant d'un mélange granulaire donné sur la base de la compacité et de la stabilité Marshall (compression diametrale empêchée à 60°C) [26], [46].

c) Méthode Hubbard-Field :

La méthode d'étude hubbard-field consiste à déterminer la teneur en bitume d'un mélange bitumineux dont la composition granulométrique est donnée et d'en apprécier les qualités mécaniques à l'aide de l'essai Hubbard-field qui est un essai de cisaillement. On détermine la charge nécessaire pour faire passer une éprouvette, placée dans un cylindre, à travers un anneau de diamètre moindre [24].

d) Méthode Superpave :

L'ensemble de la méthode Superpave est issu de programme de recherches SHRP. Cette méthode est conçue sur trois niveaux, le « niveau 1 » ne s'applique qu'à des trafics cumulés faible et il intègre la sélection des composants, l'optimisation de leur proportion à base de l'essai PCG et enfin la détermination de sensibilité à l'eau. Le « niveau 2 » concerne des trafics plus forts, il comprend la détermination de propriétés mécaniques : tenue au fluage, module complexe, fatigue, etc. la « niveau 3 » correspond aux trafics très lourds, par rapport au niveau 2, il peut comprendre des tests supplémentaires, comme l'orniérage, la fatigue en flexion, le retrait empêché [26].

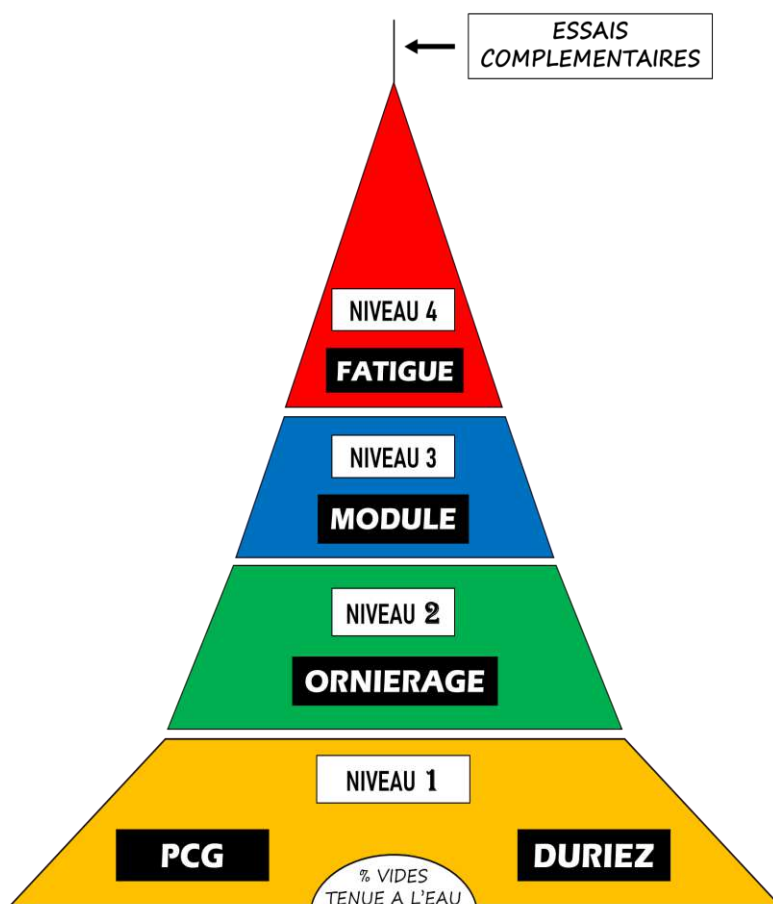


Figure IV. 10. Formulation 04 niveau

e) Méthode dite triaxiale :

La méthode triaxiale consiste à mesurer la propriétés intrinsèques d'un mélange. L'essai Smith utilise des éprouvettes standard de 9.70 cm de diamètre et de 20.3 cm de hauteur obtenus par compression. Les deux caractéristiques essentielles de cette méthode d'étude sont, d'une part,

l'examen de la teneur en vides et de la compacité et d'autre part, un essai de stabilité sur l'éprouvette soumise à une compression triaxiale [24].

III.2.4.4. Autre méthode de formulation

On distingue des autres procédés de formulation dites « traditionnelles », ce sont des méthodes basées sur des essais mécaniques qualifiés « modernes » et finalement des méthodes analytiques.

a) Méthodes de formulation basées sur les essais traditionnels :

Ces méthodes désignent un seul aspect du comportement mécanique des enrobés à savoir la rupture plastique d'une éprouvette dans des conditions standard de température, d'humidité et de charge basées sur le principe que le choix de la composition appropriée doit répondre aux exigences de résistance. Les essais mécaniques traditionnels les plus utilisés sont l'essai de fluage Marshall et l'essai Duriez [33], [34].

b) Méthodes de formulation basées sur les essais mécaniques modernes :

Ce type d'essais a pour but de déterminer les caractéristiques intrinsèques du comportement du matériau. A.G. Dumont propose une classification de ces essais en fonction de quatre propriétés appréhendées à différents temps pour les enrobés bitumineux à savoir : l'aptitude au compactage pour le court terme, l'orniérage et la fatigue pour le moyen terme et la durabilité pour le long terme. Les essais les plus utiles sont : l'essai de module complexe, l'essai de fatigue et l'essai de fluage dynamique [33], [34].

c) Méthodes de formulation analytiques :

Ces méthodes s'appuient sur des modèles développés à partir de recherches pour estimer les propriétés mécaniques et physiques d'un enrobé en fonction de sa composition. Elles consistent à remplir progressivement les vides entre les fractions granulaires, en commençant par les particules les plus grosses, pour obtenir une structure minérale dense. Le processus débute par le choix de la famille d'enrobé (comme sableux ou grenu), suivi du calcul du pourcentage de vides dans le mélange selon sa granulométrie. Ensuite, on ajuste la teneur en bitume en fonction du taux de compacité visé. Enfin, on calcule les propriétés mécaniques en utilisant des formules spécifiques aux paramètres physiques des matériaux. Ainsi, l'optimisation de la formulation et la prévision des performances peuvent être réalisées avant la production du mélange [34].

III.2.5.Comportement des enrobés bitumineux

III.2.5.1. Généralités

Pour bien fonctionner dans les systèmes de revêtement, les mélanges bitumineux doivent :

- ✓ Avoir la capacité de distribuer les contraintes ;
- ✓ Résister à la déformation permanente ;
- ✓ Résister à la fissuration (notamment la fissuration par fatigue, mais aussi la fissuration thermique, réfléchissante et de construction) ;
- ✓ Résister aux dommages causés par le gel-dégel et l'humidité.

La capacité à répondre à ces exigences est liée aux propriétés mécaniques fondamentales du mélange. Celles-ci sont influencées par de nombreux facteurs liés aux matériaux constitutifs (liants, granulats, additifs et leurs proportions), aux charges (vitesse de chargement, temps de chargement et de repos, niveau de charge, état de contrainte, etc.), aux conditions environnementales (température, humidité, etc.) et à la construction (méthode de compactage, contrôle de qualité, etc.) [124].

III.2.5.2. Grandes classes de comportement

Les enrobés bitumineux présentent un comportement complexe, mais il est possible d'identifier différents types de comportements principaux en tenant compte de l'amplitude de la déformation ($|\epsilon|$) et du nombre de cycles de chargement appliqué (N) [125], [126]:

- ✓ Pour des chargements de quelques centaines de cycles et des déformations de « faible amplitude » ($<10^4$ m/m), le comportement est approximativement viscoélastique linéaire.
- ✓ Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pourcents, les essais de déformabilité montrent un comportement fortement non linéaire.
- ✓ Lors de chargements de plusieurs milliers de cycles et sous faibles déformations, des phénomènes d'endommagement apparaissent, et le matériau se fatigue.
- ✓ Lorsque des cycles de contraintes déviatoires sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles significatives se produisent pour des amplitudes de déformation proches de la rupture. Leur accumulation engendre de l'orniérage.

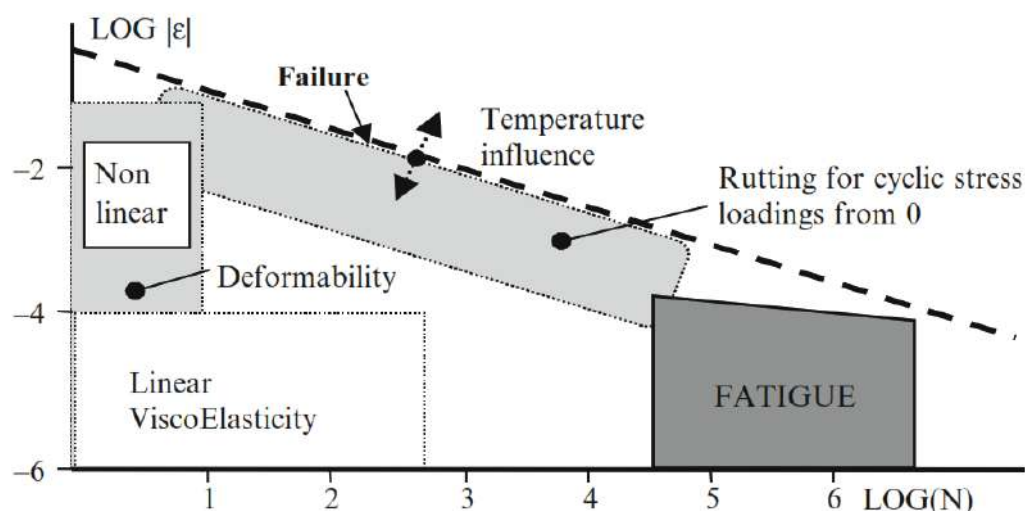


Figure IV. 11. Comportement "type" des bétons bitumineux [125], [126]

En considérant le tracé de la Figure IV.11 proposé par Di Benedetto [125], il est possible d'identifier les domaines correspondant aux différents aspects introduits précédemment ainsi que le type de comportement « typique » correspondant pour les mélanges. Bien entendu, cette figure doit être considérée comme une indication générale. La limite des différents domaines, présentée sur les axes logarithmiques de déformation par rapport au logarithme du nombre de cycles, est une indication et la transition d'un domaine à un autre se fait de manière douce et continue [124].

D'après François Olard, les quatre propriétés mécaniques essentielles pour les matériaux traités aux liants hydrocarbonés utilisés dans le domaine routier sont les suivantes [41]:

- ✓ La rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire : VEL),
- ✓ Le comportement en fatigue,
- ✓ Le comportement à l'orniérage, qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes. Il s'agit donc d'un phénomène lié aux irréversibilités et aux non-linéarités déjà présentes dans le domaine des faibles déformations,
- ✓ La fissuration et la propagation des fissures à travers la structure de la chaussée. En particulier, le phénomène de fissuration dû à l'apparition de contraintes liées aux variations de température (dilatation et/ou contraction thermique) est un aspect important qui introduit un couplage thermique/mécanique.

Les deux premières propriétés sont particulièrement cruciales pour le dimensionnement des structures routières, car elles permettent de déterminer l'effet structural et son évolution au fil du temps. Il est important de noter que la température joue un rôle central dans les études concernant ces matériaux.

III.2.5.3. Hypothèses

Les mélanges bitumineux sont décrits comme des matériaux homogènes, isotropes, viscoélastiques, linéaires et thermosensibles. Il convient de noter que la caractérisation de l'orniérage, non abordée ici, nécessite de modéliser le béton bitumineux avec un comportement élasto-viscoplastique dans le cas de grandes déformations à haute température et sous des vitesses de chargement lentes [115].

En prenant en compte l'hypothèse de milieu continu, bien que les enrobés utilisés pour les chaussées soient intrinsèquement hétérogènes en raison de leur nature composite et granulée, on peut les considérer comme homogènes à une échelle macroscopique notamment celle d'une couche de chaussée. Pour les éprouvettes en laboratoire il est généralement admis qu'un rapport d'au moins 10 entre la taille du plus gros granulat et celle de l'éprouvette est suffisant pour les considérer comme homogènes. Bien que ce rapport ne soit pas toujours respecté (par exemple, il est d'environ 6 pour les éprouvettes testées en retrait thermique empêché) l'hypothèse d'homogénéité est malgré tout retenue pour simplifier les analyses et les calculs [41].

L'hypothèse d'isotropie en génie routier peut être compromise en raison de l'anisotropie induite par le processus de mise en œuvre des enrobés sur les chaussées. Lors du répandage en couches successives et du compactage avec des machines spécialisées, les grains peuvent s'orienter préférentiellement, créant ainsi une anisotropie dans le matériau. Ce phénomène est également observé dans les éprouvettes fabriquées en laboratoire. Pour réduire ces effets les tests sont souvent réalisés sur des échantillons prélevés dans une seule direction du matériau. Toutefois, dans les calculs de dimensionnement routier l'hypothèse d'isotropie du matériau est généralement maintenue pour simplifier les analyses et les conceptions [41].

Le mélange bitumineux se comporte donc comme un matériau viscoélastique, avec une rigidité attribuée à son squelette minéral et un caractère visqueux dû au bitume.

Lorsque les charges sont appliquées très lentement il présente un comportement principalement fluide visqueux. À l'inverse lorsqu'elles sont appliquées très rapidement il exhibe un comportement presque élastique. Entre ces deux extrêmes il adopte un comportement viscoélastique dont la linéarité dépend du niveau de déformation [127].

Les mesures du module des matériaux bitumineux sont effectuées dans leur domaine linéaire, nécessitant ainsi l'application de "petites déformations". L'hypothèse d'un comportement viscoélastique linéaire des enrobés bitumineux est associée à la validité du principe de superposition de Boltzmann : la réponse d'un matériau à une sollicitation complexe est la somme des réponses aux sollicitations élémentaires qui la composent. Pour les matériaux bitumineux

présentant un comportement viscoélastique linéaire, il existe plusieurs méthodes pour mesurer la rigidité des enrobés : l'une repose sur un chargement quasi-statique (mode temporel), une autre sur un chargement sinusoïdal (mode fréquentiel), et d'autres encore combinent ces méthodes avec des techniques d'"impulsions", où la sollicitation maximale est contrôlée sans pilotage précis de la loi de chargement. Bien que l'hypothèse de comportement viscoélastique linéaire soit souvent utilisée pour décrire avec précision la réponse temporelle des matériaux, dans certains cas, une hypothèse d'élasticité linéaire peut suffire pour modéliser les contraintes et déformations dans les couches bitumineuses. Dans ce cas, le caractère viscoélastique du matériau est néanmoins pris en compte en choisissant des valeurs de module adaptées aux conditions moyennes de fréquence et de température [115].

La température joue un rôle crucial dans le comportement des matériaux bitumineux. Étant donné que l'enrobé bitumineux contient du liant il est sensible à la température c'est-à-dire que ses propriétés varient considérablement en fonction de celle-ci ; À basse température, l'enrobé présente une rigidité élevée sous des sollicitations courantes (comme le trafic routier) et peut devenir fragile. En revanche, à haute température il exhibe un module plus faible et une plus grande déformabilité, ce qui peut entraîner des phénomènes tels que l'orniérage, surtout lorsque la sollicitation est appliquée lentement [127].

CHAPITRE V :

PRÉSENTATION DES MATÉRIAUX ET DES FORMULATIONS

IV. PRÉSENTATION DES MATÉRIAUX ET DES FORMULATIONS

Introduction

Ce chapitre se concentre sur les matériaux utilisés et les méthodes expérimentales appliquées dans le cadre de cette recherche visant à améliorer les bétons bitumineux à base de sable de dunes avec un bitume modifié par une poudrette caoutchouc préviens des pneus usés modifiés avec des déchets de caoutchouc. L'objectif principal est de fournir une description détaillée des matériaux employés, le programme expérimental suivi par cette étude ainsi que des formulations des enrobés bitumineux à base de sable de dunes qui ont été testées.

IV.1. Matériaux utilisés

IV.1.1. Le bitume

Le bitume est un élément important de la composition des enrobés bitumineux. Il permet de relier les agrégats et de donner à ce matériau ses propriétés caractéristiques. Le bitume utilisé dans notre étude produit par la centrale d'enrobage SDIRA à El-Oued importé d'Espagne, il s'agit de bitume pur de grade (40/50) fréquemment utilisé en Algérie pour la confection de béton bitumineux utilisée à la couche de roulement. Des essais de spécification ont été réalisés sur ce dernier ; l'essai de pénétrabilité à l'aiguille (PEN à 25°C) et l'essai du point de ramollissement bille et anneau (TBA) ainsi que la détermination de la densité relative et le point de flamme. Les caractéristiques usuelles de bitume sont synthétisées dans le tableau V.1.

Tableau V. 1. Caractéristiques de bitume

ESSAI	Résultats	Normes	Seuils de spécifiés
Pénétrabilité relative à 25°C	43.5	EN 1426	40-50
TBA (°C)	54	EN 1427	47-60
Densité relative à 25°C	1.015	EN 1526	1.00 à 1.10
Point de flamme (°C)	285	NF T 66-0011	280

IV.1.2. Les graviers

Les graviers utilisés dans cette étude sont **3/8** et **8/15** proviennent de la carrière d'Ain Touta à 80 Km de Biskra (Figure V.1). L'identification des caractéristiques des deux fractions granulaires a nécessité la réalisation de plusieurs essais, dont l'analyse granulométrique, la mesure de la propreté, l'appâtissement, l'essai Los Angeles et micro Deval, la détermination des et masses volumiques (tableau V.4). Les courbes granulométriques des graviers sont illustrées dans la Figure V.5.



Figure V. 1. Fractions granulaire 8/15 et 3/8 utilisées

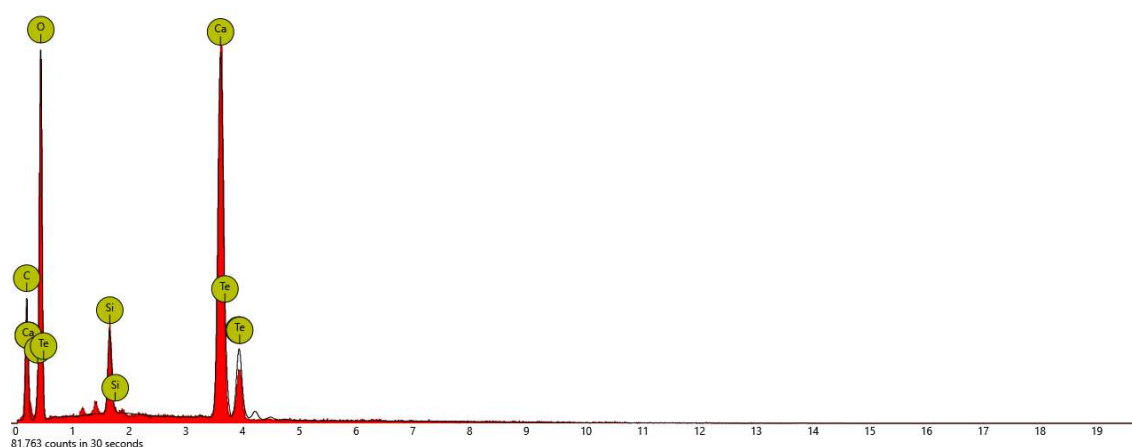


Figure V. 2. Spectre EDS de gravier montrant les pics caractéristiques des éléments O, C, Si, Ca, et Te.

Tableau V. 2. Composition élémentaire de gravier

Elément	Concentration atomique	Concentration pondérale	Oxide	Concentration pondérale stœchiométrique
O	55.38	38.50		
Ca	16.47	28.68	CaO	52.61
Te	3.28	18.16		
C	22.47	11.73		
Si	2.40	2.93	SiO ₂	8.21

Les résultats de l'analyse par microscopie électronique à balayage (MEB) sur le gravier démontrent une composition élémentaire dominée par l'oxygène le calcium et le carbone ce qui est cohérent avec la structure chimique typique du calcaire principalement composé de carbonate de calcium (CaCO_3). L'oxygène avec une concentration atomique de 55,38 % et pondérale de 38,50 % est l'élément prédominant suivi du calcium qui présente une concentration atomique de 16,47 % et une concentration pondérale de 28,68 %. Ce calcium est principalement sous forme d'oxyde de

calcium (CaO) qui contribue à 52,61 % de la concentration pondérale. Le carbone élément central du carbonate de calcium montre une concentration atomique de 22,47 % et pondérale de 11,73 %. La présence de silicium bien que minoritaire avec une concentration atomique de 2,40 % et pondérale de 2,93 % est typique des impuretés présentes dans le calcaire probablement sous forme de dioxyde de silicium (SiO₂) qui constitue 8,21 % de la concentration pondérale. Cependant la détection de tellure avec une concentration atomique de 3,28 % et pondérale de 18,16 %, est inhabituelle.

IV.1.3. Le sable

Le sable utilisé dans ce travail est le sable de dunes. Environ 09 échantillons de sable de dunes ont été prélevés sur les trois faces d'une dune appelée Touareg, de bas en haut, et à différentes profondeurs. La dune Touareg fait partie des milliers de dunes du Grand Erg Oriental, elle est située au sud-ouest de Ouargla environ 25km, ses coordonnées géographiques sont de latitude 31° 48'53'' est 5° 14' 06''. Ces échantillons sont mélangés pour obtenir un échantillon homogène (Figure V.3). Des essais de caractérisation ont été réalisés dont l'analyse granulométrique, l'équivalente de sable, le bleu méthelene, la détermination des masses volumiques et l'analyse chimique. Le tableau.V.4 présente les caractéristiques géotechniques moyennes consignées des agrégats. Le courbe granulométrique est représenté dans la Figure V.5.



Figure V. 3. Sable de dunes utilisé

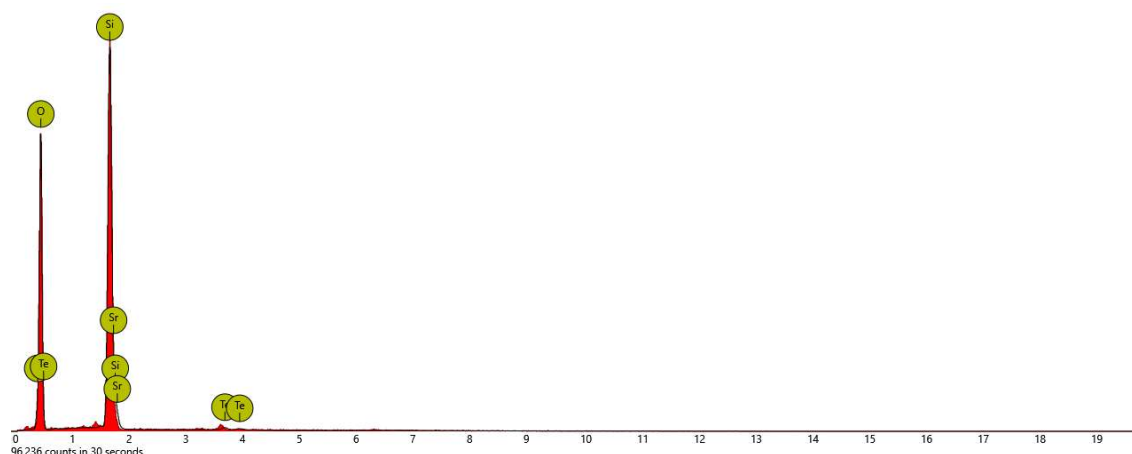


Figure V. 4. Spectre EDS de sable de dunes montrant les pics caractéristiques des éléments O, Si, Sr, et Te

Tableau V. 3. Composition élémentaire de sable de dunes

Elément	Concentration atomique	Concentration pondérale	Oxide	Concentration pondérale stœchiométrique
O	71.40	54.99		
Si	26.63	36.00	SiO ₂	89.52
Sr	1.62	6.83		
Te	0.36	2.19		

L'analyse par microscopie électronique à balayage du sable de dunes révèle une composition majoritairement dominée par l'oxygène et le silicium caractéristiques typiques du quartz SiO₂ qui est le composant principal des sables de dune. L'oxygène constitue 71,40 % en concentration atomique et 54,99 % en concentration pondérale ce qui est attendu car l'oxygène est présent dans le dioxyde de silicium SiO₂ le principal minéral du sable. Le silicium avec une concentration atomique de 26,63 % et une concentration pondérale de 36,00 % est également abondant ce qui confirme que le quartz est la phase minérale dominante. La concentration pondérale de l'oxyde de silicium (SiO₂) atteint 89,52 % ce qui reflète une forte pureté en quartz. La présence de strontium (Sr) avec une concentration atomique de 1,62 % et pondérale de 6,83 % est notable bien que relativement faible par rapport au silicium. La détection du tellure (Te) avec une concentration atomique de 0,36 % et pondérale de 2,19 % est surprenante car cet élément est rarement trouvé dans le sable de dunes.

Tableau V. 4. Caractéristiques des agrégats

NORMES	ESSAIS	RESULTAS				Spécifications
NF P 15-560	Analyse granulométrique	Tamis (mm)	Classe granulaire		Sable de dunes	
			8/15	3/8		
		20	100,00	-	-	Les courbes granulométriques doivent être insérées dans le fuseau de référence
		16	96,06	-	-	
		14	87,16	-	-	
		12,5	71,15	-	-	
		10	42,21	100,00	-	
		8	19,86	98,33	-	
		6,3	4,37	79,67	-	
		5	0,51	50,67	-	
		4	0,26	28,83	-	
		3,15	0,00	15,55	-	
		2	-	5,00	-	
		1,25	-	0,67	100,00	
		0,63	-	0,50	100,00	
		0,315	-	0,00	31,30	
		0,16	-	-	9,80	
		0,08	-	-	9,80	
	Masse volumique (g/cm³)	2.61	2.62	2.66	-	
NF P 15-461	Analyse chimique (%)	Insoluble	8.85		93.07	
		Sulfates	0.40		0.61	
		Carbonates	73		1.28	
		Chlorures	0.014		0.012	
NF P 18-591	Propreté	P (%)	0.80	0.50	-	< 1%
NF P 18-561	Aplatissement	A (%)	17.6	16.8	-	< 20%
NF P 18-573	Los Angeles	LA (%)	18.6	19.5	-	< 25%
NF P 18-572	Micro-Deval	MDE (%)	16.5	18.2	-	< 20%
	Equivalent de sable (%)	ES _v (%)	-	-	91.08	-
		ES _p (%)	-	-	86.40	< 60%
NF EN 933-9	Bleu de méthylène	VBS (%)	-	-	0.02	< 1%

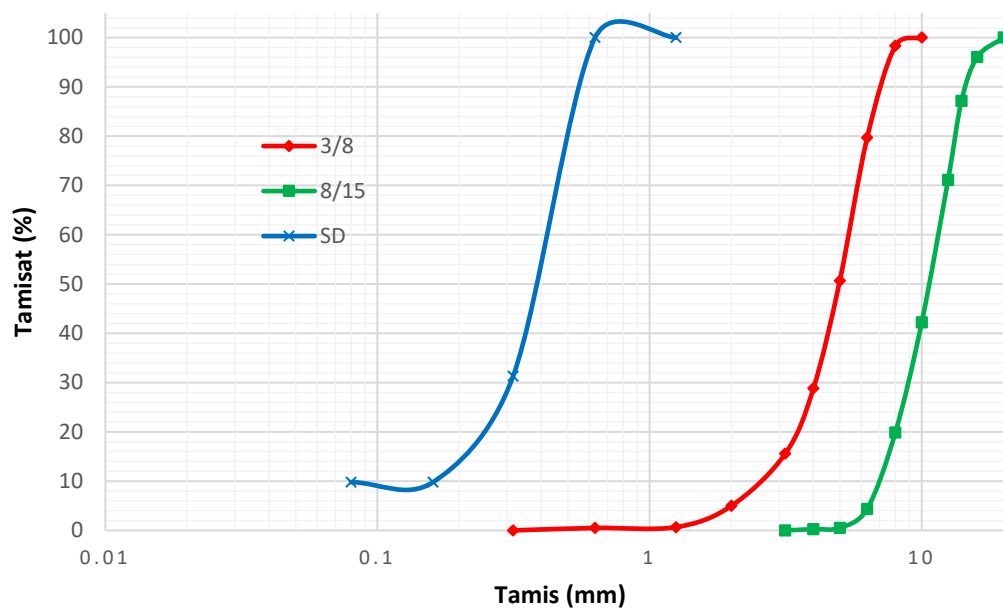


Figure V. 5. Courbes granulométriques des agrégats utilisées

IV.1.4. Les fines

Dans le but d'optimiser les performances mécaniques des bétons bitumineux étudiés, et de compenser la pauvreté des mélanges en fines granulates, deux types de fines ont été incorporés : le filler calcaire et le sable de dunes broyé.



Figure V. 6. Les fines utilisées ; A) Filler de calcaire, B) Sable de dunes broyé

IV.1.4.1. Le filler de calcaire

Le filler utilisé dans cette étude est une poudre de calcaire broyée produite par l'entreprise CALCO. Elle est fréquemment utilisée, à faibles dosages pour l'amélioration des enrobés bitumineux, ainsi que dans d'autres applications, notamment agricoles. La figure V.7 montre les grandes particules de fillers de calcaire observées au microscope mesurant 16.52 μ m et 12.43 μ m. La figure V.8 est une image MEB montrant la morphologie de la surface à une échelle de 100 et 50 μ m de FC. L'analyse chimique et les caractéristiques physiques sont présentes dans le tableau V.5 et V.6.

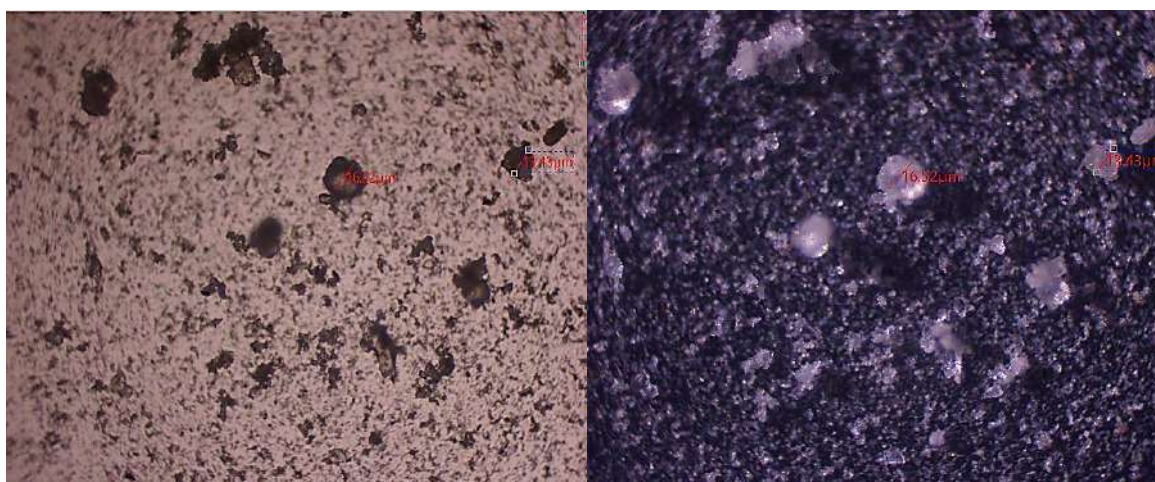


Figure V. 7. Observation de filler de calcaire par microscope

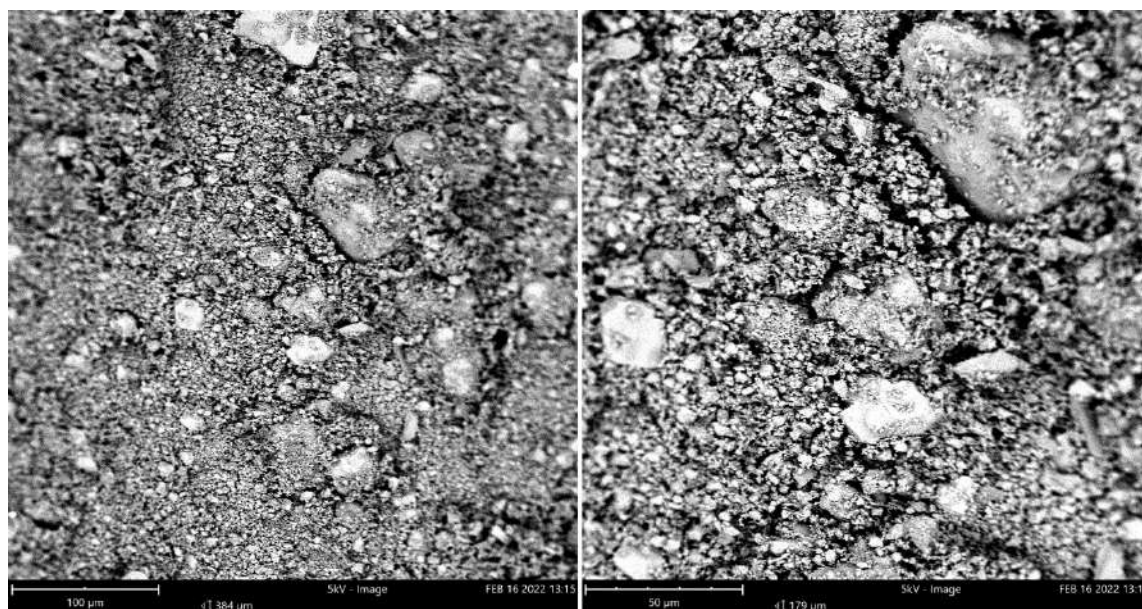


Figure V. 8. Images MEB de filler de calcaire montrant la morphologie de la surface à une échelle de 100 et 50 μ m

IV.1.4.2. Les fines de sable de dunes

Afin d'apporter les fines nécessaires pour nos mélanges, nous avons broyé le sable de dunes à l'aide de Machine Micro Deval à sec (Procédé de broyage sans eau). Son mécanisme offre un excellent environnement pour produire des poudres de sable. Le procédé de broyage consiste de mettre dans chaque cylindre 1500 g de sable refus de tamis 1 mm avec 2000 g des billes sphériques de 10 mm $\pm$ 0.5 mm en acier inox, la durée de broyage est fixée à 03 heures avec une vitesse de 100 tr/min $\pm$ 5 tr/min soit un total de 18000 tr. La figure V.9 montre les grandes particules de sable de dunes broyé observées au microscope mesurant 12.99 et 6.04 μ m. La figure V.10 est une image MEB montrant la morphologie de la surface à une échelle de 100 et 50 μ m de SDB. L'analyse chimique et les caractéristiques physiques sont présentes dans le tableau V.5 et V.6.

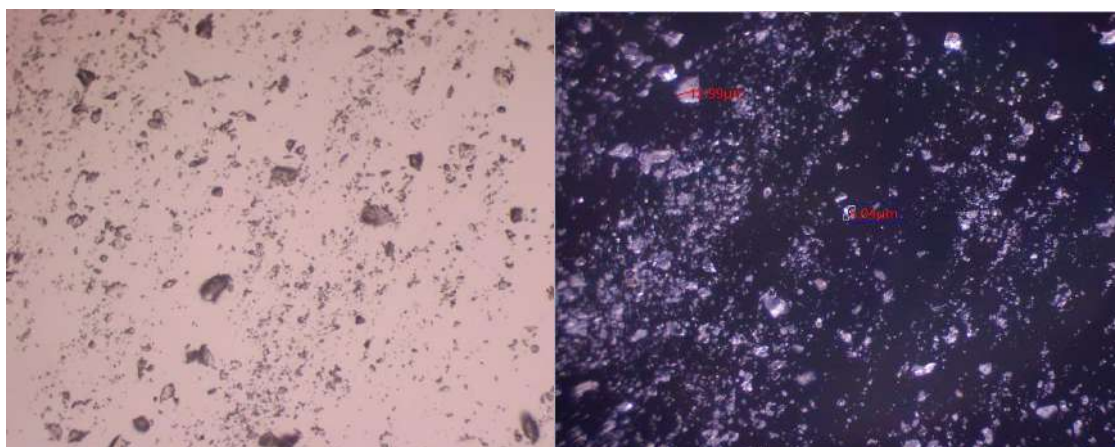


Figure V. 9. Observation de sable de dunes broyé par microscope

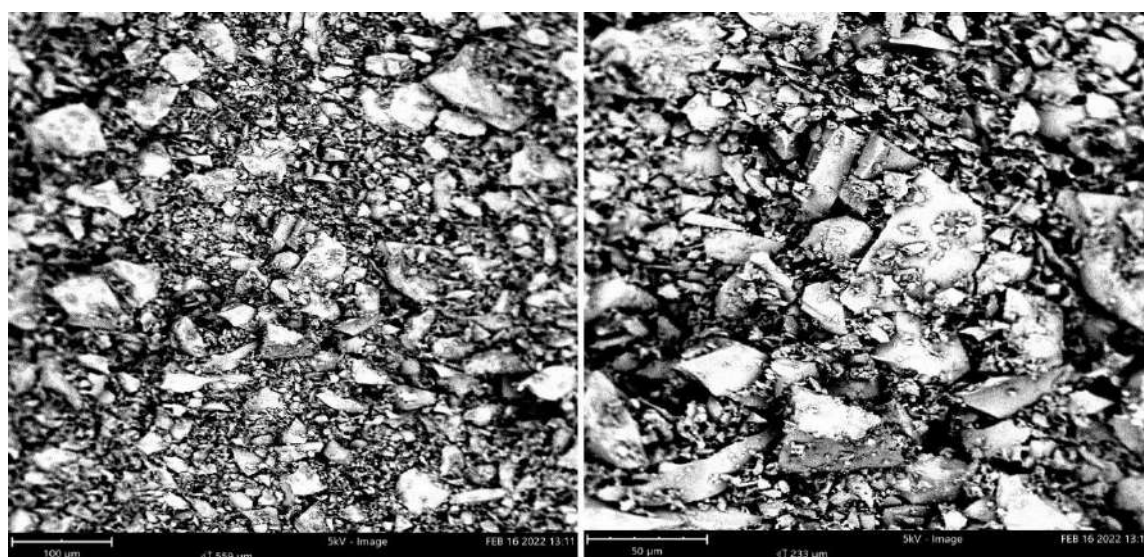


Figure V. 10. Images MEB de sable de dunes broyé montrant la morphologie de la surface à une échelle de 100 et 50 μ m

Tableau V. 5. Analyse chimique des fines

Analyse chimique (%)	Filler de calcaire	Sable de dunes broyé
MgO	0.52	-
Al ₂ O ₃	0.40	-
Fe ₂ O ₃	0.42	0.21
CaCO ₃	97.9	1.28
SO ₄ Ca, 2H ₂ O	-	2.72
SO ₄	-	0.61
Insoluble	-	93.07

Tableau V. 6. Caractéristiques physiques des fines

Caractéristiques physique	Filler de calcaire	Sable de dunes broyé
Densité (g/cm ³)	2.72	2.65
SSB (g/cm ²)	614.15	373.35

IV.1.5. Poudrette de caoutchouc

Le broyage des pneus de voitures particulières usagés, effectué par la société SAEL à Oued-Smar (Alger), permet de produire des poudrettes de caoutchouc valorisées dans divers domaines, notamment dans les revêtements de sols sportifs. Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé cette poudrette, illustrée à la Figure V.11, comme agent modifiant. Il s'agit d'une poudre de fraction granulométrique 0/2. La Figure V.12 présente la courbe granulométrique de la poudrette de caoutchouc utilisée. Le Tableau V.7 regroupe les principales caractéristiques physiques de cette poudrette, tandis que le Tableau V.8 en présente la composition chimique.



Figure V. 11. Poudrette de caoutchouc utilisée

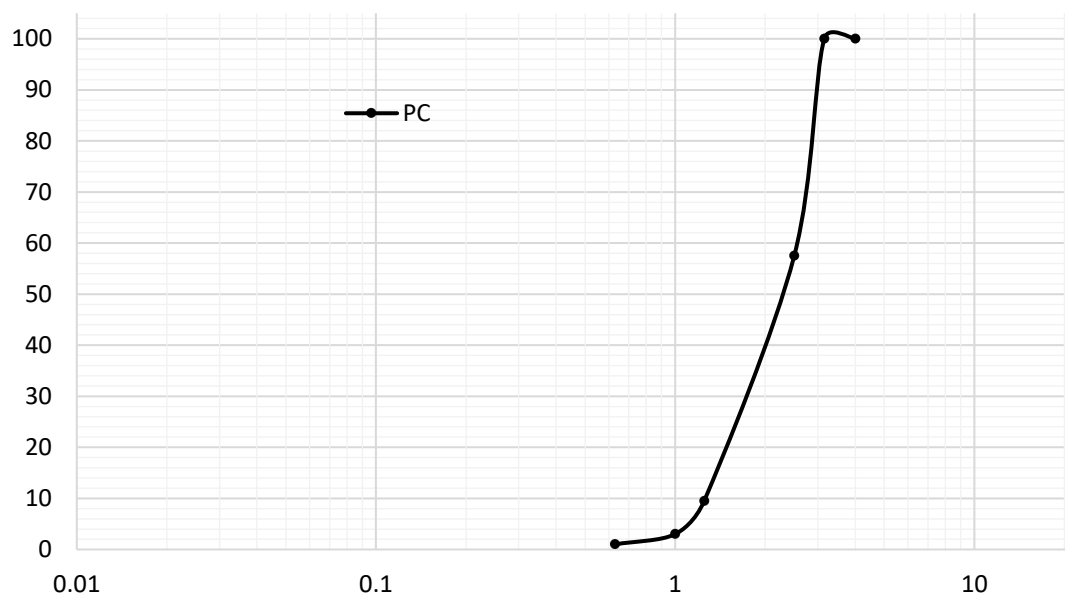


Figure V. 12. Courbe granulométrique de poudrette de caoutchouc

Tableau V. 7. Caractéristiques de la poudrette de caoutchouc utilisée [128]

Propriétés	PC
Densité (g/cm ³)	0.83
Classe	0/2
Allongement (%)	420
Taux des fibres d'acier (%)	0
Absorption (%)	> 4

Tableau V. 8. Composition chimique de la poudrette de caoutchouc utilisée [128]

Elément	Pourcentage massique
Caoutchouc	54
Noir de carbone	29
Textile	2
Oxyde de zinc	1
Soufre	1
Additifs	13

IV.2. Programme Expérimental

La Figure V.13 présente le programme expérimental suivi par cette étude. Ce programme expérimental se compose de plusieurs étapes, visant à étudier et à optimiser les formulations de bétons bitumineux à base de sable de dunes, en utilisant du bitume modifié avec de la poudrette de caoutchouc provenant de pneus usés.

IV.2.1. Étude de formulation de béton bitumineux à base de sable de dunes

Cette première phase consiste à élaborer différentes formulations de béton bitumineux utilisant du sable de dunes sans fines. Puis nous avons évalué l'influence d'ajout de deux types de fines ; (les fillers de calcaire et le sable de dunes broyé). Les variantes étudiées sont :

- M1 : Formulation sans ajout de filler (fines).
- M2 : Formulation avec l'ajout de 2% de filler calcaire.
- M3 : Formulation avec l'ajout de 4% de filler calcaire.
- M4 : Formulation avec 2% de sable de dunes broyé.
- M5 : Formulation avec 4% de sable de dunes broyé.

Ces formulations permettent de tester l'influence de différents types et quantités de fines sur les propriétés mécaniques du béton bitumineux.

À l'issue des essais sur les différentes formulations le mélange offrant les meilleures performances en termes de compacité, stabilité, et résistance est sélectionné pour les étapes suivantes.

IV.2.2. Modification du bitume avec de la poudrette de caoutchouc

Le bitume 40/50 utilisé dans le béton bitumineux est modifié par l'ajout de poudrette de caoutchouc à différents pourcentages en poids :

- C4 : Bitume modifié avec 4% de poudrette de caoutchouc.
- C8 : Bitume modifié avec 8% de poudrette de caoutchouc.
- C12 : Bitume modifié avec 12% de poudrette de caoutchouc.
- C16 : Bitume modifié avec 16% de poudrette de caoutchouc.

Cette modification vise à améliorer la résistance aux fissures, la flexibilité et la durabilité du matériau.

IV.2.3. Étude du béton bitumineux à base de sable de dunes et de bitume modifié avec de la poudrette de caoutchouc

Cette phase finale consiste à tester et à évaluer les performances des bétons bitumineux fabriqués avec le bitume modifié à différents pourcentage (4, 8, 12 et 16% en poids de bitume).

Les essais effectués sur le béton bitumineux sont ;

Presse de cisaillement giratoire : Cet essai permet de simuler le compactage du béton bitumineux sous des contraintes de cisaillement similaires à celles rencontrées en conditions réelles sur la chaussée. Il aide à évaluer la densité et la compacité optimale des mélanges sous des charges variables.

Essai Marshall : Cet essai classique permet de mesurer la stabilité et la déformabilité du béton bitumineux sous des charges spécifiques. Il est utilisé pour déterminer les propriétés de résistance au cisaillement et la capacité du mélange à supporter des charges lourdes sans déformation excessive.

Essai Duriez : Cet essai évalue la résistance à la traction indirecte et la sensibilité à l'eau du béton bitumineux. Il aide à vérifier la durabilité du mélange en conditions humides et son potentiel de décollement sous l'effet de l'eau.

Essai d'orniérage : Cet essai simule l'apparition de déformations longitudinales (ornières) sous l'effet de charges répétées. Il permet d'évaluer la résistance du mélange à la formation d'ornières, un indicateur clé de la performance à long terme des chaussées.

Essai de module : Cet essai mesure le module de rigidité du béton bitumineux c'est-à-dire sa rigidité sous des sollicitations. Il permet d'évaluer la capacité du matériau à résister aux déformations élastiques et viscoélastiques sous l'effet des charges répétées du trafic.

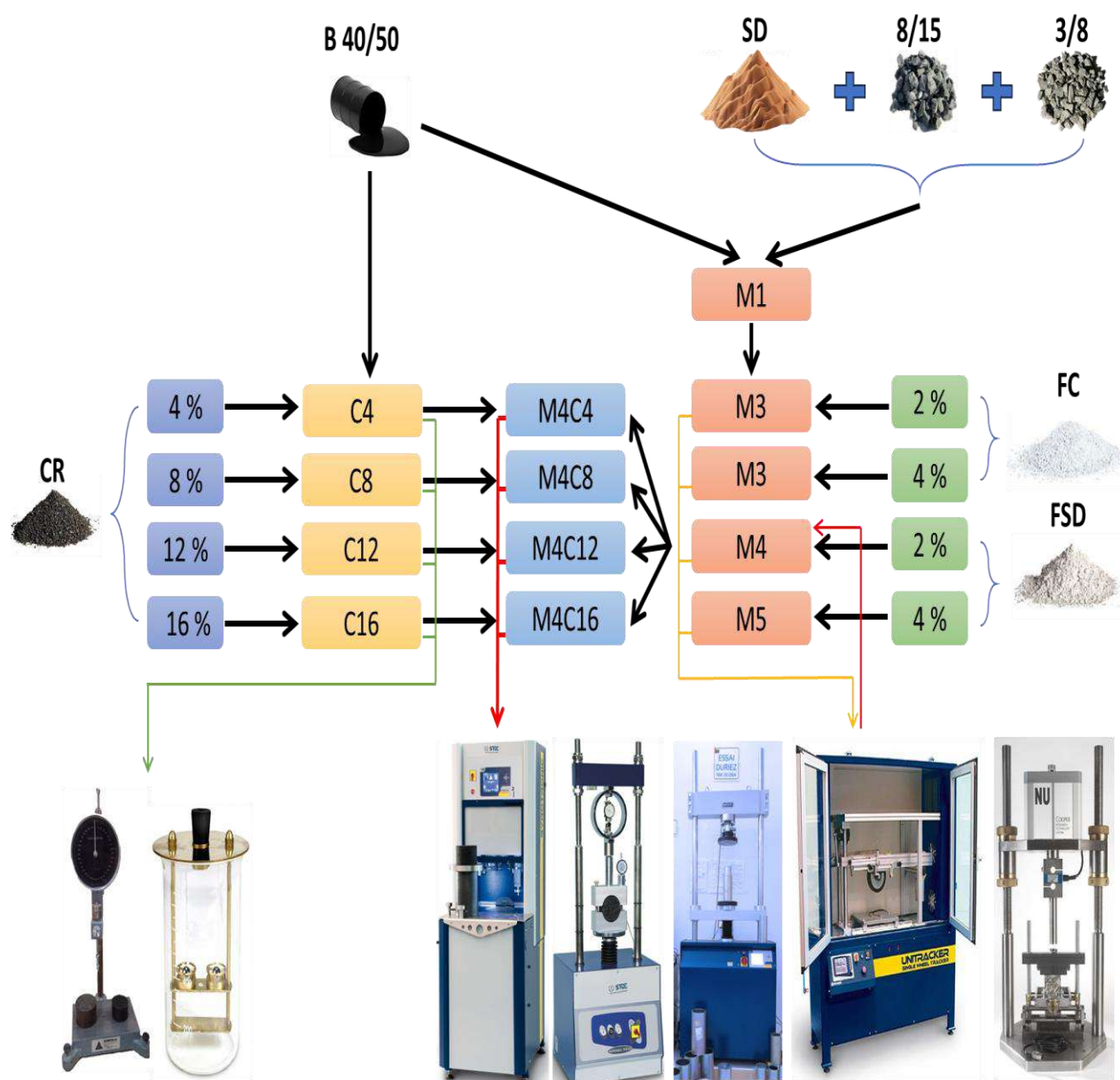


Figure V. 13. Programme expérimental de l'étude

IV.3. Formulations des enrobés

L'enrobé le plus utilisée dans les chaussées Algérienne est le béton bitumineux semi grenus (BBSG). Il est de granulométrie 0/14 et il est souvent utilisé comme couches de roulement et de liaisons, cet enrobé faudra conforme à la norme NF P 98-130. L'enjeu primordial de la formulation d'un enrobé consiste à définir la composition optimale de granulats, liants et le pourcentage de vide, afin de répondre aux exigences de performance recherchées. L'étude de formulation des bétons bitumineux, de manière générale, se compose de deux phases distinctes :

- Composition granulaire
- Teneur en liant

IV.3.1. Composition granulaire

La composition granulométrique formulée à base sable de dunes et des fractions granulaires 3/8 et 8/15. Les mélanges étudiés doivent se situer dans le fuseau de spécifique référence du béton bitumineux 0/14 destiné aux couches de roulement. D'après les analyses granulométriques des graviers et du sable de dunes, nous avons sélectionné les cinq compositions présentées dans la Figure V.14 Les courbes granulométriques des mélanges choisis ainsi que le fuseau de référence du béton bitumineux sont illustrés dans la Figure V.15.

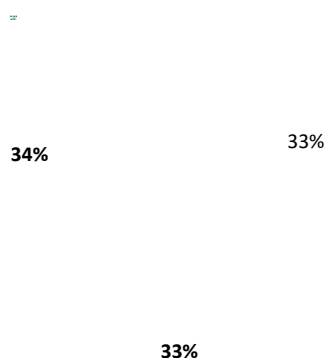


Figure V. 14. Compositions granulaire désignées

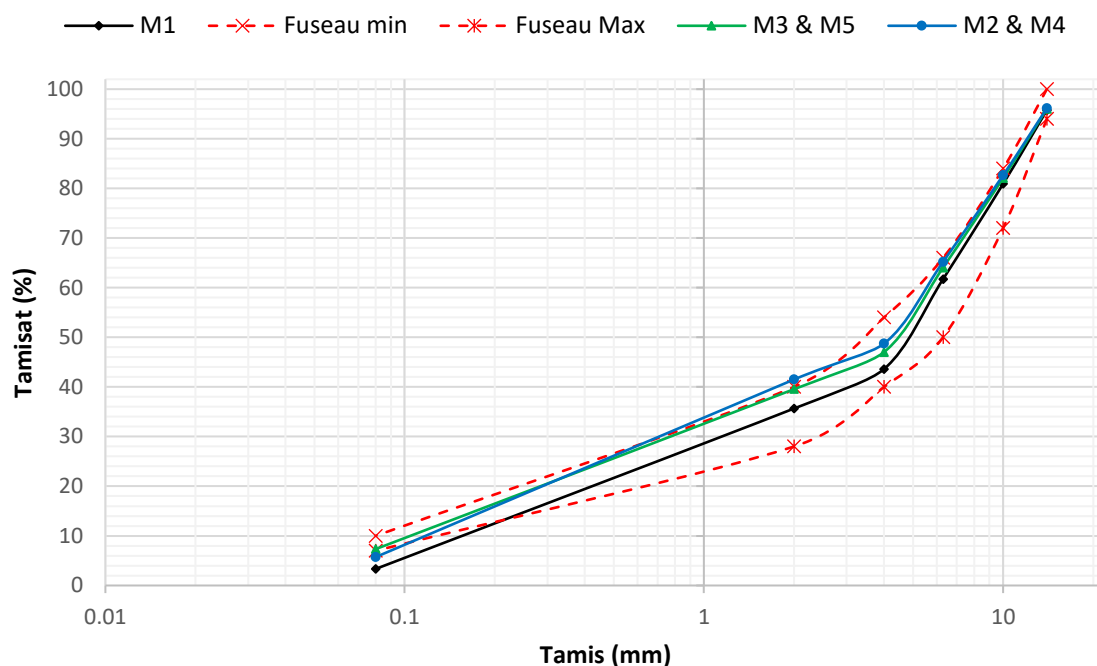


Figure V. 15. Courbes granulométriques des mélanges et fuseau de référence de BBSG 0/14

IV.3.2. Teneur en liant

Le but de cette étape est d'assurer un enrobage total de l'ensemble du squelette minéral de mélange bitumineux. Le procédé choisi est la méthode française, la teneur en liant « T_L » est déduit de la surface spécifique des agrégats « Σ » correspondant à un module de richesse « K » en fonction de trafic selon la formule suivante :

$$T_L = \alpha \cdot K \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

T_L : Teneur en liant.

α : Coefficient correcteur tenant compte de la masse volumique des agrégats.

K : Module de richesse.

Σ : La surface spécifique de mélange.

IV.3.2.1. Coefficient correcteur α

Le coefficient correcteur α est calculé suivant la formule suivante :

$$\alpha = 2.65 / MVR_g$$

MVR_g : La masse volumique réelle des granulats calculés comme suite :

$$MVR_g = \frac{100}{\frac{\%8/15}{\rho_{8/15}} + \frac{\%3/8}{\rho_{3/8}} + \frac{\%SD}{\rho_{SD}} + \frac{\%F}{\rho_F}}$$

Tableau V. 9. Coefficient correcteur des mélanges étudiés

Mélanges	M1	M2 & M4	M3 & M5
MVR_g	2.63	2.615	2.624
α	1.007	1.013	1.01

IV.3.2.2. Module de richesse K

Le module de richesse est d'une grande importance car il détermine la souplesse du revêtement, sa faculté d'adaptation et d'autoréparation, ainsi que sa rigidité et son indéformabilité. Un module de richesse trop faible peut engendrer un revêtement cassant et friable, généralement non imperméable. À l'inverse, un module de richesse trop élevé peut donner un revêtement très souple, adaptable et autoréparable, mais déformable et manquant de stabilité sous trafic, en plus d'être potentiellement glissant [129].

IV.3.2.3. Surface spécifique de mélange Σ

La surface spécifique « Σ » des granulats est donnée par la relation :

$$\Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 135f$$

G, S, s et f sont respectivement les proportions d'éléments tels que :

G : proportion des éléments supérieure à 6,3 mm,

S : proportion des éléments compris entre 6,3 et 0,315mm,

s : proportion des éléments compris entre 0,315 et 0,08mm,

f : proportion des éléments inférieure à 0,08 mm

Tableau V. 10. Surfaces spécifiques des mélanges étudiés

Mélanges	M1	M2 & M4	M3 & M5
G	38,27	34,79	35,95
S	51,09	51,32	49,41
s	7,31	8,17	7,31
f	3,33	5,72	7,33
Σ	6,65	9,98	12,00

Les teneurs en liant des mélanges sont mentionnées dans le tableau V.11.

Tableau V. 11. Teneurs en liant pour différentes valeurs du module de richesse

K	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8
M1	4,86	5,00	5,15	5,30	5,44	5,59
M2 & M4	5,28	5,44	5,60	5,76	5,92	6,08
M3 & M5	5,50	5,66	5,83	6,00	6,16	6,33

IV.3.3. Essai Marshall

Des échantillons de 1200 g du béton bitumineux sont préparés dans des éprouvettes d'acier cylindriques de 101,6 mm de diamètre et 63,5 mm de hauteur. Le compactage est exécuté en appliquant 50 coups à chaque face à $160\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ conformément à la norme NF P 98-251-2. Après une conservation de 24 heures à température ambiante, les éprouvettes sont immergées à l'eau pendant 30 minutes à $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. On réalise ensuite l'écrasement à une vitesse de déplacement $0.85\text{ mm/s} \pm 0.1\text{ mm/s}$ pour déterminer leur stabilité et leur fluage. La stabilité Marshall correspond à la force maximale maintenue par l'éprouvette avant la rupture exprimée en kN. Le fluage est la déformation de l'éprouvette en mm, mesurée à cette force maximale. Le quotient Marshall est le rapport de la stabilité sur le fluage, elle permet d'évaluer la résistance des enrobés aux déformations permanentes. Une valeur élevée de ce quotient indique que les mélanges bitumineux sont plus résistants aux déformations. Pour chaque mélange nous avons préparé 5 éprouvettes dont 3 pour l'écrasement et 2 pour évaluer la compacité de l'enrobé.

Tableau V. 7. Evolution de résultats de l'essai Marshall avec le teneur de filler de calcaire

Mélange	M 01			M 02			M 03		
TI (%)	5,00%	5,30%	5,59%	5,44%	5,76%	6,08%	5,66%	6,00%	6,33%
S (KN)	6,638	9,655	7,045	8,613	10,198	10,046	11,597	12,236	10,096
F (0.1mm)	3,76	2,68	2,25	3,75	3,60	3,60	3,15	5,13	4,08
QM	1.76	3,61	3.13	2.30	2,83	2.79	6.68	2,39	2.47
Compacité %	92,85	93,52	94,33	95,45	96,08	96,39	96,72	97,21	98,01

Tableau V. 8. Evolution de résultats de l'essai Marshall avec le teneur de sable de dunes broyé

Mélange	M 01			M 04			M 05		
TL (%)	5,00%	5,30%	5,59%	5,44%	5,76%	6,08%	5,66%	6,00%	6,33%
S (KN)	6,638	9,655	7,045	10,974	12,511	10,661	11,334	13,172	12,412
F (0.1mm)	3,76	2,68	2,25	2,00	2,45	3,50	2,43	2,85	3,83
QM	1.76	3,61	3.13	5.487	5,11	3.046	4.66	4,62	3.24
Compacité %	92,85	93,52	94,33	92,83	93,99	94,50	95,79	96,23	96,77

Les tableaux V.12 et V.13 présentent l'évolution des résultats de l'essai Marshall (Stabilité corrigé, fluage et quotient Marshall) en fonction de la teneur en fines et de la teneur en liant.

IV.4. Conclusion

Ce chapitre a fourni une description exhaustive des matériaux utilisés et des méthodes expérimentales mises en œuvre pour l'étude de l'amélioration des bétons bitumineux en sable de dunes modifiés avec des déchets de caoutchouc. En détaillant les propriétés des matériaux et les techniques de modification du bitume les paramètres de malaxage et la démarche de modification ont été soigneusement optimisés pour assurer une bonne intégration des matériaux et des performances supérieures. Les formulations des bétons bitumineux en sable de dunes développées dans cette étude ont démontré des propriétés prometteuses confirmant la viabilité de cette approche pour des applications pratiques.

CHAPITRE V :

INFLUENCE DES FINES SUR LE
COMPORTEMENT DU BETON
BITUMINEUX A BASE SABLE DE
DUNES

V. INFLUENCE DES FINES SUR LE COMPORTEMENT DU BETON BITUMINEUX A BASE SABLE DE DUNES

Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'influence des fines sur le comportement du béton bitumineux à base de sable de dunes. Le rôle des fines est crucial dans la formulation des mélanges bitumineux car elles affectent les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau.

Tout d'abord nous commençons par l'essai de la Presse à cisaillement Giratoire qui permet de simuler les conditions réelles de compactage subies par le béton bitumineux. Ensuite l'essai Marshall qui est un essai classique couramment utilisé pour déterminer la stabilité et le fluage des mélanges bitumineux. Par suite l'essai Duriez sera abordé pour évaluer la sensibilité dû à l'eau des enrobés qui est un facteur déterminant pour sa durabilité à long terme. L'étude de la résistance à l'orniérage mettra en lumière la capacité du mélange à résister à la déformation permanente sous l'action des charges roulantes répétées. Et enfin le chapitre se fini par l'essai du module qui est essentiel pour comprendre le comportement élastique du béton bitumineux sous des sollicitations répétées. Ensemble, ces essais fourniront une évaluation complète de l'influence des fines sur les propriétés du béton bitumineux à base de sable de dunes offrant ainsi des indications précieuses pour son utilisation optimale en construction routière.

V.1. Essai à la Presse à cisaillement Giratoire (PCG)

L'essai à la presse à cisaillement giratoire permet d'évaluer le comportement de compactage des enrobés bitumineux en appréciant le pourcentage de vides en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobé. Dans ce processus l'enrobé est compacté à une température constante dans un moule cylindrique qui tourne sur lui-même créant un effet de pétrissage. On observe une augmentation de la compacité c'est-à-dire une diminution du pourcentage de vide en fonction du nombre de giration. Ce mode de compactage traduit la relation linéaire entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur de chantier et le nombre de girations.

Cet essai est fréquemment utilisé pour nombreux raisons :

- ✓ Contrôle de la maniabilité des enrobés ;
- ✓ Détermination du pourcentage de vides d'un échantillon pour un taux de girations donné ;
- ✓ Détermination d'une courbe de la masse volumique par rapport au nombre de girations.
- ✓ Confection d'éprouvettes d'une hauteur donnée à une masse volumique prédestinée, pour exécuter par la suite des essais de propriétés mécaniques ;

Dans cette essai l'échantillon est mise à l'action combinée d'un piston exerçant une pression fixé à 600 KPa et d'un moule cylindrique de 150 mm de diamètre incliné de 1.25° et décrivant un mouvement giratoire de 30tr/min.

On prend 10 kg d'agrégats chauffés à 165°C et on les mélange avec les différents liants. Ensuite, on verse le mélange dans des moules ce qui est compatible avec la condition $h_{\min}/D$.

$$0.66 \leq h_{\min}/D = 0.76 \leq 1.05$$

Puis on met le moule dans la presse et on lance l'essai avec 200 rotations. Le tableau présente les l'évolution des indices de vide en fonction de nombre de girations.



Figure VI. 1. Eprouvette soumise au compactage par l'appareil PCG

Tableau VI. 1. Indice de vide en fonction de nombre de giration

Girations	M1 (0% fines)	M2 (2%FC)	M3 (4%FC)	M4 (2%SDB)	M5 (4%SDB)
5	16,97	14,18	12,9	14,5	13,8
10	15,66	13,02	11,53	13,2	12,43
15	14,85	12,3	10,7	12,4	11,59
20	14,27	11,8	10,11	11,9	10,94
25	13,84	11,38	9,66	11,5	10,48
30	13,48	11,07	9,31	11,2	10,11
40	12,93	10,58	8,74	10,7	9,53
50	12,56	10,19	8,36	10,3	9,06
60	12,27	9,9	7,99	10	8,66
80	11,85	9,41	7,47	9,6	8,01
100	11,56	9,05	7,09	9,3	7,53
120	11,39	8,76	6,73	9	7,13
150	11,22	8,44	6,35	8,8	6,71
200	10,99	7,99	5,79	8,6	6,23

Selon les résultats obtenus est présenté dans le tableau IV.1 les bétons bitumineux à base sable de dunes améliorés avec des fines montrent des pourcentages de vide inférieurs à celui du témoin. En effet ces valeurs à 80 girations des mélanges M3 et M5 (contenant 4% des fines) sont à la fourchette des spécifications (de 4% à 9% par 80 girations). Plus précisément l'indice de vide à 80 girations diminue de 20% et 37% pour le cas des BBSD améliorés par des fillers de calcaire à 2% et 4% respectivement et le taux de diminution est estimé à 19% et 32% respectivement pour le cas des BBSD améliorés par du sable de dunes broyé. Nos résultats sont en accord avec les résultats de Ibrahim Qasim et al [130] qui ont également observé une diminution significative de pourcentage de vides avec l'addition des fines.

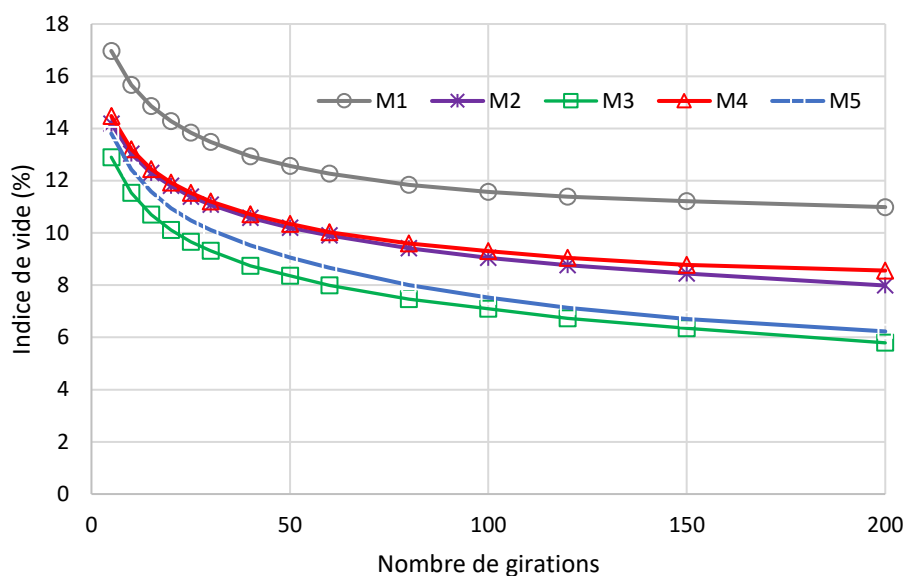


Figure VI. 2. Évolution des indices de vide en fonction de nombre de giration

Selon la Figure VI.2 il est observé que tous les mélanges étudiés ont un comportement similaire avec l'augmentation de nombre de giration. De plus les Bétons Bitumineux à base sable de dunes contenant des fines montrent dès le début des taux de vide inférieurs par rapport à ceux de témoin. Cela pourrait indiquer que l'incorporation de fines dans le mélange améliore la compaction et réduit les vides ce qui est souvent souhaitable pour la durabilité et la performance des enrobés bitumineux. Cette amélioration pourrait être attribuée à une lubrification optimale et à une meilleure maniabilité du mélange, vraisemblablement favorisées par l'interaction entre le mastic bitumineux composé de bitume et de fines. Cette interaction confère au mélange une consistance ferme obtenue avec une faible énergie de compactage (seulement 5 girations) tout en préservant cette consistance stable tout au long de l'essai.

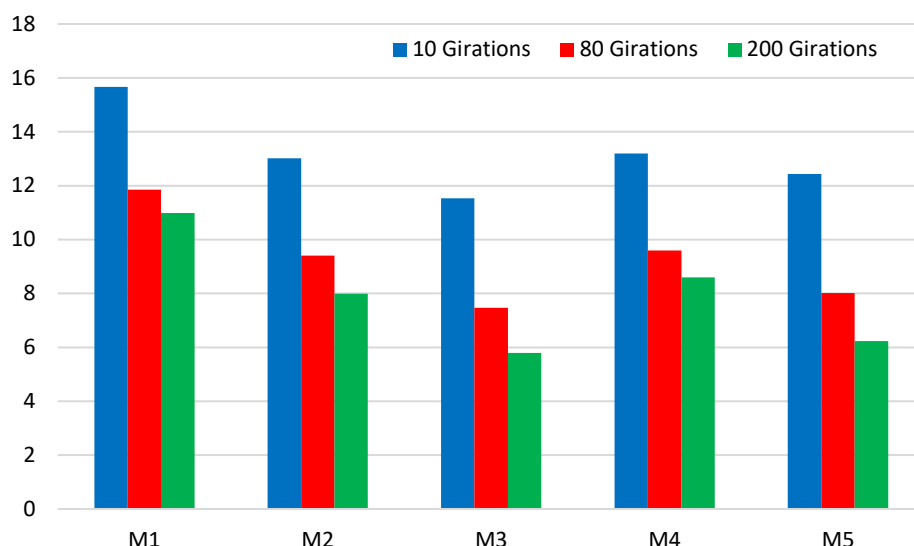


Figure VI. 3. Indice de vide à 10, 80 et 200 girations

De plus les résultats confirment que les BBSD contenant des fillers de calcaire par ont des pourcentages de vide inférieurs à ceux qui contenant du sable de dunes broyé. D'après la Figure VI.3 et pour un nombre de girations de 10, les normes recommandent une valeur supérieure ou égale à 10% pour éviter le risque d'apparition des déformations permanentes tels que l'orniérage. Cette condition est remplie par tous les mélanges étudiés. L'évolution à une énergie de compactage élevé tel que 200 girations, a entraîné pour les bétons bitumineux améliorés avec des FC ou SDB avec un taux de compacité élevé par rapport au témoin.

L'ajout de fines de calcaire et de sable de dunes broyé a eu un impact positif sur la diminution de vide dans les bétons bitumineux à base sable de dunes tels qu'observé dans l'essai à la presse à cisaillement giratoire. Ces fines ont une petite taille de particule ce qui leur permet de se loger dans les espaces entre les plus gros agrégats du béton bitumineux elles peuvent aussi améliorer l'adhérence entre les granulats et le bitume ce qui peut aider à réduire les vides en améliorant la cohésion du mélange. Les fines aussi ont contribué à augmenter la masse volumique des béton bitumineux ce qui témoigne d'une meilleure compacité et par conséquent d'une meilleure résistance aux charges appliquées.

V.2. Essai Marshall

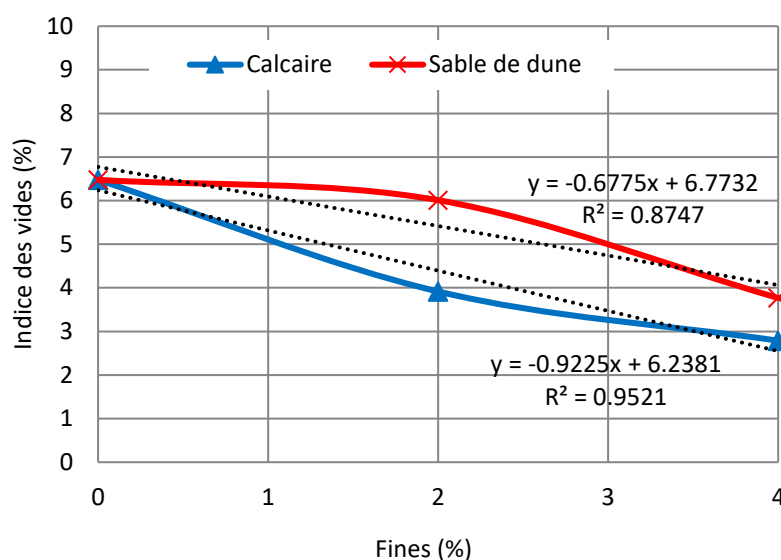


Figure VI. 4. Indice des vides en fonction de teneur des fines

La Figure VI.4 montre que l'indice des vides diminue avec l'augmentation du taux des fines dans les mélanges bitumineux. Les fillers de calcaire ont aptitude d'offrir une meilleure compacité que le sable de dunes broyé en grande partie grâce à la granulométrie des FC. Cette finesse favorise une meilleure adhérence entre ce qui participe à la compacité des mélanges. Le mélange témoin M1 présente un taux de vides de 6.48% et une compacité de 93,52%, avec l'ajout de 2% des FC les vides diminuent jusqu'à 3.92% avec 96.08% de compacité. Lorsque on a ajouté 4 % des fines calcaires (FC) les vides ont diminué à 2.79 %, et nous avons enregistré une compacité maximale égale à 97.21 %. En revanche l'ajout 2% de SDB ne réduit les vides qu'à 6% et une légère augmentation de compacité à 93.99%. L'addition de 4% de SDB entraîne une diminution des vides à 3.77% et une augmentation de compacité à 96.23%. Nos résultats sont en accord avec les résultats de Saifa Summin et al [131] et Rahman et al [132] qui ont également observé une diminution significative de l'indice de vides avec l'addition des fines.

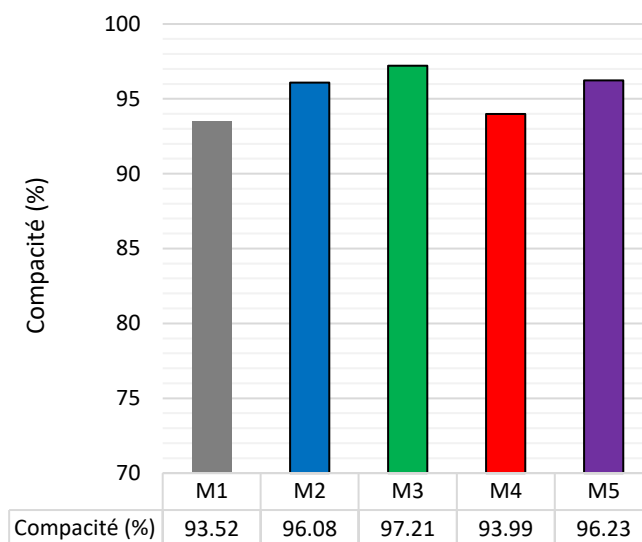


Figure VI. 5. Compacité Marshall en fonction de teneur des fines

La stabilité est une mesure de la résistance à la déformation de l'enrobés bitumineux. Plus la stabilité est élevée, plus le mélange est capable de résister aux charges appliquées. Selon la Figure VI.7 on observe une amélioration de stabilité avec l'ajout de fines passant de 9.655 KN à 12.236 KN pour le filler de calcaire, soit une augmentation de 5% de stabilité pour 2% FC et de plus de 26% de stabilité pour 4% de FC. De plus l'ajout de 2% et 4 % de sable de dunes broyé à donner une valeur de stabilité de 12.511 KN et 13.172 KN soit une amélioration de 30% et 36% respectivement. Nos résultats sont en accord avec les résultats de Ibrahim Qasim. Z et al [130] qui ont également observé augmentation de stabilité Marshall avec l'addition des fines.



Figure VI. 6. Eprouvette soumise à l'essai Marshall

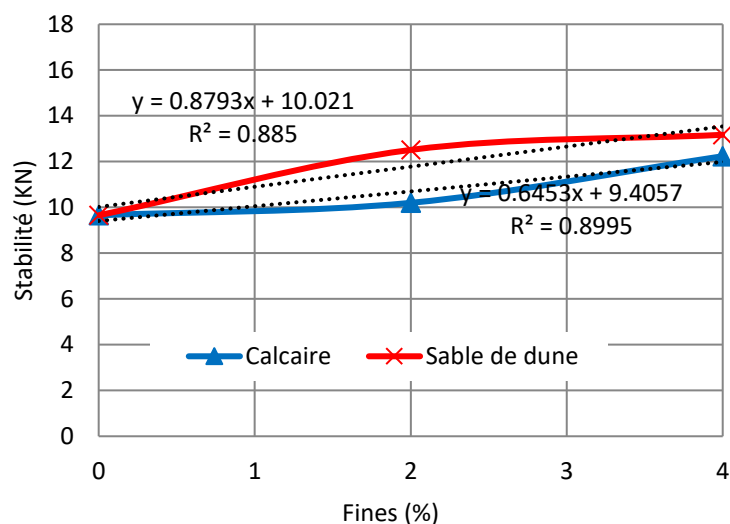


Figure VI. 7. Stabilité Marshall en fonction de teneur des fines

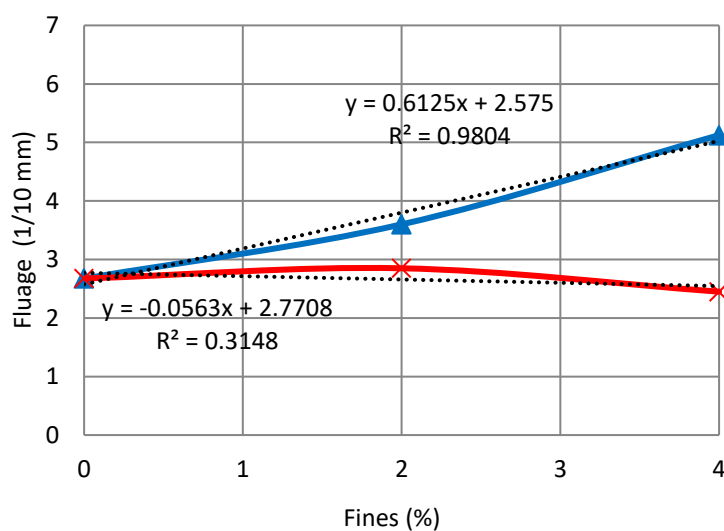


Figure VI. 8. Fluage en fonction de teneur des fines

Le fluage mesuré à l'essai Marshall est la déformation du mélange lors la charge de rupture de l'éprouvette. Un faible fluage indique une meilleure résistance à la déformation permanente. La Figure VI.8 illustre l'évolution des fluages suivant la teneur des fines. Le fluage augmente presque linéairement avec l'addition de FC tandis qu'il diminue presque linéairement avec l'ajout de SDB. Le mélange M3 présente le fluage le plus élevé avec une valeur de 5,13mm. Les mélanges M2 a également un fluage relativement élevé avec 3,60mm. Les mélanges M4 et M5 amélioré avec le SDB ont des valeurs de fluage plus faibles avec 2.85 et 2,45 mm respectivement.

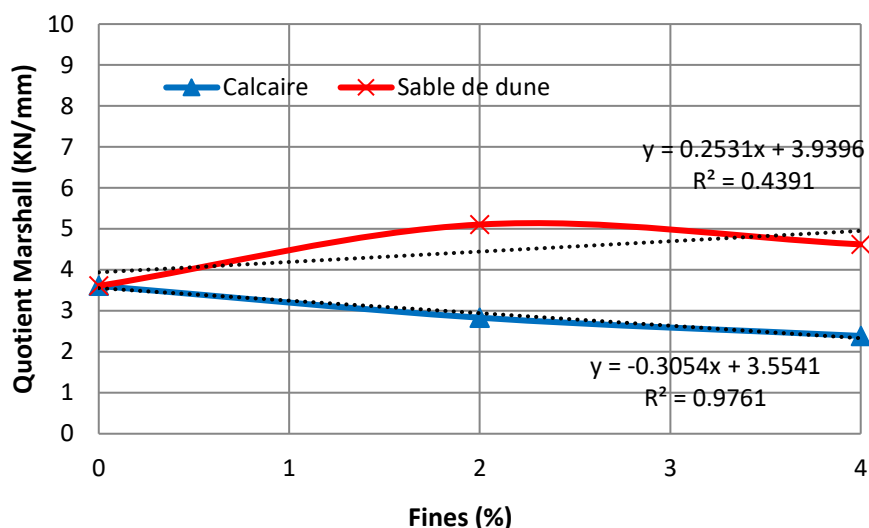


Figure VI. 9. Quotient Marshall en fonction de teneur des fines

Le quotient Marshall est un indicateur essentiel pour évaluer la résistance de béton bitumineux. Une valeur grande du quotient indique que l'enrobé est plus résistant aux déformations permanentes. Sur la Figure VI.9 on observe que le quotient Marshall diminue de manière presque linéaire avec l'augmentation du pourcentage de FC passant de 3.61 KN/mm pour M1 à une perte de plus que 50 % de sa valeur pour 4% de FC ajouté. Avec l'addition de SDB le quotient Marshall commença à augmenter jusqu'à une valeur maximale de 5.11 KN/mm puis elle commence à diminuer jusqu'à 4.62 KN/mm pour 4% de SDB ajouté.

V.3. Essai Duriez (Sensibilité à l'eau)

La présence d'eau peut altérer l'adhérence entre les granulats et le liant bitumineux entraînant ainsi une durée de vie réduite du mélange bitumineux. De plus, les dommages causés par l'humidité se caractérisent par une perte de résistance ou de durabilité de liant en raison des effets de l'humidité [100]. L'essai LCPC Duriez est un essai de compression simple réalisé sur des éprouvettes cylindriques confectionnés au laboratoire par compactage statique à double effet. Le but de l'essai Duriez est d'évaluer la résistance mécanique (statique) des enrobés bitumineux dont des agrégats passent en totalité au tamis 20 mm ainsi que leur résistance au désenrobage par l'eau (estimation de sensibilité à l'eau).

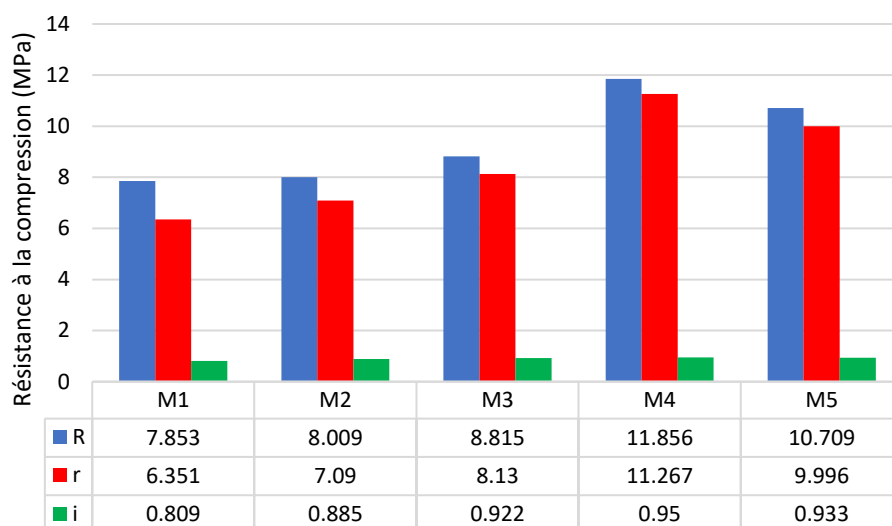


Figure VI. 10. Résultats de l'essai Duriez

La Figure VI.10 présente les résultats de l'essai Duriez des différentes formulations étudiées. Il est évident qu'il y'a une augmentation de la résistance de compression que ce soit après conservation à l'aire ou dans l'eau avec l'ajout des fines. Les bétons bitumineux à base sable dune enrichis en SDB ont montré une amélioration plus importante que les BBSD avec des FC. Une légère augmentation de résistance de compression à l'aire pour 2% et 4% de fillers de calcaire estimée respectivement à 2% et 12%. Les pourcentages d'augmentation sont de 51% et 36% pour 2% et 4% de SDB ajouté respectivement. Pour conservation dans l'eau les augmentations sont plus importantes que la conservation à l'air ; 12% et 28% pour le FC ajouté et 77% et 57% pour 2% et 4% de sable de dunes broyé respectivement.

Ces résultats ont abouti à une progression de coefficient i qui définit par le rapport r/R . L'ajout de 2% SDB donne le coefficient le plus élevé soit 0.95 indiquant une amélioration maximale de la sensibilité à l'eau. Cependant l'ajout de 4% de SDB réduit légèrement ce coefficient à 0.933. Les FC ont également entraîné une augmentation de ce coefficient qui atteint 0.885 et 0.922 pour 2% et 4% respectivement. Nos résultats sont en accord avec les résultats de Moinul H. et al et [133] et Noman K et al [134] qui ont également observé une augmentation de la résistance de compression que ce soit après conservation à l'aire ou dans l'eau avec l'ajout des fines. L'amélioration de la sensibilité à l'eau est un aspect crucial de l'optimisation du béton bitumineux. Le sable de dunes broyé a effectivement contribué à la sensibilité à l'eau. En effet le les fines possèdent une structure granulaire unique qui peut aider à réduire les vides de l'enrobé bitumineux. Cela peut empêcher l'eau de pénétrer dans le BBSD améliorant ainsi sa résistance de compression après conservation dans l'eau.

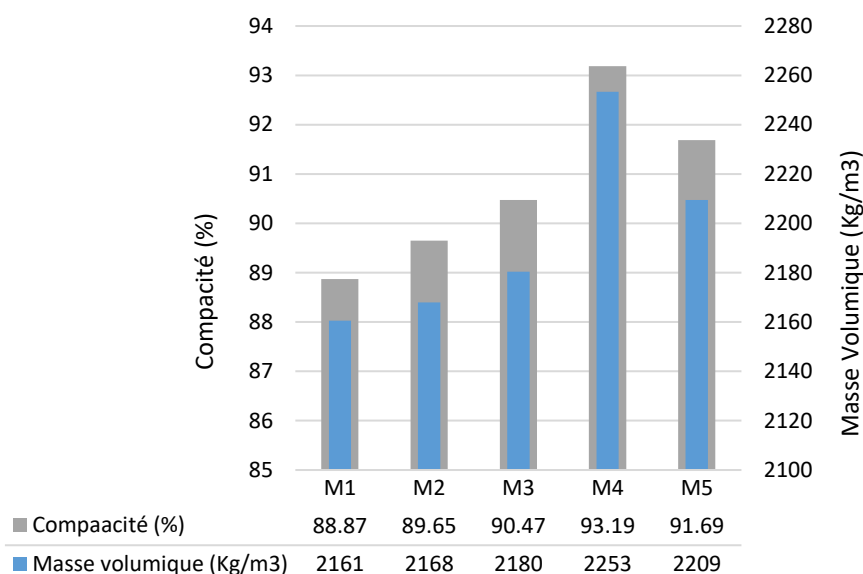


Figure VI. 11. Compacité Duriez et masse volumique des formulations étudiées

La Figure VI.11 présente les masses volumiques et les compacités des formulations étudiées. Il est clair que l'ajout de fines a un impact significatif sur les propriétés du béton bitumineux à base sable de dunes. En particulier l'ajout de ces fines semble augmenter à la fois la masse volumique et la compacité du béton bitumineux. Le mélange M1 qui ne contient pas de fines a la masse volumique la plus faible et la compacité la plus faible. Toutefois avec l'ajout de 2% et 4% de FC on observe une augmentation de la masse volumique et de la compacité. Cette augmentation est encore plus prononcée avec l'ajout de SDB où le mélange avec 2% de SDB présente la masse volumique et la compacité les plus élevées. Ces résultats conduisent que l'ajout de fines peut améliorer les propriétés du BBSD en augmentant sa densité et sa compacité. Cela pourrait avoir des implications importantes pour la durabilité et la résistance du béton ainsi que pour sa performance dans des conditions d'exposition à l'eau.

Lorsque des fines sont ajoutées au mélange compacté statiquement on observe initialement une augmentation de la masse volumique et de la compacité jusqu'à un ajout de 2% pour le sable de dunes broyé. À ce stade les fines comblent les vides entre les granulats améliorant ainsi la densité du mélange et permettant une compaction plus efficace. Toutefois lorsque l'ajout du sable de dunes atteint 4% un phénomène inverse se produit : les valeurs de compacité et de masse volumique diminuent. Cela s'explique par le fait qu'un excès de fines peut saturer le mélange bitumineux provoquant une lubrification excessive qui entrave le bon compactage. De plus cet excès perturbe l'organisation optimale des granulats réduisant ainsi leur capacité à se compacter efficacement. Par conséquent la structure du mélange devient et moins compacte ce qui se traduit par une diminution des propriétés mécaniques souhaitées. Cependant l'ajout de 4% de filler de calcaire continue

d'entraîner une élévation des valeurs de compacité et de masse volumique. Il est intéressant de noter que bien que les fillers de calcaire permettent une augmentation continue de la compacité et de la masse volumique jusqu'à 4% la valeur maximale de ces paramètres est atteinte avec seulement 2% de fines de SDB. Cela peut être expliqué par la nature des fines de sable qui sont notamment efficaces pour combler les vides dans le mélange jusqu'à une certaine concentration. À 2% les fines de sable remplissent de manière idéale les espaces entre les granulats permettant ainsi une compaction maximale et une densité accrue. Au-delà de cette concentration les fines de sable pourraient commencer à perturber l'équilibre granulométrique optimal, entraînant une légère diminution de l'efficacité de la compaction, même si des matériaux comme le calcaire continuent à améliorer la densité.

V.4. Résistance à l'orniérage



Figure VI. 12. Compacteur pour préparation des éprouvettes de l'essai d'orniérage

L'étude de la résistance aux déformations permanentes (orniérage) a été faite avec l'orniéreur LCPC. Dans le contexte de cet essai une profondeur d'orniérage élevé est généralement indésirable car cela signifie que la structure du mélange est insuffisamment résistante pour supporter le trafic et les charges appliquées. Il est essentiel d'avoir une résistance d'orniérage adéquate pour garantir la durabilité et la fonctionnalité d'une chaussée ou d'une surface similaire.



Figure VI. 13. Ornièreur LCPC

Tableau VI. 2. Profondeurs d'orniérage en %

N de cycles	1000	3000	10000	30000	Remarque
M1	1,78	2,37	2,9	3,71	
M2	3,45	5,07	6,88	9,59	
M3	4,01	5,22	6,9	-	Nul après 25868 cycles
M4	5,79	9,67	-	-	Nul après 4104 cycles
M5	7,34	-	-	-	Nul après 2216 cycles

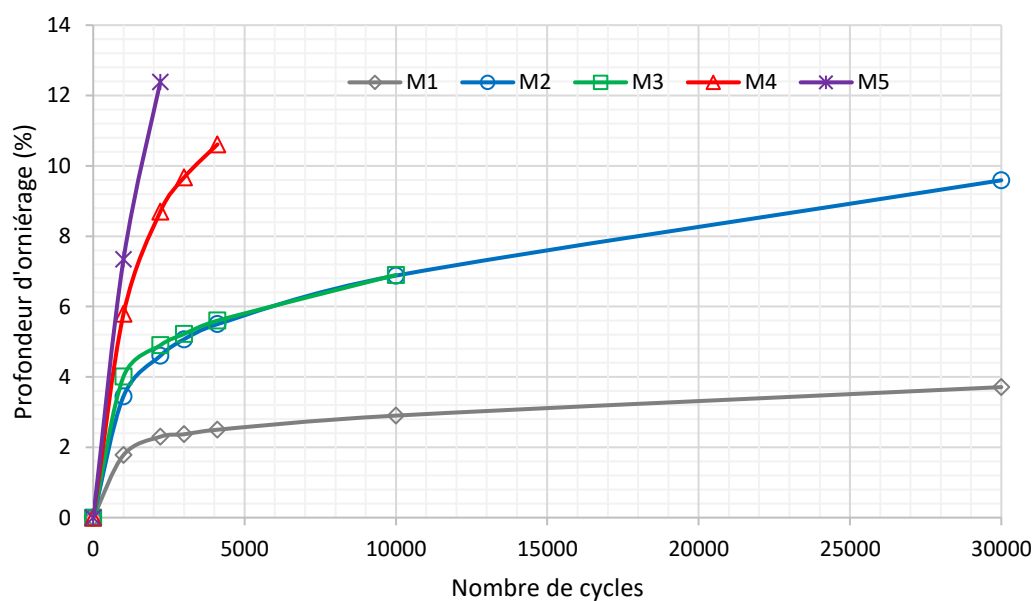


Figure VI. 14. Profondeur d'orniérage en fonction du nombre de cycles

La Figure VI.14 présente l'évolution de la profondeur d'orniérage à mesure que le nombre de cycles augmente. Pour la courbe de mélange témoin M1 la profondeur d'orniérage augmente également, atteignant 3,71% à 30 000 cycles. Cela indique que le mélange montre une certaine sensibilité à l'orniérage. La profondeur d'orniérage de mélange M2 augmente de manière significative, atteignant 9,59% à 30 000 cycles. La profondeur d'orniérage de M3 enrichi avec FC 4% de FC augmente jusqu'à 5,22% à 3000 cycles, puis la résistance d'orniérage devient nul après 25868 cycles. La dernière valeur enregistrer est 6.9% pour 10000 cycles. M4 enrichi avec 2% de SDB présente une profondeur d'orniérage de 9,67% à 3000 cycles puis la résistance d'orniérage devient nul après 4104 cycles, ce qui suggère une sensibilité plus élevée à l'orniérage par rapport aux trois premiers mélanges testés. Le mélange M5 affiche une profondeur d'orniérage de 7,34% à 3000 cycles puis la résistance d'orniérage devient nul après 2216 cycles, indiquant également une sensibilité modérée à l'orniérage.



Figure VI. 15. Eprouvette soumise à l'essai d'orniérage

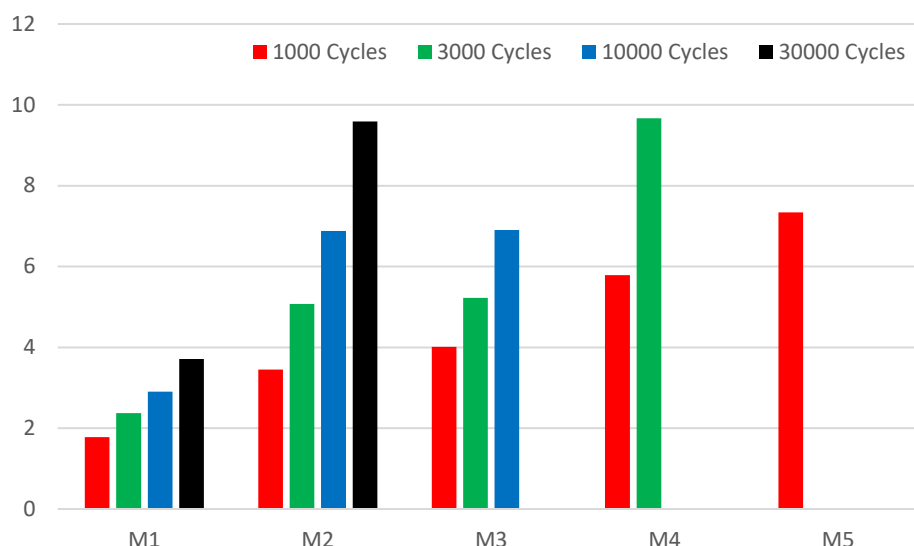


Figure VI. 16. Profondeur d'orniérage dans 1000,3000, 10000 et 30000 cycles

Selon la Figure VI.16 on remarque les mélange témoin se comporte mieux que les autres enrichi avec des fines. Bien que l'ajout de fillers de calcaire ou de sable de dunes broyé semble augmenter la profondeur d'orniérage du béton bitumineux à base de sable de dunes indiquant une plus grande sensibilité à l'orniérage le SDB semble avoir un effet plus prononcé que le FC. Cela pourrait être dû à la structure granulaire du SDB qui pourrait interagir différemment avec le bitume par rapport au FC. De plus, les fines ont un effet significatif sur la densité et la viscosité du mélange. D'une part, elles augmentent la densité du mélange en remplissant les vides entre les agrégats ce qui peut rendre le mélange plus rigide et moins flexible, augmentant ainsi la profondeur d'orniérage sous l'effet des charges de trafic. D'autre part, les fines peuvent modifier la viscosité du liant bitumineux. Les fines plus petites ou plus angulaires peuvent augmenter la viscosité du liant, rendant le mélange plus résistant à l'orniérage. Cependant, à des températures élevées, la viscosité du liant, qui est inversement liée à l'orniérage, est significativement réduite avec l'augmentation de la température, ce qui peut augmenter la profondeur d'orniérage.

V.5. Essai module de rigidité

La Figure VI.17 présente les résultats de l'essai de module de rigidité pour les cinq formulations étudiées à 15°C et à une fréquence de 0.001 Hz. Il est clair que l'ajout des fines a un effet positif sur le module de rigidité de béton bitumineux à base sable de dunes. Le mélange témoin M1 à la valeur de module de rigidité la plus faible avec une moyenne de 7900 MPa. Avec l'addition de 2% de fillers de calcaire le module de rigidité augmente à 24% et avec 4% il augmente presque à 50% par rapport à sa valeur initiale. Avec le sable de dunes broyé l'augmentation de module de rigidité est plus importante. La valeur moyenne maximale enregistré pour tous les

mélanges étudiés est de 13219 MPa pour M4 à 2% de SDB soit une augmentation 67%. Cependant l'augmentation du module de rigidité avec 2% et 4% de SDB est presque la même indiquant que l'ajout de SDB au-delà de 2% n'entraîne pas d'augmentation significative de la rigidité.

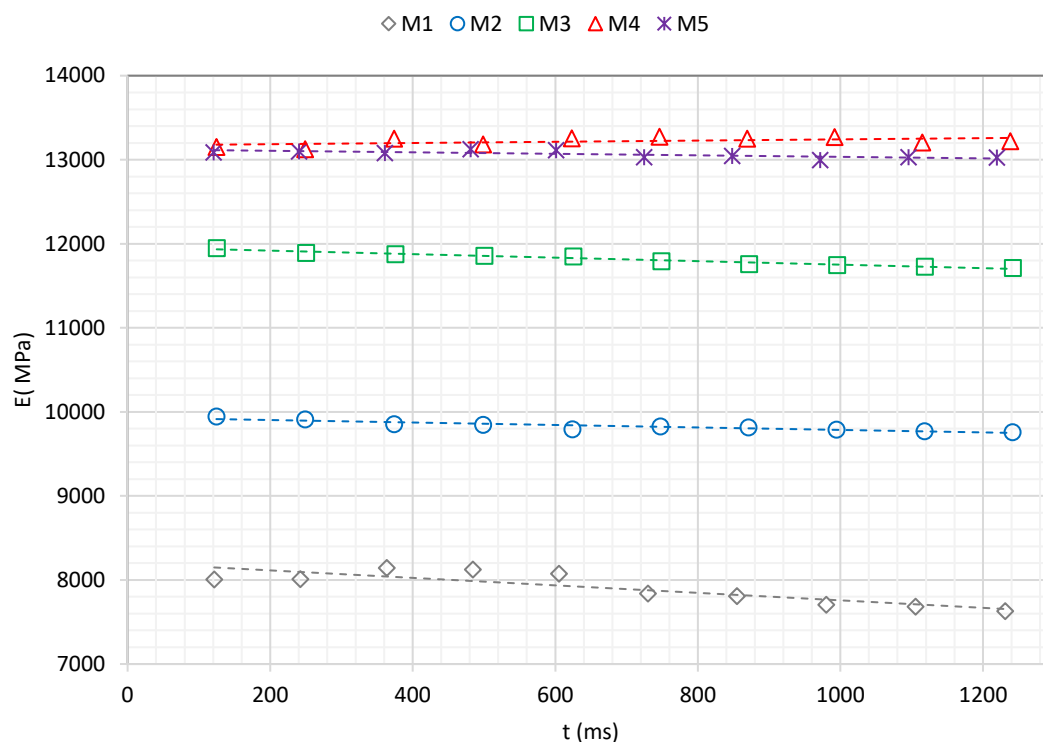


Figure VI. 17. Module de rigidité à 15°C

A 20°C les modules de rigidité de tous les mélanges ont diminué. Le pourcentage de diminution est compris entre 20 et 32%. La diminution maximale est observée pour M1, tandis que le mélange le plus résistant à la température est le mélange M4 avec seulement 2% de SDB. Selon les résultats illustrés dans la Figure VI.18 les fines ont un effet positif à 20°C sur le module de rigidité de béton bitumineux à base sable de dunes. Le mélange enrichi avec 2% de FC a enregistré une augmentation de 42% et 54% à 4%. Les meilleures augmentations de module de rigidité sont pour les mélanges améliorés avec le sable de dunes broyé, M4 a montré une augmentation presque de 97% et M5 a enregistré 82% d'augmentation de valeur de module par rapport le mélanges témoin.

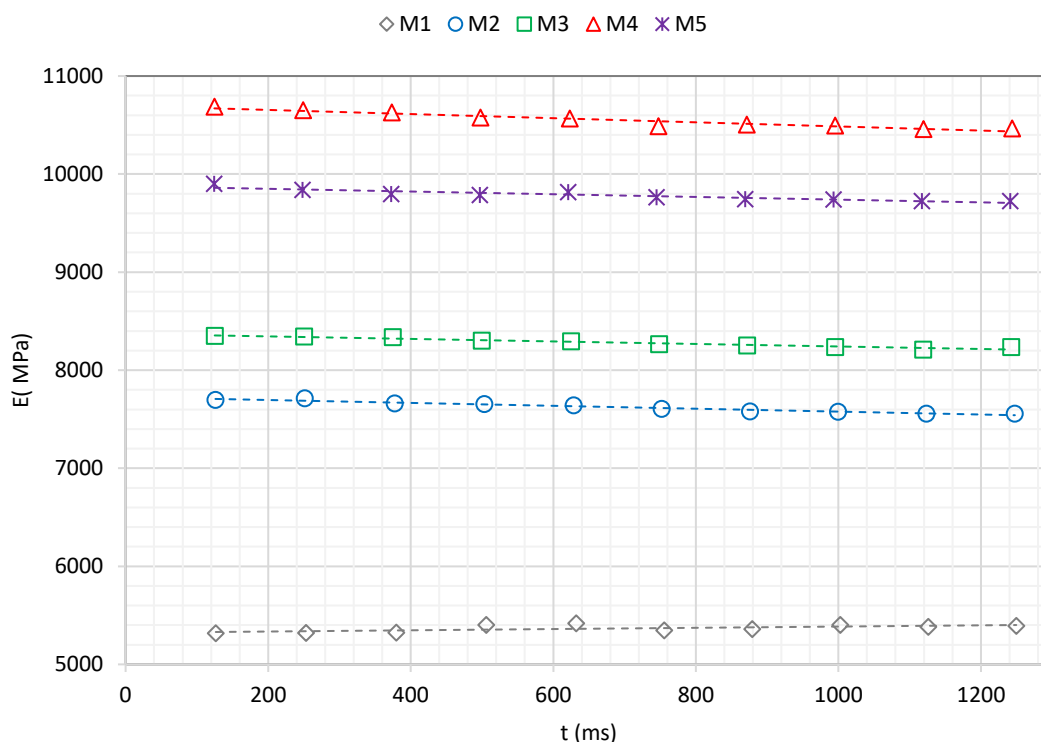


Figure VI. 18. Module de rigidité à 20°C

La Figure VI.19 dévoile les résultats de l'essai de module de rigidité des formulations étudiées à 30°C. Il est clair que les modules de rigidité diminuent avec l'augmentation des températures. Les fines ont toujours un effet positif sur le module de rigidité même avec l'augmentation de température. Le mélange témoin M1 a enregistré 2023 MPa. L'addition de 2% de FC a amélioré le module de rigidité de 76% avec 4% de FC l'augmentation est de 84%. Cependant l'effet du sable de dunes broyé est toujours supérieur à celui des fillers de calcaire. L'ajout de 2% de SDB (M4) a donné un meilleur module de 5171 MPa soit une augmentation de 156% par rapport au mélange témoin M1. Avec 4% SDB l'augmentation est de 124%.

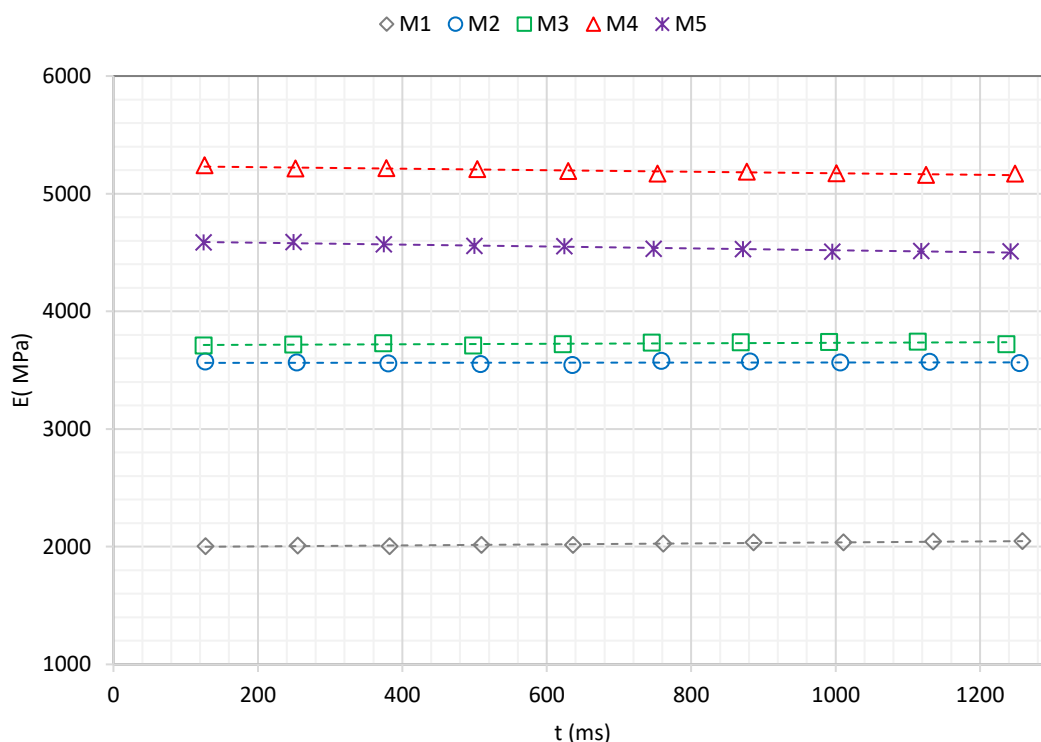


Figure VI. 19. Module de rigidité à 30°C

Il est clair que l'ajout de fines qu'il s'agisse de fillers de calcaire ou de sable de dunes broyé améliore le module de rigidité. Cependant l'effet du SDB est toujours supérieur à celui du FC. À 15°C l'ajout de 2% de SDB a entraîné une augmentation significative du module de rigidité de 67%. À 20°C et malgré une diminution générale des modules de rigidité le mélange M4 avec 2% de SDB a montré la plus grande résistance à la température avec une augmentation de 97% du module. À 30°C même si les modules de rigidité continuent de diminuer avec l'augmentation de la température l'ajout de 2% de SDB a permis d'obtenir un module de 5193 MPa, soit une augmentation de 156% par rapport au mélange témoin M1.

Tableau VI. 3. Modules de rigidité moyenne à 15, 20 et 30°C

<i>T</i> (C°)	15	20	30
<i>M1</i>	7903,8	5366	2023,45
<i>M2</i>	9831,7	7623,65	3564,3
<i>M3</i>	11817,05	8282,4	3726,1
<i>M4</i>	13219,5	10552,3	5193,7
<i>M5</i>	13064,3	9783,15	4544,45

L'ajout de fines peut augmenter le module de rigidité ce qui s'explique par une augmentation de la rigidité. En effet les fines peuvent remplir les vides entre les particules plus grosses ce qui augmente la densité du mélange et donc sa rigidité. De plus les fines peuvent également améliorer l'adhésion entre les particules de sable ce qui renforce la structure du matériau et augmente sa

résistance aux déformations. Il est important de noter que l'effet des fines sur la rigidité peut varier en fonction de la température. Comme exemple à des températures plus élevées la rigidité peut diminuer en raison de l'augmentation de la mobilité des particules.

Conclusion

En conclusion, l'intégration de fines dans le béton bitumineux à base de sable de dunes a montré des résultats prometteurs dans plusieurs aspects techniques. L'ajout de fines a significativement amélioré les teneurs en vides, le comportement au compactage, et la stabilité Marshall, avec des performances optimales observées à 4% de sable de dunes broyé. De plus, l'ajout de 2% de sable de dunes broyé a permis d'atteindre des valeurs maximales pour le quotient Marshall, la résistance à la compression, ainsi que la sensibilité à l'eau et la compacité lors du compactage statique. Cependant il est à noter que l'ajout de fines a entraîné une diminution de la résistance à l'orniérage bien que le module de rigidité ait été amélioré avec des valeurs maximales observées pour 2% de sable de dunes à toutes les températures d'essai. Le mélange M4 composé de 2% de sable de dunes broyé a été sélectionné pour la poursuite cette étude en combinaison avec un bitume modifié au caoutchouc en raison de ses performances globales optimales.

CHAPITRE VI :

INFLUENCE DE CAOUTCHOUC
SUR LE COMPORTEMENT DE
BITUME ET DE BETON
BITUMINEUX A BASE SABLE DE
DUNES

VI. INFLUENCE DE CAOUTCHOUC SUR LE COMPORTEMENT DE BITUME ET DE BETON BITUMINEUX A BASE SABLE DE DUNES

Introduction

Dans ce chapitre nous avons examiné l'influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement du bitume et du béton bitumineux basé sur le de sable de dunes. L'ajout de poudrette de caoutchouc dans les formulations bitumineuses représente une technique encourageante pour l'amélioration des performances des enrobés bitumineux. Tous d'abord nous présentons la fabrication du bitume modifié par le caoutchouc. Après nous analyserons l'influence de cette modification sur les propriétés du bitume notamment en termes de pénétrabilité et ramollissement. Enfin nous étudierons l'ajout de poudrette de caoutchouc affecte sur le comportement du béton bitumineux à base de sable de dunes à travers une série d'essais comme le chapitre précédent.

VI.1. Fabrication de bitume modifié par le caoutchouc

La méthode choisie dans ce travail est la modification de l'enrobé par la dispersion de caoutchouc dans le liant (voie humide) sous l'effet de cisaillement produit par agitation mécanique. Le bitume pur 40/50 est d'abord chauffé à une température de $170^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. La poudre de caoutchouc est ensuite ajoutée soigneusement et progressivement sous agitation continue.

VI.1.1. Paramètres de malaxage

La production du bitume caoutchouté exige un contrôle rigoureux de tous les facteurs influençant le comportement du produit final. La constance des paramètres fixés doit être constamment surveillée afin de minimiser leur impact sur la variabilité du produit final.

Nous avons fixé les paramètres suivants :

- La température de malaxage : $170^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- La vitesse d'agitation : 5000 tr/min.
- Durée de malaxage : 4 h.

VI.1.2. Matériels utilisés (Figure VII.1)

- Le mélangeur Silverson L5M-A : est un véritable couteau suisse pour les laboratoires. Sa large gamme d'applications (mélange, émulsification, homogénéisation, désintégration et dissolution) et sa grande flexibilité (capacité de 1 ml à 12 litres et vitesse de rotation variable entre 500 et 10 000 tr/min) en font un outil précieux pour les scientifiques.
- Un chauffage ballon placé directement sous le récipient de malaxage.

- Récipient en acier inoxydable de 8 litres de capacité.

■

Figure VII. 1. Matériels utilisés pour la production de bitume caoutchouté

VI.1.3. Démarche de modification



Figure VII. 2. Contrôle de température de mélange

- Chauffer le bitume dans une étuve jusqu'à ce qu'il devienne fluide.
- Peser la quantité exacte de bitume dans un bol en acier inoxydable.
- Placer le bol sur le chauffe-ballon.
- Allumer le malaxeur à 500 tr/min et prendre la mesure de la température toutes les 2 minutes.
- Lorsque la température atteint 170°C, commencer à ajouter progressivement la quantité de caoutchouc (Figure VII. 2).
- Augmenter la vitesse de malaxage à 5 000 tr/min.
- Pendant toute la durée du malaxage, vérifier la température. Elle ne doit pas dépasser 175°C.



Figure VII. 3. Malaxage de bitume caoutchouc

VI.3. Influence de poudrette de caoutchouc sur le comportement de bitume

Les modifications des bitumes par ajout de caoutchouc visent plusieurs objectifs. L'objectif principal est d'améliorer les propriétés thermiques du bitume c'est à dire maintenir une consistance suffisamment élevée à haute température pour prévenir le ressuage et les déformations permanentes, tout en réduisant la fragilité à basse température afin d'éviter les fissures et le décollement des gravillons.

VI.3.1. Pénétrabilité

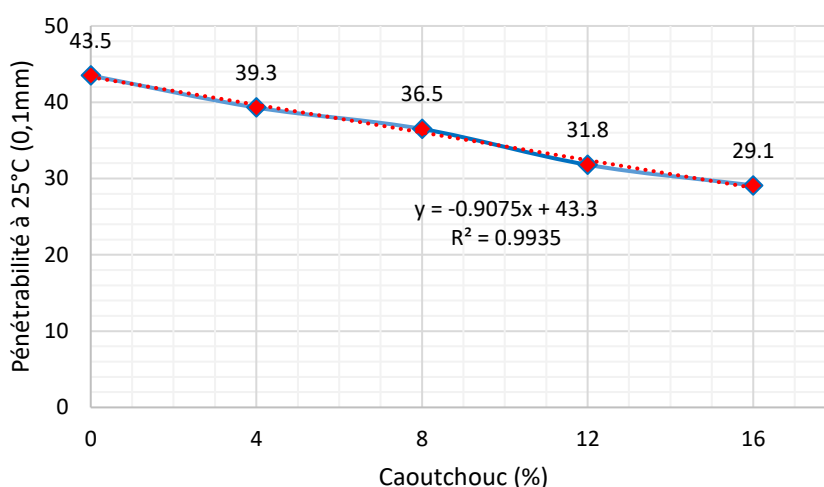


Figure VII. 4. Influence de pourcentage caoutchouc sur la pénétrabilité de liant

Selon la courbe présentée dans la Figure VII.4 qui illustre l'influence de pourcentage de poudrette de caoutchouc sur la pénétrabilité de bitume pur 40/50. Les résultats présentés démontrent une tendance claire que à mesure que la proportion de caoutchouc augmente la pénétrabilité du bitume diminue. En commençons d'une pénétrabilité de bitume pur égale à 43,5 avec 0% de la poudrette de caoutchouc, puis on observe une diminution progressive de cette valeur à 39,3 avec 4% de caoutchouc, 36,5 avec 8%, 31,8 avec 12%, et 29,1 avec 16% de caoutchouc. Nos résultats sont en accord avec les résultats de Kebaili [33] qui a également observé une diminution significative de pénétrabilité de deux types de bitumes modifiées avec deux granulométries différentes de poudrette caoutchouc (Figure III.16). Yigezu Tefera et al. [94] ont aussi observé une diminution de pénétrabilité de bitume de grade 60/70 avec l'augmentation de pourcentage de la PC (Figure III.13).

Cette diminution indique un durcissement du bitume modifié ce qui suggère que le bitume devient plus rigide et moins susceptible de se déformer sous charge. L'effet du caoutchouc semble donc renforcer la structure du bitume ce qui pourrait améliorer sa résistance à l'orniérage sous les

conditions de circulation intense. Toutefois il est important de noter que ce durcissement accru pourrait également entraîner une diminution de la flexibilité du bitume le rendant plus sujet à la fissuration à basse température. En somme, l'incorporation de poudrette de caoutchouc dans le bitume pur modifie significativement ses propriétés mécaniques.

VI.3.2. Point de ramollissement

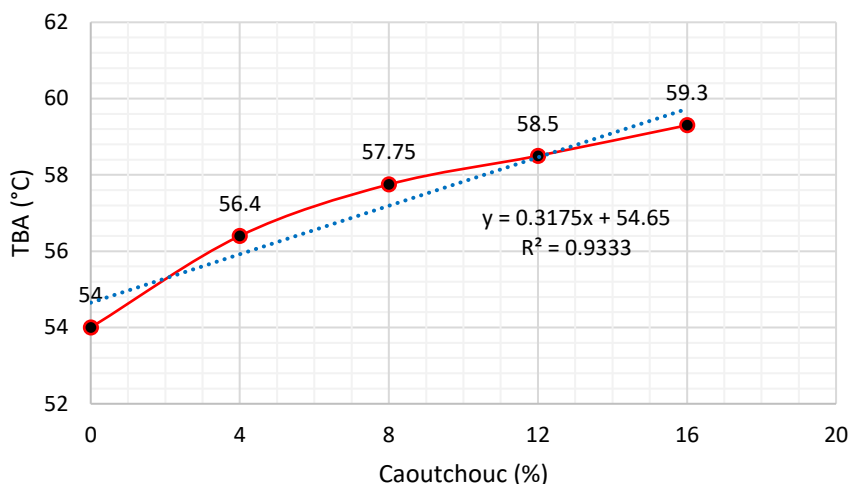


Figure VII. 5. Influence de pourcentage en caoutchouc sur la pénétrabilité de liant

La Figure VII.5 présente l'influence de pourcentage de poudrette de caoutchouc sur le ramollissement de bitume pur 40/50. Les résultats illustrés montrent que la température de ramollissement (TBA) augmente de manière progressive avec l'ajout de la poudrette de caoutchouc. Pour le bitume pur de grade 40/50 avec 0% la TBA enregistré est de 54°C. Cependant avec l'incorporation de 4% de caoutchouc cette température s'élève à 56,4°C puis continue d'augmenter pour atteindre 57,75°C avec 8% de la poudrette de caoutchouc 58,5°C avec 12%, et enfin 59,3°C avec 16%. Ces résultats corroborent les résultats de Liu [98] qui a démontré une augmentation des TBA avec l'augmentation de taux de caoutchouc (Figure III.26). Kebaili [95] aussi à montrer que ramollissement de liant augmente avec l'addition des caoutchoucs recyclé (Figure III.17).

Cette augmentation de la température de ramollissement indique que le bitume modifié devient plus solide face à la chaleur ce qui le rend plus stable au côté thermiquement. Cela signifie que le bitume devient moins difficile de ramollir sous des conditions de températures élevées. Ce qui est particulièrement bénéfique dans les régions à climat chaud. En accroissant la température à laquelle le bitume commence à ramollir l'ajout de caoutchouc améliore la durabilité du revêtement routier réduisant ainsi le risque de déformations également les ornières. En conclusion l'ajout de poudrette de caoutchouc au bitume pur 40/50 entraîne une amélioration de la stabilité thermique

du bitume ce qui en fait un matériau plus adapté pour des applications exigeant une résistance accrue à la chaleur.

VI.4. Influence de poudrette de caoutchouc sur le comportement de béton bitumineux à base sable de dunes

VI.4.1. Essai à la Presse à cisaillement Giratoire (PCG)



Figure VII. 6. Eprouvette compacté avec appareil PCG

Les résultats présentés au tableau VII.1 montrent l'évolution de l'indice des vides en fonction du nombre de girations. Les premières mesures à 5 girations indiquant que le mélange sans caoutchouc présente l'indice des vides le plus élevé à 14,48% tandis que le mélange contenant 12% de caoutchouc (M4C12) a l'indice le plus bas à 7,16%. Cela suggère que l'ajout de caoutchouc améliore la compaction initiale du matériau. À mesure que le nombre de girations augmente l'indice des vides diminue pour tous les mélanges reflétant une densification progressive sous l'effet de la compaction. Les mélanges contenant des pourcentages plus élevés de caoutchouc (M4C8, M4C12 et M4C16) montrent une réduction plus rapide de l'indice des vides.

Tableau VII. 1. Indice de vide en fonction de nombre de giration

Girations	M4C0	M4C4	M4C8	M4C12	M4C16
5	14,48	12,10	9,87	7,16	10,30
10	13,21	10,29	7,81	5,55	8,46
15	12,44	8,24	6,71	4,65	7,34
20	11,93	7,79	5,97	4,04	6,56
25	11,53	7,43	5,42	3,58	5,98
30	11,20	7,13	5,01	3,23	5,51
40	10,71	6,66	4,38	2,68	4,82
50	10,34	6,29	3,93	2,29	4,30
60	10,03	6,01	3,58	1,98	3,90
80	9,60	5,56	3,04	1,53	3,31
100	9,31	5,22	2,69	1,19	2,89
120	9,04	4,96	2,39	0,95	2,56
150	8,78	4,66	2,08	0,65	2,22
200	8,56	4,30	1,78	0,33	1,80

Comme illustre la Figure VII.8 après 200 girations l'indice des vides du mélange M4C12 chute à 0,33%, et celui du mélange M4C16 à 1,80%, comparé à 8,56% pour le mélange M4C0. Cette tendance indique que l'incorporation de caoutchouc améliore la densité et la compaction du béton bitumineux. L'effet de la poudrette de caoutchouc sur la réduction de l'indice des vides dans le béton bitumineux à base sable de dune s'explique par plusieurs causes. D'abord, les particules de caoutchouc agissent comme des fines comblant les vides entre les grains minéraux. De plus la nature élastique et déformable du CR lui permet de s'adapter aux formes irrégulières des granulats lors du compactage. Le bitume modifié devient plus cohésif et capable de mieux enrober les granulats, limitant la formation de poches d'air et contribuant à une densification plus efficace du mélange.

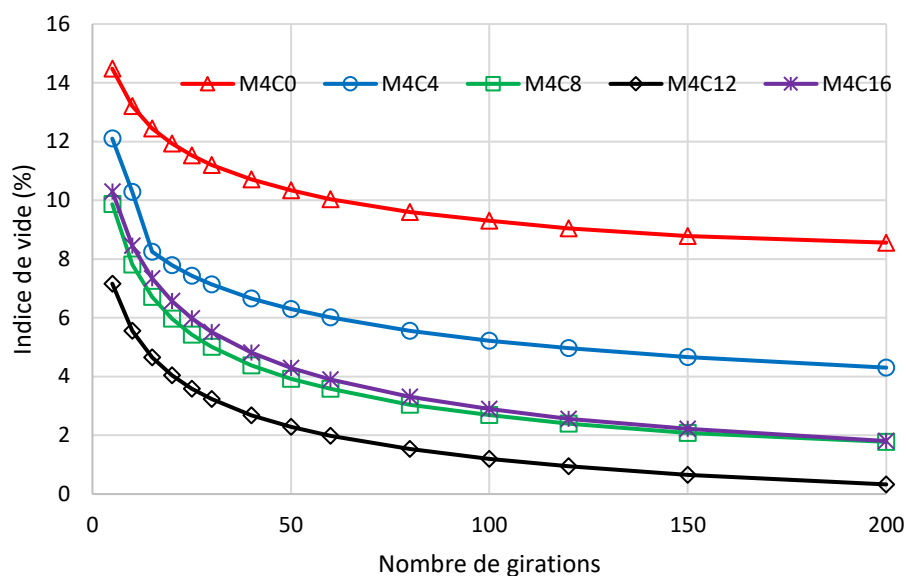


Figure VII. 7. Évolution des indices de vide en fonction de nombre de giration

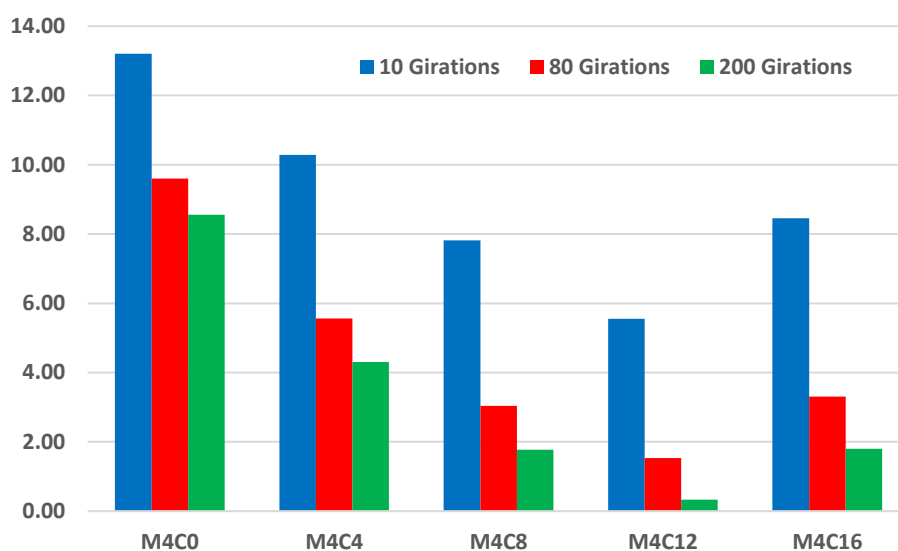


Figure VII. 8. Indice de vide à 10, 80 et 200 girations

L'intégration de poudrette de caoutchouc de pneus usés dans le béton bitumineux améliore considérablement la compacité du matériau en particulier pour les mélanges contenant 12% et 16% de caoutchouc. Ces mélanges atteignent des niveaux de compacité très élevés après 200 girations ce qui indique une meilleure densification. Cela pourrait potentiellement se traduire par une durabilité et une résistance accrue des matériaux bitumineux utilisés dans les applications routières. Contrairement à nos conclusions l'étude de Swaney et al. [103] montre que l'ajout de caoutchouc à l'enrobé bitumineux a entraîné une augmentation des vides en fonction de nombre de girations (Figure III. 30).

VI.4.2. Essai Marshall



Figure VII. 9. Eprouvettes Marshall

La courbe présentée dans la Figure VII.10 illustre l'évolution de l'indice de vides en fonction de la teneur en caoutchouc. Pour M4C0 l'indice des vides est de 6,87% ce qui indique que le béton bitumineux sans ajout de caoutchouc montre une densité relativement compacte avec un faible pourcentage des vides. Avec l'ajout de 4% de poudrette l'indice des vides augmente considérablement à 13,51%. Cette augmentation suggère que l'ajout de 4% de la poudrette de caoutchouc crée plus de vides dans le mélange diminuant subséquemment sa compacité comme le montre la Figure VII.11. Pour un teneur de 8% de poudrette l'indice des vides diminue légèrement à 12,16%. Bien que le pourcentage de vides soit encore élevé par rapport au mélange sans au caune ajout de caoutchouc cette diminution par rapport à 4% de caoutchouc montre une amélioration relative de la compacité du mélange. Avec l'ajout de 12% de caoutchouc l'indice des vides est de 12,37%. Ce résultat est proche de celui obtenu avec 8% de poudrette de caoutchouc indiquant une certaine stabilisation de la compacité avec l'accroissement du pourcentage de caoutchouc. Enfin pour 16% de caoutchouc l'indice des vides augmente de nouveau à 14,06% suggérant que l'ajout de ce teneur de caoutchouc augmente encore le rapport de vides dans le mélange réduisant ainsi sa compacité par rapport aux niveaux intermédiaires de caoutchouc.

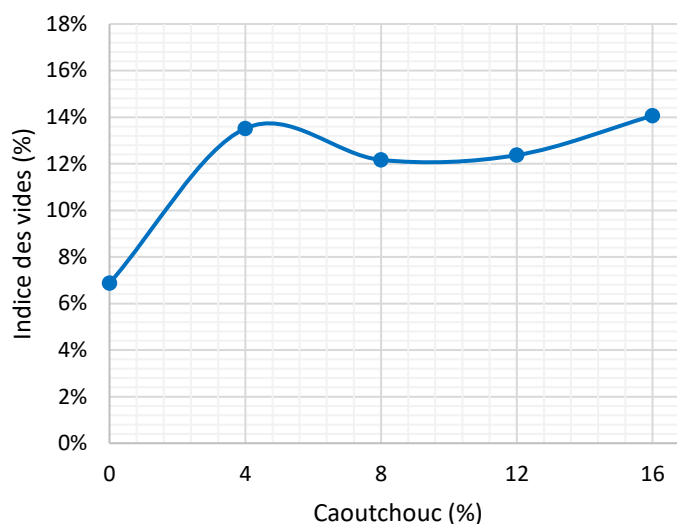


Figure VII. 5. Evolution de l'indice de vide en fonction de teneur en PC

L'ajout de poudrette de caoutchouc tend à augmenter l'indice des vides dans le mélange bitumineux. Cela peut être donné au fait que la poudrette de caoutchouc modifie la structure du mélange générant plus de vides. Il semble qu'un ajout équilibré de poudrette de caoutchouc entre 8% et 12% puisse offrir une certaine amélioration en termes de compacité par rapport à un ajout de 4% ou de 16% mais n'atteint pas les niveaux de compacité du mélange M4C0. Nos résultats sont tout accord avec ceux de Al-Rubaie et al. [104] et Yigezu Tefera et al. [94] qui ont également observé une augmentation des pourcentages des vide dans le béton bitumineux avec l'augmentation de pourcentage en caoutchouc par la méthode humide (Figure III.34 et III.30).

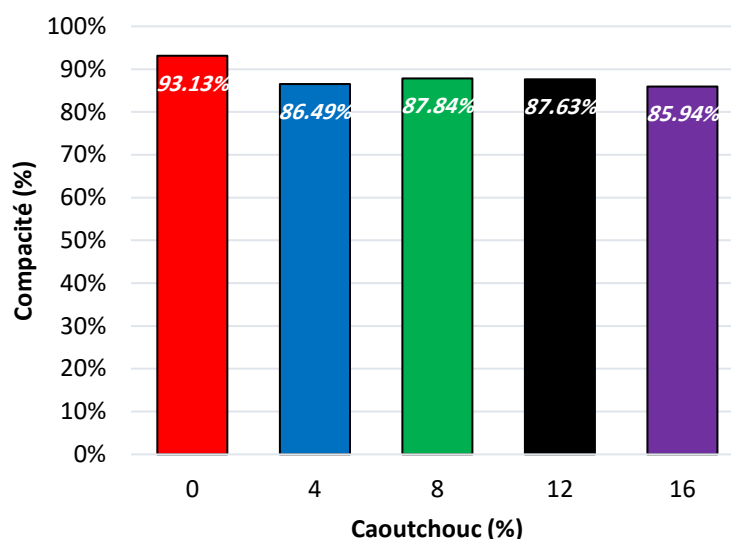


Figure VII. 6. Compacité Marshall en fonction de teneur en PC

La Figure VII.12 présente les résultats de la stabilité Marshall pour les bétons bitumineux améliorés avec de la poudrette de caoutchouc de pneus usés. La courbe montre une augmentation significative de la résistance du matériau avec l'ajout de caoutchouc jusqu'à un certain teneur de poudrette. Le béton bitumineux sans ajout de poudrette présente une stabilité de 13,18 KN. Cette valeur de référence est utilisée pour comparer les effets des différents pourcentages de caoutchouc. Lorsque 4% de caoutchouc est ajouté la stabilité augmente considérablement pour atteindre 22 KN indiquant une amélioration notable de la stabilité par rapport M4C0. L'ajout de 8% de caoutchouc continue de renforcer la stabilité du matériau qui atteint alors 30,05 KN soit plus du double de la stabilité initiale. Cela montre que l'intégration de caoutchouc à ces niveaux est très bénéfique pour la stabilité Marshall du béton bitumineux. Le pic de stabilité est observé avec l'ajout de 12% de caoutchouc atteignant 32,48 KN. Cette proportion de caoutchouc semble offrir la meilleure amélioration de la résistance du béton bitumineux indiquant un point optimal pour maximiser la stabilité. Cependant lorsque le rapport de la poudrette de caoutchouc est augmenté à 16% une diminution légère de la stabilité est notée de 26,91 KN. Bien que cette valeur soit toujours supérieure à celle du mélange M4C0 elle montre qu'il existe une limite au-delà de laquelle l'ajout de caoutchouc commence à nuire à la stabilité.

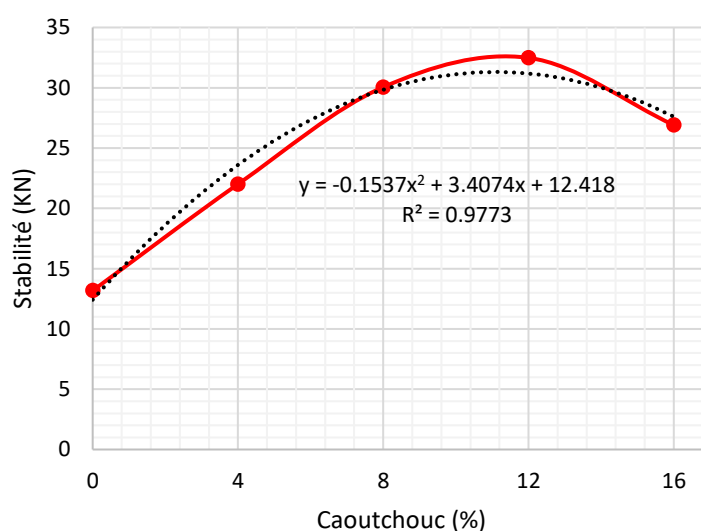


Figure VII. 7. Evolution de Stabilité Marshall en fonction de teneur en PC

Nos résultats sont en accord avec ceux de Bakheit et al. [135] et Hachani et al. [136] qui ont également observé une augmentation de stabilité de mélange avec l'addition de poudrette de caoutchouc jusqu'à 12%. Au-delà de ce seuil la stabilité commence à diminuer.

Les résultats de fluage obtenu par l'essai Marshall sont illustrée dans la FigureVII.13, les bétons bitumineux améliorés avec de la poudrette de caoutchouc montrent des améliorations significatives de la résistance au fluage du matériau. Ces données sont cruciales pour comprendre l'effet du caoutchouc sur les performances du béton bitumineux.

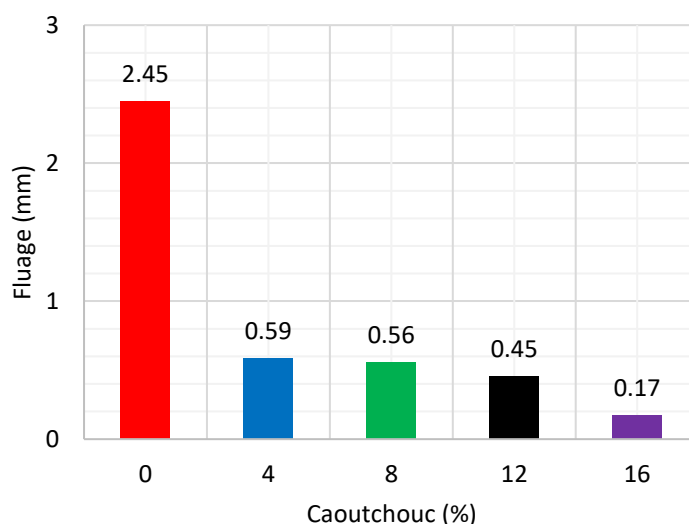


Figure VII. 13. Fluage en fonction de teneur en PC

Pour le béton bitumineux sans ajout de caoutchouc M4C0 le fluage est de 2,45 mm. Cette valeur de démontre que sans l'incorporation de caoutchouc le matériau subit une déformation permanente considérable sous la charge. Lorsque 4% de caoutchouc est ajouté le fluage diminue directement à 0,59 mm. Cette diminution montre l'efficacité de l'ajout de caoutchouc dans l'amélioration de la résistance au fluage du béton bitumineux. En accroissant la teneur de poudrette à 8% le fluage continue de diminuer légèrement atteignant 0,56 mm. Avec 12% de caoutchouc le fluage est encore réduit à 0,45 mm. Ce résultat suggère que l'augmentation du pourcentage de caoutchouc continue d'améliorer la résistance au fluage du béton bitumineux bien que l'amélioration commence à se stabiliser. Enfin l'ajout de 16% de caoutchouc entraîne une réduction du fluage à 0,17 mm. Cette valeur très basse indique une résistance maximale au fluage suggérant que ce pourcentage de caoutchouc est optimal pour minimiser la déformation permanente sous charge. Nos résultats sont en accord avec ceux de Hachani et al. [136] qui a également observé une diminution significative au niveau de fluage avec l'ajout de caoutchouc. Cependant, Kebaili [33] a rapporté des résultats divergents, ne trouvant aucune preuve significative de l'effet des teneurs en caoutchouc sur le fluage.

Ce comportement est principalement dû à l'augmentation de la viscosité du liant et au développement d'une matrice plus cohésive. Les particules de caoutchouc en gonflant sous l'effet

des huiles du bitume modifient la rhéologie du liant en le rendant plus viscoélastique. Cela favorise une meilleure adhérence aux granulats et limite leur déplacement relatif sous l'effet des charges dans lequel une stabilité accrue. En parallèle l'effet du caoutchouc sur le fluage est également remarquable. La déformation permanente sous charge diminue fortement avec l'augmentation de la teneur en poudrette atteignant une valeur minimale à 16 %. Ce comportement s'explique par la capacité du liant modifié à mieux résister au fluage lent grâce à ses propriétés élastiques accrues. Le caoutchouc agit ainsi comme un amortisseur interne absorbant et dissipant une partie des contraintes mécaniques tout en renforçant la structure interne du mélange. L'amélioration de la stabilité et réduction du fluage traduisent l'efficacité du caoutchouc en tant qu'agent modificateur capable d'optimiser les performances mécaniques du béton bitumineux à condition que sa teneur soit maîtrisée pour éviter une baisse de compacité ou une sur-flexibilité du matériau.

VI.4.4. Essai Duriez (Sensibilité à l'eau)

La Figure VII.14 présentent les résultats de l'essai Duriez pour les bétons bitumineux améliorés avec de la poudrette de caoutchouc des pneus usés. Ils montrent une amélioration des résistances à la compression à l'air et après conservation à l'eau.

Pour le béton bitumineux M4C0 la résistance à la compression après conservation à l'air R est de 11,856 MPa tandis que celle après conservation à l'eau r est de 11,267 MPa. Le rapport r/R est de 0,950 indiquant une légère diminution de la résistance après immersion dans l'eau. En ajoutant 4% de poudrette de caoutchouc la résistance à la compression après conservation à l'air augmente à 14,517 MPa et après conservation à l'eau à 13,987 MPa, et le rapport r/R s'améliore légèrement à 0,963. L'ajout de caoutchouc améliore la résistance aussi la capacité du matériau à maintenir cette résistance après conservation à l'eau. Avec 8% de poudrette la résistance à la compression après conservation à l'air atteint 18,219 MPa et celle après conservation à l'eau 17,681 MPa. Le rapport r/R de 0,970 montre une stabilité accrue démontrant que l'incorporation de caoutchouc continue de renforcer la résistance et la durabilité du matériau. L'ajout de 12% de caoutchouc produit la meilleure performance observée avec une résistance à la compression après conservation à l'air de 19,501 MPa et après conservation à l'eau de 19,09 MPa. Le rapport r/R de 0,979 indique que le matériau conserve presque entièrement sa résistance après immersion ce qui est un indicateur que la durabilité est améliorée. Enfin à 16% de caoutchouc la résistance à la compression après conservation à l'air diminue légèrement à 17,138 MPa et après conservation à l'eau à 16,908 MPa. Cependant le rapport r/R atteint son maximum à 0,987, montrant une résistance presque inchangée après immersion dans l'eau. Cela suggère que bien que la résistance absolue diminue légèrement la stabilité du matériau en conditions humides est optimale à ce niveau de caoutchouc.

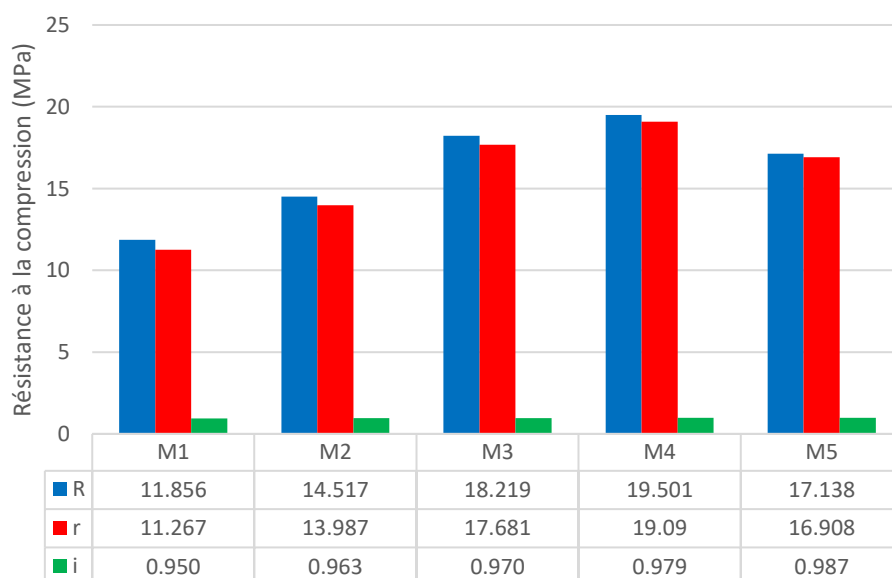


Figure VII. 14. Résultats de l'essai Duriez des enrobés modifiées

L'ajout de la poudrette de caoutchouc au le béton bitumineux améliore considérablement ses propriétés mécaniques et la résistance à la dégradation par l'eau. Les résultats indiquent qu'un pourcentage de 12% à 16% de caoutchouc est suffisant pour offrir un équilibre entre résistance à la compression et durabilité en conditions humides. Ces améliorations montrent le bénéfice de l'utilisation de caoutchouc préviens des pneus usés pour produire des matériaux bitumineux plus performants, durables et qui contribue de recyclage des déchets. Nos résultats sont en accord avec ceux de Teba et al. [105] qui a également observé une résistance à la sensibilité à l'eau avec l'ajout de poudrette de caoutchouc (Figure III.33). Eltwati et al. [107] aussi ont conclu que la résistance de l'enrobé à augmenter avec l'addition de continu en caoutchouc jusqu'à 20%. Au-delà de ce seuil la résistance à l'eau commence à diminuer.

Du point de vue de la durabilité le caoutchouc agit comme une barrière hydrophobe réduisant la perméabilité du matériau et limitant la pénétration de l'eau dans la matrice bitumineuse. Cette propriété explique la faible variation de la résistance entre les conditions à sec et après immersion (rapport r/R proche de 1). Autrement dit le matériau conserve une grande partie de ses performances même en environnement humide. De plus le comportement élastique du caoutchouc permet une meilleure dissipation des contraintes internes sous compression limitant ainsi les microfissures qui pourraient se développer dans la structure après saturation en eau. Ce phénomène contribue à maintenir la résistance mécanique du matériau, même après exposition à l'humidité.

VI.4.6. Résistance à l'orniérage

La Figure VII.15 montre résultats de l'essai d'orniérage sur des bétons bitumineux étudiées. Les enrobés bitumineux améliorés avec de la poudrette de caoutchouc montrent une tendance significative dans la résistance à la formation des ornières en fonction du pourcentage de caoutchouc ajouté et du nombre de cycles de chargement.

Tableau VII. 2. Profondeurs d'orniérage en % des enrobés modifiées

N de cycles	1000	3000	10000	30000	Remarque
M4C0	5,79	9,67	-	-	Nul après 4104 cycles
M4C4	1,69	5,47	12,03	16,52	
M4C8	0,89	3,68	10,11	14,61	
M4C12	0,63	1,98	5,51	7,55	
M4C16	0,11	0,29	0,97	2,66	

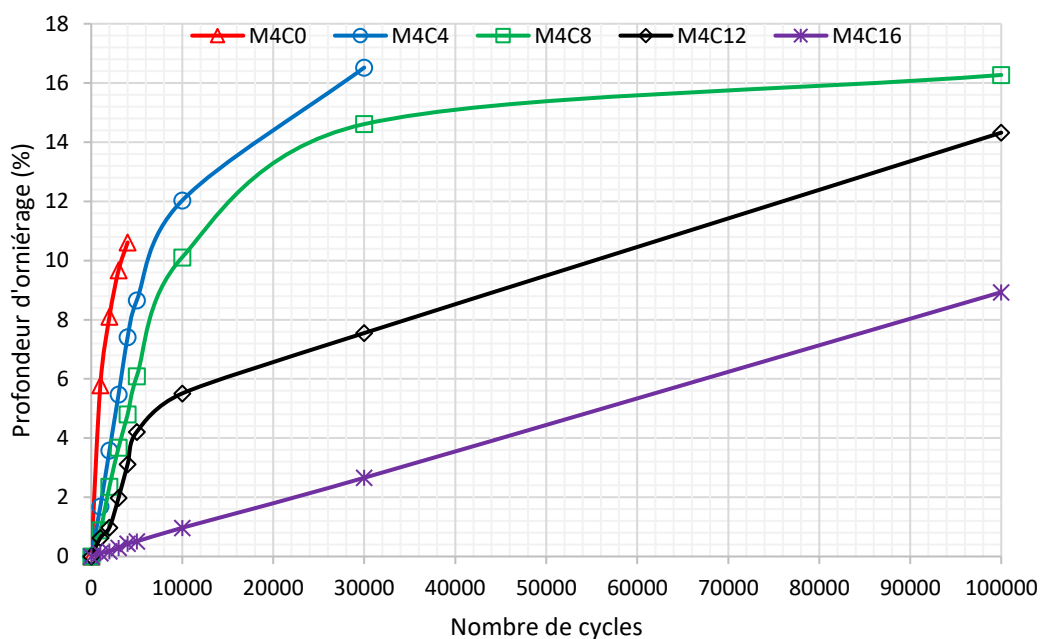


Figure VII. 15. Profondeur d'orniérage en fonction du nombre de cycles des enrobés modifiées

Pour M4C0 la profondeur de l'ornière augmente plus rapidement avec le nombre de cycles de chargement. À 1000 cycles la profondeur de l'ornière est de 5,79 mm et continue d'accroître jusqu'à 10,61 mm à 4000 cycles puis la résistance d'orniérage devient nul après 25868 cycles. En ajoutant 4% de caoutchouc il y a une amélioration remarquable de la résistance à l'orniérage. À 1000 cycles la profondeur de l'ornière est réduite à 1,69 mm et elle atteint 7,41 mm à 4000 cycles. Même si la profondeur continue d'augmenter avec le nombre de cycles l'accroissement est moins claire par rapport au M4C0. Avec 8% de caoutchouc la profondeur de l'orniérage à 1000 cycles est encore réduite à 0,89 mm et elle atteint 4,8 mm à 4000 cycles. La performance continue de s'améliorer

avec 6,09 mm à 5000 cycles et 16,27 mm à 100000 cycles montrant une résistance accrue par rapport aux pourcentages inférieurs. Pour M4C12 les résultats montrent une amélioration significative de la résistance à l'orniérage. À 1000 cycles la profondeur de l'ornière est de 0,63 mm atteignant seulement 3,12 mm à 4000 cycles et 14,32 mm à 100000 cycles. Cette disposition illustre une meilleure durabilité du mélange sous des charges répétées.

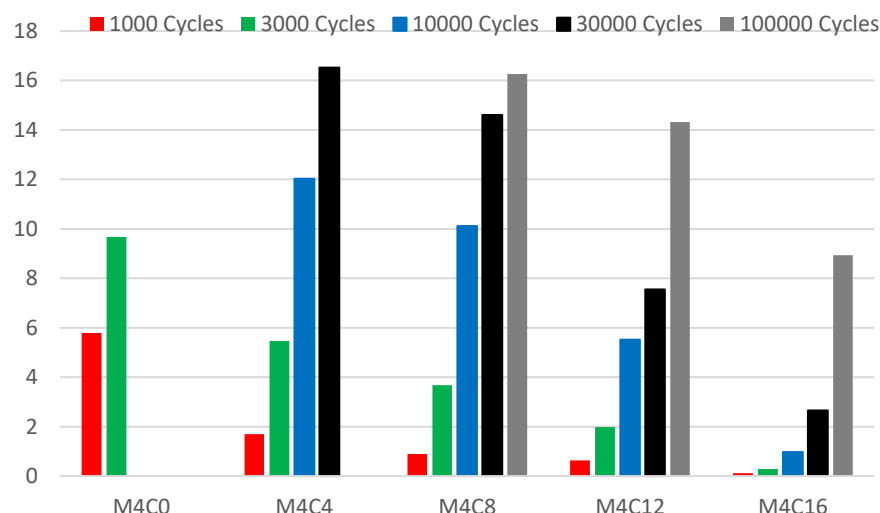


Figure VII. 16. Profondeur d'orniérage des BB modifiées dans 1000,3000, 10000, 30000 et 100000 cycles

L'ajout de 16% de caoutchouc offre les meilleures performances avec une profondeur de l'ornière à 1000 cycles de seulement 0,11 mm. À 4000 cycles la profondeur de l'ornière est de 0,44 mm et elle obtenu 8,93 mm à 100000 cycles. Ce niveau de performance montre que l'ajout de caoutchouc améliore beaucoup la résistance du béton bitumineux à la déformation sous charge répétée. Ces résultats affirment les études de plusieurs chercheurs [105], [106], [107], [135] et [137] qui ont démontré une diminution de profondeur d'orniérage avec l'ajout de teneur en caoutchouc (Figure III.38).

Cependant, Al-Rubaie et al. [104] ont rapporté des résultats qui montrent une diminution de la profondeur d'orniérage jusqu'à 10 % de poudrette de caoutchouc. Au-delà de ce seuil, la profondeur d'orniérage de l'enrobé commence à augmenter.

L'influence positive de la poudrette de caoutchouc sur la résistance à l'orniérage du béton bitumineux à base sable de dunes s'explique par plusieurs mécanismes liés à la nature élastique et thermoplastique du caoutchouc et à son interaction avec le bitume lors du malaxage. Le caoutchouc modifie la rhéologie du bitume. Ce liant devenu plus visqueux et plus élastique permet de mieux résister aux sollicitations provoquées par le passage répété des charges roulantes. Cela réduit la déformation permanente en surface et donc la formation d'ornières. De plus les particules de

caoutchouc agissent comme des micro-renforts dispersés dans la matrice bitumineuse améliorant la cohésion du mélange et la répartition des contraintes internes. Cela rend le matériau plus résistant aux déformations du au passage répètes de roue haute température. Ensuite le PC permet au matériau de retrouver partiellement sa forme après déformation ce qui limite l'accumulation de déformations plastiques sous l'effet des charges répétées. Cette élasticité interne renforce la stabilité du mélange sous trafic lourd et fréquent.

Enfin, la meilleure adhérence entre les granulats et le bitume modifié grâce au caoutchouc contribue à maintenir la structure interne du mélange limitant les glissements internes et la déformation en surface.

En conclusion l'ajout de poudrette de caoutchouc de pneus usés dans le béton bitumineux améliore sa résistance à l'orniérage. Plus le pourcentage de caoutchouc est élevé plus la résistance à l'orniérage est importante atteignant un maximum à 16% de caoutchouc. Ces résultats conduisent que l'incorporation de caoutchouc de pneus usés peut être une méthode efficace pour augmenter la durabilité et la performance des revêtements routiers en réduisant la formation d'orniérages et en prolongeant la durée de vie des routes.

VI.4.7. Essai module de rigidité



Figure VII. 17. Eprouvette soumise à l'essai de Module

La Figure VII.18 présente les résultats de l'essai de module de rigidité pour les bétons bitumineux étudiés à 15°C et à une fréquence de 0,001 Hz. Pour M4C0 qui ne contient pas de caoutchouc le module de rigidité moyenne est de 13220 MPa. Cette valeur est de référence pour comparer l'effet de l'ajout de caoutchouc sur la rigidité du béton bitumineux. Lorsqu'on ajoute 4% de caoutchouc M4C4 le module de rigidité augmente à 14300 MPa. Cette augmentation suggère que même une quantité faible de poudrette améliore la rigidité du béton bitumineux. En augmentant la teneur en caoutchouc à 8% le module de rigidité atteint 17145 MPa montrant une augmentation significative par rapport à la formulation avec 4% de caoutchouc. Cela démontre que l'ajout de caoutchouc continue à renforcer considérablement le béton bitumineux. Pour le mélange M4C12 le module de rigidité s'élève à 17987 MPa. Bien que l'augmentation soit moins prononcée que celle observée entre 4% et 8% elle indique que l'effet renforçant du caoutchouc est toujours présent. Enfin pour la formulation M4C16 contenant 16% de caoutchouc le module de

rigidité atteint 19449 MPa la valeur la plus élevée parmi toutes les formulations testées. L'accroissement continu du module de rigidité avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc montre que le caoutchouc de pneus usés a un effet positif et significatif sur la rigidité du béton bitumineux.

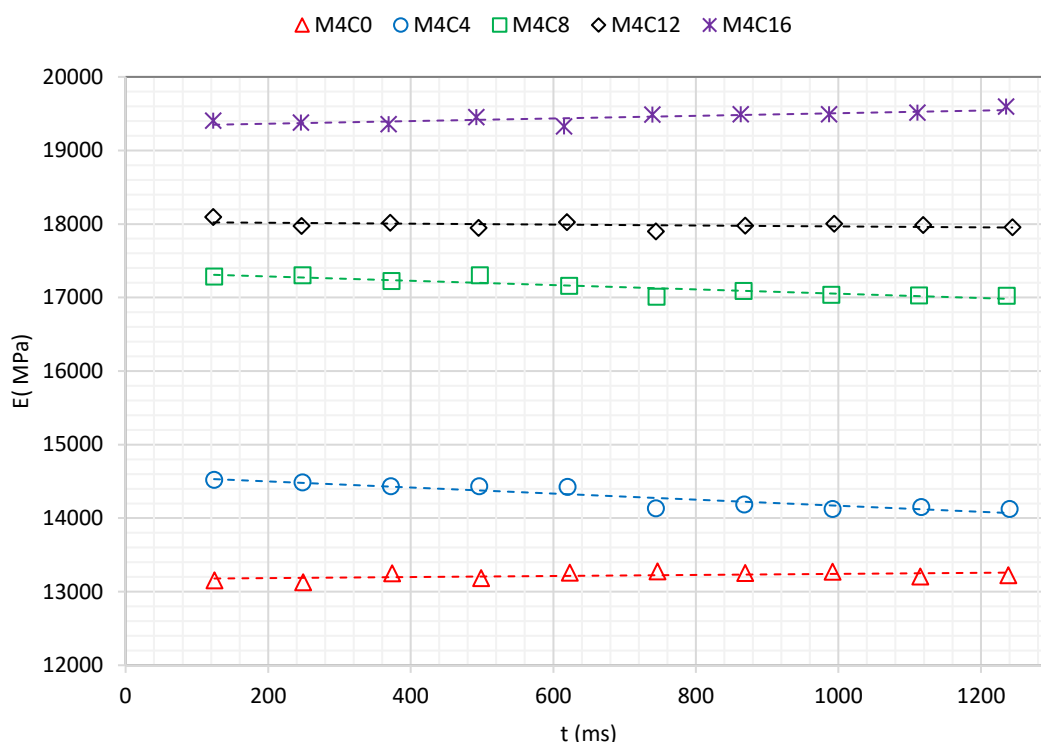


Figure VII. 18. Module de rigidité des enrobés modifiés à 15°C

La Figure VII.19 présente les résultats de l'essai de module de rigidité pour cinq mélanges de béton bitumineux à 20°C et à une fréquence de 0,001 Hz. Pour la formulation M4C0 le module de rigidité moyenne est de 10552 MPa. Lorsqu'on ajoute 4% de caoutchouc le module de rigidité accroît à 11505 MPa. En augmentant la teneur en caoutchouc à 8% le module de rigidité atteint 14221 MPa montrant une augmentation significative par rapport à la formulation avec 4% de caoutchouc. Cela démontre que l'ajout de caoutchouc continue à renforcer considérablement le béton bitumineux. Pour M4C12 avec 12% de poudre de caoutchouc le module de rigidité s'élève à 15625 MPa. Bien que l'augmentation soit moins prononcée que celle observée entre 4% et 8% elle montre que l'effet renforçant du caoutchouc est toujours présent. Enfin pour le béton bitumineux contenant 16% de caoutchouc la valeur enregistrée de module atteint 17430 MPa la valeur la plus haute parmi toutes les formulations testées. L'augmentation continue du module de rigidité avec l'accroissement du pourcentage en caoutchouc montre que le caoutchouc de pneus usés a un effet positif sur la rigidité du béton bitumineux.

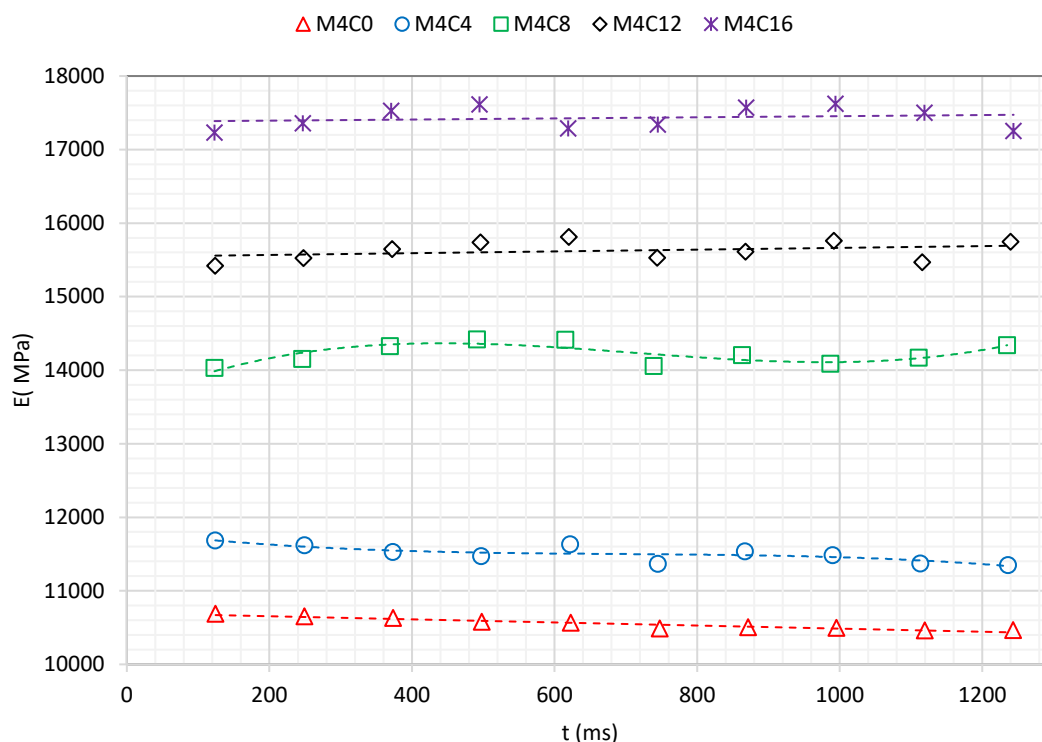


Figure VII. 19. Module de rigidité des enrobés modifiées à 20°C

La Figure VII.20 présente les résultats de l'essai de module de rigidité pour cinq formulations de béton bitumineux à 30°C et à une fréquence de 0,001 Hz. Pour la formulation M4C0 sans caoutchouc le module de rigidité est de 5194 MPa. Avec l'addition de 4% de caoutchouc (mélange M4C4) le module de rigidité accroit à **6593** MPa indiquant une amélioration de la rigidité du mélange bitumineux. En augmentant la teneur en caoutchouc à 8% le module de rigidité atteint **8528** MPa montrant une augmentation encore plus remarquable par rapport à la formulation contenant 4% de caoutchouc. Cela démontre que l'ajout de caoutchouc continue à renforcer le béton bitumineux. Pour 12% de caoutchouc ajouté au béton le module de rigidité s'élève à **9784** MPa. Cette augmentation indique que l'effet renforçant du caoutchouc est toujours présent. Enfin pour le mélange M4C16 contenant 16% de caoutchouc le module de rigidité atteint **11204** MPa la valeur la plus élevée parmi toutes les formulations testées. Même à des températures élevées l'accroissement de la teneur en caoutchouc a réussi d'augmentation continue du module de rigidité de béton bitumineux à base sable de dunes ce qui montre que le caoutchouc a un effet positif et significatif sur la rigidité.

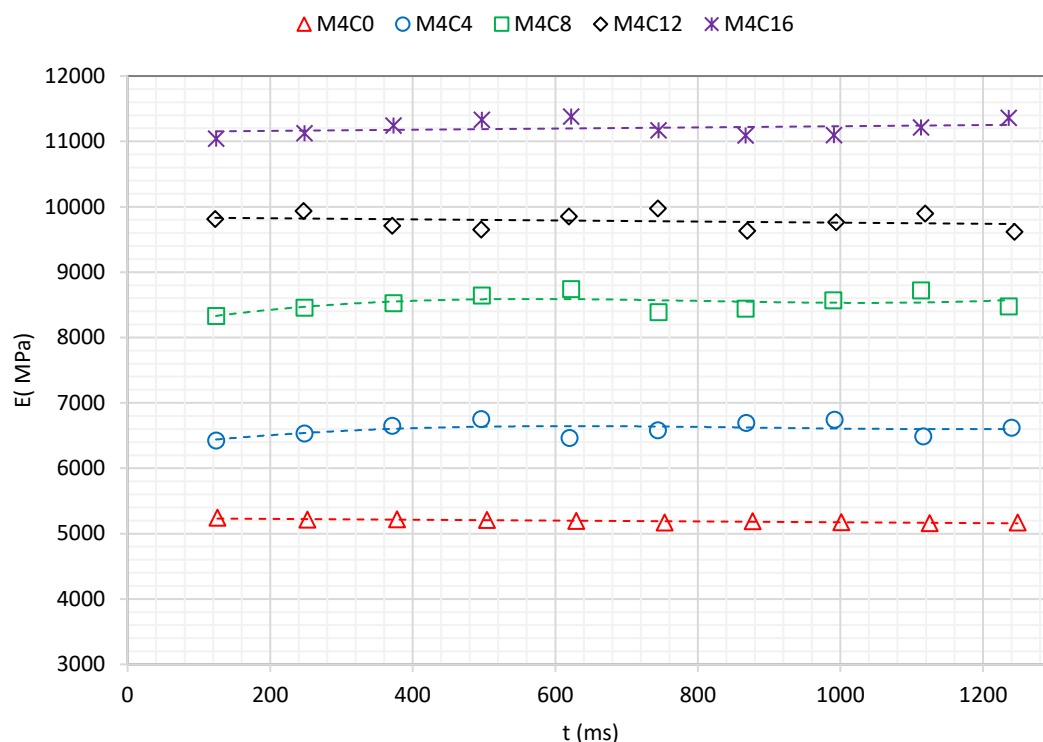


Figure VII. 20. Module de rigidité des enrobés modifiées à 30°C

Les particules de caoutchouc agissent comme des inclusions semi-rigides ou élastiques dispersées dans la matrice bitumineuse. Elles renforcent le squelette interne de l'enrobé en limitant les mouvements relatifs entre les granulats, ce qui réduit la déformation sous charge. Cette action renforçante est particulièrement efficace à basse et moyenne température où le caoutchouc conserve sa souplesse tout en apportant de la consistance au mélange. De plus, le caoutchouc améliore l'adhésion entre le bitume et les granulats, grâce à ses propriétés viscoélastiques et à l'augmentation de la cohésion du liant modifié. Cette meilleure liaison interne accroît la capacité du mélange à transférer les charges et donc à résister à la sollicitation mécanique ce qui se traduit par une élévation du module de rigidité. Même à température élevée (comme 30 °C), le mélange modifié conserve une rigidité plus élevée que le mélange témoin car le caoutchouc retarde le ramollissement du liant. Cela confère une meilleure tenue mécanique aux enrobés sous climat chaud ou en conditions de trafic intense.

Tableau VI. 4. Modules de rigidité moyenne à 15, 20 et 30°C pour les enrobés modifiées

$T (C^{\circ})$	15	20	30
<i>M4C0</i>	13219,5	10552,3	5193,7
<i>M4C4</i>	14300,2	11505,1	6593,0
<i>M4C8</i>	17145,3	14220,5	8528,0
<i>M4C12</i>	17986,5	15625,0	9784,0
<i>M4C16</i>	19448,8	17429,8	11203,5

En conclusion on peut dire que l'incorporation de poudrette de caoutchouc dans le béton bitumineux a base sable de dunes augmente la rigidité du matériau à toutes les températures de l'essai (15°C, 20°C et 30°C). Cependant la rigidité diminue avec l'augmentation de la température pour toutes les formulations ce qui est normale pour tous les enrobé bitumineux. À des températures plus élevées bien que la rigidité diminue les formulations contenant du caoutchouc conservent une rigidité relativement supérieure démontrant une meilleure performance thermique. Ainsi l'utilisation de 16% de poudrette de caoutchouc semble être la plus efficace pour améliorer la rigidité du béton bitumineux et maintenir ses performances à différentes températures.

Conclusion

En conclusion l'ajout de la poudrette de caoutchouc au béton bitumineux a montré une amélioration significative des performances. La stabilité Marshall s'est considérablement améliorée jusqu'à une teneur de 12% de caoutchouc au-delà une diminution a été observée. De même la teneur en vides a diminué jusqu'à 12% avant de commencer à augmenter. Le fluage a été minime avec l'ajout de caoutchouc tandis que la résistance à la compression de l'essai Duriez a augmenté de manière continue jusqu'à 12%. La résistance à la sensibilité à l'eau a également été renforcée tout comme la résistance à l'orniérage qui a montré une amélioration significative. Enfin le module de rigidité a augmenté avec l'ajout de poudrette de caoutchouc indépendamment des températures d'essai indiquant une meilleure capacité du matériau à résister aux déformations. Ces résultats démontrent l'efficacité du caoutchouc en tant qu'additif au bitume pour améliorer les propriétés des mélanges bitumineux en particulier jusqu'à une concentration optimale de 12%.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

À l'issue du présent recherche un programme expérimental a été suivi pour améliorer les formulations de bétons bitumineux à base de sable de dunes en les modifiant avec de la poudrette de caoutchouc provenant de pneus usés. La première phase a porté sur l'élaboration de diverses formulations explorant l'impact de l'ajout de fines telles que les fillers de calcaire et le sable de dunes broyé. Ces formulations allant de mélanges sans fines (0%) à des mélanges enrichis en fines jusqu'à 4% ont permis de tester leur efficacité sur les propriétés mécaniques. Par la suite le bitume pur 40/50 a été modifié par l'incorporation de divers pourcentages de poudrette de caoutchouc de 4% à 16% afin d'améliorer ses caractéristiques mécaniques et thermiques. Les performances des bétons bitumineux modifiés ont été évaluées au moyen d'essais tels que la presse de cisaillement giratoire, l'essai Marshall, l'essai Duriez, l'essai d'orniérage et l'essai de module. Ces essais ont permis d'identifier les mélanges offrant les meilleures performances tant en termes de résistance sous les conditions réelles de trafic routier. Les conclusions dont on a abouti sont les suivantes :

1. Impact de l'ajout des fines sur le béton bitumineux à base sable de dunes :

- L'ajout de fines particulièrement le sable de dunes broyé a permis une réduction significative des teneurs en vides dans le béton bitumineux à base sable de dunes. Cette amélioration de la compacité contribue à une meilleure performance générale du matériau notamment en termes de résistance mécanique.
- L'ajout de fines a entraîné une augmentation notable de la stabilité Marshall avec une performance maximale observée à 4% de sable de dunes broyé. Cela indique que l'incorporation contrôlée de fines peut renforcer la structure interne du béton bitumineux améliorant ainsi sa résistance sous charge.
- L'ajout de fines en particulier celles provenant du sable de dunes a réduit le fluage du matériau. En revanche, les fillers de calcaire ont montré une tendance à augmenter le fluage soulignant l'importance du choix des types de fines pour contrôler cette propriété.
- L'ajout de 2% de sable de dunes broyé a permis d'atteindre des valeurs maximales de résistance à la compression tant après conservation à l'air qu'à l'eau. De plus, cette même proportion a montré une amélioration de la résistance à la sensibilité à l'eau un indicateur clé de la durabilité du matériau sous conditions humides.

- Une compacité maximale a été observée lors du compactage statique avec 2% de sable de dunes broyé soulignant encore l'efficacité de ce taux pour améliorer la densité et la stabilité du béton bitumineux.
- Bien que l'ajout de fines ait généralement amélioré les propriétés mécaniques une diminution de la résistance à l'orniérage a été observée
- Le module de rigidité a augmenté de manière significative avec l'ajout de 2% de sable de dunes broyé pour toutes les températures d'essai. Cela montre une meilleure capacité du matériau à résister aux déformations sous différentes conditions thermiques.

2. Impact de l'ajout de poudrette caoutchouc sur le bitume pur :

- L'incorporation de poudrette de caoutchouc dans le bitume pur 40/50 entraîne une modification importante de ses propriétés mécaniques et thermiques ce qui a des implications directes pour son utilisation dans les revêtements routiers.
- L'ajout de caoutchouc réduit la pénétrabilité du bitume ce qui le rend plus rigide. Cette rigidité accrue signifie que le bitume est moins susceptible de se déformer sous des charges permanentes ce qui est particulièrement important pour prévenir l'apparition d'ornières sur les routes.
- L'ajout de caoutchouc augmente la température de ramollissement du bitume. Une température de ramollissement plus élevée indique que le bitume reste stable à des températures plus élevées ce qui est crucial pour prévenir son ramollissement et sa déformation sous des conditions de chaleur intense.

En raison de ses propriétés améliorées le bitume modifié avec du caoutchouc est particulièrement bien adapté pour des applications dans des environnements à climat chaud, où la stabilité thermique est essentielle. Il est également idéal pour les routes soumises à des charges élevées comme les autoroutes ou les zones industrielles où la résistance aux déformations et aux contraintes mécaniques est cruciale.

3. Impact de l'ajout de poudrette de caoutchouc sur le béton bitumineux à base sable de dunes :

- L'ajout de caoutchouc a contribué à une réduction progressive des teneurs en vides jusqu'à 12%. Après cette teneur les teneurs en vides ont commencé à augmenter suggérant une saturation du mélange en caoutchouc.
- L'incorporation de poudrette de caoutchouc utilisant la méthode humide a considérablement amélioré la stabilité Marshall jusqu'à une teneur de 12%. Au-delà de cette proportion une

diminution de la stabilité a été observée indiquant un seuil optimal d'incorporation du caoutchouc.

- Le fluage du matériau a diminué avec l'incorporation de caoutchouc ce qui est bénéfique pour la performance à long terme du béton bitumineux sous charge.
- La résistance à la compression a montré une augmentation jusqu'à 12% d'ajout de caoutchouc confirmant l'effet renforçant de ce matériau sur la structure du béton bitumineux.
- L'ajout de caoutchouc a également renforcé la résistance du mélange à l'eau réduisant ainsi les risques de dégradation sous conditions humides.
- L'incorporation de poudrette de caoutchouc a significativement amélioré la résistance à l'orniérage un paramètre clé pour la durabilité des enrobés soumis à des charges de trafic répétées.
- Le module de rigidité a augmenté avec l'ajout de caoutchouc pour toutes les températures d'essai ce qui indique une meilleure performance du matériau face aux variations thermiques et aux charges répétées.

Les résultats prouvent que l'ajout contrôlé de fines et de la poudrette de caoutchouc en utilisant le procédé humide permet d'optimiser les propriétés mécaniques du béton bitumineux à base de sable de dunes. Le mélange optimal identifié intégrant 2% de sable de dunes broyé et 12% de caoutchouc offre un équilibre entre stabilité, résistance à la compression, réduction du fluage, et amélioration du module de rigidité, tout en minimisant les risques liés à l'orniérage et la sensibilité à l'eau. Ces observations confirment l'efficacité des modifications apportées pour améliorer les performances des enrobés bitumineux dans des applications pratique.

PERSPECTIVES

Perspectives

1. Étude approfondie des interactions physico-chimiques

- Explorer les interactions entre les particules de caoutchouc, le bitume et les fines du sable de dunes. Cela inclut les mécanismes de gonflement du caoutchouc dans le bitume.
- Étudier la dispersion du caoutchouc et son effet de maillage dans la matrice bitumineuse ce qui peut expliquer l'amélioration de la cohésion et de la résistance mécanique.

2. Analyse du vieillissement du liant modifié

- Effectuer des essais normalisés de vieillissement tels que RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) pour simuler le vieillissement à court terme pendant la mise en œuvre.
- Réaliser des essais PAV (Pressure Aging Vessel) pour simuler le vieillissement à long terme en service.
- Comparer les propriétés rhéologiques du liant avant et après vieillissement (module complexe, angle de phase, viscosité) à l'aide de DSR (Dynamic Shear Rheometer) pour vérifier si la poudrette de caoutchouc contribue à ralentir l'oxydation ou la perte de souplesse du liant.

3. Évaluation de la résistance à la fatigue

- Mener des essais de fatigue sur enrobés bitumineux (essais en flexion 4 points, essais de traction-compression alternée) afin de déterminer le nombre de cycles supportés avant fissuration.
- Évaluer l'influence du type de sable de dunes sur la résistance à la propagation des fissures.

4. Étude de la performance en conditions climatiques sévères

- Étudier le comportement des formulations sous des cycles gel/dégel, très critiques pour les matériaux hydrophiles comme les sables de dunes.
- Tester la stabilité thermique des enrobés modifiés dans des conditions de fortes températures et vérifier la tenue à la reprise plastique ou à la formation d'ornières après vieillissement.

5. Caractérisation environnementale et valorisation durable

- Évaluer l'impact environnemental des matériaux produits en tenant compte du cycle de vie des matériaux.
- Quantifier les gains environnementaux liés à la valorisation des déchets de pneus (économie circulaire, réduction des déchets enfouis, limitation des imports d'agrégats).

6. Essais de mise en œuvre à grande échelle

- Réaliser des planches d'essai ou des sections routières expérimentales avec les formulations optimales à base de sable de dunes et de caoutchouc.
- Suivre les performances en conditions réelles de trafic pendant plusieurs saisons.
- Évaluer la compatibilité avec les techniques actuelles de fabrication et de mise en œuvre, ainsi que les coûts associés.

7. Optimisation de la formulation

- Étudier l'effet combiné de la poudrette de caoutchouc avec d'autres additifs polymériques ou nanomatériaux pour des formulations plus performantes.
- Ajuster la gradation granulaire du sable 0/14, le teneur de liant et la teneur en filler pour maximiser les performances mécaniques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] P. Kenneth and T. Haim, *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-85910-9.
- [2] J. Laity, *Deserts and Desert Environments*. in Environmental Systems and Global Change Series. Wiley-Blackwell Publishing, 2008. [Online]. Available: <https://books.google.com.au/books?id=wtAbzLLTcwcC>
- [3] N. Lancaster, *Geomorphology of Desert Dunes*. in Critical Psychology. Routledge, 1995.
- [4] K. Zouaouid and R. Gheriani, "Mineralogical Analysis of Sand Roses and Sand Dunes Samples from Two Regions of South Algeria," *Silicon Springer*, vol. 11, pp. 1537–1545, 2019, doi: 10.1007/s12633-018-9974-1.
- [5] M. Maun Anwar, *The Biology of Coastal Sand Dunes*. New York: Oxford University Press, 2009.
- [6] M. T. Amanda, R. Mauliana, T. Rahman, and L. B. Suparma, "Evaluating the performance of porous asphalt mixtures with polymer-modified and unmodified bitumen," *Discover Civil Engineering*, vol. 2, no. 1, p. 31, Feb. 2025, doi: 10.1007/s44290-025-00196-x.
- [7] A. Siala, S. El Euch Khay, A. Loulizi, and J. Neji, "Improving the performance of porous asphalt with reclaimed asphalt, dune sand and lime," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, vol. 174, no. 4, pp. 214–226, 2021, doi: 10.1680/jcoma.19.00056.
- [8] S. Beddiaf, S. Chihi, and Y. Leghrieb, "The determination of some crystallographic parameters of quartz, in the sand dunes of Ouargla, Algeria," *Journal of African Earth Sciences*, vol. 106, pp. 129–133, 2015, doi: 10.1016/j.jafrearsci.2015.03.014.
- [9] S. Beddiaf, S. Chihi, H. Bouguettaia, M. L. Mechri, and N. Mahdadi, "Qualitative and Quantitative Evaluation of Quartz in Different Granular Types of Ouargla Region Sand Dunes – Algeria," *Silicon Springer*, vol. 9, pp. 603–611, 2015, doi: 10.1007/s12633-015-9324-5.
- [10] N. Mahdadi, S. Chihi, H. Bouguettaia, S. Beddiaf, and M. L. Mechri, "Chromatic Classification of Ouargla (Algeria) Dunes Sand: Determination of Main Compositions and Color Causes, by Using XRD, FTIR and XRF," *Silicon Springer*, vol. 9, pp. 211–221, 2017, doi: 10.1007/s12633-016-9432-x.
- [11] K. Hadjadj and S. Chihi, "Rietveld Refinement Based Quantitative Phase Analysis (QPA) of Ouargla (Part of Grand Erg Oriental in Algeria) Dunes Sand," *Silicon Springer*, 2020, doi: 10.1007/s12633-020-00826-2.
- [12] W. Steven E, "Michigan's Study of Coastal Sand Dune Mining in Michigan," Michigan, 2000.
- [13] A. GHRIEB, "Étude de Stabilisation pour la Valorisation des Sables de Dune en Assises de Chaussée – Étude Comparative Entre Trois Sables de la Région de Djelfa (Algérie)," Ecole Nationale Polytechnique, 2014. [Online]. Available: www.enp.edu.dz
- [14] R. KETTAB, "Contribution à la valorisation du sable de dunes," ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, 2007.
- [15] "Choix de formulations de sable enrobé et réalisation d'une planche expérimentale au niveau de la RN 49 Ouargla," Ouargla, Nov. 1999.
- [16] A. SIALA, S. EL EUCH KHAY, and J. NEJI, "Étude expérimentale de la valorisation du sable de dune dans la formulation de béton bitumineux [Experimental study of the development of dune sand in asphalt concrete formulation]," *Les annales du BTP*, vol. 67, no. 2, Jul. 2015.

- [17] M. Akacem, M. Bouteldja, V. Cerezo, and A. Hachichi, "A method to use local low performances aggregates in asphalt pavements – An Algerian case study," *Constr Build Mater*, vol. 125, pp. 290–298, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.035.
- [18] A. Siala, S. El Euchkhay, and J. Neji, "Etude expérimentale d'un enrobé drainant avec ajout de sable de dune, de chaux et de matériaux recyclés," Rabat: journées scientifiques franco-maghrébines, caractérisation des matériaux complexes, 2017.
- [19] M. Akacem, B. Mekerta, R. Zentar, and O. Hassan Moulay, "Valorisation of fine dune sand in asphalt concrete," *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 34, pp. 317–322, 2018, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/335617546>
- [20] N. Kebaili, M. Kebaili, and M. Djouhri, "Properties of a new concrete pavement made with dune sands for the south Algerian roads," 2018.
- [21] A. BENTATA, N. KEBAILI, A. BOUZOUID, H. CHAIB, and M. BOUCHERBA, "View of Experimental characterization of design performance of sand-grained asphalt concrete for worn pavement," *Tob Regul Sci*, vol. 9, no. 1, pp. 2090–2103, 2023, doi: doi.org/10.18001/TRS.9.1.145.
- [22] M. Boucherba, A. AMIEUR, and L. MOULAY, "A method to use saharian sand dune in high modulus bituminous mixture," in *Patrimoine et l'Environnement en Zones Arides*, Adrar , 2019, pp. 1–8.
- [23] Mallouk Jean-Georges, *Les enrobés bitumineux. Tome 1: Théorie*. Québec: Modulo éditeur, 1982.
- [24] Y. (dir) Figoli, *L'art de bâtir. Volume 1*. Québec: Modulo éditeur, 1983.
- [25] M. S. Mamlouk and J. P. Zaniewski, *Materials for civil and construction engineers*, 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2011.
- [26] I.-B. (dir.) Dominique, *Les enrobés bitumineux. Tome 1*. Paris: USIRF, 2003.
- [27] LAROUSSE, "Définitions : goudron - Dictionnaire de français Larousse." Accessed: Mar. 20, 2020. [Online]. Available: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/goudron/37587>
- [28] ASTM International, *Standard Terminology Relating to Materials for Roads and Pavements*. United States, 2002, p. 4. [Online]. Available: www.astm.org
- [29] A. BORDJIBA, "VALORISATION ET RENFORCEMENT DES BETONS BITUMINEUX," UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA, 2017.
- [30] R. Peltier, *Manuel du laboratoire routier*, 3e Edition. Paris: DUNOD, 1965.
- [31] L. Gagon, *Techniques Routières*. Québec: Modulo éditeur, 1982.
- [32] D. A. Ramirez Cardona, "Characterisation of thermomechanical properties of bituminous mixtures used for railway infrastructures," UNIVERSITE DE LYON, 2016.
- [33] N. KEBAILI, "L'ASPHALTE CAOUTCHOUC VALORISATION DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC EN DOMAINE ROUTIER," Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
- [34] M. MERBOUH, "Contribution a La Modelisation Du Comportement Rheologique Des Enrobés Bitumineux: Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue," UNIVERSITE BORDEAUX-I, 2010.
- [35] M. Nguyen, "Modélisation numérique discrète des matériaux bitumeux," Université de Lyon, 2017.

- [36] N. A. Alvarado Patino, "Évaluation des performances thermomécaniques des enrobés bitumineux à fort taux de recyclage : Apport du procédé de régénération Fenixfalt," Université Bretagne Loire, 2019.
- [37] P. Gayte, "Modélisation du comportement thermo-viscoplastique des enrobés bitumineux," Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat, 2016.
- [38] S. Vassaux, "Mouillabilité et miscibilité des bitumes: application au recyclage," UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER, 2017.
- [39] Nadine TACHON, "Nouveaux types de liants routiers à hautes performances, à teneur en bitume réduite par addition de produits organiques issus des agroressourcés," L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, 2008.
- [40] R. Sebben Paranhos, "Approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobés à chaud.," Université de Rouen, 2007.
- [41] F. Olard, "ENROBÉS BITUMINEUX À BASSES TEMPÉRATURES . Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé," ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE LYON, 2004.
- [42] L. Style and E. Performance, "Arabian Journal of Business and," *Arabian Journal of Business and Management Review*, 2015, doi: 10.4172/2223-5833.1000146.
- [43] C. Yang *et al.*, "Investigation of physicochemical and rheological properties of SARA components separated from bitumen," *Constr Build Mater*, vol. 235, p. 117437, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117437>.
- [44] D. SI BACHIR, "COMPOTEMENT RHÉOLOGIQUE DES BITUMES MODIFIÉS PAR DES POLYMÈRES : INFLUENCE DU VIEILLISSEMENT," UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE, 2014.
- [45] L. EL BEZE, "Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux : Identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport," UNIVERSITÉ PAUL CÉZANNE AIX-MARSEILLE III, 2008.
- [46] J. Arrambide and M. Duriez, *Liants routiers et enrobés matériaux de protection ; plâtre - agglomérés - bois*. Paris: DUNOD, 1959.
- [47] M. L. C. AIDARA, "Le Module Complexe et l'Impact du Granulat sur la Prédiction du Module Dynamique des Enrobés Bitumineux. Application aux Dimensionnements Rationnel et Mécanistique-Empirique," UNIVERSITÉ DE THIÈS, 2016.
- [48] M. AUDO, "Évaluation du potentiel rhéologique d'huiles issues de microalgues pour des applications en tant que matériaux de substitution aux bitumes," UNIVERSITÉ DE NANTES, 2013.
- [49] D. Lesueur, "The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification," *Adv Colloid Interface Sci*, vol. 145, no. 1–2, pp. 42–82, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.cis.2008.08.011.
- [50] B. GLAOU, "CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION DES LIANTS BITUMINEUX PAR L'ANALYSE VIBRATOIRE Effet des cycles de fatigue thermiques sur les liants bitumineux," Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2011.
- [51] É. LACHANCE-TREMBLAY, "Sensibilité à l'eau et résistance au gel-dégel des enrobés bitumineux avec granulats de verre recyclé," UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2018.

- [52] A. ROGEAUX, "Impact du vieillissement par oxydation sur les caractéristiques rhéologique et chimique de deux bitumes de même grade de performance et d'origine pétrolière différente par," 2017.
- [53] S. LAMOTHE, "Influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le coupe ouvrabilité-ornière," UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2004.
- [54] BERTHIER Jean, "Granulats et liants routiers," *Techniques de l'Ingénieur*. Paris: Techniques de l'Ingénieur, p. 13, 1992.
- [55] Mallouk Jean-Georges, *Les enrobés bitumineux. Tome 2: Laboratoires*. Québec: Modulo éditeur, 1982.
- [56] M. L. NGUYEN, "Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux [Study on the cracking and fatigue of bituminous mixtures]," L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2009.
- [57] A. Vieyres, "Influence of filler /polymer interface on reinforcement, strain-induced crystallization and tear resistance in reinforced natural rubber," UNIVERSITE DE LYON, 2013. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-01170268>
- [58] A. C. Engonga Edzang, "Biomécanique de l'hévéa de plantations : sensibilité à la casse au vent," Université Clermont Auvergne, 2023. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-04405936>
- [59] J.-C. Brosse, I. Campistron, D. Derouet, and D. Reyx, "Le caoutchouc naturel Chimie d'un hydrocarbure polymère," pp. 45–51, Nov. 2002.
- [60] R. Le Coz Botrel, "Application de la métathèse à la dégradation contrôlée de polydiènes pour la synthèse de copolymères et à l'élaboration d'ionogels," Normandie Université, 2019. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-02520014v2>
- [61] N. Eiamnison, "Etude de la dégradation de structures composites en caoutchouc soumises à des chocs," École nationale supérieure des mines de Paris, 2013.
- [62] K. Kempfer, "Simulation multi-échelle de l'interaction polymère-charge," Université Clermont Auvergne, 2019. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-02512903>
- [63] C. HO Anh, "Optimisation de la composition et caractérisation d'un béton incorporant des granulats issus du broyage de pneus usagés : Application aux éléments de grande surface," Université de Toulouse, 2010.
- [64] S. Faten, "Etude de la dégradation contrôlée de polydiènes : Application au recyclage des déchets pneumatiques," Université du Maine, 2010.
- [65] H. Trouzine, A. Asroun, N. Asroun, F. Belabdelouhab, and N. T. Long, "Problématique des pneumatiques usagés en Algérie," vol. 28, p. 35, 2011, [Online]. Available: http://www.ons.dz/them_sta.htm
- [66] W. Zheng, H. Wang, Y. Chen, J. Ji, Z. You, and Y. Zhang, "A review on compatibility between crumb rubber and asphalt binder," *Constr Build Mater*, vol. 297, p. 123820, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123820.
- [67] O. Samira, "APPROCHES BIO-INSPIREES DU CAOUTCHOUC NATUREL PAR POLYMERISATION CATIONIQUE ET MODIFICATION CHIMIQUE," UNIVERSITE BORDEAUX I, 2011.
- [68] P. Ekkawit, "Natural Rubber grades, from polymer characteristics to engineering properties," Université du Maine, 2010.

- [69] W. Chumeka, "Improvement of compatibility of poly(lactic acid) blended with natural rubber by modified natural rubber," Université Nantes Angers Le Mans, 2013. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-01018026>
- [70] M. Merlin, "Structure et propriétés de mélanges d'élastomères chargés de noir de carbone : étude des coupages NR / SBR et BR / SBR," Université Jean Monnet de Saint-Etienne, 2012. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-00952025>
- [71] Y. Mahmoudi, "Comportement thermomécanique d'enrobés bitumineux contenant des granulats de caoutchouc, issus de pneumatiques usagés, ajoutés par voie sèche," Université de Lyon, 2022. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-04155514>
- [72] J. A. Cruz-Morales, C. Gutiérrez-Flores, D. Zárate-Saldaña, M. Burelo, H. García-Ortega, and S. Gutiérrez, "Synthetic Polyisoprene Rubber as a Mimic of Natural Rubber: Recent Advances on Synthesis, Nanocomposites, and Applications," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 20, p. 4074, Oct. 2023, doi: 10.3390/polym15204074.
- [73] G. Thomas, F. Jean-Philippe, and L. Moulin, "Que faire des millions de pneus usagés ?," Polytechnique insights LA REVUE DE L'INSTITUT POLYTECHNIQUE DE PARIS. Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.polytechnique-insights.com/tribunes/energie/que-faire-des-millions-de-pneus-usages/>
- [74] Conso Globe, "Nombre de pneus usagés en Europe," Conso Globe; Statistiques mondiales en temps réel. Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available: <https://www.planetoscope.com/recyclage-collecte/925-nombre-de-pneus-usages-en-europe.html>
- [75] M. Larissa and K. Maxime, "RECYCLAGE : DONNER UNE SECONDE VIE AUX PNEUS USES," Africa Green Magazine. Accessed: Jul. 14, 2024. [Online]. Available: <http://www.africagreenmagazine.com/2020/11/recyclage-donner-une-seconde-vie-aux.html>
- [76] "Déchets spéciaux et dangereux: quelque 325.000 tonnes enregistrées annuellement en Algérie," Algerie Presse Service.
- [77] "Déchets spéciaux et dangereux: Plus de 300 .000 tonnes enregistrées annuellement en Algérie," EL MOUDJAHID Economie.
- [78] P. Ravindra Badarayani, "Sand/waste rubber mixtures : A micromechanical analysis," École centrale de Nantes, 2020. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-02479748>
- [79] M. BEKHITI, "Contribution théorique et expérimentale à l'étude de stabilisation des argiles gonflantes par ajout de granulats de caoutchouc des pneus usagés.," Université Djilali Liabès, 2019.
- [80] A. BELFERRAG, "Contribution à l'amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques des bétons de sable de dunes," Université Mohamed Khider – Biskra, 2016.
- [81] Pierre Deshaies, "Incendie de milliers de pneus usagés à Beauceville," <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1143654/incendie-pneus-usages-beauceville-royal-mat>.
- [82] H. BENSACI, "PERFORMANCE DES BÉTONS AUTOPLAÇANTS À BASE DES DECHETS DES PNEUS EN CAOUTCHOUC ET AJOUTS MINÉRAUX," UNIVERSITÉ DE BLIDA 1, 2019.
- [83] A. MEDDAH, "Caractérisation d'un béton compacté contenant des déchets pneumatiques," École Nationale Polytechnique d'Alger, 2015. [Online]. Available: www.enp.edu.dz

- [84] T. Edeskär, "Use of Tyre Shreds in Civil Engineering Applications Technical and Environmental Properties," Luleå University of Technology, 2006.
- [85] D. Flores-Medina, N. Flores Medina, and F. Hernández-Olivares, "Static mechanical properties of waste rests of recycled rubber and high quality recycled rubber from crumbed tyres used as aggregate in dry consistency concretes," *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, vol. 47, no. 7, pp. 1185–1193, 2014, doi: 10.1617/s11527-013-0121-6.
- [86] R. Samiha, "Etude de l'influence de l'incorporation dans le béton des déchets recyclés issus du broyage des pneus usagés et verre broyé sur leurs caractéristiques et comportement.," Université Mohamed Khider-Biskra, 2019.
- [87] S. BOUKOUR, "Caractéristiques physico-mécaniques et durabilité des éco-composites cimentaires à base de granulats de caoutchouc issus de pneus usagés," Université du 08 Mai 1945 - Guelma, 2017.
- [88] F. Belabdelouhab and N. Kebaïli, "Large Scale Experimentation Slope Stability of «Soil Tyre» in Mostaganem (Algeria)," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 699–706, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.805.
- [89] M. MEDINE, "Etude expérimentale des bétons légers Incorporant des granulats issus du broyage Des pneus usés," Université Djillali Liabès, 2018.
- [90] E. H. Tan, E. M. M. Zahran, and S. J. Tan, "The optimal use of crumb rubber in hot-mix asphalt by dry process: A laboratory investigation using Marshall mix design," *Transportation Engineering*, vol. 10, p. 100145, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.treng.2022.100145.
- [91] L. N. Mohammad, M. Elseifi, and S. Cooper, "Development of rubberized asphalt binder specification," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 2, no. 1, p. 38, Dec. 2017, doi: 10.1007/s41062-017-0072-9.
- [92] S. H. Baek, H. H. Kim, Y. S. Doh, and K. W. Kim, "Estimation of high-temperature properties of rubberized asphalt using chromatograph," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 13, no. 3, pp. 161–167, May 2009, doi: 10.1007/s12205-009-0161-1.
- [93] Y. Sheng, H. Li, J. Geng, Y. Tian, Z. Li, and R. Xiong, "Production and performance of desulfurized rubber asphalt binder," *International Journal of Pavement Research and Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 262–273, May 2017, doi: 10.1016/j.ijprt.2017.02.002.
- [94] B. Yigezu Tefera, "Evaluation of the Effect of Rubber Modified Bitumen on Asphalt Performance," *American Journal of Civil Engineering*, vol. 6, no. 3, p. 87, 2018, doi: 10.11648/j.ajce.20180603.11.
- [95] N. Kebaïli, A. Zerzour, and F. Belabdelouhab, "Influence of Rubber Fine Powder on the Characteristics of the Bitumens in Algeria," *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 226–233, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.583.
- [96] G. Liu, Y. Liang, H. Chen, H. Wang, J. Komacka, and X. Gu, "Influence of the chemical composition and the morphology of crumb rubbers on the rheological and self-healing properties of bitumen," *Constr Build Mater*, vol. 210, pp. 555–563, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.205.
- [97] Z. Yao, J. Zhang, F. Gao, S. Liu, and T. Yu, "Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen," *Constr Build Mater*, vol. 170, pp. 217–224, May 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.080.

- [98] L. SHENGJIE, "Influence of Different Factors of Crumb Rubber on the Properties of Crumb Rubber Modified Asphalt," *Asian Journal of Chemistry*, vol. 25, no. 3, pp. 1583–1586, 2013, doi: 10.14233/ajchem.2013.13254.
- [99] H. Wang, X. Liu, P. Apostolidis, M. van de Ven, S. Erkens, and A. Skarpas, "Effect of laboratory aging on chemistry and rheology of crumb rubber modified bitumen," *Mater Struct*, vol. 53, no. 2, p. 26, Apr. 2020, doi: 10.1617/s11527-020-1451-9.
- [100] M. Bilema, M. Aman, N. Hassan, M. Haloul, and S. Modibbo, "Influence of crumb rubber size particles on moisture damage and strength of the hot mix asphalt," *Mater Today Proc*, vol. 42, pp. 2387–2391, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.423.
- [101] C. K. Akisetty, S.-J. Lee, and S. N. Amirkhanian, "High temperature properties of rubberized binders containing warm asphalt additives," *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 1, pp. 565–573, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.010.
- [102] I. Pérez and A. R. Pasandín, "Moisture damage resistance of hot-mix asphalt made with recycled concrete aggregates and crumb rubber," *J Clean Prod*, vol. 165, pp. 405–414, Nov. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.07.140.
- [103] M. Swaney, D. Xuan Lu, D. Sun, and F. Giustozzi, "Production and use of crumb rubber for bitumen modiom end-of-life passenger car tyres in comparison with truck tyres: a comprehensive study on bitumen and asphalt performance," *Mater Struct*, Aug. 2024.
- [104] A. H. Al-Rubaie and H. H. Joni, "Assessment the performance of asphalt mixtures modified with waste tire rubber at high temperatures," *J Phys Conf Ser*, vol. 1895, no. 1, p. 012026, May 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1895/1/012026.
- [105] T. T. Khaled, G. M. Aboud, and R. Kh. S. Al-Hamd, "Study the effect of adding crumb rubber on the performance of hot mix asphalt," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 737, p. 012129, Mar. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/737/1/012129.
- [106] H. A. A. Gibreil and C. P. Feng, "Effects of high-density polyethylene and crumb rubber powder as modifiers on properties of hot mix asphalt," *Constr Build Mater*, vol. 142, pp. 101–108, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.062.
- [107] A. S. Eltwati, A. Hossein, and D. Nasr, "Effect of Crumb Rubber Particles on the Properties of Asphalt," in *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 59, 2020, pp. 43–52. doi: 10.1007/978-981-15-1193-6_5.
- [108] AFNOR, *Dimensionnement des chaussées routières*. France, 1992, p. 8.
- [109] I.-B. (dir.) Dominique, *Les enrobés bitumineux. Tome 2*. Paris: USIRF, 2003.
- [110] I. M. Arsenie, "ÉTUDE ET MODÉLISATION DES RENFORCEMENTS DE CHAUSSÉES À L'AIDE DE GRILLES EN FIBRE DE VERRE SOUS SOLlicitations DE FATIGUE," UNIVERSITÉ DE STRASBOURG, 2013.
- [111] J. NAVARO, "Cinétique de mélange des enrobés recyclés et influence sur les performances mécaniques," Doctorat ParisTech T, 2011.
- [112] SETRA-LCPC, *Conception et dimensionnement des structures de chaussée*. France, 1994, p. 260.
- [113] SETRA-LCPC, *Catalogue des structures types de chaussées neuves*. France, 1998.
- [114] A. F. Des Essarts, "Etude du comportement des enrobés bitumineux aux eratures de mise en œuvre," Université de Paris, 2017.

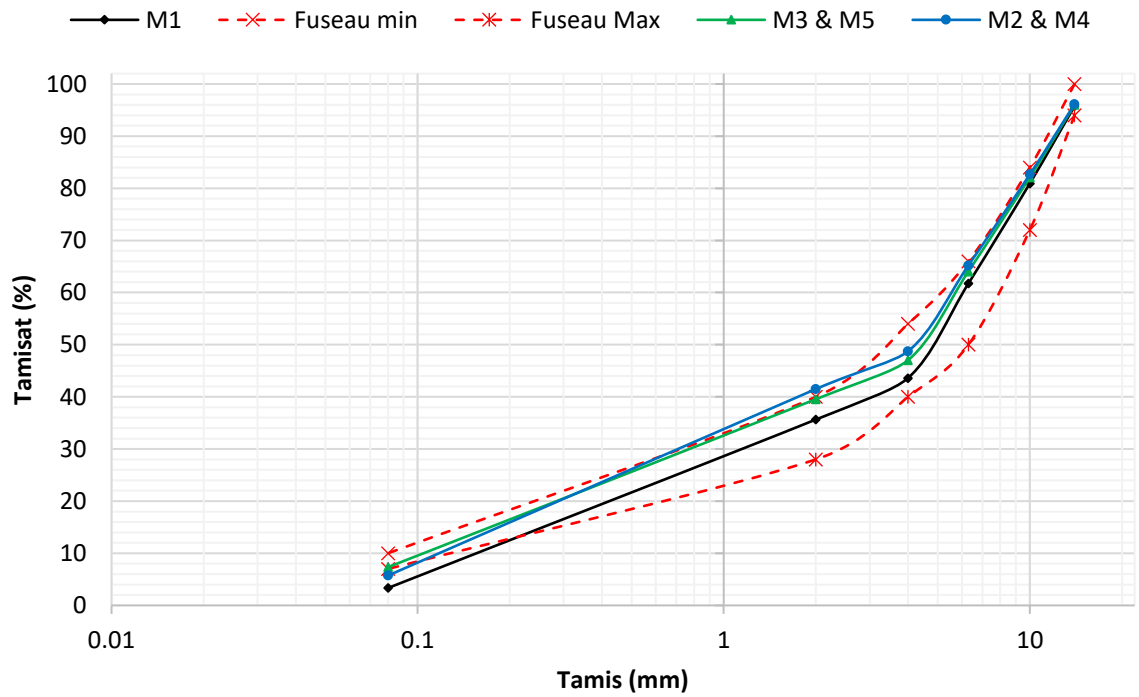
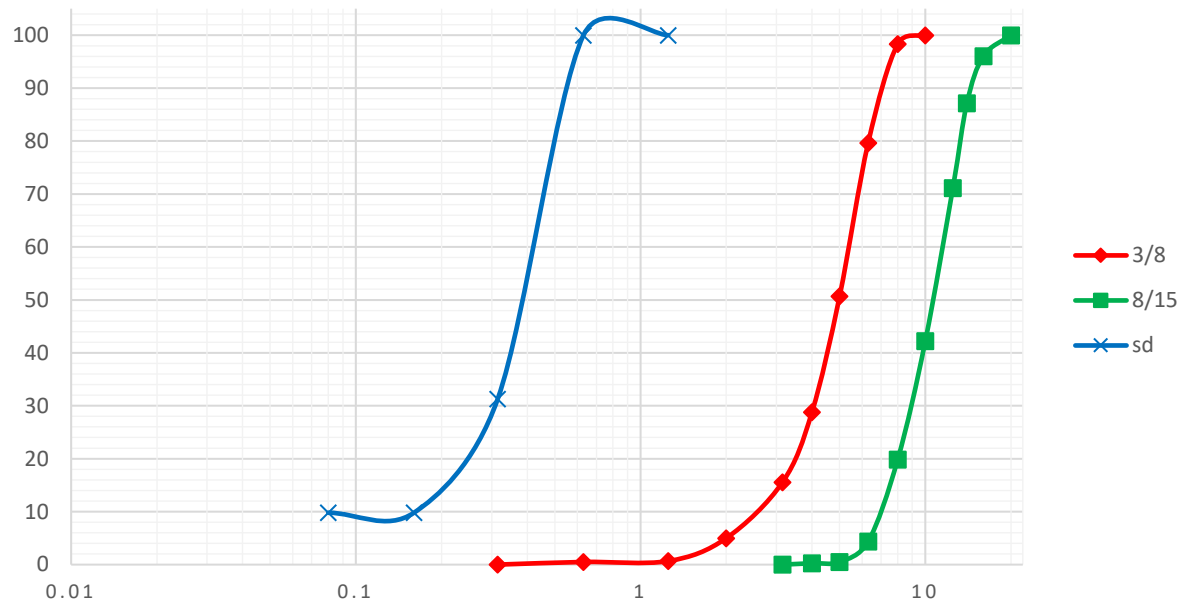
- [115] Y. LEFEUVRE, "Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux Etude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus Expérimentation - Modélisation," ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES, 2001. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [116] L. SADOUDI, "Etude des performances d'un enrobé modifié par polymère Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)," Ecole Nationale Polytechnique, 2020. [Online]. Available: www.enp.edu.dz
- [117] D.-T. NGUYEN, "Prédiction des déformation permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses," Ecole Nationale des Ponts et Chaussees.
- [118] J.-C. Carret, H. Di Benedetto, and C. Sauzeat, "Multi Modal Dynamic Linear Viscoelastic Back Analysis for Asphalt Mixes," *J Nondestr Eval*, vol. 37, no. 2, Jun. 2018, doi: 10.1007/s10921-018-0491-3.
- [119] M. Lambert, "Comportement mécanique évolutif des enrobés bitumineux à l'émulsion : étude expérimentale et modélisation," Université de Limoges, 2018.
- [120] A. Pedraza, "Propriétés thermomécaniques d'enrobés multi-recyclés," Ecole Nationale de Travaux Publics de l'Etat, 2018.
- [121] N. H. PHAM, "Étude thermomécanique avancée de différents types d'enrobés recyclés tièdes avec additifs," Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat , 2014. [Online]. Available: <https://theses.hal.science/tel-02132411>
- [122] C. SETTARI, "CARACTERISATION ET COMPORTEMENT DU BETON A BASE DE DECHETS DE ROUTES (BETON BITUMINEUX)," Université Yahia Farès de Médéa, 2016.
- [123] D. Zhang, X. Huang, Y. Zhao, and S. Zhang, "Rubberized asphalt mixture design using a theoretical model," *Constr Build Mater*, vol. 67, pp. 265–269, Sep. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.011.
- [124] H. Di Benedetto, T. Gabet, J. Grenfell, D. Perraton, C. Sauzéat, and D. Bodin, "Mechanical testing of bituminous mixtures," in *RILEM State-of-the-Art Reports*, vol. 9, Springer Netherlands, 2013, pp. 143–256. doi: 10.1007/978-94-007-5104-0_4.
- [125] H. Di Benedetto, *Mechanical Tests for Bituminous Mixes - Characterization, Design and Quality Control*. CRC Press, 1990. doi: 10.1201/9781482267518.
- [126] H. Di Benedetto, M. N. Partl, L. Francken, and C. De La Roche Saint André, "Stiffness testing for bituminous mixtures," *Mater Struct*, vol. 34, pp. 66–70, 2001.
- [127] M. BOUCHERBA, "VALORISATION DES DECHETS PLASTIQUES DANS LES ENROBÉS BITUMINEUX," Université Kasdi Merbah Ouargla, 2021.
- [128] M. BEKHITI, "Contribution théorique et expérimentale à l'étude de stabilisation des argiles gonflantes par ajout de granulats de caoutchouc des pneus usagés.," Université Djilali Liabès, Sidi Bel Abbès, 2019.
- [129] J. Arrambide and M. Duriez, *Liants routiers et enrobés: matériaux de protection, plâtre, agglomérés, bois*. Dunod, 1959.
- [130] Z. Ibrahim Qasim, A. Saadi Abbas, and Z. Ibrahim Qasim, "Effect of Filler Content on Properties of Asphaltic Mixtures for Marshall and Superpave Gyrotory Compactor," *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, vol. 20, no. 1, pp. 183–193, 2017.

- [131] S. S. Upoma, M. M. Islam, and Q. S. Hossain, "Assessing the effect of various categories of filler of high content on Hot Mix Asphalt," in *7th International Conference on Civil Engineering for Sustainable Development (ICCESD 2024)*, Atlantis Press, 2024, pp. 203–215. doi: 10.2991/978-94-6463-478-5_16.
- [132] A. Rahman, S. Ashik Ali, S. Kumar Adhikary, and Q. Sazzad Hossain, "EFFECT OF FILLERS ON BITUMINOUS PAVING MIXES: AN EXPERIMENTAL STUDY," *Journal of Engineering Science*, vol. 03, no. 1, p. 2012, 2012.
- [133] M. Hossain, M. Rahman, D. Chamberlain, and T. Kasim, "Influence of conductive fillers on the mechanical and thermal performance of stone mastic asphalt (SMA) mixtures," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 22, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e04865.
- [134] N. Khan *et al.*, "Effect of Fine Aggregates and Mineral Fillers on the Permanent Deformation of Hot Mix Asphalt," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 13, Jul. 2023, doi: 10.3390/su151310646.
- [135] I. Bakheit and H. Xiaoming, "Modification of the dry method for mixing crumb rubber modifier with aggregate and asphalt based on the binder mix design," *Constr Build Mater*, vol. 220, pp. 278–284, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.050.
- [136] M. B. Hachani, D. Daas, and N. kebaili, "Etude expérimental d'un béton bitumineux modifié à la poudrette de caoutchouc-Influence du mode de modification," vol. 7, no. 2, pp. 1112–1163, 2014, [Online]. Available: <http://elwahat.univ-ghardaia.dz>
- [137] B. Shirini and R. Imaninasab, "Performance evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures," *Constr Build Mater*, vol. 107, pp. 165–171, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.006.

ANNEXE A :

ETUDE DE FORMULATION

ANALYSE GRANULOMETRIQUE



Tamis	8/15	3/8	SD	Fines	M1	F-	F+
	33%	33%	34%	0%			
20	100,00	100,00	100,00	100	100,00		
16	96,06	100,00	100,00	100	98,70		
14	87,16	100,00	100,00	100	95,76	94	100
12,5	71,15	100,00	100,00	100	90,48		
10	42,21	100,00	100,00	100	80,93	72	84
8	19,86	98,33	100,00	100	73,00		
6,3	4,37	79,67	100,00	100	61,73	50	66
5	0,51	50,67	100,00	100	50,89		
4	0,26	28,83	100,00	100	43,60	40	54
3,15	0,00	15,55	100,00	100	39,13		
2	0,00	5,00	100,00	100	35,65	28	40
1,25	0,00	0,67	100,00	100	34,22		
0,63	0,00	0,50	100,00	100	34,17		
0,315	0,00	0,00	31,30	100	10,64		
0,16	0,00	0,00	9,80	100	3,33		
0,08	0,00	0,00	9,80	100	3,33	7	10

G	0,25	38,27	9,57
S	2,3	51,09	117,50
s	12	7,31	87,72
f	135	3,33	449,82
Σ	6,65	$\sqrt[5]{\Sigma}$	1,46
8/15	2,61	Mv	2,63
3/8	2,62	α	1,01
SD	2,66		

K	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8
T _L %	4,86	5,00	5,15	5,30	5,44	5,59

Tamis	8/15	3/8	SD	Fines	M2 & M4	F-	F+
	30%	30%	38%	2%			
20	100,00	100,00	100,00	100	100,00		
16	96,06	100,00	100,00	100	98,82		
14	87,16	100,00	100,00	100	96,15	94	100
12,5	71,15	100,00	100,00	100	91,34		
10	42,21	100,00	100,00	100	82,66		
8	19,86	98,33	100,00	100	75,46		
6,3	4,37	79,67	100,00	100	65,21		
5	0,51	50,67	100,00	100	55,35		
4	0,26	28,83	100,00	100	48,73		
3,15	0,00	15,55	100,00	100	44,67		
2	0,00	5,00	100,00	100	41,50		
1,25	0,00	0,67	100,00	100	40,20		
0,63	0,00	0,50	100,00	100	40,15		
0,315	0,00	0,00	31,30	100	13,89		
0,16	0,00	0,00	9,80	100	5,72		
0,08	0,00	0,00	9,80	100	5,72	7	10

G	0,25	34,79	8,70
S	2,3	51,32	118,03
s	12	8,17	98,04
f	135	5,72	772,74
Σ	9,98	$\sqrt[5]{\Sigma}$	1,58
8/15	2,61	Mv	2,63
3/8	2,62	α	1,01
SD	2,66		

K	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8
T _L %	5,26	5,42	5,58	5,74	5,90	6,06

Tamis	8/15	3/8	SD	Fines	M3 & M5	F-	F+
	31%	31%	34%	4%			
20	100,00	100,00	100,00	100	100,00		
16	96,06	100,00	100,00	100	98,78		
14	87,16	100,00	100,00	100	96,02	94	100
12,5	71,15	100,00	100,00	100	91,06		
10	42,21	100,00	100,00	100	82,08		
8	19,86	98,33	100,00	100	74,64		
6,3	4,37	79,67	100,00	100	64,05		
5	0,51	50,67	100,00	100	53,87		
4	0,26	28,83	100,00	100	47,02		
3,15	0,00	15,55	100,00	100	42,82		
2	0,00	5,00	100,00	100	39,55		
1,25	0,00	0,67	100,00	100	38,21		
0,63	0,00	0,50	100,00	100	38,16		
0,315	0,00	0,00	31,30	100	14,64		
0,16	0,00	0,00	9,80	100	7,33		
0,08	0,00	0,00	9,80	100	7,33	7	10

G	0,25	35,95	8,99
S	2,3	49,41	113,64
s	12	7,31	87,72
f	135	7,33	989,82
Σ	12,00	$\sqrt[5]{\Sigma}$	1,64
8/15	2,61	Mv	2,63
3/8	2,62	α	1,01
SD	2,66		

K	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7	3,8
T _L %	5,46	5,63	5,80	5,96	6,13	6,29



ANNEXE B :

ESSAI MARSHALL

M1 : 33% 3/8 + 33% 8/15 + 34% SD				
1	Température de l'essai	25°C		
2	Mélange	M11	M12	M13
3	Masse des éprouvette non enrobées dans l'air	1197,4	1196,8	1068,9
4	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'air	1212,6	1215,5	1088,8
5	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'eau	667,3	668,2	598,6
6	Densité relative de paraffine	0,895	0,895	0,895
7	Masse de la paraffine	15,2	18,7	19,9
8	Volume de paraffine en cm3	16,983	20,894	22,235
9	Volume des éprouvette enrobées de paraffine en cm3	545,3	547,3	490,2
10	Volume des éprouvette non enrobées en cm3	528,317	526,406	467,965
11	Densité relative brute du mélange compacté dm	2,266	2,274	2,284
12	Masse volumique du mélange compacté kg/m3	2266,44	2273,53	2284,14
13	Hauteur mm	66	67	60
14	Mva	2,238	2,203	2,197
15	MVR (dmax)	2,441	2,431	2,421
16	Vv %	7,15	6,48	5,67
17	Compacité %	92,85	93,52	94,33
18	Densité moyenne des agrégats da	2,630	2,630	2,630
19	% des vides de l'agrégats VDA %	17,94	17,92	17,77

M2 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 38% SD + 2% fc				
1	Température de l'essai	25°C		
2	Mélange	M21	M22	M23
3	Masse des éprouvette non enrobées dans l'air	1196,3	1190,2	1193,5
4	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'air	1224,1	1221,9	1222
5	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'eau	667,9	665,3	667
6	Densité relative de paraffine	0,895	0,895	0,895
7	Masse de la paraffine	27,8	31,7	28,5
8	Volume de paraffine en cm3	31,061	35,419	31,844
9	Volume des éprouvette enrobées de paraffine en cm3	556,2	556,6	555
10	Volume des éprouvette non enrobées en cm3	525,139	521,181	523,156
11	Densité relative brute du mélange compacté dm	2,278	2,284	2,281
12	Masse volumique du mélange compacté kg/m3	2278,07	2283,66	2281,34
13	Hauteur mm	64	63	63
14	Mva	2,306	2,330	2,337
15	MVR (dmax)	2,387	2,377	2,367
16	Vv %	4,55	3,92	3,61
17	Compacité %	95,45	96,08	96,39
18	Densité moyenne des agrégats da	2,686	2,686	2,686
19	% des vides de l'agrégats VDA %	19,55	19,60	19,93

M3 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 34% SD + 4% fc				
1	Température de l'essai	25°C		
2	Mélange	M31	M32	M33
3	Masse des éprouvette non enrobées dans l'air	1197,6	1185,2	1192,7
4	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'air	1228	1227,1	1227,1
5	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'eau	682,6	674,4	681,5
6	Densité relative de paraffine	0,895	0,895	0,895
7	Masse de la paraffine	30,4	41,9	34,4
8	Volume de paraffine en cm3	33,966	46,816	38,436
9	Volume des éprouvette enrobées de paraffine en cm3	545,4	552,7	545,6
10	Volume des éprouvette non enrobées en cm3	511,434	505,884	507,164
11	Densité relative brute du mélange compacté dm	2,342	2,343	2,352
12	Masse volumique du mélange compacté kg/m3	2341,65	2342,83	2351,70
13	hauteur mm	63	62	62
14	Mva	2,345	2,358	2,373
15	MVR (dmax)	2,421	2,410	2,400
16	Vv %	3,28	2,79	1,99
17	Compacité %	96,72	97,21	98,01
18	Densité moyenne des agrégats da	2,633	2,633	2,633
19	% des vides de l'agrégats VDA %	15,82	16,05	16,00

M4 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 38% SD + 2% fsd				
1	Température de l'essai	25°C		
2	Mélange	M41	M42	M43
3	Masse des éprouvette non enrobées dans l'air	1187,7	1188,5	1189,6
4	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'air	1221,3	1221,8	1122
5	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'eau	662,9	664	678
6	Densité relative de paraffine	0,895	0,895	0,895
7	Masse de la paraffine	33,6	33,3	-67,6
8	Volume de paraffine en cm3	37,542	37,207	-75,531
9	Volume des éprouvette enrobées de paraffine en cm3	558,4	557,8	444
10	Volume des éprouvette non enrobées en cm3	520,858	520,593	519,531
11	Densité relative brute du mélange compacté dm	2,280	2,283	2,290
12	Masse volumique du mélange compacté kg/m3	2280,28	2282,97	2289,76
13	hauteur mm	64	64	64
14	Mva	2,289	2,291	2,293
15	MVR (dmax)	2,471	2,460	2,449
16	Vv %	7,70	7,18	6,50
17	Compacité %	92,30	92,82	93,50
18	Densité moyenne des agrégats da	2,685	2,685	2,685
19	% des vides de l'agrégats VDA %	19,46	19,62	19,62

M5 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 34% SD + 4% fsd				
1	Température de l'essai	25°C		
2	Mélange	M51	M52	M53
3	Masse des éprouvette non enrobées dans l'air	1198	1196,7	1195,7
4	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'air	1223,1	1220,9	1225,5
5	Masse des éprouvette enrobées de paraffine dans l'eau	678,4	677,8	677,2
6	Densité relative de paraffine	0,895	0,895	0,895
7	Masse de la paraffine	25,1	24,2	29,8
8	Volume de paraffine en cm3	28,045	27,039	33,296
9	Volume des éprouvette enrobées de paraffine en cm3	544,7	543,1	548,3
10	Volume des éprouvette non enrobées en cm3	516,655	516,061	515,004
11	Densité relative brute du mélange compacté dm	2,319	2,319	2,322
12	Masse volumique du mélange compacté kg/m3	2318,76	2318,91	2321,73
13	hauteur mm	64	63	63
14	Mva	2,309	2,343	2,341
15	MVR (dmax)	2,421	2,410	2,399
16	Vv %	4,21	3,77	3,23
17	Compacité %	95,79	96,23	96,77
18	Densité moyenne des agrégats da	2,632	2,632	2,632
19	% des vides de l'agrégats VDA %	16,63	16,89	17,06

M1 : 33% 3/8 + 33% 8/15 + 34% SD		
1	Mélange	M11
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	5,00%
3	Nombre de coups de compactage par face	50
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	59,6
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14
10	Eprouvette n°	1 2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	342 340
12	Stabilité mesurée en Kg	731,60 727,27
13	Volume des éprouvette en cm3	535,08 535,08
14	Hauteur des éprouvette en mm	66 66
15	Facteur de correction	0,91 0,91
16	Stabilité corrigée en Kg	665,76 661,82
17	Indice de fluage en mm	3,82 3,7
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	663,79
19	Fluage moyen en mm	3,76
20	Conformité : Stabilité	NON
	Fluage	OUI

M1 : 33% 3/8 + 33% 8/15 + 34% SD			
1	Mélange	M12	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	5,30%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	59,9	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	521	488
12	Stabilité mesurée en Kg	1121,14	1048,45
13	Volume des éprouvette en cm3	543,190	543,190
14	Hauteur des éprouvette en mm	67	67
15	Facteur de correction	0,89	0,89
16	Stabilité corrigée en Kg	997,81	933,12
17	Indice de fluage en mm	3	2,35
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	965,47	
19	Fluage moyen en mm	2,675	
20	Conformité : Stabilité	NON	
	Fluage	OUI	

M1 : 33% 3/8 + 33% 8/15 + 34% SD			
1	Mélange	M13	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	5,59%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	60,4	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	368	340
12	Stabilité mesurée en Kg	787,87	727,27
13	Volume des éprouvette en cm3	526,976	526,976
14	Hauteur des éprouvette en mm	65	65
15	Facteur de correction	0,93	0,93
16	Stabilité corrigée en Kg	732,72	676,36
17	Indice de fluage en mm	2,1	2,4
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	704,54	
19	Fluage moyen en mm	2,25	
20	Conformité : Stabilité	NON	
	Fluage	OUI	

M2 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 38% SD + 2% fc			
1	Mélange	M21	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	5,44%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	59,6	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	415	422
12	Stabilité mesurée en Kg	889,610	904,760
13	Volume des éprouvette en cm3	518,868	518,868
14	Hauteur des éprouvette en mm	64	64
15	Facteur de correction	0,96	0,96
16	Stabilité corrigée en Kg	854,0256	868,5696
17	Indice de fluage en mm	3,9	3,6
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	861,2976	
19	Fluage moyen en mm	3,75	
20	Conformité : Stabilité	NON	
	Fluage	OUI	

M2 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 38% SD + 2% fc			
1	Mélange	M22	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	5,76%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	59,9	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	470	480
12	Stabilité mesurée en Kg	1008,80	1030,83
13	Volume des éprouvette en cm3	510,761	510,761
14	Hauteur des éprouvette en mm	63	63
15	Facteur de correction	1	1
16	Stabilité corrigée en Kg	1008,80	1030,83
17	Indice de fluage en mm	3,5	3,7
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1019,82	
19	Fluage moyen en mm	3,60	
20	Conformité : Stabilité	OUI	
	Fluage	NON	

M2 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 38% SD + 2% fc			
1	Mélange	M23	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	6,08%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	60,4	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	480	456
12	Stabilité mesurée en Kg	1030,83	978,350
13	Volume des éprouvette en cm3	510,761	510,761
14	Hauteur des éprouvette en mm	63	63
15	Facteur de correction	1	1
16	Stabilité corrigée en Kg	1030,83	978,35
17	Indice de fluage en mm	3,75	3,45
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1004,59	
19	Fluage moyen en mm	3,6	
20	Conformité : Stabilité		
	Fluage		

M3 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 34% SD + 4% fc			
1	Mélange	M31	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	5,66%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	59,6	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	516	561
12	Stabilité mesurée en Kg	1110,13	1209,25
13	Volume des éprouvette en cm3	510,761	510,761
14	Hauteur des éprouvette en mm	63	63
15	Facteur de correction	1	1
16	Stabilité corrigée en Kg	1110,13	1209,25
17	Indice de fluage en mm	3,45	2,85
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1159,69	
19	Fluage moyen en mm	3,15	
20	Conformité : Stabilité	OUI	
	Fluage	OUI	

M3 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 34% SD + 4% fc			
1	Mélange	M32	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	6,00%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	59,9	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	450	642
12	Stabilité mesurée en Kg	965,36	1387,66
13	Volume des éprouvette en cm3	502,654	502,654
14	Hauteur des éprouvette en mm	62	62
15	Facteur de correction	1,04	1,04
16	Stabilité corrigée en Kg	1003,97	1443,17
17	Indice de fluage en mm	4,9	5,35
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1223,57	
19	Fluage moyen en mm	5,13	
20	Conformité : Stabilité	OUI	
	Fluage	NON	

M3 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 34% SD + 4% fc			
1	Mélange	M33	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	6,33%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	60,4	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	448	457
12	Stabilité mesurée en Kg	961,03	980,51
13	Volume des éprouvette en cm3	502,654	502,654
14	Hauteur des éprouvette en mm	62	62
15	Facteur de correction	1,04	1,04
16	Stabilité corrigée en Kg	999,47	1019,73
17	Indice de fluage en mm	4,75	3,4
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1009,60	
19	Fluage moyen en mm	4,08	
20	Conformité : Stabilité	OUI	
	Fluage	NON	

M4 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 38% SD + 2% fsd			
1	Mélange	M41	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	5,44%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	59,6	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	523	539
12	Stabilité mesurée en Kg	1125,550	1160,790
13	Volume des éprouvette en cm3	518,868	518,868
14	Hauteur des éprouvette en mm	64	64
15	Facteur de correction	0,96	0,96
16	Stabilité corrigée en Kg	1080,528	1114,3584
17	Indice de fluage en mm	2,3	2,55
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1097,4432	
19	Fluage moyen en mm	2,43	
20	Conformité : Stabilité		
	Fluage		

M4 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 38% SD + 2% fsd			
1	Mélange	M42	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	5,76%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau (60 ± 1°C)	59,9	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	597	610
12	Stabilité mesurée en Kg	1289,26	1317,18
13	Volume des éprouvette en cm3	518,868	518,868
14	Hauteur des éprouvette en mm	64	64
15	Facteur de correction	0,96	0,96
16	Stabilité corrigée en Kg	1237,69	1264,49
17	Indice de fluage en mm	3,2	2,5
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1251,09	
19	Fluage moyen en mm	2,85	
20	Conformité : Stabilité	OUI	
	Fluage	OUI	

M4 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 38% SD + 2% fsd			
1	Mélange	M43	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	6,08%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau ($60 \pm 1^\circ\text{C}$)	60,4	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	486	506
12	Stabilité mesurée en Kg	1044,05	1088,100
13	Volume des éprouvette en cm ³	510,761	510,761
14	Hauteur des éprouvette en mm	63	63
15	Facteur de correction	1	1
16	Stabilité corrigée en Kg	1044,05	1088,1
17	Indice de fluage en mm	3,75	3,9
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1066,075	
19	Fluage moyen en mm	3,83	
20	Conformité : Stabilité		
	Fluage		

M5 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 34% SD + 4% fsd			
1	Mélange	M51	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	5,66%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau ($60 \pm 1^\circ\text{C}$)	59,6	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	555	541
12	Stabilité mesurée en Kg	1196,03	1165,190
13	Volume des éprouvette en cm ³	518,868	518,868
14	Hauteur des éprouvette en mm	64	64
15	Facteur de correction	0,96	0,96
16	Stabilité corrigée en Kg	1148,1888	1118,5824
17	Indice de fluage en mm	1,8	2,2
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1133,3856	
19	Fluage moyen en mm	2	
20	Conformité : Stabilité		
	Fluage		

M5 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 34% SD + 4% fsd			
1	Mélange	M52	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	6,00%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau ($60 \pm 1^\circ\text{C}$)	59,9	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	605	615
12	Stabilité mesurée en Kg	1306,16	1328,19
13	Volume des éprouvette en cm ³	510,761	510,761
14	Hauteur des éprouvette en mm	63	63
15	Facteur de correction	1	1
16	Stabilité corrigée en Kg	1306,16	1328,19
17	Indice de fluage en mm	2,4	2,5
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1317,18	
19	Fluage moyen en mm	2,45	
20	Conformité : Stabilité	OUI	
	Fluage	OUI	

M5 : 31% 3/8 + 31% 8/15 + 34% SD + 4% fsd			
1	Mélange	M53	
2	Teneur en bitume en % de la masse de mélange	6,33%	
3	Nombre de coups de compactage par face	50	
4	Température du bain d'eau ($60 \pm 1^\circ\text{C}$)	60,4	
5	Durée d'immersion des éprouvettes dans le bain d'eau (30 à 40min)	30	
6	Stabilité minimale exigée en Kg	≥ 1050	
7	Fluage exigé en mm.	≥ 4	
8	Temps écoulé depuis l'enlèvement de l'éprouvette du bain jusqu'à la rupture (max 30s)	20s	
9	Facteur de calibrage en Kg pour chaque unité	2,14	
10	Eprouvette n°	1	2
11	Lecture du cadre micrométrique du dynamomètre	584	567
12	Stabilité mesurée en Kg	1259,91	1222,460
13	Volume des éprouvette en cm ³	510,761	510,761
14	Hauteur des éprouvette en mm	63	63
15	Facteur de correction	1	1
16	Stabilité corrigée en Kg	1259,91	1222,46
17	Indice de fluage en mm	3,85	3,15
18	Stabilité moyenne corrigé en Kg	1241,185	
19	Fluage moyen en mm	3,5	
20	Conformité : Stabilité		
	Fluage		



ANNEXE C :

ESSAI PCG

COMPOSITION (M1)		(%)
Fraction	3/8	33
Fraction	8/15	33
Fraction	SD	34

Liant	40/50	5.30
-------	-------	------

Température compactage	160
Condition d'essai	
Angle d'inclinaison	0,82
Vitesse de rotation	30
Pression	600 kPa

Information de l'essai				
MVR (kg/m ³) (1)	Hmin (mm)	Diamètre de moule (mm)	Masse d'échantillon (kg)	Facteur K
2550	120	150	5,405	

Eprouvette N°	1	2	3	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	CV
Température	155	155	155				
Girations	Hauteur (mm)			Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	CV
5	142,09	146,96					
10	140,23	144,34					
15	139,04	142,82					
20	138,24	141,72					
25	137,67	140,90					
30	137,17	140,23					
40	136,44	139,20					
50	135,94	138,54					
60	135,54	138,04					
80	134,85	137,40					
100	134,38	137,01					
120	134,05	136,81		135,4	2259,5	11,4	1,44
150	133,58	136,74		135,2	2263,9	11,2	1,65
200	133,15	136,47		134,8	2269,8	11,0	1,74

COMPOSITION (M2)		(%)
Fraction	3/8	31
Fraction	8/15	31
Fraction	SD	38

Filler	FC	2
Liant	40/50	5.76

Condition d'essai	
Angle d'inclinaison	0,82
Vitesse de rotation	30
Pression	600 kPa

Information de l'essai				
MVR (kg/m ³) (1)	Hmin (mm)	Diamètre de moule (mm)	Masse d'échantillon (kg)	Facteur K
2546	120	150	5,396	

Eprouvette N°	1	2	3	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m^3)	Indice de vide (%)	CV
Température	155	155	155				
Girations	Hauteur (mm)						
5	140,10	139,57		139,8	2184,9	14,2	0,27
10	138,17	137,77		138,0	2214,4	13,0	0,21
15	137,04	136,61		136,8	2232,9	12,3	0,23
20	136,27	135,84		136,1	2245,5	11,8	0,22
25	135,61	135,21		135,4	2256,2	11,4	0,21
30	135,11	134,78		134,9	2264,1	11,1	0,17
40	134,38	134,01		134,2	2276,7	10,6	0,19
50	133,75	133,48		133,6	2286,5	10,2	0,14
60	133,32	133,05		133,2	2294,0	9,9	0,14
80	132,55	132,39		132,5	2306,3	9,4	0,09
100	132,02	131,86		131,9	2315,6	9,1	0,09
120	131,59	131,46		131,5	2322,9	8,8	0,07
150	131,06	131,06		131,1	2331,2	8,4	0,00
200	130,33	130,50		130,4	2342,7	8,0	0,09

COMPOSITION (M3)		(%)
Fraction	3/8	31
Fraction	8/15	31
Fraction	SD	34

Filler	FC	4
Liant	40/50	6

Condition d'essai	
Angle d'inclinaison	0,82
Vitesse de rotation	30
Pression	600 kPa

Information de l'essai				
MVR (kg/m ³) (1)	Hmin (mm)	Diamètre de moule (mm)	Masse d'échantillon (kg)	Facteur K
2547	120	150	5,398	

Eprouvette N°	1	2	3	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	CV
Température	155	155	155				
Girations	Hauteur (mm)			Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	CV
5	138,44	137,11					
10	136,21	135,08					
15	134,88	133,88					
20	133,95	133,05					
25	133,22	132,45					
30	132,72	131,92					
40	131,79	131,20					
50	131,23	130,66					
60	130,66	130,17					
80	129,90	129,47					
100	129,34	128,98					
120	128,84	128,48		128,7	2375,6	6,7	0,20
150	128,28	127,99		128,1	2385,3	6,3	0,16
200	127,56	127,19		127,4	2399,5	5,8	0,20

COMPOSITION (M4)		(%)
Fraction	3/8	31
Fraction	8/15	31
Fraction	SD	38

Filler	FC	2
Liant	40/50	5.76

Condition d'essai	
Angle d'inclinaison	0,82
Vitesse de rotation	30
Pression	600 kPa

Information de l'essai				
MVR (kg/m ³) (1)	Hmin (mm)	Diamètre de moule (mm)	Masse d'échantillon (kg)	Facteur K
2547	120	150	5,398	

Eprouvette N°	1	2	3	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	CV
Température	155	155	155				
Girations	Hauteur (mm)			Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	CV
5	139,98	140,65					
10	137,86	138,66					
15	136,60	137,50					
20	135,80	136,70					
25	135,14	136,14					
30	134,64	135,63					
40	133,88	134,90					
50	133,28	134,41					
60	132,81	133,94					
80	132,18	133,31					
100	131,68	132,94					
120	131,35	132,51		131,9	2316,7	9,0	0,62
150	130,95	132,15		131,5	2323,4	8,8	0,64
200	130,80	131,66		131,2	2329,0	8,6	0,46

COMPOSITION (M5)		(%)
Fraction	3/8	31
Fraction	8/15	31
Fraction	SD	34

Filler	FSD	4
Liant	40/50	6

Condition d'essai	
Angle d'inclinaison	0,82
Vitesse de rotation	30
Pression	600 kPa

Information de l'essai				
MVR (kg/m ³) (1)	Hmin (mm)	Diamètre de moule (mm)	Masse d'échantillon (kg)	Facteur K
2547	120	150	5,398	

Eprouvette N°	1	2	3	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	CV
Température	155	155	155				
Girations	Hauteur (mm)			Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	CV
5	139,10	139,33					
10	136,71	137,37					
15	135,28	136,17					
20	134,25	135,25					
25	133,55	134,55					
30	132,99	134,01					
40	132,12	133,15					
50	131,42	132,49					
60	130,86	131,89					
80	129,93	130,96					
100	129,24	130,30					
120	128,65	129,77		129,2	2365,5	7,1	0,62
150	128,22	129,04		128,6	2376,1	6,7	0,45
200	127,89	128,05		128,0	2388,4	6,2	0,09

Girations	M1 (0% fines)			M2 (2%FC)			M3 (4%FC)		
	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)
5	144,52	2117,3	16,97	139,83	2184,92	14,18	137,77	2218,46	12,9
10	142,29	2150,58	15,66	137,97	2214,39	13,02	135,64	2253,28	11,53
15	140,93	2171,33	14,85	136,82	2232,94	12,3	134,38	2274,43	10,7
20	139,98	2186,02	14,27	136,06	2245,52	11,8	133,5	2289,43	10,11
25	139,28	2196,97	13,84	135,41	2256,23	11,38	132,84	2300,9	9,66
30	138,7	2206,18	13,48	134,94	2264,06	11,07	132,32	2309,82	9,31
40	137,82	2220,28	12,93	134,2	2276,67	10,58	131,49	2324,4	8,74
50	137,24	2229,66	12,56	133,62	2286,53	10,19	130,94	2334,12	8,36
60	136,79	2237,02	12,27	133,18	2293,97	9,9	130,41	2343,6	7,99
80	136,13	2247,93	11,85	132,47	2306,33	9,41	129,69	2356,77	7,47
100	135,69	2255,11	11,56	131,94	2315,58	9,05	129,16	2366,39	7,09
120	135,43	2259,53	11,39	131,52	2322,91	8,76	128,66	2375,56	6,73
150	135,16	2263,95	11,22	131,06	2331,16	8,44	128,13	2385,32	6,35
200	134,81	2269,82	10,99	130,41	2342,69	7,99	127,38	2399,52	5,79

Girations	M1 (0% fines)			M4 (2%SDB)			M5 (4%SDB)		
	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)	Hauteur moyenne (mm)	Masse volumique (kg/m ³)	Indice de vide (%)
5	144,52	2117,3	16,97	140,3	2178,2	14,5	139,22	2195,42	13,8
10	142,29	2150,58	15,66	138,3	2210,7	13,2	137,04	2230,31	12,43
15	140,93	2171,33	14,85	137	2230,2	12,4	135,73	2251,88	11,59
20	139,98	2186,02	14,27	136,3	2243,2	11,9	134,75	2268,26	10,94
25	139,28	2196,97	13,84	135,6	2253,4	11,5	134,05	2280,08	10,48
30	138,7	2206,18	13,48	135,1	2261,7	11,2	133,5	2289,44	10,11
40	137,82	2220,28	12,93	134,4	2274,3	10,7	132,64	2304,35	9,53
50	137,24	2229,66	12,56	133,8	2283,6	10,3	131,96	2316,24	9,06
60	136,79	2237,02	12,27	133,4	2291,6	10	131,38	2326,43	8,66
80	136,13	2247,93	11,85	132,7	2302,5	9,6	130,45	2343,02	8,01
100	135,69	2255,11	11,56	132,3	2310	9,3	129,77	2355,28	7,53
120	135,43	2259,53	11,39	131,9	2316,7	9	129,21	2365,49	7,13
150	135,16	2263,95	11,22	131,5	2323,4	8,8	128,63	2376,13	6,71
200	134,81	2269,82	10,99	131,2	2329	8,6	127,97	2388,4	6,23



ANNEXE D :

ESSAI DURIEZ

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI SENSIBILITE A L'EAU
DURIEZ SUR MÉLANGES HYDROCARBONÉS
NA 5226 | NF P 98 – 251 – 1

Structure : Unité Ghardaia

N° Dossier interne : DRML-DR-2022

Type de Liant : M 01

Presse DURIEZ N° Inv : L.069.15.S.006

ETUVE N° Inv : L.039.15.S.008

Lieu de travail : S^{ce} Hydrocarbones

Date : 24/07/2022

Opérateur : Bellaouar / Boubtina

BALANCE N° Inv : L.022.06.S.002

Enciente N° Inv : L.144.15.S.001

Rapport d'imbibition à J+8	Résistance à la compression à l'air	Rapport d'immersion
$\omega_{(f+8)}$: 0,04	R : 78,53	r/R : 0,809

COMPOSITION		%
Fraction		
Fraction		
Fraction		
Fraction		
Additif		
Filler		
Liant		

Type de malaxeur	Date	Heure
Température de référence du liant	/	
Milieu d'immersion	EAU + AIR	
Température de conservation	18°	
Date de confection de l'enrobé	17/07/2022	
Date de confection des éprouvettes	17/07/2022	
Heure début de compactage	10h00	
Date et Heure d'immersion	18/07/2022	09h00
Date et Heure d'écrasement	24/07/2022	09h00

I – RAPPORT D'IMBIBITION DES EPROUVETTES

N° Eprouvettes N°	01	02	03	04	05
I/ Poids Eprouvettes Sec					
Poids humide					
J+03	$\omega_{(j+03)} =$				
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition moyenne					
Poids humide					
J+05	$\omega_{(j+05)} =$				
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition moyenne					
Poids humide					
J+08	$\omega_{(j+08)} =$				
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition moyenne					

II – ECRASEMENT & RESISTANCES

N° Eprouvettes	EAU					AIR				
Poids Eprouvettes	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05
Moyenne des hauteurs (H)		1044,00	1043,00	1043,00			1000,00	1000,00	1000,00	
Moyenne des diamètres des éprouvettes (D)		94,00					94,00			
Volume des éprouvettes : (Jl D ² . H/4)		80,00					80,00			
Masse volumique apparente des éprouvettes des par Mesure géométrique (méthode D de NA 5238)		472,26	472,26	472,26			472,26	472,26	472,26	
Masse volumique apparente des éprouvettes selon la norme NA 5238		2,21	2,21	2,21			2,12	2,12	2,12	
Charge totale « F »	Méthode :					Valeur moyenne :				
Résistance à la Compression	Kn					2,16				
Résistance à la Compression Moyenne	Bars					0,809				
Tenue à l'eau / Rapport d'immersion	r					R =				
	r/R =									

L'Opérateur

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI SENSIBILITE A L'EAU DURIEZ SUR MELANGES HYDROCARBONÉS NA 5226 | NF P 98 – 251 – 1

Structure : Unité Ghardaia

N° Dossier interne : **DRML-DR-2022**

Type de Liant : **M 02**

Presse DURIEZ N° Inv : L069.15.S.006

ETUVE N° Inv : L039.15.S.008

Lieu de travail : S^{ce} Hydrocarbones

Date : 24/07/2022

Opérateur : Bellaouar / Boubtina

BAI,ANCE N° Inv : L022.06.S.002

Enciente N° Inv : L144.15.S.001

Rapport d'imbibition à J+8

$\omega_{(J+8)}$: 0,03

Résistance à la compression à l'air

R : 80,09

Rapport d'immersion

r/R : 0,885

COMPOSITION		%
Fraction		
Fraction		
Fraction		
Fraction		
Additif		
Filler		
Liant		

Type de malaxeur	Date	Heure
Température de référence du liant	/	
Milieu d'immersion	EAU + AIR	
Température de conservation	18°	
Date de confection de l'endrobé	17/07/2022	
Date de confection des éprouvettes	17/07/2022	
Heure début de compactage	10h00	
Date et Heure d'immersion	18/07/2022	09h00
Date et Heure d'écrasement	24/07/2022	09h00

I - RAPPORT D'IMBIBITION DES EPROUVETTES

N° Eprouvettes N°	01	02	03	04	05
1/ Poids Eprouvettes Sec					
Poids humide					
$\frac{2-i}{1} \times 100$	$\omega_{(i+03)} =$				
Rapport d'imbibition					
Poids humide					
$\frac{2-i}{1} \times 100$	$\omega_{(i+05)} =$				
Rapport d'imbibition					
Poids humide					
$\frac{2-i}{1} \times 100$	$\omega_{(i+08)} =$				
Rapport d'imbibition					
Poids humide					
$\frac{2-i}{1} \times 100$	$\omega_{(i+08)} =$				
Rapport d'imbibition moyenne					

II - ECRASEMENT & RESISTANCES

N° Eprouvettes	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05
Poids Eprouvettes										
Moyenne des hauteurs (H)	93,00					93,00				
Moyenne des diamètres des éprouvettes (D)	80,00					80,00				
Volume des éprouvettes : $(\frac{1}{4} \pi D^2 \cdot H/4)$	467,23					467,23				
Masse volumique apparente des éprouvettes des	2,20					2,14				
par Mesure géométrique										
(méthode D de NA 5238)										
Masse volumique apparente des éprouvettes selon la										
norme NA 5238										
Charge totale « F »	33,72					40,11				
Résistance à la Compression	68,46					81,43				
Résistance à la Compression Moyenne	70,90					79,30				
Tenue à l'eau / Rapport d'immersion	r					0,885				
	r/R =					2,17				

L'Opérateur

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI SENSIBILITE A L'EAU DURIEZ SUR MÉLANGES HYDROCARBONÉS NA 5226 | NF P 98 – 251 – 1

Structure : Unité Ghardaia

N° Dossier interne : DRML-DR-2022

Type de Liant :

M 03

Presse DURIEZ N°.Inv : L.069.15.S.006

ETUVE N°.Inv : L.039.15.S.008

Lieu de travail : S^{ce} Hydrocarbones

Date : 24/07/2022

Opérateur : Bellaouar / Boubtima

BALANCE N°.Inv : L.022.06.S.002

Enciente N°.Inv : L.144.15.S.001

Rapport d'imbibition à J+8	Résistance à la compression à l'air	Rapport d'immersion
$\omega_{(j+8)}$: 0,03	R : 88,15	r/R : 0,922

COMPOSITION	%
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	

Type de malaxeur	Date	Heure
Température de référence du liant	/	
Milieu d'immersion	EAU + AIR	
Température de conservation	18°	
Date de confection de l'entrobé	17/07/2022	
Date de confection des éprouvettes	17/07/2022	
Heure début de compactage	10h00	
Date et Heure d'immersion	18/07/2022	09h00
Date et Heure d'écrasement	24/07/2022	09h00

I - RAPPORT D'IMBIBITION DES EPROUVETTES

N° Eprouvettes N°	01	02	03	04	05
1/ Poids Eprouvettes Sec					
Poids humide					
2					
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition					
J+03					
2					
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition					
J+05					
2					
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition					
J+08					
2					
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition					
Rapport d'imbibition moyenne					

II - ECRASEMENT & RESISTANCES

II - ECRASEMENT & RESISTANCES											AIR										
EAU																					
											01	02	03	04	05	01	02	03	04	05	
N° Epreuves											01	02	03	04	05						
Poids Epreuves												1026,00	1026,00	1026,00			1000,00	1000,00	1000,00	1000,00	
											93,00					93,00					
Moyenne des hauteurs	(H)										80,00					80,00					
Moyenne des diamètres des éprouvettes (D)	(mm)																				
Volume des éprouvettes : (J) D² . H/4	(cm³)										467,23					467,23					
											2,20					2,14					
Masse volumique apparente des éprouvettes des par Mesure géométrique (méthode D de NA 5238)	(g/cm³)										2,17					2,18					
Masse volumique apparente des éprouvettes selon la norme NA 5238																					
Charge totale « F »	Kn										39,46					42,85					
											40,39					43,78					
Charge totale à la Compression	Bars										80,11					88,88					
											82,00					88,58					
Résistance à la Compression	Bars										81,30					88,15					
Résistance à la Compression Moyenne	r																				
Tenue à l'eau / Rapport d'immersion	/										r/R =										

0,922

Visa du Responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

ESSAI SENSIBILITE A L'EAU DURIEZ SUR MÉLANGES HYDROCARBONÉS NA 5226 | NF P 98 – 251 – 1

Structure : Unité Ghardaia

N° Dossier interne : DRML-DR-2022

M 04

Type de Liant :

Presse DURIEZ N° Inv : L.069.15.S.006

ETUVE N° Inv : L039.15.S.008

Lieu de travail : S^{ce} Hydrocarbones

Date : 24/07/2022

Opérateur : Bellaouar / Boubtina

BALANCE N° Inv : L.022.06.S.002

Enciente N° Inv : L.144.15.S.001

Rapport d'imbibition à J+8	Résistance à la compression à l'air	Rapport d'immersion
$\omega_{(j+8)}$: 0,02	R : 118,56	r/R : 0,950

COMPOSITION	%
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	

Type de malaxeur	Date	Heure
Température de référence du liant	/	
Milieu d'immersion	EAU + AIR	
Température de conservation	18°	
Date de confection de l'entrobé	17/07/2022	
Date de confection des éprouvettes	17/07/2022	
Heure début de compactage	10h00	
Heure début d'immersion	18/07/2022	09h00
Date et Heure d'écrasement	24/07/2022	09h00

I - RAPPORT D'IMBIBITION DES EPROUVETTES

N° Eprouvettes N°	01	02	03	04	05
I/ Poids Eprouvettes Sec					
Poids humide					
2					
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition moyenne	$\omega_{(j+03)} =$				
J+03					
2					
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition moyenne	$\omega_{(j+05)} =$				
J+05					
2					
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition moyenne	$\omega_{(j+08)} =$				
J+08					
2					
$\frac{2-1}{1} \times 100$					
Rapport d'imbibition moyenne					

II - ECRASEMENT & RESISTANCES

N° Eprouvettes	01	02	03	04	05	01	02	03	04	05
Poids Eprouvettes										
Moyenne des hauteurs (H)										
Moyenne des diamètres des éprouvettes (D)										
Volume des éprouvettes : (J) D ² . H/4										
Masse volumique apparente des éprouvettes des par Mesure géométrique (méthode D de NA 5238)										
Masse volumique apparente des éprouvettes selon la norme NA 5238										
Charge totale « F »										
Résistance à la Compression										
Résistance à la Compression Moyenne										
Tenue à l'eau / Rapport d'immersion										

L'Opérateur

Visa du Responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

**ESSAI SENSIBILITE A L'EAU
DURIEZ SUR MELANGES HYDROCARBONÉS
NA 5226 | NF P 98 – 251 – 1**

Structure : Unité Chardaia

N° Dossier interne : **DRML-DR-2022**

M 05

Type de Liant :

Presse DURIEZ N° Inv : L069.15.S.006

ETUVE N° Inv : L039.15.S.008

Lieu de travail : S^{ee} Hydrocarbones

Date : 24/07/2022

Opérateur : Bellaouar / Boubouma

BALANCE N° Inv : L022.06.S.002

Enciente N° Inv : L144.15.S.001

Rapport d'imbibition à J+8	Résistance à la compression à l'air	Rapport d'immersion
$\omega_{(f+8)}$: 0,02	R : 107,09	r/R : 0,933

COMPOSITION		%
Fraction		
Fraction		
Fraction		
Fraction		
Additif		
Filler		
Liant		

	Date	Heure
Type de malaxeur	/	
Température de référence du liant	/	
Milieu d'immersion	EAU + AIR	
Température de conservation	18°	
Date de confection de l'endrobé	17/07/2022	
Date de confection des éprouvettes	17/07/2022	
Date de début de compactage	10h00	
Heure début de compactage		09h00
Date et Heure d'immersion	18/07/2022	
Date et Heure d'écrasement	24/07/2022	09h00

I - RAPPORT D'IMBIBITION DES EPROUVETTES

N° Eprouvettes N°		01	02	03	04	05
I/ Poids Eprouvettes Sec						
J+03	Poids humide					
	$\frac{2-1}{1} \times 100$	$\omega_{(j+03)} =$				
	Rapport d'imbibition moyenne					
	Poids humide					
J+05	$\frac{2-1}{1} \times 100$	$\omega_{(j+05)} =$				
	Rapport d'imbibition moyenne					
	Poids humide					
	$\frac{2-1}{1} \times 100$					
J+08	Rapport d'imbibition moyenne	$\omega_{(j+08)} =$				
	Poids humide					
	$\frac{2-1}{1} \times 100$					
	Rapport d'imbibition moyenne					

II - ECRASEMENT & RESISTANCES

		EAU					AIR				
N° Eprouvettes		01	02	03	04	05	01	02	03	04	05
Poids Eprouvettes			1024,00	1026,00	1025,00			1000,00	1000,00	1000,00	
Moyenne des hauteurs (H)			92,00					92,00			
Moyenne des diamètres des éprouvettes (D)			80,00					80,00			
Volume des éprouvettes : ($\pi D^2 \cdot H/4$)			462,21	462,21	462,21			462,21	462,21	462,21	
Masse volumique apparente des éprouvettes des par Mesure géométrique			2,22	2,22	2,22			2,16	2,16	2,16	
Masse volumique apparente des éprouvettes selon la (méthode D de NA 5238)			2,19					2,19			
Masse volumique apparente des éprouvettes selon la norme NA 5238											
Charge totale « F »			48,52	49,39	49,79			52,63	54,43	51,18	
Résistance à la Compression			98,51	100,27	101,09			106,85	110,51	103,91	
Résistance à la Compression Moyenne			99,96					107,09			
Tenue à l'eau / Rapport d'immersion			r					R = 0,933			
			r/R =								

L'Opérateur

ANNEXE E :

ESSAI L'ORNIERAGE



مختبر الأشغال العامة في جنوب البلاد

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD
SPA AU CAPITALE DE :303.000.000 DA

Zone d'activité -Bouhraoua -Ghardaïa ☎ +213 (0) 770 27 37 32 / +213 (0) 29 25 27 38 / +213 (0) 29 25 27 36

+213 (0) 29 25 27 44 ✉ BP 332 - 47000 Ghardaïa 📧 Contact@ltps.dz 🌐 www.ltps.dz

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI D'ORNIERAGE

Dispositif de grandes dimension

NF EN 12697 - 22 (2020)

PV N° :/ORN/ 20... version (*) :

Structure	DT				Balance N°	L21.03.06	
N° dossier interne	DRM - DR - 2022				Etuve N°	L039. 17.S.001+002	
Date de la demande d'essai	/				Ornièreur N°	L127.17.S.001	
Description et état de l'échantillon (**):	Granulats + Liant	Granulats	Mélange	Carottage	Autre (Préciser)	Compacteur N°	de LCTP
			X			Lieu de travail	PBS

Méthode de production :

Laboratoire

LAB
OUED

Chantier

-

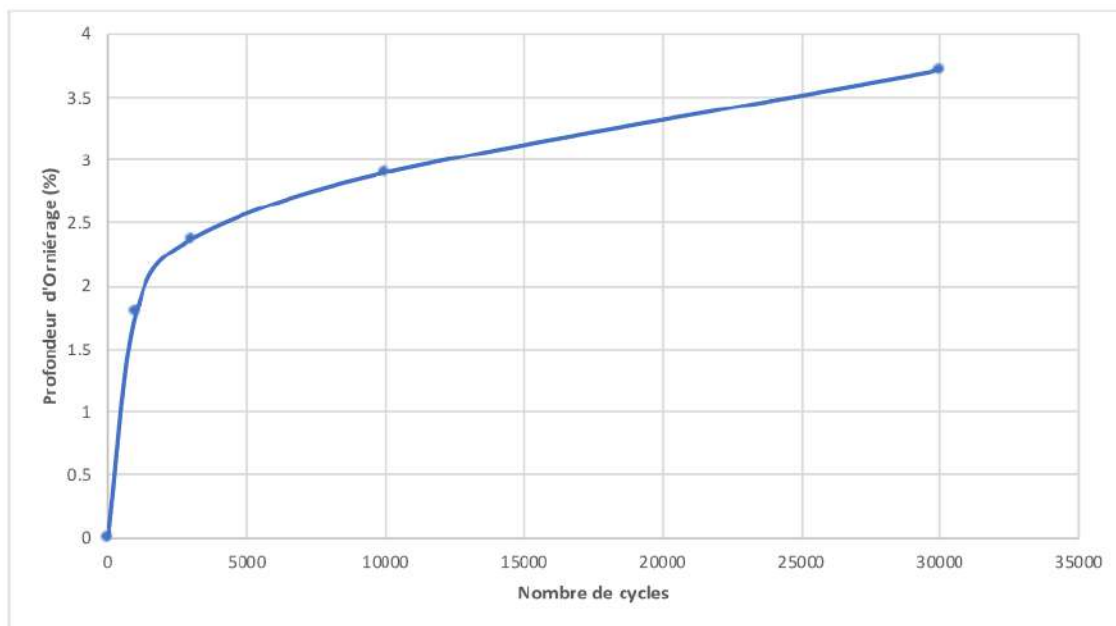
COMPOSITION (1)	(%)
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	

Date de confection des plaques	Profile de compactage
-	LOURD
Durée de conservation	Température de conservation
2 mois	25
Condition d'essai	
Date d'essai	20/7/2022
Température d'essai	60
Nombre des éprouvettes	1

Information d'éprouvette	Dimension de la plaque			Masse (kg)	MVA (kg/m3)	MVR (kg/m3) (1)	Pourcentage de vide (%)	Compacité (%)
	Longueur	Largeur	épaisseur					
	500	180	102.9					
				21023	2270.1	2550	10.98	89.02

Reference de l'Eprouvette : M1

Nombre de cycles	0	1000	3000	10000	30000	
Profondeur d'orniérage en %	0	1.78	2.37	2.9	3.71	



Observation :

(*) : En cas de changement de la version de rapport, les informations modifiées doivent être identifiées en « **gras** », les explications de ces modifications doivent être mentionnées dans la rubrique « **observation** » du rapport.

(**) : Si l'échantillon présente un écart par rapport aux exigences spécifiées et que le client demande de réaliser l'essai malgré que cet écart peut affecter les résultats, ce dernier doit être mentionné dans la rubrique « observation ».

Date de réception d'échantillon :

Date d'essai : 20 - 07 - 2022

Date de rapport: 15 - 09 - 2022

Nom et Prénom du Contrôleur : BOUCHERBA. MED

Visa :

- Les résultats de ce rapport ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

fin rapport



مختبر الأشغال العامة في جنوب البلاد

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD
SPA AU CAPITALE DE :303.000.000 DA

Zone d'activité -Bouhraoua -Ghardaïa +213 (0) 770 27 37 32 / +213 (0) 29 25 27 38 / +213 (0) 29 25 27 36
+213 (0) 29 25 27 44 BP 332 - 47000 Ghardaïa Contact@ltps.dz www.ltps.dz

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI D'ORNIERAGE

Dispositif de grandes dimension

NF EN 12697 - 22 (2020)

PV N° :/ORN/ 20... version (*) :

Structure	DT	Balance N°	L21.03.06
N° dossier interne	DRM - DR - 2022	Etuve N°	L039. 17.S.001+002
Date de la demande d'essai	/	Ornièreur N°	L127.17.S.001
Description et état de l'échantillon (**):	Granulats + Liant	Granulats	Mélange
			Carottage
			Autre (Préciser)
			Compacteur N°
			Lieu de travail
			PBS

Méthode de production :

Laboratoire

LAB
OUED

Chantier

-

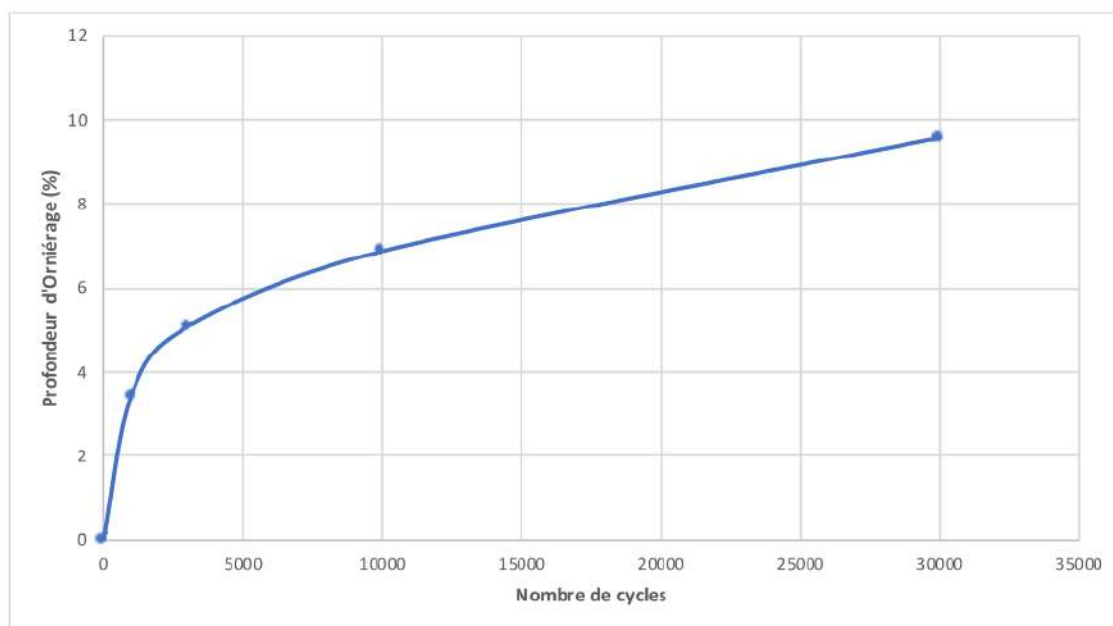
COMPOSITION (1)	(%)
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	

Date de confection des plaques	Profile de compactage
-	LOURD
Durée de conservation	Température de conservation
2 mois	25
Condition d'essai	
Date d'essai	20/7/2022
Température d'essai	60
Nombre des éprouvettes	1

Information d'éprouvette	Dimension de la plaque			Masse (kg)	MVA (kg/m3)	MVR (kg/m3) (1)	Pourcentage de vide (%)	Compacité (%)
	Longueur	Largeur	épaisseur					
	500	180	101.5	21025	2301.6	2546	9.60	90.40

Reference de l'Eprouvette : M2

Nombre de cycles	0	1000	3000	10000	30000	
Profondeur d'orniérage en %	0	3.45	5.07	6.88	9.59	



Observation :

(*) : En cas de changement de la version de rapport, les informations modifiées doivent être identifiées en « **gras** », les explications de ces modifications doivent être mentionnées dans la rubrique « **observation** » du rapport.

(**) : Si l'échantillon présente un écart par rapport aux exigences spécifiées et que le client demande de réaliser l'essai malgré que cet écart peut affecter les résultats, ce dernier doit être mentionné dans la rubrique « observation ».

Date de réception d'échantillon :

Date d'essai : 20 - 07 - 2022

Date de rapport : 15 - 09 - 2022

Nom et Prénom du Contrôleur : BOUCHERBA. MED

Visa :

- Les résultats de ce rapport ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

fin rapport



مختبر الأشغال العامة وجنوب البلاد

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD
SPA AU CAPITALE DE :303.000.000 DA

Zone d'activité -Bouhraoua -Ghardaïa ☎ +213 (0) 770 27 37 32 / +213 (0) 29 25 27 38 / +213 (0) 29 25 27 36

☎ +213 (0) 29 25 27 44 ✉ BP 332 - 47000 Ghardaïa ✉ Contact@ltps.dz 🌐 www.ltps.dz

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI D'ORNIERAGE

Dispositif de grandes dimension

NF EN 12697 - 22 (2020)

PV N° :/ORN/ 20... version (*) :

Structure	DT				Balance N°	L21.03.06	
N° dossier interne	DRM - DR - 2022				Etuve N°	L039. 17.S.001+002	
Date de la demande d'essai	/				Ornièreur N°	L127.17.S.001	
Description et état de l'échantillon (**):	Granulats + Liant	Granulats	Mélange	Carottage	Autre (Préciser)	Compacteur N°	de LCTP
			X			Lieu de travail	PBS

Méthode de production :

Laboratoire

LAB
OUED

Chantier

-

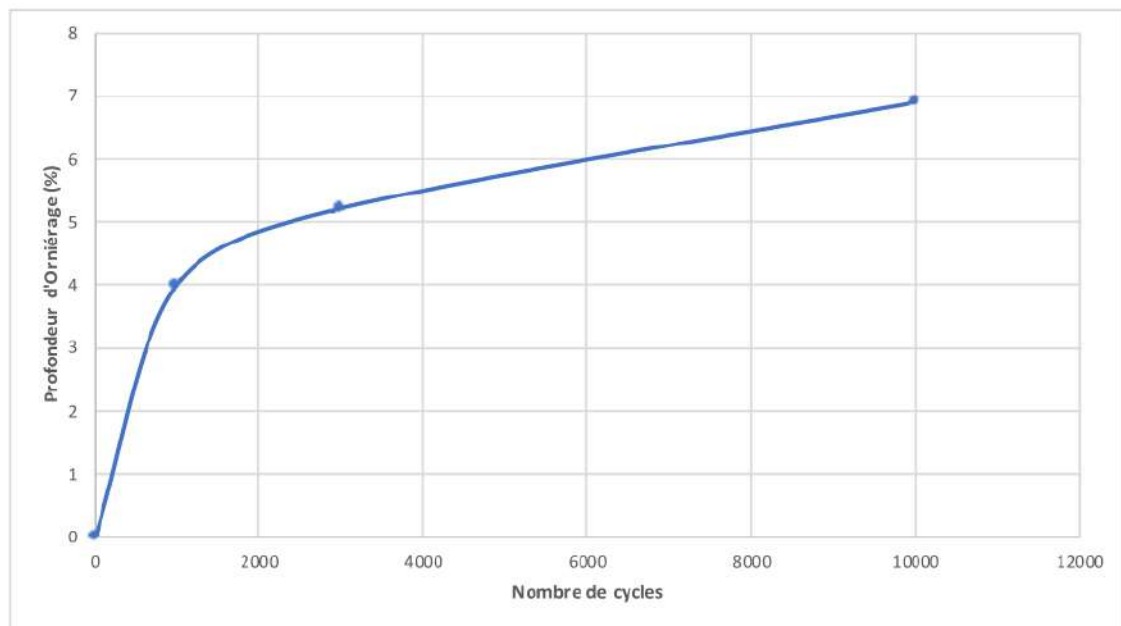
COMPOSITION (1)	(%)
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	

Date de confection des plaques	Profile de compactage
-	LOURD
Durée de conservation	Température de conservation
2 mois	25
Condition d'essai	
Date d'essai	24/7/2022
Température d'essai	60
Nombre des éprouvettes	1

Information d'éprouvette	Dimension de la plaque			Masse (kg)	MVA (kg/m3)	MVR (kg/m3) (1)	Pourcentage de vide (%)	Compacité (%)
	Longueur	Largeur	épaisseur					
	500	180	102.7					
				20951	2266.7	2547	11.01	88.99

Reference de l'Eprouvette : M3

Nombre de cycles	0	1000	3000	10000		
Profondeur d'orniérage en %	0	4.01	5.22	6.9		



Observation : Résistance d'orniage deviens nul après 25868 cycles.

(*) : En cas de changement de la version de rapport, les informations modifiées doivent être identifiées en « **gras** », les explications de ces modifications doivent être mentionnées dans la rubrique « **observation** » du rapport.

(**) : Si l'échantillon présente un écart par rapport aux exigences spécifiées et que le client demande de réaliser l'essai malgré que cet écart peut affecter les résultats, ce dernier doit être mentionné dans la rubrique « observation ».

Date de réception d'échantillon :

Date d'essai : 24 - 07 - 2022

Date de rapport : 15 - 09 - 2022

Nom et Prénom du Contrôleur : BOUCHERBA. MED

Visa :

- Les résultats de ce rapport ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

fin rapport



مختبر الأشغال العامة في جنوب البلاد

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD
SPA AU CAPITALE DE :303.000.000 DA

Zone d'activité -Bouhraoua -Ghardaïa ☎ +213 (0) 770 27 37 32 / +213 (0) 29 25 27 38 / +213 (0) 29 25 27 36

☎ +213 (0) 29 25 27 44 ✉ BP 332 - 47000 Ghardaïa ✉ Contact@ltps.dz 🌐 www.ltps.dz

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI D'ORNIERAGE

Dispositif de grandes dimension

NF EN 12697 - 22 (2020)

PV N° :/ORN/ 20... version (*) :

Structure	DT				Balance N°	L21.03.06	
N° dossier interne	DRM - DR - 2022				Etuve N°	L039. 17.S.001+002	
Date de la demande d'essai	/				Ornièreur N°	L127.17.S.001	
Description et état de l'échantillon (**):	Granulats + Liant	Granulats	Mélange	Carottage	Autre (Préciser)	Compacteur N°	de LCTP
			X			Lieu de travail	PBS

Méthode de production :

Laboratoire

LAB
OUED

Chantier

-

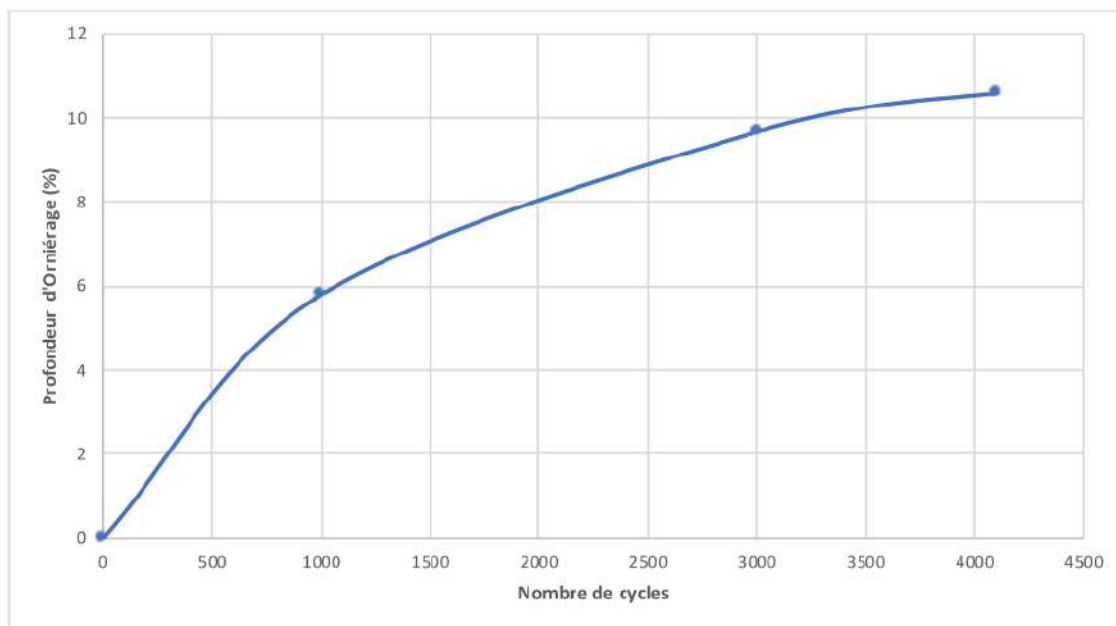
COMPOSITION (1)	(%)
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	

Date de confection des plaques	Profile de compactage
-	LOURD
Durée de conservation	Température de conservation
2 mois	25
Condition d'essai	
Date d'essai	24/7/2022
Température d'essai	60
Nombre des éprouvettes	1

Information d'éprouvette	Dimension de la plaque			Masse (kg)	MVA (kg/m3)	MVR (kg/m3) (1)	Pourcentage de vide (%)	Compacité (%)
	Longueur	Largeur	épaisseur					
	500	180	102.4					
				21680	2352.4	2547	7.64	92.36

Reference de l'Eprouvette : M4

Nombre de cycles	0	1000	3000	4104		
Profondeur d'orniérage en %	0	5.79	9.67	10.61		



Observation : Résistance d'orniérage deviens nul après 4104 cycles.

(*) : En cas de changement de la version de rapport, les informations modifiées doivent être identifiées en « **gras** », les explications de ces modifications doivent être mentionnées dans la rubrique « **observation** » du rapport.

(**) : Si l'échantillon présente un écart par rapport aux exigences spécifiées et que le client demande de réaliser l'essai malgré que cet écart peut affecter les résultats, ce dernier doit être mentionné dans la rubrique « observation ».

Date de réception d'échantillon :

Date d'essai : 24 - 07 - 2022

Date de rapport: 15 - 09 - 2022

Nom et Prénom du Contrôleur : BOUCHERBA. MED

Visa :

- Les résultats de ce rapport ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

fin rapport



مختبر الأشغال العامة في جنوب البلاد

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD
SPA AU CAPITAL DE :303.000.000 DA

Zone d'activité -Bouhraoua -Ghardaïa ☎ +213 (0) 770 27 37 32 / +213 (0) 29 25 27 38 / +213 (0) 29 25 27 36
☎ +213 (0) 29 25 27 44 ✉ BP 332 - 47000 Ghardaïa ✉ Contact@ltps.dz 🌐 www.ltps.dz

RAPPORT D'ESSAI

ESSAI D'ORNIERAGE

Dispositif de grandes dimension

NF EN 12697 - 22 (2020)

PV N° :/ORN/ 20... version (*) :

Structure	DT				Balance N°	L21.03.06
N° dossier interne	DRM - DR - 2022				Etuve N°	L039. 17.S.001+002
Date de la demande d'essai	/				Ornièreur N°	L127.17.S.001
Description et état de l'échantillon (**):	Granulats + Liant	Granulats	Mélange	Carottage	Autre (Préciser)	Compacteur N°
			X			de LCTP
						Lieu de travail
						PBS

Méthode de production :

Laboratoire

LAB
OUED

Chantier

-

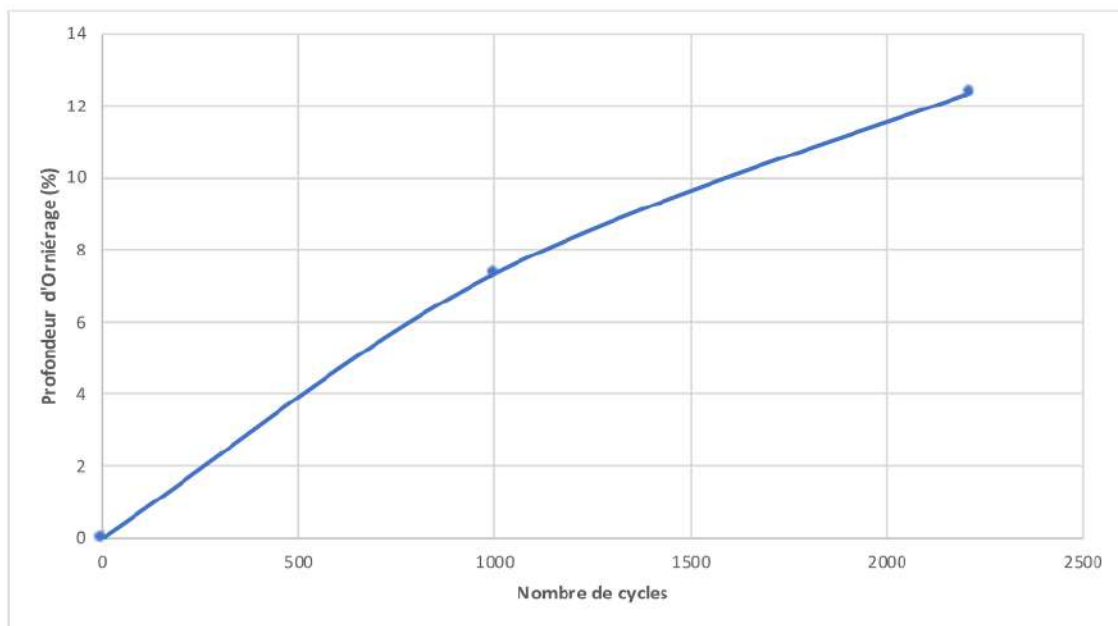
COMPOSITION (1)	(%)
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	

Date de confection des plaques	Profile de compactage
-	LOURD
Durée de conservation	Température de conservation
2 mois	25
Condition d'essai	
Date d'essai	26/7/2022
Température d'essai	60
Nombre des éprouvettes	1

Information d'éprouvette	Dimension de la plaque			Masse (kg)	MVA (kg/m3)	MVR (kg/m3) (1)	Pourcentage de vide (%)	Compacité (%)
	Longueur	Largeur	épaisseur					
	500	180	100.38					
				21370	2365.5	2547	7.13	92.87

Reference de l'Eprouvette : M5

Nombre de cycles	0	1000	2216			
Profondeur d'orniérage en %	0	7.34	12.38			



Observation : Résistance d'orniérage deviens nul après 2216 cycles.

(*) : En cas de changement de la version de rapport, les informations modifiées doivent être identifiées en « **gras** », les explications de ces modifications doivent être mentionnées dans la rubrique « **observation** » du rapport.

(**) : Si l'échantillon présente un écart par rapport aux exigences spécifiées et que le client demande de réaliser l'essai malgré que cet écart peut affecter les résultats, ce dernier doit être mentionné dans la rubrique « observation ».

Date de réception d'échantillon :

Date d'essai : 26 - 07 - 2022

Date de rapport : 15 - 09 - 2022

Nom et Prénom du Contrôleur : BOUCHERBA. MED

Visa :

- Les résultats de ce rapport ne se rapportent qu'aux objets soumis à l'essai.

fin rapport







ANNEXE F :

ESSAI DE MODULE

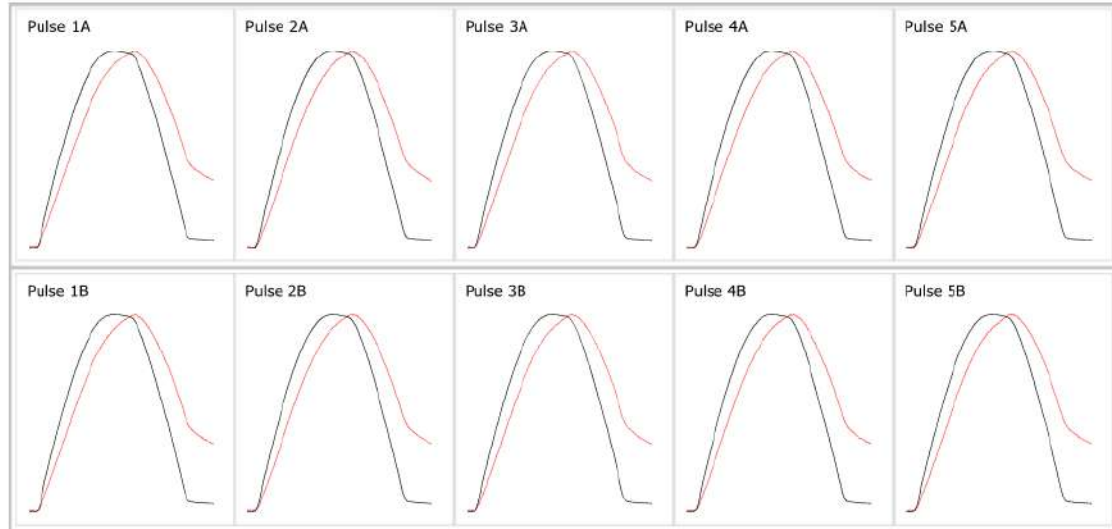
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 20 Jul 2022 @ 07:34
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M1 EP 01
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	66

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.052	4.050	4.051	4.052	4.052	4.052	3.685	3.688	3.689	3.689	3.689	3.688	3.870
Horizontal Stress (kPa)	387.0	386.8	386.9	386.9	387.0	386.9	351.9	352.2	352.3	352.2	352.3	352.2	369.6
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	5.20	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	5.03
Load Rise Time (ms)	117	116	116	116	116	116	124	124	124	125	125	124	120
Measured Stiffness (MPa)	7335	7305	7311	7267	7271	7298	7134	7133	7129	7110	7112	7123	7211
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	7545	7499	7505	7459	7463	7494	7353	7351	7346	7300	7301	7330	7412

Data File M1 EP 01_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper

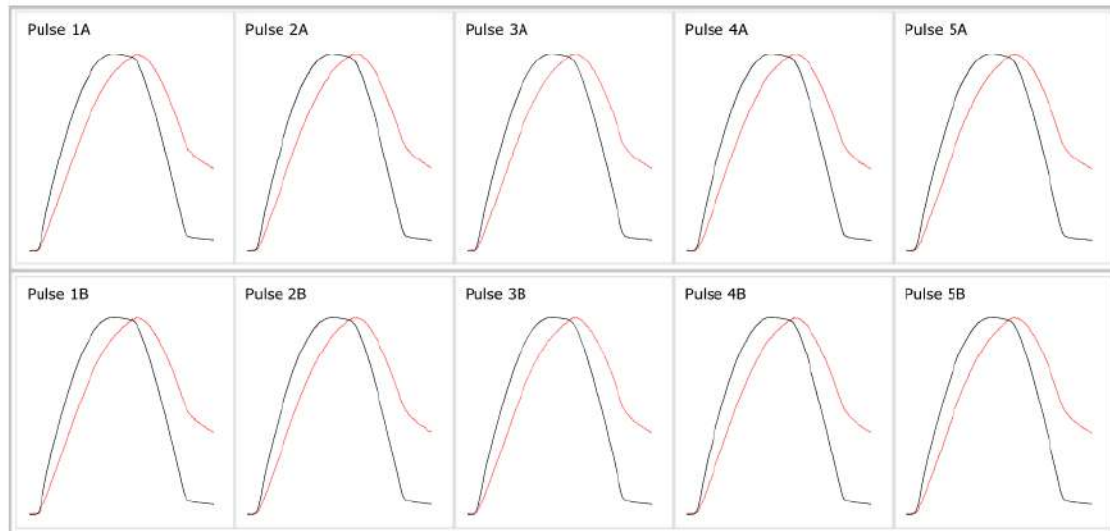
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C, April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 11:30
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M1 EP 01 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	66

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	2.690	2.690	2.691	2.690	2.692	2.691	2.636	2.638	2.637	2.637	2.638	2.637	2.664
Horizontal Stress (kPa)	256.9	256.9	257.0	256.9	257.0	256.9	251.7	251.9	251.8	251.8	251.9	251.8	254.4
Load-Area Factor	0.66	0.65	0.65	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
Horizontal Deformation (µm)	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.93
Load Rise Time (ms)	126	127	127	126	126	126	124	124	124	124	124	124	125
Measured Stiffness (MPa)	5131	5128	5116	5137	5102	5123	5055	5048	5044	5024	5042	5042	5083
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	5313	5292	5280	5320	5282	5297	5230	5222	5219	5197	5215	5217	5257

Data File M1 EP 01 20_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

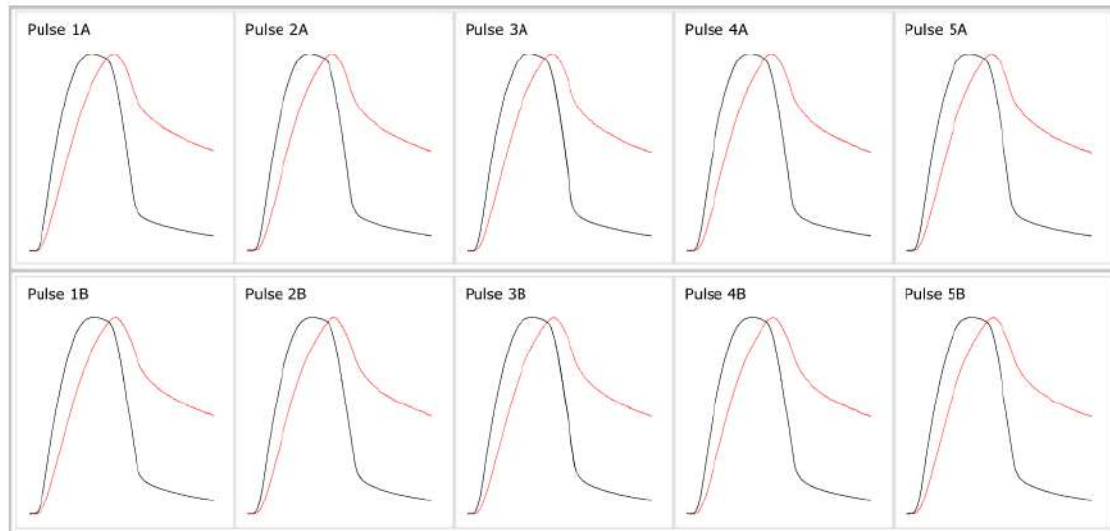
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 25 Jul 2022 @ 07:52
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M1 EP 01 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	66

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	0.928	0.930	0.928	0.928	0.930	0.929	0.907	0.908	0.907	0.908	0.908	0.908	0.918
Horizontal Stress (kPa)	88.6	88.8	88.6	88.6	88.8	88.7	86.6	86.7	86.6	86.7	86.7	86.7	87.7
Load-Area Factor	0.68	0.68	0.67	0.68	0.68	0.67	0.67	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
Horizontal Deformation (um)	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.25	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.14
Load Rise Time (ms)	126	126	127	126	126	126	127	126	126	126	125	126	126
Measured Stiffness (MPa)	1703	1711	1709	1716	1716	1711	1752	1755	1761	1764	1766	1760	1736
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	1762	1770	1763	1776	1775	1769	1812	1818	1825	1827	1835	1823	1796

Data File M1 EP 01 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

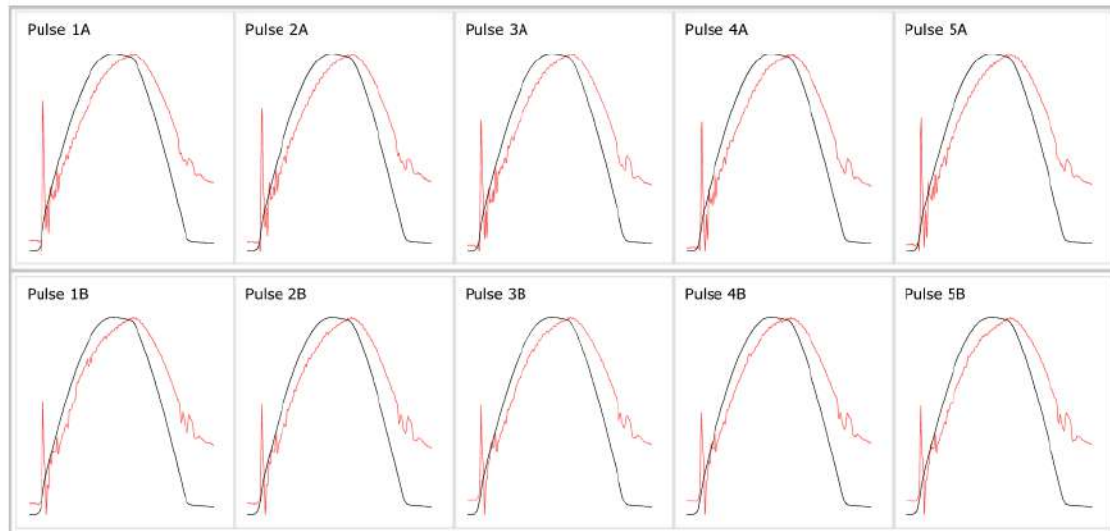
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 20 Jul 2022 @ 07:41
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M1 EP 02
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	67

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	3.995	3.996	3.997	3.997	3.998	3.997	4.035	4.034	4.034	4.035	4.035	4.034	4.016
Horizontal Stress (kPa)	383.4	383.5	383.6	383.5	383.6	383.5	387.2	387.1	387.1	387.1	387.1	387.1	385.3
Load-Area Factor	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Horizontal Deformation (um)	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56	4.56	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.62
Load Rise Time (ms)	126	126	126	126	125	126	126	126	126	126	126	126	126
Measured Stiffness (MPa)	8207	8266	8514	8523	8391	8380	8069	8013	7817	7820	7687	7881	8131
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	8466	8526	8784	8794	8687	8651	8328	8271	8067	8070	7932	8134	8392

Data File M1 EP 02_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

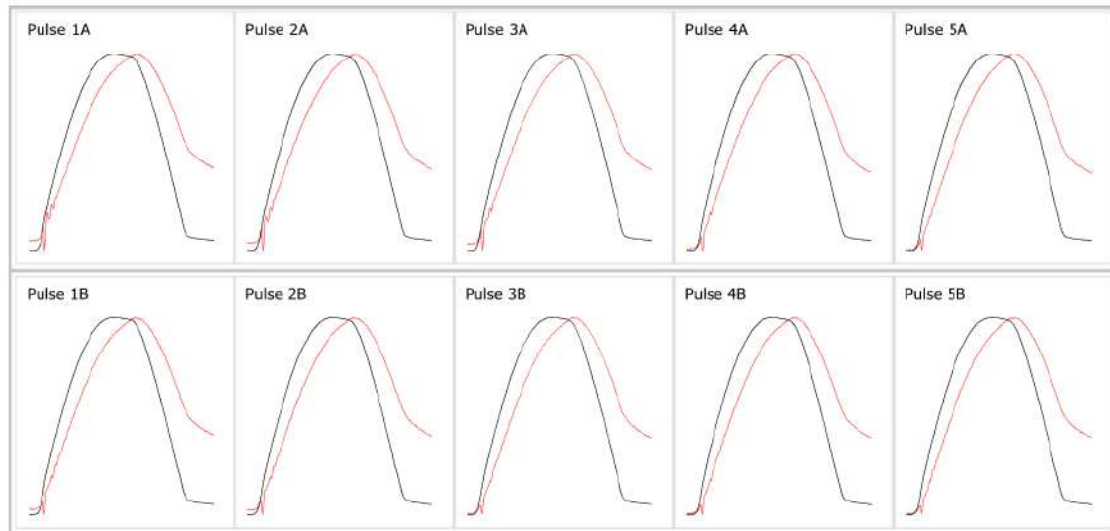
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 11:42
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M1 EP 02 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	67

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	2.728	2.728	2.727	2.729	2.729	2.728	2.634	2.635	2.635	2.635	2.635	2.635	2.681
Horizontal Stress (kPa)	261.8	261.8	261.7	261.9	261.8	261.8	252.7	252.8	252.9	252.8	252.8	252.8	257.3
Load-Area Factor	0.65	0.66	0.66	0.65	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
Horizontal Deformation (um)	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.84
Load Rise Time (ms)	127	126	126	127	126	126	123	123	123	123	123	123	124
Measured Stiffness (MPa)	5151	5164	5179	5309	5359	5232	5270	5308	5390	5372	5372	5342	5287
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	5319	5350	5366	5483	5554	5415	5461	5499	5586	5566	5566	5536	5475

Data File M1 EP 02 20_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

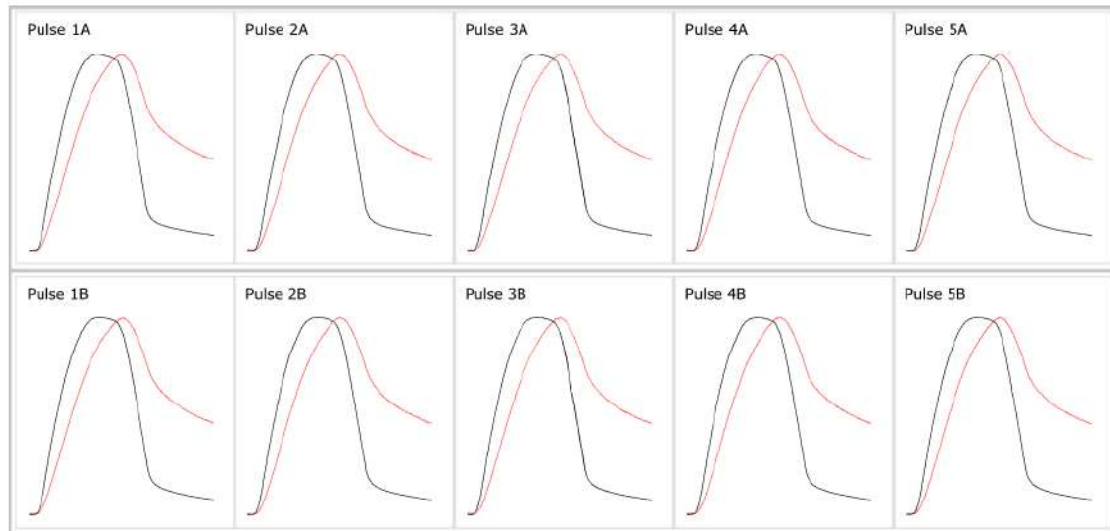
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 25 Jul 2022 @ 07:41
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M1 EP 02 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	67

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.151	1.151	1.151	1.152	1.153	1.152	1.103	1.102	1.104	1.103	1.104	1.103	1.127
Horizontal Stress (kPa)	110.5	110.5	110.4	110.6	110.6	110.5	105.8	105.8	106.0	105.8	105.9	105.9	108.2
Load-Area Factor	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
Horizontal Deformation (µm)	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	5.09	4.85	4.85	4.85	4.85	4.85	4.85	4.97
Load Rise Time (ms)	129	129	128	128	128	128	123	124	123	122	122	123	126
Measured Stiffness (MPa)	2171	2174	2169	2174	2180	2173	2168	2180	2175	2181	2181	2177	2175
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	2244	2246	2247	2252	2257	2249	2240	2255	2246	2260	2259	2252	2251

Data File M1 EP 02 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

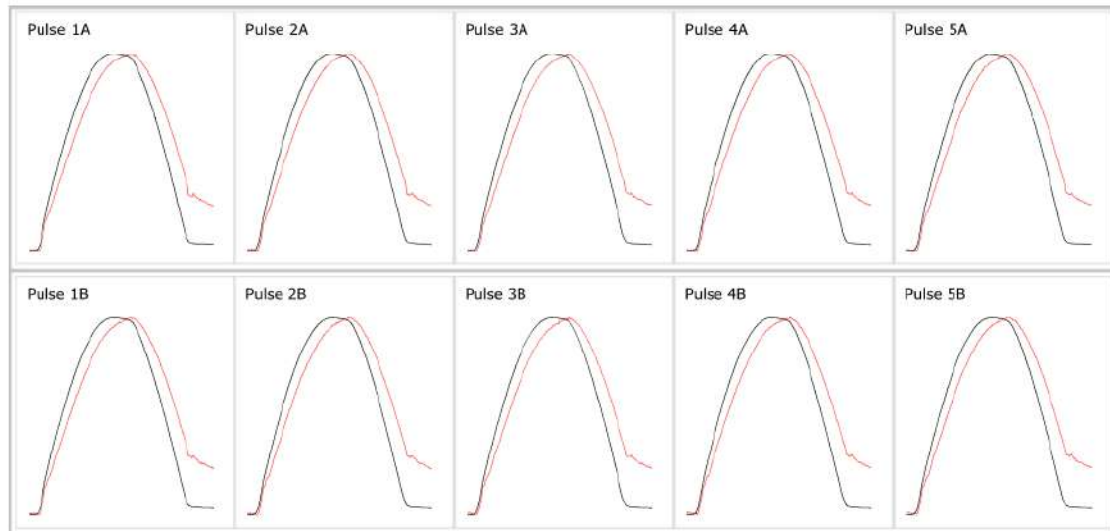
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 20 Jul 2022 @ 08:20
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M2 EP 01
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	65

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.958	4.961	4.961	4.961	4.977	4.964	4.767	4.768	4.769	4.769	4.769	4.768	4.866
Horizontal Stress (kPa)	487.8	488.1	488.1	488.1	489.7	488.4	469.0	469.1	469.2	469.2	469.2	469.2	478.8
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	4.57	4.64
Load Rise Time (ms)	125	125	125	125	126	125	124	124	124	124	124	124	125
Measured Stiffness (MPa)	10141	10096	10013	9972	9988	10042	10026	9993	9937	9909	9928	9958	10000
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	10436	10386	10300	10257	10224	10320	10329	10295	10235	10205	10224	10257	10289

Data File M2 EP 01_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

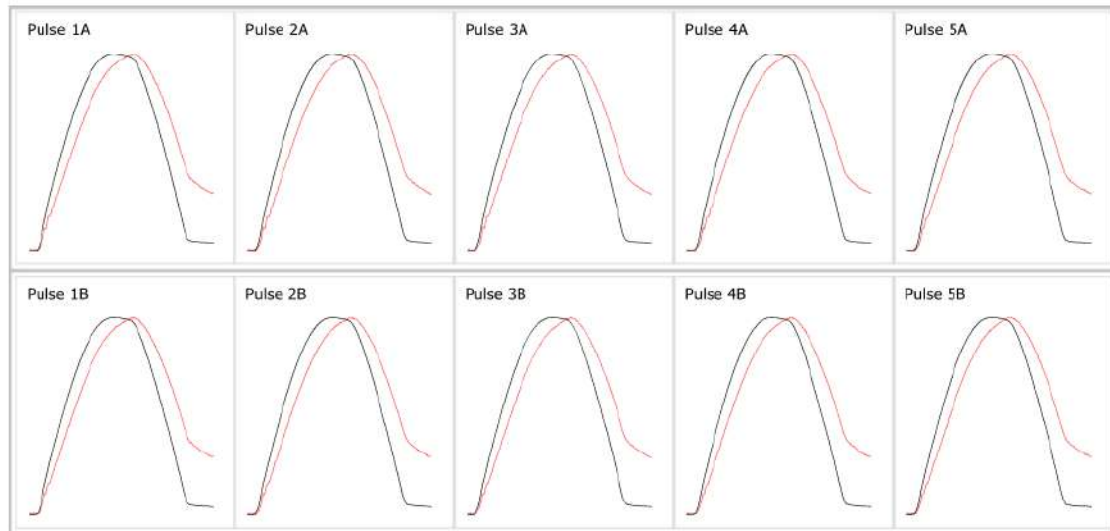
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 09:30
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M2 EP 01 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	65

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	3.873	3.873	3.873	3.873	3.873	3.873	3.777	3.776	3.776	3.777	3.777	3.777	3.825
Horizontal Stress (kPa)	381.1	381.1	381.1	381.0	381.1	381.0	371.6	371.5	371.5	371.6	371.6	371.6	376.3
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65	0.64	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	4.74	4.74	4.74	4.74	4.74	4.74	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.71
Load Rise Time (ms)	125	125	125	125	125	125	124	125	124	125	125	124	125
Measured Stiffness (MPa)	7874	7871	7822	7809	7803	7836	7757	7747	7724	7714	7706	7730	7783
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	8108	8105	8054	8040	8035	8068	7998	7958	7964	7923	7915	7952	8010

Data File M2 EP 01 20_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

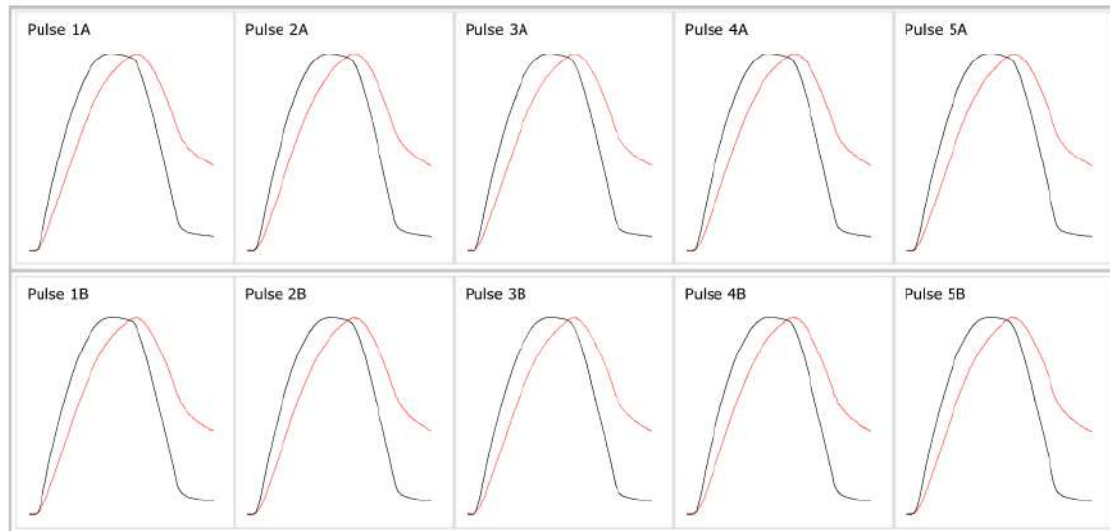
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 25 Jul 2022 @ 11:31
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M2 EP 01 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	65

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.831	1.832	1.833	1.831	1.833	1.832	1.799	1.798	1.799	1.798	1.798	1.798	1.815
Horizontal Stress (kPa)	180.2	180.3	180.3	180.2	180.3	180.3	177.0	176.9	177.0	176.9	176.9	176.9	178.6
Load-Area Factor	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.66	0.66
Horizontal Deformation (µm)	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.91	4.83	4.83	4.83	4.83	4.83	4.83	4.87
Load Rise Time (ms)	126	126	126	126	125	126	123	123	125	123	125	124	125
Measured Stiffness (MPa)	3617	3609	3610	3598	3589	3605	3612	3607	3603	3606	3603	3606	3605
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	3737	3727	3729	3717	3717	3725	3742	3736	3725	3735	3708	3729	3727

Data File M2 EP 01 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

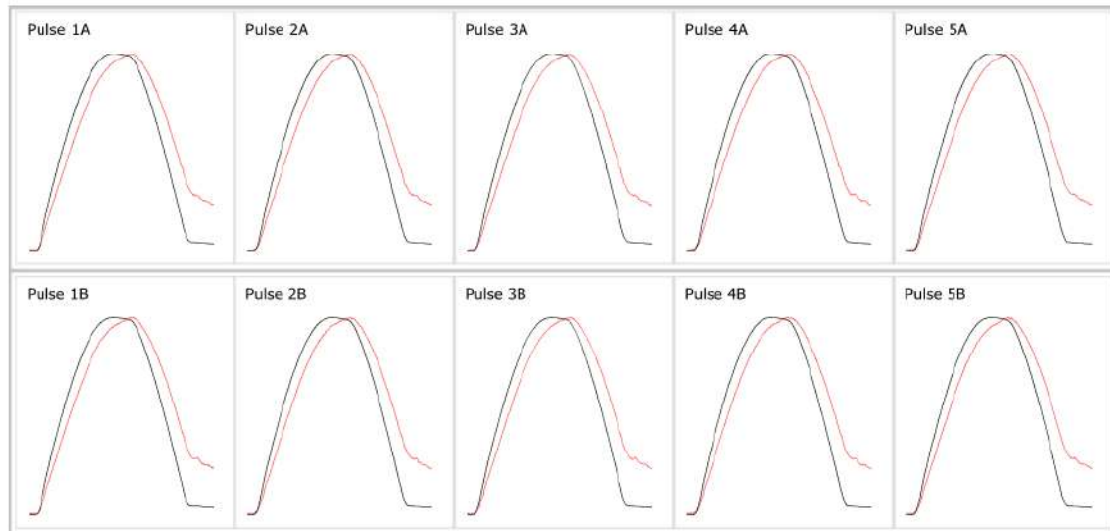
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 20 Jul 2022 @ 08:28
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M2 EP 02
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	65

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.482	4.481	4.482	4.462	4.483	4.482	4.329	4.328	4.329	4.329	4.328	4.328	4.405
Horizontal Stress (kPa)	441.2	441.2	441.2	441.2	441.3	441.2	426.1	426.1	426.2	426.1	426.1	426.1	433.7
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.65	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.65
Load Rise Time (ms)	124	124	125	124	125	124	123	123	123	123	123	123	124
Measured Stiffness (MPa)	9192	9174	9130	9119	9092	9141	9055	9062	9071	9063	9023	9055	9098
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	9454	9436	9407	9434	9366	9419	9330	9337	9345	9337	9297	9329	9374

Data File M2 EP 02_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

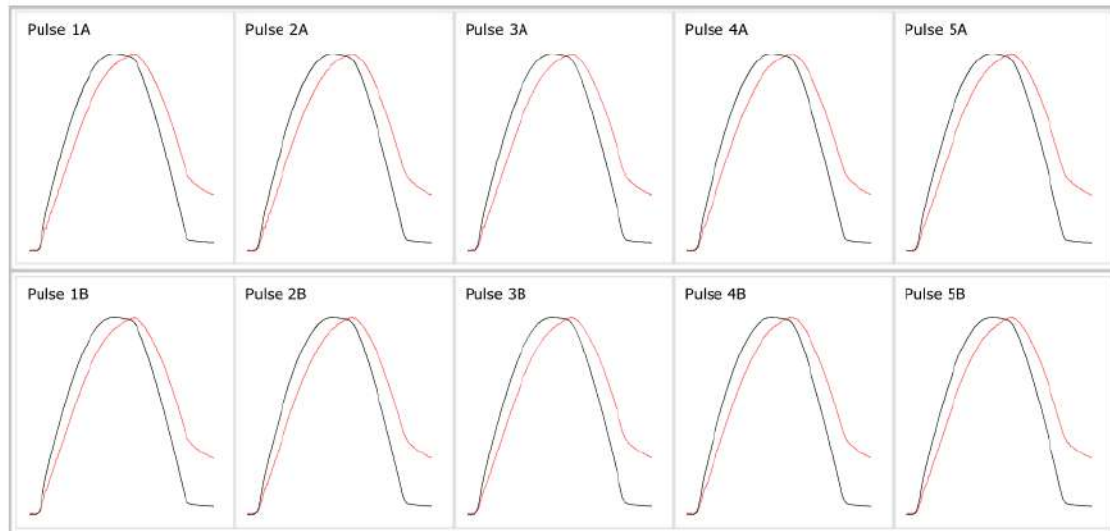
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 09:38
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M2 EP 02 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	65

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	3.663	3.663	3.663	3.665	3.666	3.664	3.578	3.578	3.579	3.578	3.579	3.578	3.621
Horizontal Stress (kPa)	360.6	360.6	360.6	360.8	360.9	360.7	352.2	352.3	352.3	352.3	352.4	352.3	356.5
Load-Area Factor	0.64	0.65	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Horizontal Deformation (µm)	4.99	4.99	4.99	4.99	4.99	4.99	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.95	4.97
Load Rise Time (ms)	127	126	127	126	126	126	123	123	123	123	123	123	125
Measured Stiffness (MPa)	7076	7088	7061	7036	7015	7055	6979	6968	6959	6958	6965	6966	7010
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	7284	7321	7268	7267	7245	7277	7212	7200	7190	7190	7196	7198	7237

Data File M2 EP 02 20_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

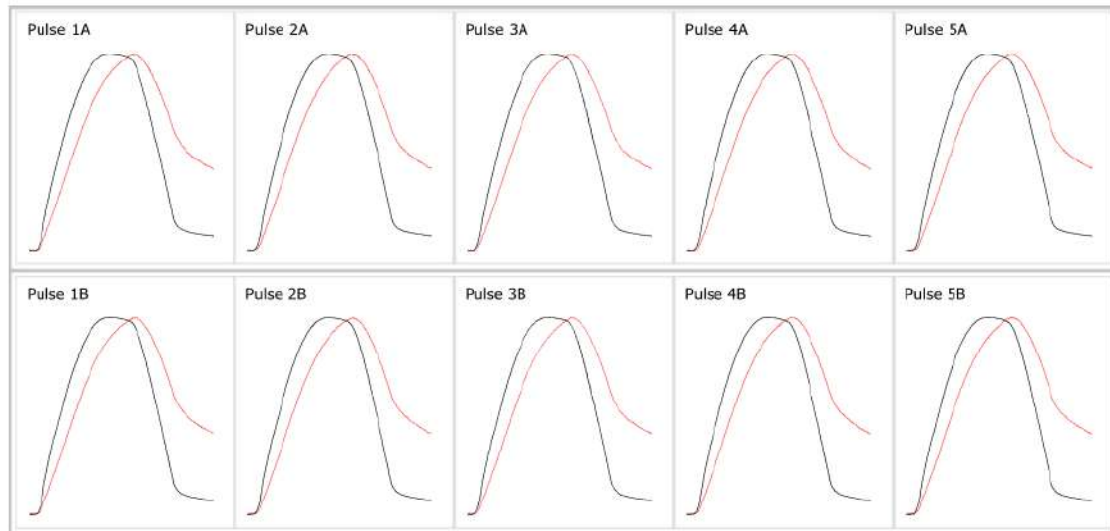
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 25 Jul 2022 @ 11:39
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M2 EP 02 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	65

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.697	1.699	1.699	1.697	1.697	1.698	1.650	1.652	1.653	1.650	1.652	1.651	1.675
Horizontal Stress (kPa)	167.1	167.3	167.2	167.0	167.1	167.1	162.4	162.6	162.7	162.4	162.6	162.6	164.8
Load-Area Factor	0.67	0.67	0.66	0.66	0.66	0.66	0.67	0.67	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
Horizontal Deformation (um)	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	5.02	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.95
Load Rise Time (ms)	128	128	127	129	130	128	123	123	125	124	124	124	126
Measured Stiffness (MPa)	3289	3285	3275	3277	3272	3280	3294	3292	3302	3298	3301	3297	3289
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	3408	3403	3388	3387	3371	3391	3417	3413	3404	3409	3413	3411	3401

Data File M2 EP 02 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

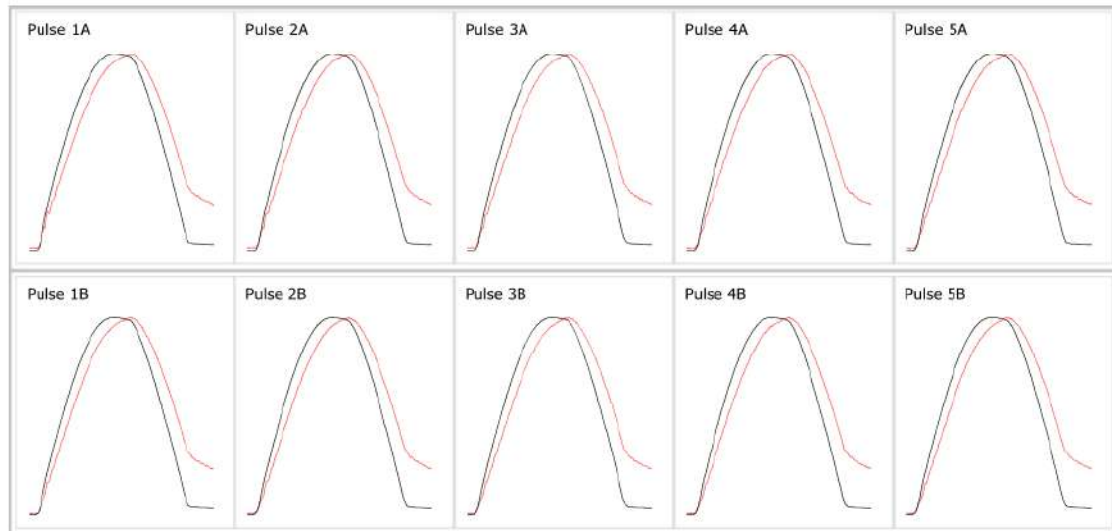
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 20 Jul 2022 @ 08:45
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M3 EP 01
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	62

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	5.023	5.024	5.025	5.024	5.025	5.025	4.962	4.962	4.962	4.962	4.962	4.962	4.993
Horizontal Stress (kPa)	515.4	515.6	515.6	515.6	515.6	515.6	509.2	509.2	509.2	509.1	509.2	509.1	512.4
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.61	4.64
Load Rise Time (ms)	125	125	125	125	125	125	123	123	123	123	123	123	124
Measured Stiffness (MPa)	10806	10765	10756	10753	10766	10769	10793	10766	10758	10738	10713	10754	10761
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	11130	11086	11078	11075	11088	11091	11080	11052	11045	11023	10996	11039	11065

Data File M3 EP 01_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

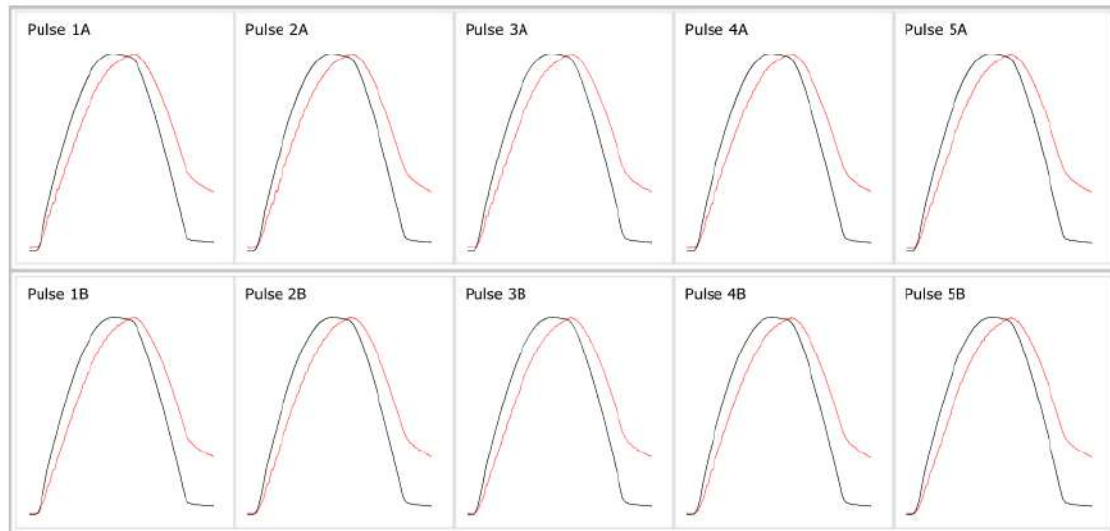
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 08:42
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M3 EP 01 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	62

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	3.640	3.638	3.638	3.640	3.640	3.639	3.655	3.656	3.656	3.656	3.655	3.655	3.647
Horizontal Stress (kPa)	373.2	372.9	372.9	373.1	373.1	373.1	374.7	374.8	374.8	374.8	374.7	374.7	373.9
Load-Area Factor	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Horizontal Deformation (um)	4.83	4.83	4.83	4.83	4.83	4.83	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.86	4.85
Load Rise Time (ms)	125	126	124	124	126	125	124	124	124	124	124	124	124
Measured Stiffness (MPa)	7571	7544	7531	7510	7503	7532	7560	7536	7528	7517	7491	7526	7529
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	7787	7776	7777	7753	7733	7765	7788	7763	7754	7743	7717	7753	7759

Data File M3 EP 01 20_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

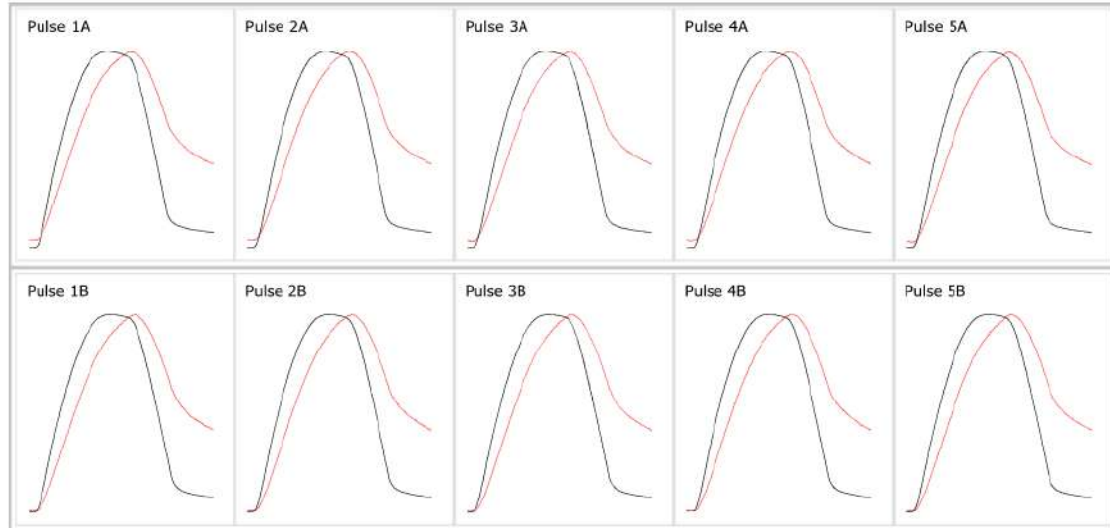
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 25 Jul 2022 @ 12:00
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M3 EP 01 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	62

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.482	1.482	1.481	1.482	1.482	1.482	1.546	1.545	1.547	1.546	1.546	1.546	1.514
Horizontal Stress (kPa)	151.9	151.9	151.8	152.0	152.0	151.9	158.5	158.4	158.6	158.5	158.5	158.5	155.2
Load-Area Factor	0.67	0.66	0.66	0.67	0.67	0.67	0.66	0.67	0.66	0.67	0.67	0.66	0.66
Horizontal Deformation (µm)	4.77	4.77	4.77	4.77	4.77	4.77	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.87	4.82
Load Rise Time (ms)	124	124	125	124	124	124	124	123	123	123	123	124	124
Measured Stiffness (MPa)	3155	3161	3154	3149	3150	3154	3224	3221	3230	3225	3213	3223	3188
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	3270	3263	3261	3264	3265	3265	3328	3336	3344	3341	3327	3335	3300

Data File M3 EP 01 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

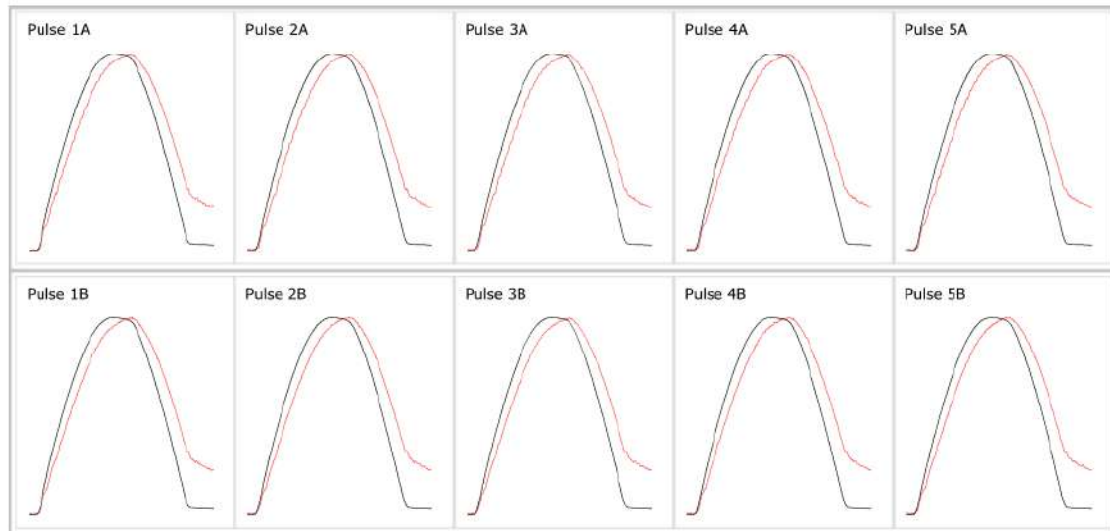
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 20 Jul 2022 @ 09:16
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M3 EP 02
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	5.487	5.487	5.487	5.487	5.486	5.487	5.466	5.465	5.466	5.466	5.467	5.466	5.476
Horizontal Stress (kPa)	557.3	557.4	557.4	557.3	557.3	557.3	555.2	555.2	555.2	555.2	555.3	555.2	556.3
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48	4.48	4.44
Load Rise Time (ms)	125	126	125	125	125	125	124	123	124	123	124	124	124
Measured Stiffness (MPa)	12379	12359	12292	12249	12226	12301	12111	12099	12057	12070	12039	12075	12188
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	12771	12697	12679	12637	12612	12679	12507	12469	12449	12437	12430	12458	12569

Data File M3 EP 02_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
INSTRUMENTS

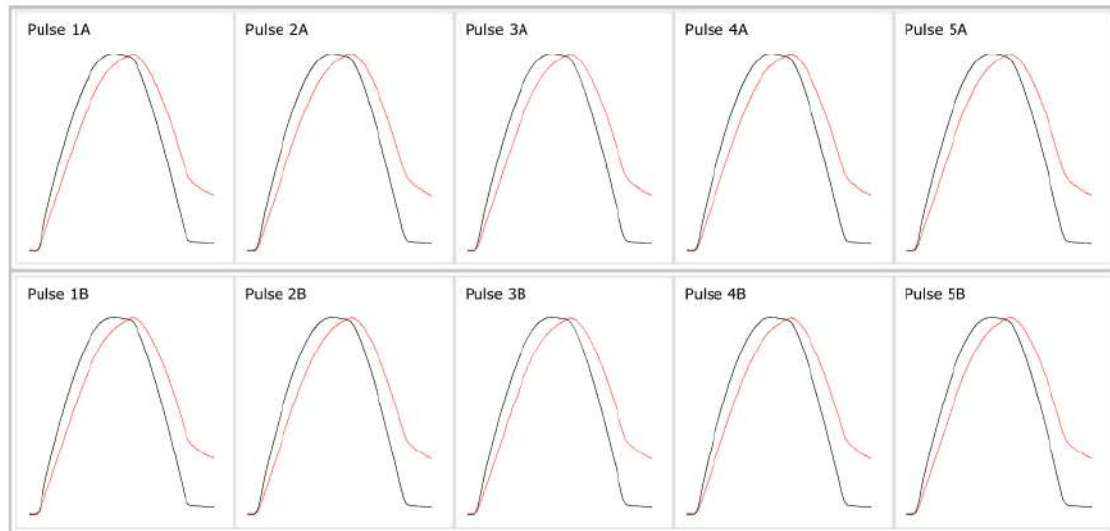
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 08:49
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M3 EP 02 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.172	4.174	4.174	4.174	4.174	4.174	4.096	4.096	4.096	4.097	4.097	4.096	4.135
Horizontal Stress (kPa)	423.8	423.9	424.0	424.0	424.0	424.0	416.1	416.1	416.1	416.1	416.1	416.1	420.0
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (µm)	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80
Load Rise Time (ms)	125	125	125	125	125	125	123	123	123	123	123	123	124
Measured Stiffness (MPa)	8650	8653	8632	8592	8598	8625	8486	8487	8465	8425	8465	8466	8545
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	8912	8913	8893	8850	8857	8885	8740	8741	8719	8678	8718	8719	8802

Data File M3 EP 02 20_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

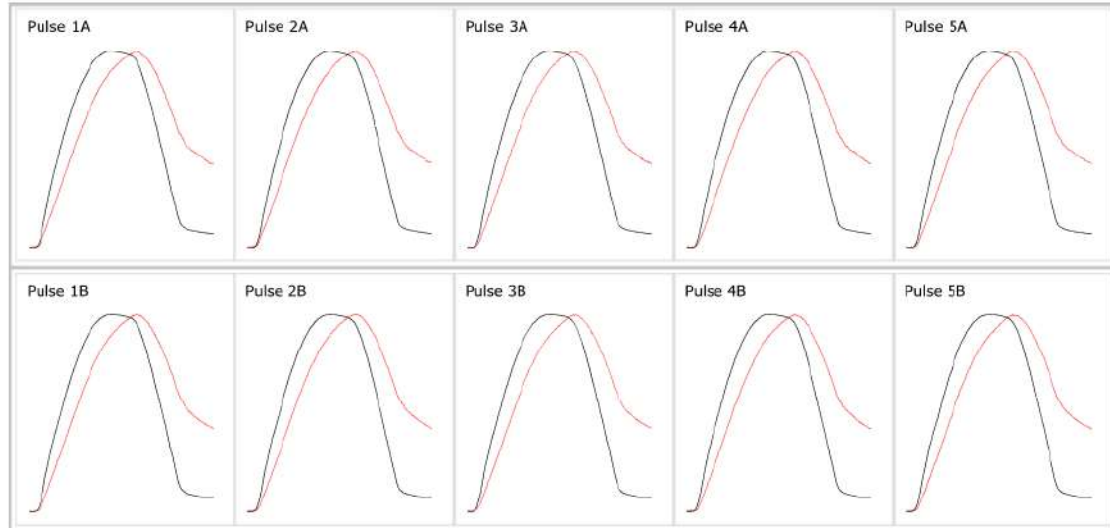
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 25 Jul 2022 @ 12:08
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M3 EP 02 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	1.981	1.982	1.980	1.962	1.981	1.981	1.939	1.938	1.937	1.939	1.939	1.938	1.960
Horizontal Stress (kPa)	201.2	201.3	201.1	201.3	201.3	201.2	197.0	196.9	196.7	197.0	196.9	196.9	199.1
Load-Area Factor	0.65	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.66	0.66	0.66	0.65	0.66	0.66
Horizontal Deformation (um)	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.93	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84	4.88
Load Rise Time (ms)	126	124	124	125	124	125	123	123	122	122	123	123	124
Measured Stiffness (MPa)	4027	4026	4045	4019	4030	4029	4013	4012	3996	4001	3991	4003	4016
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	4149	4174	4195	4154	4178	4170	4139	4140	4137	4141	4116	4135	4152

Data File M3 EP 02 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

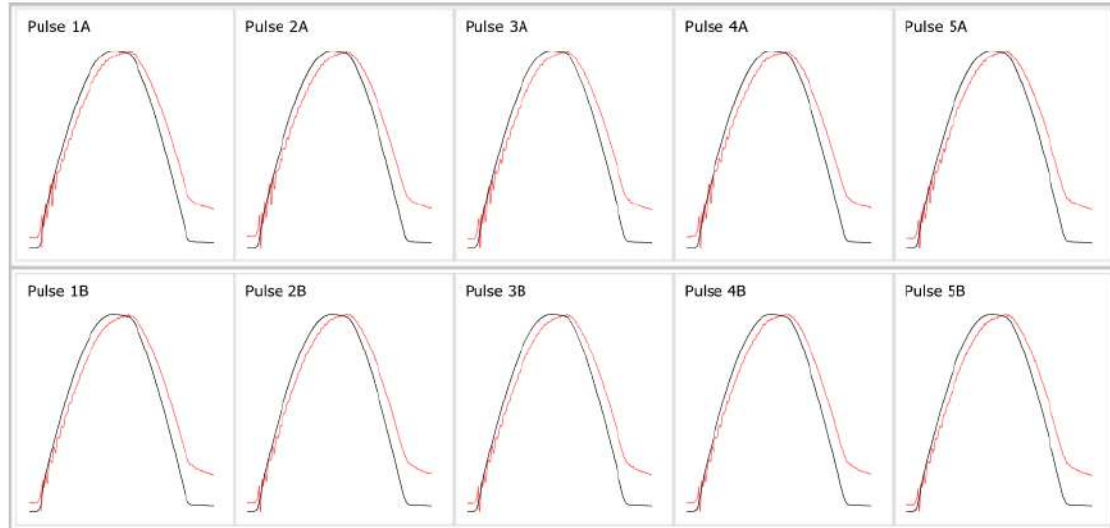
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 20 Jul 2022 @ 09:30
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M4 EP 01
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	64

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	5.785	5.785	5.785	5.787	5.786	5.785	5.725	5.724	5.723	5.724	5.724	5.724	5.755
Horizontal Stress (kPa)	573.1	573.1	573.1	573.3	573.2	573.2	567.1	567.1	567.0	567.1	567.1	567.1	570.1
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.36	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	4.32	4.34
Load Rise Time (ms)	124	124	124	124	124	124	123	123	123	123	123	123	124
Measured Stiffness (MPa)	12839	12697	12843	12663	12780	12764	12848	12885	12883	12847	12918	12876	12820
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	13211	13065	13215	13027	13149	13133	13244	13283	13281	13243	13316	13273	13203

Data File M4 EP 01_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

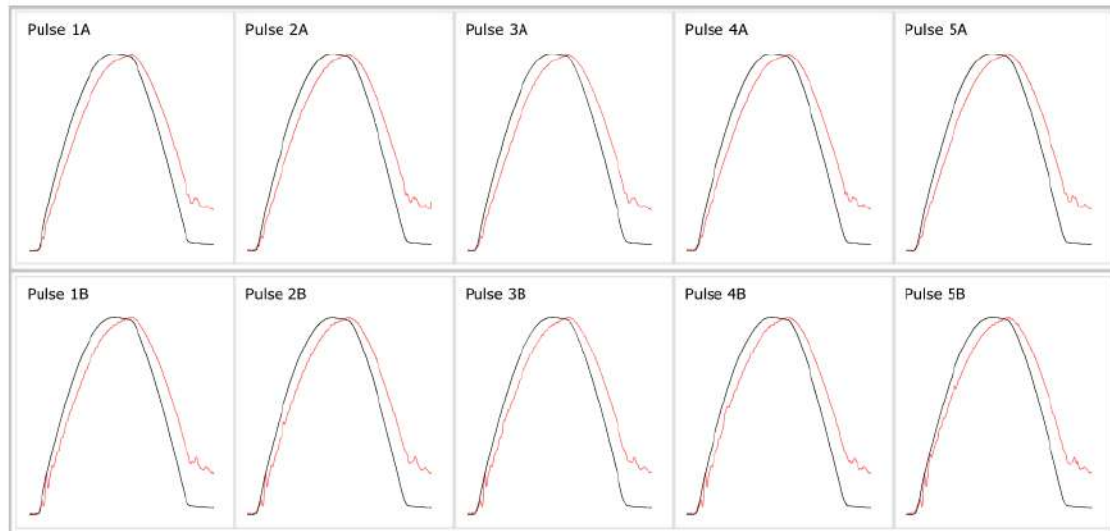
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 08:15
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M4 EP 01 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	64

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.872	4.872	4.873	4.873	4.875	4.873	4.720	4.725	4.720	4.721	4.720	4.721	4.797
Horizontal Stress (kPa)	482.6	482.7	482.7	482.8	483.0	482.8	467.6	468.1	467.6	467.7	467.6	467.7	475.2
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (µm)	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.59	4.59	4.59	4.59	4.59	4.59	4.61
Load Rise Time (ms)	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
Measured Stiffness (MPa)	10182	10149	10150	10082	10119	10137	9971	9973	9955	9920	9902	9944	10040
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	10480	10444	10446	10375	10412	10432	10272	10268	10254	10218	10201	10243	10337

Data File M4 EP 01 20_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

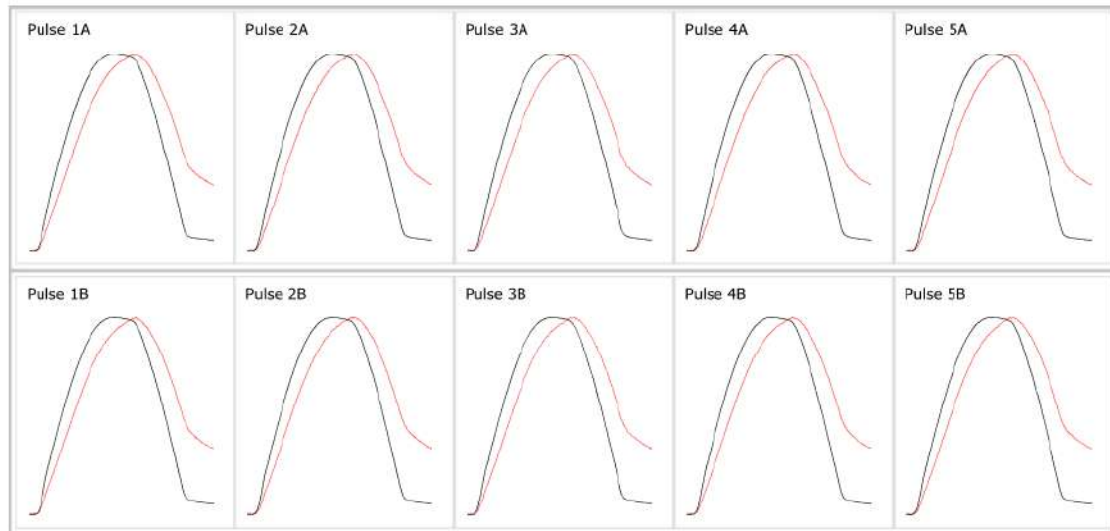
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 26 Jul 2022 @ 07:36
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M4 EP 01 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	64

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	2.602	2.600	2.600	2.602	2.601	2.601	2.492	2.491	2.492	2.492	2.492	2.492	2.546
Horizontal Stress (kPa)	257.7	257.6	257.6	257.7	257.7	257.7	246.9	246.8	246.9	246.8	246.9	246.8	252.3
Load-Area Factor	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Horizontal Deformation (µm)	4.96	4.96	4.96	4.96	4.96	4.96	4.85	4.85	4.85	4.85	4.85	4.85	4.91
Load Rise Time (ms)	126	126	126	126	126	126	125	124	124	124	124	124	125
Measured Stiffness (MPa)	5113	5083	5075	5068	5056	5079	4999	5018	5021	5002	4998	5008	5043
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	5257	5228	5219	5212	5199	5223	5141	5179	5182	5163	5158	5165	5194

Data File M4 EP 01 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

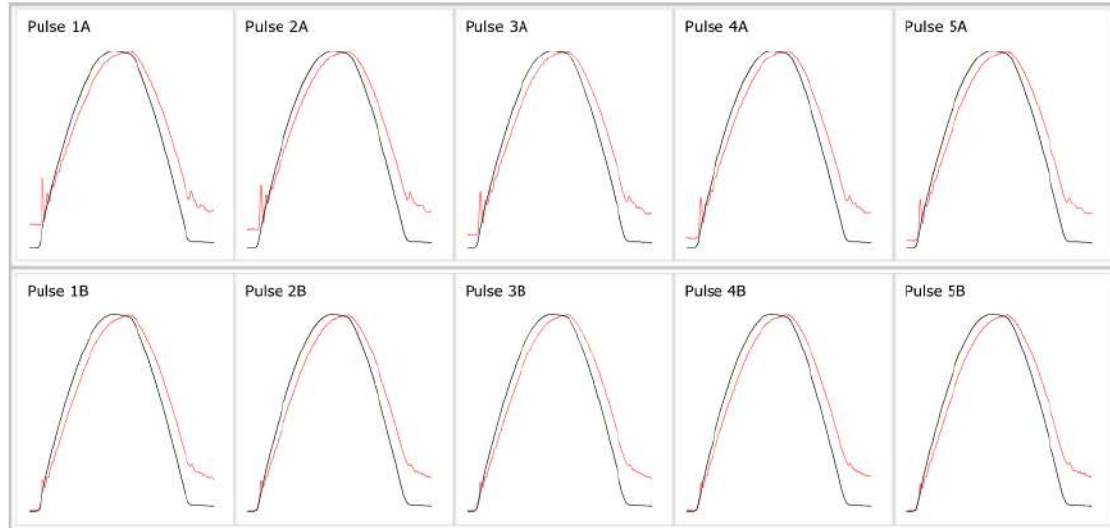
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 20 Jul 2022 @ 09:36
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M4 EP 02
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	64

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	6.102	6.102	6.103	6.103	6.103	6.102	6.192	6.191	6.192	6.192	6.193	6.192	6.147
Horizontal Stress (kPa)	602.9	602.9	603.0	603.1	603.0	603.0	611.8	611.8	611.8	611.8	612.0	611.8	607.4
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.64	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63	4.63	4.64
Load Rise Time (ms)	125	125	126	125	125	125	123	123	123	123	124	123	124
Measured Stiffness (MPa)	12690	12779	12924	12925	12947	12853	12916	12836	12871	12784	12796	12841	12847
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	13098	13189	13286	13341	13364	13256	13305	13222	13258	13167	13126	13216	13236

Data File M4 EP 02_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

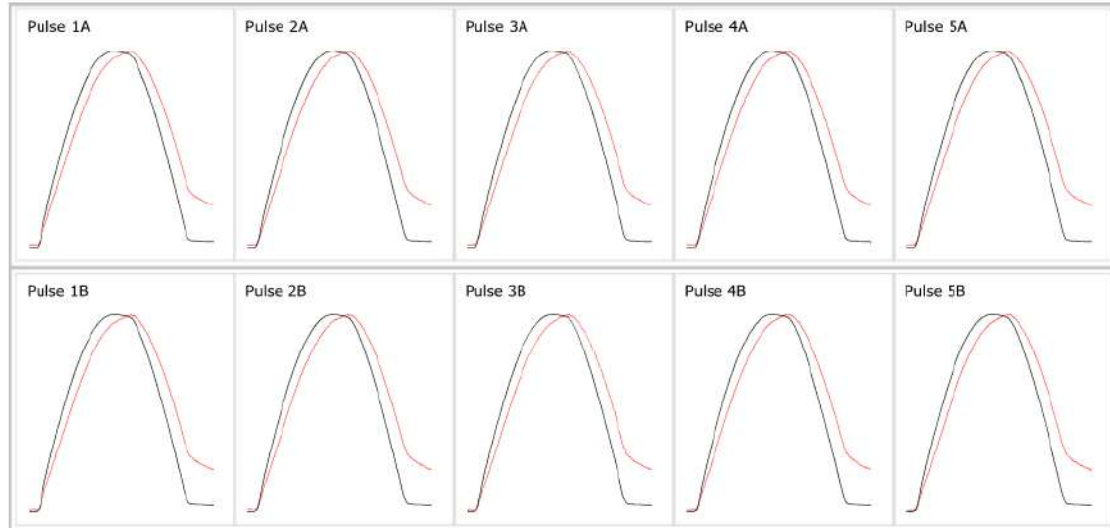
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 08:23
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M4 EP 02 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	64

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	5.144	5.145	5.146	5.146	5.146	5.145	5.054	5.055	5.056	5.055	5.054	5.055	5.100
Horizontal Stress (kPa)	508.3	508.4	508.4	508.4	508.4	508.4	499.4	499.5	499.5	499.5	499.4	499.5	503.9
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65	0.65	0.65	0.65	0.64	0.64
Horizontal Deformation (µm)	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.71	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.70
Load Rise Time (ms)	125	125	125	125	125	125	125	124	124	124	124	124	124
Measured Stiffness (MPa)	10565	10532	10488	10455	10437	10495	10413	10406	10405	10370	10395	10398	10447
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	10895	10860	10813	10779	10718	10813	10705	10739	10738	10702	10727	10722	10768

Data File M4 EP 02 20_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

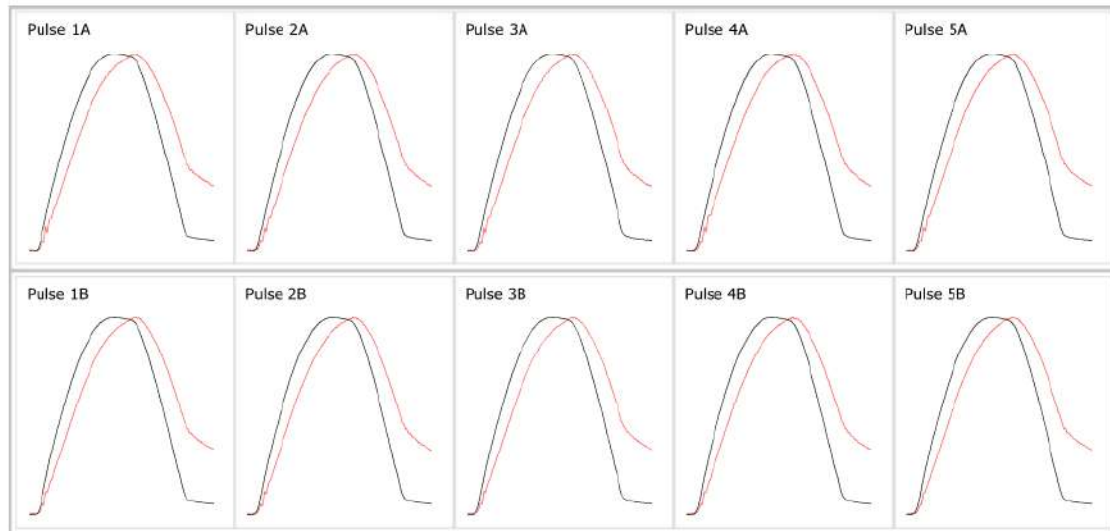
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 26 Jul 2022 @ 07:49
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M4 EP 02 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	64

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	2.610	2.611	2.610	2.612	2.610	2.610	2.501	2.501	2.501	2.501	2.501	2.501	2.556
Horizontal Stress (kPa)	257.9	258.0	257.9	258.1	257.9	257.9	247.1	247.1	247.1	247.1	247.1	247.1	252.5
Load-Area Factor	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.66	0.66	0.65	0.65	0.66	0.66	0.65
Horizontal Deformation (um)	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.98	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84	4.84	4.91
Load Rise Time (ms)	126	126	126	126	125	126	123	123	124	124	123	123	125
Measured Stiffness (MPa)	5083	5061	5075	5066	5027	5062	5021	5018	5005	4994	5006	5009	5036
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	5225	5202	5217	5207	5184	5207	5201	5196	5166	5154	5184	5180	5194

Data File M4 EP 02 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

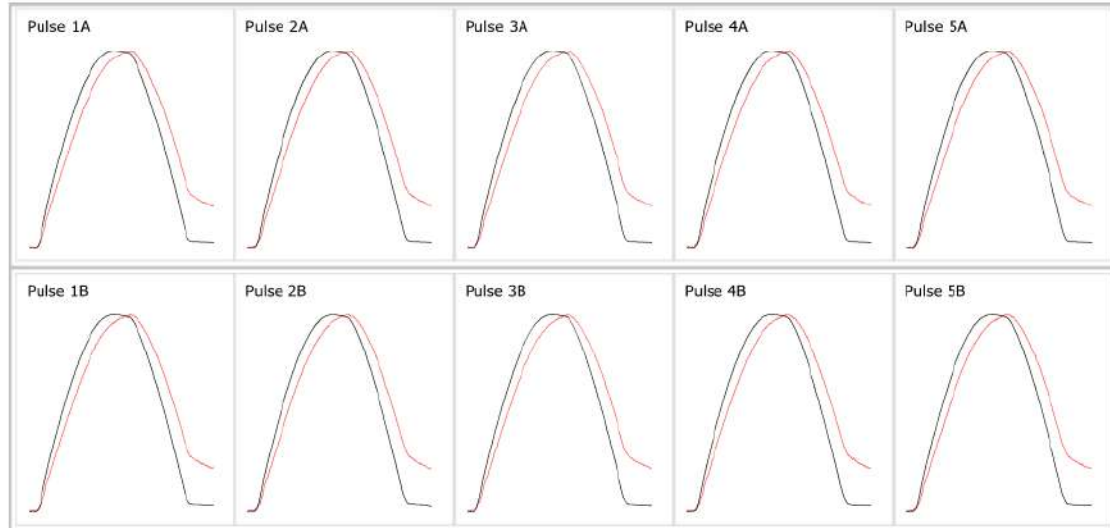
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 20 Jul 2022 @ 10:00
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M5 EP 01
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	5.917	5.916	5.915	5.916	5.915	5.916	5.574	5.577	5.567	5.571	5.571	5.572	5.744
Horizontal Stress (kPa)	601.9	601.9	601.8	601.9	601.8	601.9	567.1	567.4	566.4	566.8	566.8	566.9	584.4
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (µm)	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.68	4.49	4.49	4.49	4.49	4.49	4.49	4.59
Load Rise Time (ms)	116	116	116	116	116	116	124	124	124	125	125	125	120
Measured Stiffness (MPa)	12578	12556	12524	12481	12459	12520	12326	12300	12237	12262	12294	12284	12402
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	12911	12888	12855	12812	12789	12851	12632	12609	12547	12597	12630	12603	12727

Data File M5 EP 01_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

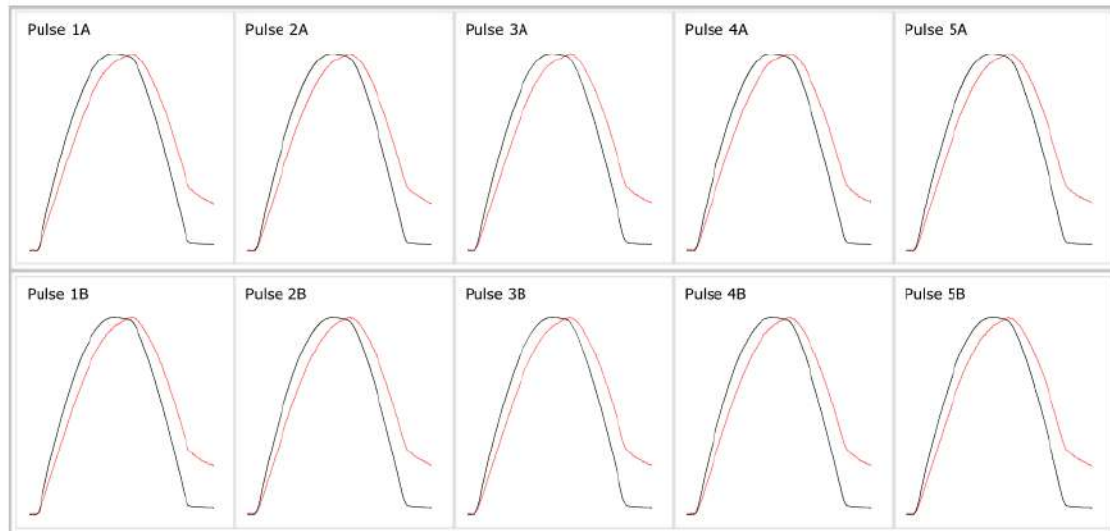
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 07:09
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M5 EP 02 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.610	4.610	4.611	4.611	4.610	4.611	4.621	4.621	4.621	4.621	4.621	4.621	4.616
Horizontal Stress (kPa)	465.7	465.6	465.7	465.8	465.7	465.7	466.8	466.7	466.7	466.8	466.8	466.8	466.2
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.65	0.64	0.64	0.65	0.65	0.64
Horizontal Deformation (um)	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.74	4.74	4.74	4.74	4.74	4.74	4.70
Load Rise Time (ms)	124	124	125	125	124	125	124	124	124	124	124	124	124
Measured Stiffness (MPa)	9810	9776	9753	9729	9753	9764	9641	9626	9632	9617	9601	9624	9694
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	10116	10082	10019	9994	10056	10053	9944	9930	9934	9918	9902	9926	9989

Data File M5 EP 02 20_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

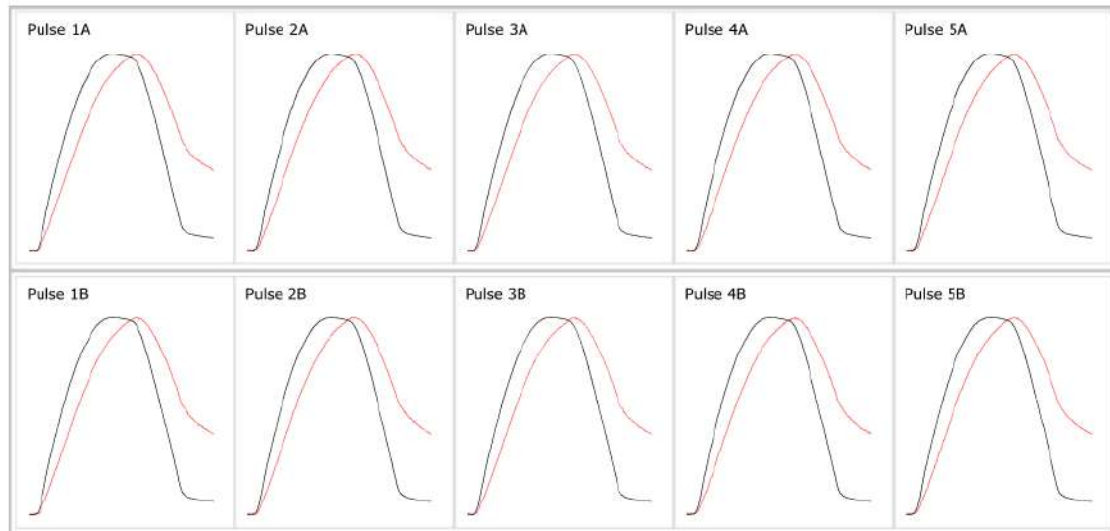
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 26 Jul 2022 @ 07:55
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M5 EP 01 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	2.059	2.060	2.059	2.060	2.060	2.060	1.999	1.997	1.999	1.998	1.998	1.998	2.029
Horizontal Stress (kPa)	209.5	209.6	209.4	209.6	209.6	209.5	203.4	203.2	203.4	203.3	203.3	203.3	206.4
Load-Area Factor	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.65	0.66	0.66	0.66	0.66
Horizontal Deformation (µm)	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.81	4.81	4.81	4.81	4.81	4.81	4.87
Load Rise Time (ms)	124	124	124	125	124	124	123	123	124	122	123	123	124
Measured Stiffness (MPa)	4188	4173	4172	4161	4140	4167	4165	4168	4151	4130	4141	4151	4159
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	4324	4330	4309	4302	4295	4312	4304	4309	4276	4282	4279	4290	4301

Data File M5 EP 01 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

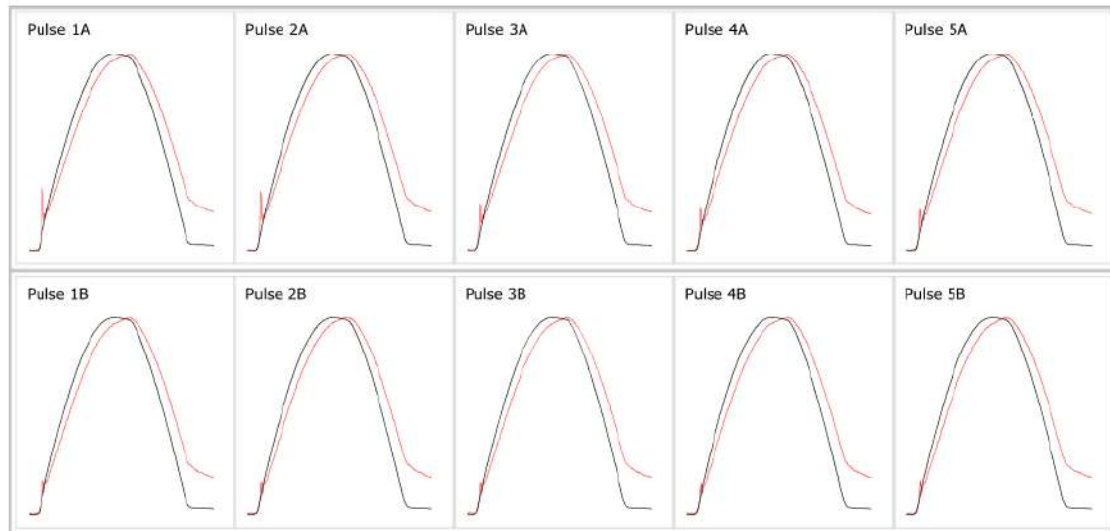
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 27 Jul 2022 @ 07:21
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M5 EP 02
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	15
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	6.099	6.100	6.103	6.102	6.102	6.101	5.823	5.823	5.823	5.823	5.824	5.823	5.962
Horizontal Stress (kPa)	616.8	616.9	617.1	617.1	617.0	617.0	588.8	588.8	588.8	588.9	589.0	588.9	602.9
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.63	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (µm)	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.66	4.42	4.42	4.42	4.42	4.42	4.42	4.54
Load Rise Time (ms)	125	124	125	124	124	125	123	123	123	123	123	123	124
Measured Stiffness (MPa)	12931	12925	12971	13051	13050	12986	13023	13070	13035	13054	13014	13039	13012
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	13267	13314	13306	13442	13441	13354	13432	13482	13446	13465	13421	13449	13402

Data File M5 EP 02_3.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

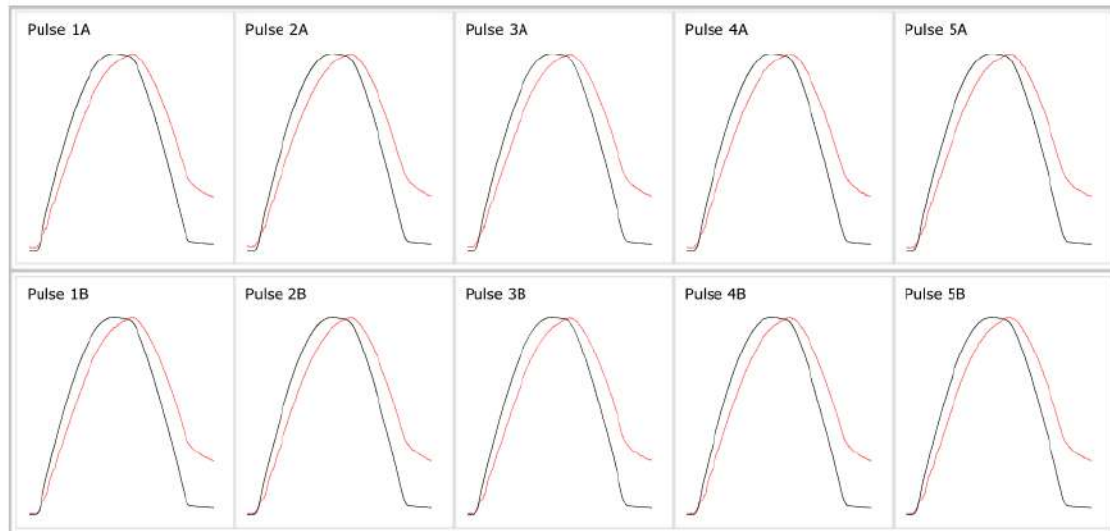
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 21 Jul 2022 @ 07:58
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M5 EP 02 20
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	20
Bulk Density (kg/m3)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (um)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	4.419	4.417	4.417	4.417	4.415	4.417	4.476	4.477	4.477	4.477	4.477	4.477	4.447
Horizontal Stress (kPa)	446.3	446.2	446.1	446.1	445.9	446.1	452.3	452.1	452.2	452.1	452.2	452.2	449.2
Load-Area Factor	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64
Horizontal Deformation (um)	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.65	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.75	4.70
Load Rise Time (ms)	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124	124
Measured Stiffness (MPa)	9410	9325	9303	9309	9300	9330	9322	9297	9290	9273	9291	9295	9312
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	9683	9596	9573	9580	9572	9601	9581	9556	9547	9531	9549	9553	9577

Data File M5 EP 02 20_2.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

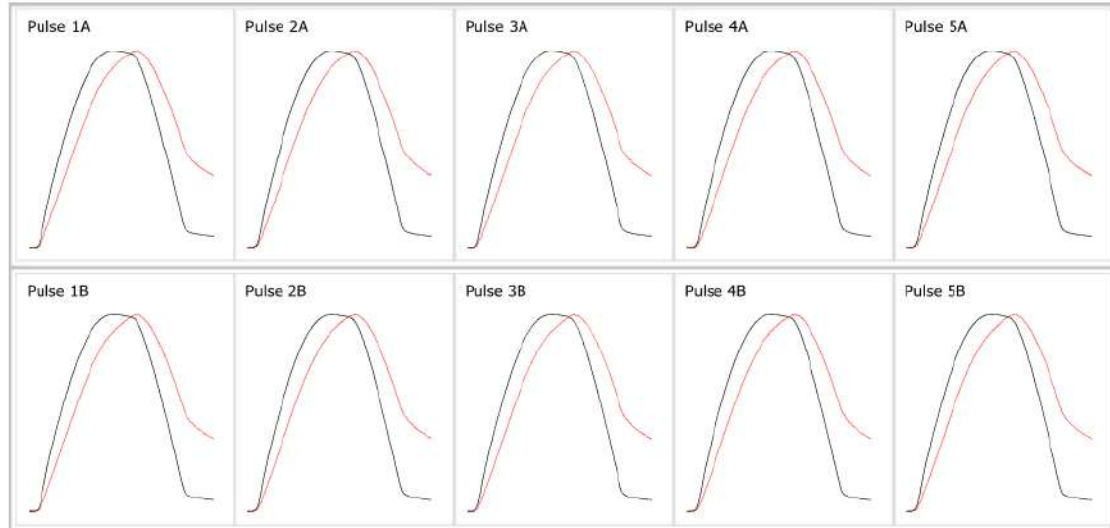
Stiffness Modulus: EN 12697-26: Annex C. April 2005

Date of Test 26 Jul 2022 @ 08:03
Report Number DRM - DR - 2022
Operator BEKKOUCHE BRAHIM
Specimen ID M5 EP 02 30
Client Name Melik

Lab Address LTP Sud

Test Temperature (°)	30
Bulk Density (kg/m ³)	0
Diameter (mm)	100
Thickness (mm)	63

Conditioning Pulses	10
Poissons Ratio	0.35
A & B Target Rise Time (ms)	124
A & B Target Deformation (µm)	5

**Test Results**

	1A	2A	3A	4A	5A	Mean A	1B	2B	3B	4B	5B	Mean B	Mean A&B
Load Peak to Peak (kN)	2.329	2.329	2.330	2.329	2.331	2.329	2.285	2.285	2.286	2.285	2.286	2.286	2.308
Horizontal Stress (kPa)	235.2	235.2	235.3	235.3	235.4	235.3	230.8	230.8	230.9	230.8	230.9	230.9	233.1
Load-Area Factor	0.65	0.66	0.65	0.65	0.66	0.65	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
Horizontal Deformation (µm)	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.92	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.94	4.93
Load Rise Time (ms)	126	125	126	126	125	126	124	124	124	124	124	124	125
Measured Stiffness (MPa)	4708	4689	4691	4667	4655	4682	4603	4592	4583	4585	4583	4589	4636
Adjusted Stiffness Modulus (MPa)	4849	4847	4832	4808	4811	4829	4761	4750	4739	4743	4739	4747	4788

Data File M5 EP 02 30_1.tdms

Notes Record details about the specimen in this area:

Bulk Density:
Poisson's Ratio:
Description of asphaltic material:
How it was mixed:
How it was compacted:
How bulk density was determined:
How the specimen was stored:

Signed

Date

cooper
technologies

