



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique

جامعة العربي التبسي – تبسة

Université Larbi Tébessi – Tébessa –  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Civil

## THÈSE DE DOCTORAT

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat LMD

En: Génie Civil

Spécialité: Matériaux, Structures et Géotechnique

Par: BOUCHOUK Khalil

Titre de la thèse

**Étude et comparaison de l'orniérage des chaussées  
bitumineuses avec le phénomène de fatigue**

Présentée et soutenue publiquement, le **04/07/ 2022**, devant le jury composé de :

BOUTAGOUGA Djamel	Professeur	Université de Tébessa	Président
NINOUH Tarek	Professeur	Université de Tébessa	Directeur de thèse
BELACHIA Mouloud	Professeur	Université de Guelma	Examineur
MESSABHIA Ali	Professeur	Université de Tébessa	Examineur
BOUACHA Nadjet	MCA	Université de Souk Ahars	Examinatrice
BOUFARH Rafik	MCA	Université de Tébessa	Examineur

2021/2022

# DÉDICACE

A ma mère

A la mémoire de mon père

À tous mes frères et ma sœur

À tous mes amis et collègues.....

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer .....

BOUCHOUK Khalil 04,07,2022

# Résumé

Le trafic croissant de poids lourds sur les réseaux routiers avec une forte augmentation de la charge totale roulante est à l'origine de l'apparition des problèmes majeurs de dégradation des chaussées flexibles qui demeurent, relativement, complexes surtout le phénomène d'orniérage (déformations permanentes longitudinales) sur les chaussées en enrobés bitumineux dans les zones à fort trafic et en site très difficile comme le sud algérien où les conditions climatiques sont très sévères. Ce phénomène d'orniérage est un problème complexe et qui crée un danger pour la sécurité des usagers de la route. Les enrobés bitumineux sont des matériaux hétérogènes composés d'un squelette granulaire formant l'ossature rigide et d'un liant hydrocarboné assurant la cohésion de l'ensemble. L'objectif de cette thèse est d'étudier le phénomène de l'orniérage et du fatigue à l'aide d'une série d'essais de performances mécaniques de l'effet du bitume modifié par un mélange de la poudre de caoutchouc des pneus de différents types, sections et marques (3, 6 et 9% selon le poids), sur la résistance des chaussées bitumineuses à l'orniérage, particulièrement, à haute température sans compromettre la résistance à la fatigue. Puis une comparaison des phénomènes de détérioration (rupture et fatigue) est faite. L'utilisation de pneus usés (MC) en complément du bitume a montré une amélioration de la sensibilité (indice de pénétration PI). Les résultats expérimentaux réalisés sur du béton bitumineux préparé avec du bitume modifié montrent une amélioration de la stabilité Marshall, une réduction de la plage d'orniérage sans compromettre le module de rigidité à moyenne température (une bonne résistance à la fatigue). Une forte amélioration du module de rigidité peut provoquer une fragilisation et augmenter le potentiel de fissuration du béton bitumineux, notamment à basse température. L'amélioration du module de rigidité de 28% (la valeur la plus élevée) est acceptable en raison du climat chaud de notre région.

Mots clés: bitume, orniérage, susceptibilité thermique, fatigue, chaussée, béton bitumineux

# Abstract

The increasing traffic of heavy goods vehicles on the road networks with a sharp increase in the total rolling load is at the origin of the appearance of major problems of deterioration of flexible pavements which remain relatively complex, especially the phenomenon of rutting (permanent longitudinal deformations) on asphalt pavements in high traffic areas and in very difficult sites such as southern Algeria where the climatic conditions are very severe. This phenomenon of rutting is a complex problem which creates a danger for the safety of road users. Bituminous mixes are heterogeneous materials composed of a granular skeleton forming the rigid framework and a hydrocarbon binder ensuring the cohesion of the whole. The objective of this thesis is to study the phenomenon of rutting and fatigue using a series of mechanical performance tests of the effect of bitumen modified by a mixture of rubber crumb tires. Of different types, sections and brands (3, 6 and 9% depending on the weight), on the resistance of bituminous pavements to rutting, particularly at high temperature without compromising fatigue resistance. Then a comparison of deterioration phenomena (rupture and fatigue) is made. The use of scrap tires (MC) in addition to bitumen showed an improvement in sensitivity (PI penetration index). Experimental results performed on asphalt concrete prepared with modified bitumen show improved Marshall stability, reduced rutting range without compromising stiffness modulus at medium temperatures (good fatigue resistance). A large improvement in the modulus of rigidity can cause embrittlement and increase the cracking potential of asphalt concrete, especially at low temperatures. The improvement in the modulus of rigidity of 28% (the highest value) is acceptable due to the hot climate of our region.

**Keywords:** bitumen, rutting, thermal susceptibility, fatigue, pavement, bituminous concrete.

## ملخص

تزايد حركة مركبات البضائع الثقيلة على شبكات الطرق مع الزيادة الحادة في إجمالي الحمولة هو السبب في ظهور المشاكل الرئيسية المتمثلة في تدهور الأرصفة المرنة التي تظل معقدة نسبياً، خاصة ظاهرة التجويف (التشوهات الطولية الدائمة) على الأرصفة الإسفلتية في مناطق الازدحام الشديد وفي المواقع الصعبة مثل جنوب الجزائر حيث الظروف المناخية قاسية للغاية. تعتبر ظاهرة التجويف مشكلة معقدة تخلق خطراً على سلامة مستخدمي الطريق. الخلائط البيتومينية عبارة عن مواد غير متجانسة تتكون من هيكل حبيبي يشكل إطاراً صلباً ورابط هيدروكربوني يضمن تماسك الكل. الهدف من هذه الرسالة دراسة ظاهرة التجويف والتعب باستخدام سلسلة من اختبارات الأداء الميكانيكي لتأثير البيتومين المعدل بمزيج من الفئات المطاطية من مختلف الأنواع والأقسام والعلامات التجارية للاطارات (3، 6 و9% حسب على الوزن)، على مقاومة الأرصفة البيتومينية للتجويف، خاصة في درجات الحرارة العالية دون المساومة على مقاومة التعب. ثم تم إجراء مقارنة بين ظواهر التدهور (التجويف والتعب). أظهر استخدام الفئات المطاطية (MC) كإضافة إلى البيتومين تحسناً في الحساسية (مؤشر اختراق PI). أظهرت النتائج التجريبية التي تم إجراؤها على الخرسانة البيتومينية المحضرة باستخدام البيتومين المعدل تحسناً في ثبات مارشال، وتقلص نطاق التجويف دون المساس بمعامل الصلابة عند درجات الحرارة المتوسطة (مقاومة جيدة للإجهاد). يمكن أن يؤدي التحسن الكبير في معامل الصلابة إلى التصلب المفرط وزيادة إمكانية تكسير الخرسانة الإسفلتية، خاصة في درجات الحرارة المنخفضة. التحسن في معامل الصلابة بنسبة 28% (أعلى قيمة) مقبول بسبب المناخ الحار في منطقتنا.

**الكلمات المفتاحية:** البيتومين، التشوه الدائم "التمزق"، القابلية للحرارة، التعب، الرصف، الخرسانة البيتومينية.

# Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné la force et le courage pour accomplir cette thèse.

Mes sincères remerciements pour le directeur de thèse, professeur NINOUH Tarek, pour ses précieux conseils et son investissement dans le suivi de cette thèse.

Je remercie, spécialement, le directeur du laboratoire de travaux publics du sud pour son accueil chaleureux durant mon passage au laboratoire LTPS à Ghardaïa. Je remercie également le directeur technique EL HADJ Omer, et le chef de service BOUCHERBA Mohammed et tout le personnel du laboratoire.

Mes remerciements s'étendent, également, à tous les membres du laboratoire LEEGO de la faculté de génie civil de l'USTHB, et surtout le directeur du laboratoire Professeur HADDADI Smail.

Je tiens à saisir cette occasion pour adresser mes profondes reconnaissances aux personnels de l'organisme de contrôle technique de travaux publics (CTTP).

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à tous les professeurs de l'université de Tébessa, l'université de Souk-Ahras, et l'université de Guelma qui m'ont enseigné et qui par leurs compétences m'ont soutenu dans la poursuite de mes études.

Je voudrais remercier tous les membres de jury pour le grand honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail. Je remercie Monsieur le président de jury BOUTAGOUGA Djamel Professeur à l'université de Tébessa, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse, et aussi les membres de jury: Monsieur MESSABHIA Ali professeur à l'université de Tébessa, Monsieur BELACHIA Mouloud professeur à l'université de Guelma, Madame BOUACHA Nadjet maître de conférences à l'université de Souk-Ahras, et Monsieur BOUFARH Rafik maître de conférences à l'université de Tébessa.

En fin, je voudrais, également, exprimer ma profonde gratitude, à tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce travail.

# TABLE DES MATIÈRES

Dédicace.....	i
Résumé en français.....	ii
Abstract .....	iii
Résumé en Arabe .....	iv
Remerciements .....	v
Table des matières.....	vi
Liste des figures .....	xi
Liste des tableaux .....	xiv
Liste des symboles et abréviations .....	xv

## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

## CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES CHAUSSÉES

I.1. Introduction.....	04
I.2. Les types de chaussées.....	04
I.2.1. Chaussées souples.....	04
I.2.2. Chaussées bitumineuses épaisses.....	05
I.2.3. Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques.....	06
I.2.4. Chaussées à structure mixte.....	06
I.2.5. Chaussées à structure inverse.....	06
I.2.6. Chaussées en béton de ciment “ rigides”.....	07
I.3. Présentation de l’enrobé bitumineux et les propriétés de ses composants.....	08
I.3.1. Définition de l’enrobé bitumineux.....	08
I.3.2. Granulats.....	08
I.3.2.1. Granularité.....	08
I.3.2.2. Caractéristiques intrinsèques des gravillons.....	09
I.3.2.3. Caractéristiques de fabrication des gravillons.....	10
I.3.2.4. Domaine d’utilisation.....	10
I.3.3. Liants hydrocarbonés.....	11
I.4. Influence des propriétés des matériaux sur les performances des chaussées souples (facteurs internes) .....	11
I.5. Influence des conditions climatiques et des contraintes de trafic sur les performances de la chaussée souple (facteurs externes) .....	12
I.6. Conclusion.....	15

## CHAPITRE II. PHÉNOMÈNE D'ORNIÉRAGE DES CHAUSSÉES SOUPLES

II.1. Introduction.....	16
II.2. Définition du phénomène d'orniérage.....	16
II.2.1. Les types d'orniérage .....	17
II.2.1.1. Orniérage des couches support.....	17
II.2.1.2. Orniérage des couches bitumineuses.....	17
II.3. Essais employés pour l'étude des déformations permanentes.....	18
II.3.1. Essais sur liants.....	18
II.3.1.1. Essais non homogènes.....	18
a. Température Bille Anneau (TBA) (NF T 66- 008) .....	18
b. Pénétrabilité (NF T 66-004) .....	19
II.3.1.2. Essais homogènes au rhéomètre.....	20
a. Essai 'Dynamic Shear Rheometer' DSR.....	20
b. Essai de fluage et viscosité à taux zéro.....	20
II.3.2. Essais sur mélanges bitumineux (non homogènes).....	22
II.3.2.1. Essai de compression Marshall.....	22
II.3.2.2. Essai de compression diamétrale sous chargement répété.....	22
II.3.2.3. Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG).....	24
II.3.2.4. Simulateurs de trafic.....	25
II.4. Facteurs influencent sur le comportement d'orniérage.....	27
II.4.1. Granulats: L'angularité et le squelette granulaire.....	27
II.4.2. Type de liant.....	27
II.4.3. Teneur en vide.....	28
II.5. Conclusion.....	28

## CHAPITRE III. PHÉNOMÈNE DE FATIGUE DES CHAUSSÉES SOUPLES

III.1. Introduction.....	30
III.2. Caractérisation du comportement à la fatigue.....	30
III.3. Types d'essais.....	31
III.4. Types de chargement.....	31
III.4.1. Sollicitation en déplacement.....	31
III.4.2. Sollicitation en force.....	31
III.5. Critères de fatigue.....	33



<b>III.5.1.</b> Critères sur les mesures globales.....	33
<b>III.5.1.1.</b> Critère classique: Nf-50%.....	33
<b>III.5.1.2.</b> Changement de concavité de la courbe de fatigue: N <sub>f-Co</sub> .....	33
<b>III.5.1.3.</b> Critère basé sur l'angle de phase N <sub>f-φmax</sub> .....	34
<b>III.5.2.</b> Critères sur les mesures locales.....	34
<b>III.5.2.1.</b> Critère basé sur les écarts relatifs des amplitudes de 3 extensomètres : N f-Δε <sub>i</sub> .....	35
<b>III.5.2.1.</b> Critère basé sur les écarts d'angles de phase de 3 extensomètres par rapport à celle de la déformation moyenne: N f-Δε <sub>i</sub> .....	35
<b>III.6.</b> Sollicitation des couches routières en enrobés bitumineux.....	36
<b>III.6.1.</b> Effet du trafic.....	36
<b>III.6.2.</b> Effet de la température.....	37
<b>III.7.</b> Comportements des matériaux bitumineux.....	38
<b>III.7.1.</b> Grandes classes de comportement.....	38
<b>III.7.2.</b> Comparaison de l'orniérage des chaussées bitumineuses avec le phénomène de fatigue.....	39
<b>III.7.2.1.</b> Nature incrémentale des déformations permanentes et comparaisons avec le phénomène de fatigue.....	39
<b>III.8.</b> Conclusion.....	41
<b>CHAPITRE IV. MODIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES D'ENROBÉS BITUMINEUX</b>	
<b>IV.1.</b> Introduction.....	42
<b>IV.2.</b> Insuffisances des mélanges bitumineux.....	43
<b>IV.3.</b> Les objectifs de la modification.....	44
<b>IV.4.</b> Mécanisme de la modification.....	45
<b>IV.5.</b> Principaux agents utilisés dans la modification des bitumes.....	48
<b>IV.5.1.</b> Les polymères thermodurcissables.....	48
<b>IV.5.2.</b> Les polymères thermoplastiques.....	48
<b>IV.5.3.</b> Les fibres.....	49
<b>IV.6.</b> La notion de la compatibilité.....	50
<b>IV.7.</b> Stabilité au stockage.....	51
<b>IV.8.</b> Amélioration de la résistance des couches bitumineuses au phénomène	51

d'orniérage en modifiant le liant hydrocarboné.....	
<b>IV.9. Conclusion.....</b>	<b>54</b>

## **CHAPITRE V. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE**

<b>V.1. Introduction.....</b>	<b>55</b>
<b>V.2. Modification du bitume.....</b>	<b>56</b>
<b>V.2.1. Identification des additives utilisés.....</b>	<b>57</b>
<b>V.2.1.1. Description d'additive 1.....</b>	<b>57</b>
<b>V.2.1.2. Description d'additive 2.....</b>	<b>57</b>
<b>V.2.1.3. Description d'additive 3.....</b>	<b>57</b>
<b>V.2.1.4. Description d'additive 4.....</b>	<b>58</b>
<b>V.2.1.5. Description d'additive 5.....</b>	<b>58</b>
<b>V.2.2. Présentation des matériels.....</b>	<b>58</b>
<b>V.2.3. Résultats et discussions.....</b>	<b>58</b>
<b>V.2.4. Stabilité au stockage.....</b>	<b>63</b>
<b>V.3. Essais sur enrobes bitumineux .....</b>	<b>64</b>
<b>V.3.1. Caractéristique des constituants.....</b>	<b>64</b>
<b>V.3.2. Formulation d'enrobé bitumineux.....</b>	<b>66</b>
<b>V.3.3. Composition granulaire.....</b>	<b>68</b>
<b>V.3.4. Teneur en liant.....</b>	<b>69</b>
<b>V.3.5. Performance mécanique de mélange bitumineux témoin.....</b>	<b>70</b>
<b>V.3.5.1. Essai Marshall.....</b>	<b>71</b>
<b>V.3.5.2. Analyse empirique d'enrobé bitumineux.....</b>	<b>72</b>
<b>V.4. Matériaux et méthodes.....</b>	<b>75</b>
<b>V.4.1. Matériaux.....</b>	<b>75</b>
<b>V.4.1.1. Bitume.....</b>	<b>75</b>
<b>V.4.1.2. Agrégats.....</b>	<b>75</b>
<b>V.4.1.3. Agent de modification (mélange de caoutchouc provenant de pneus en fin de vie).....</b>	<b>75</b>
<b>V.4.2. Caractérisation.....</b>	<b>76</b>
<b>a. Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR).....</b>	<b>76</b>
<b>b. Caractéristiques de la microstructure.....</b>	<b>77</b>

c. Analyse thermique gravimétrique (ATG).....	78
<b>V.4. 3. Méthodes (Fabrication des échantillons de liant caoutchouc).....</b>	<b>79</b>
<b>V.5. Résultats et discussions.....</b>	<b>80</b>
<b>V.5.1. Sensibilité à la température.....</b>	<b>80</b>
<b>V.5.2. Propriétés physiques conventionnelles.....</b>	<b>82</b>
<b>V.5.3. Formulation de béton bitumineux.....</b>	<b>82</b>
<b>V.5.4. Module complexe de rigidité .....</b>	<b>86</b>
<b>V.5.5. Résistance à l'orniérage.....</b>	<b>92</b>
<b>V.6. Conclusion.....</b>	<b>97</b>
Conclusion générale.....	99
Références bibliographiques .....	102
Annexes .....	I

# LISTE DES FIGURES

<b>Fig. I.1.</b> Chaussées souples [LCPC, 1994].....	04
<b>Fig. I.2.</b> Constitution d'une structure chaussée type.....	05
<b>Fig. I.3.</b> Chaussée bitumineuse épaisse [LCPC, 1994].....	05
<b>Fig. I.4.</b> Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques [LCPC, 1994].....	06
<b>Fig. I.5.</b> Chaussée à structure mixte [LCPC, 1994].....	06
<b>Fig. I.6.</b> Chaussée à structure inverse [LCPC, 1994].....	06
<b>Fig. I.7.</b> Dalles non goujonnées avec fondation [LCPC, 1994].....	07
<b>Fig. I.8.</b> Dalles goujonnées avec fondation [LCPC, 1994].....	07
<b>Fig. I.9.</b> Dalles sans fondation [LCPC, 1994].....	07
<b>Fig. I.10.</b> Béton armé continu 1 [LCPC, 1994].....	07
<b>Fig. I.11.</b> Béton armé continu 2 [LCPC, 1994].....	08
<b>Fig. I.12.</b> Exemple de courbe granulométrique.....	09
<b>Fig. II.1.</b> Orniérage de la chaussée. ....	17
<b>Fig. II.2.</b> Orniérage du sol support.....	17
<b>Fig. II.3.</b> Orniérage des couches bitumineuses de surface.....	18
<b>Fig. II.4.</b> Principe de l'essai de détermination de La Température Bille Anneau. ....	19
<b>Fig. II.5.</b> Essai de pénétrabilité.....	19
<b>Fig. II.6.</b> Détermination de $\eta_0$ à partir des essais de fluage et de relaxation.....	21
<b>Fig. II.7.</b> Exemple de rhéomètre.....	21
<b>Fig. II.8.</b> Appareil d'essai et instrument de l'éprouvette.....	23
<b>Fig. II.9.</b> Schéma du mouvement de l'éprouvette.....	24
<b>Fig. II.10.</b> Orniéreur type LPC.....	26
<b>Fig. III.1.</b> La courbe de Wöhler.....	31
<b>Fig. III.2.</b> Distinction des trois phases dans un essai de fatigue (adapté de (Di Benedetto, et al. 2004)).....	32
<b>Fig. III.3.</b> Définition du critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie $N_f-50\%$ .....	33
<b>Fig. III.4.</b> Evolution de module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue $N_f-Co$ (Test -SG3B1 (5.7)0FT).....	34
<b>Fig. III.5.</b> Evolution de l'angle de phase du module complexe durant l'essai de	34

fatigue et critère de fatigue $N_{f-\phi_{max}}$ (Test - SG3B1(5.7)0FT).....	
<b>Fig. III.6.</b> Critère basé sur les valeurs $ \Delta\epsilon_i  \geq 25\%$ (Test - SG3B1 (5.7)0FT).....	35
<b>Fig. III.7.</b> Critère basé sur les valeurs $ \Delta\phi_i  \geq 5^\circ$ (Test - SG3B1(5.7)0FT).....	36
<b>Fig. III.8.</b> Schématisation des sollicitations induites par le trafic sous une roue (Di Benedetto & Corté, 2005).....	37
<b>Fig. III.9.</b> Schématisation des sollicitations induites par la température dans les structures routières (Di Benedetto & Corté, 2005).....	38
<b>Fig. III.10.</b> Comportements des enrobés bitumineux à température fixée, ( $\epsilon$ ) déformation - (N) nombre de chargements (Di Benedetto & Corté, 2005).....	39
<b>Fig. III.11.</b> Distinction entre le phénomène d’orniérage et la fatigue.....	40
<b>Fig. IV.1.</b> Méthodologie des processeurs de modification.....	43
<b>Fig. IV.2.</b> Mécanismes de la dispersion d’un copolymère (polystyrène –butadiène) dans le bitume [W. BOUGHAMZA, 2008] .....	47
<b>Fig. V.1.</b> Influence de type et de teneur en ajout sur le point de ramollissement de bitume (2).....	59
<b>Fig. V.2.</b> Influence de type et de teneur en ajout sur la pénétration de bitume (2).....	60
<b>Fig. V.3.</b> Influence de type et de teneur en ajout sur l’indice de pénétration de bitume (2) .....	61
<b>Fig. V.4.</b> Influence de type et de teneur en ajout sur le point de ramollissement de bitume (1).....	62
<b>Fig. V.5.</b> Influence de type et de teneur en ajout sur la pénétration de bitume (1).....	62
<b>Fig. V.6.</b> Influence de type et de teneur en ajout sur l’indice de pénétration de bitume (1) .....	63
<b>Fig. V.7.</b> La courbe de mélanges comparativement au fuseau de référence.....	69
<b>Fig. V.8.</b> Essai la presse à cisaillement giratoire.....	73
<b>Fig. V.9.</b> Extraction d’éprouvette de PCG.....	73
<b>Fig. V.10.</b> Courbe de compacité en fonction de nombre de girations des différents mélanges.....	74
<b>Fig. V.11.</b> Mélange de caoutchouc de (ELT) inférieur à 80 $\mu\text{m}$ .....	76
<b>Fig. V.12.</b> Spectres FTIR du mélange de caoutchouc.....	77
<b>Fig. V.13.</b> Résultats EDX du mélange de caoutchouc.....	78
<b>Fig. V.14.</b> Analyse thermogravimétrique (ATG) d'un échantillon MC.....	79
<b>Fig. V.15.</b> Modification du bitume.....	80

<b>Fig. V.16.</b> L'indice de pénétration du bitume modifié.....	82
<b>Fig. V.17.</b> Gradation globale combinée.....	83
<b>Fig. V.18.</b> Malaxeur à température 165 °C .....	83
<b>Fig. V.19.</b> Mélange bitumineux après malaxage .....	84
<b>Fig. V.20.</b> Transporte du mélange bitumineux .....	84
<b>Fig. V.21.</b> Éprouvette de l'essai Marshall.....	86
<b>Fig. V.22.</b> Éprouvette dans la presse de compression Marshall.....	85
<b>Fig. V.23.</b> La plaque dans le compacteur.....	87
<b>Fig. V.24.</b> Les étapes de l'acquisition trapézoïdale.....	88
<b>Fig. V.25.</b> Opération de coupage d'une plaque de fatigue.....	88
<b>Fig. V.26.</b> Fixsation des éprouvettes trapézoïdales dans la basse.....	89
<b>Fig. V.27.</b> Les éprouvettes trapézoïdales placées dans la machine de flexion.....	89
<b>Fig. V.28. (a)</b> Variation du module de rigidité du mélange témoin en fonction de la température et de la fréquence.....	90
<b>Fig. V.28. (b)</b> Variation du module de rigidité du mélange 3% RM en fonction de la température et de la fréquence.....	90
<b>Fig. V.28. (c)</b> Variation du module de rigidité du mélange 6% RM en fonction de la température et de la fréquence.....	91
<b>Fig. V.28.(d)</b> Variation du module de rigidité du mélange 9% RM en fonction de la température et de la fréquence.....	91
<b>Fig. V.29.</b> Mesure de la profondeur d'orniérage.....	93
<b>Fig. V.30.</b> Éprouvette dans l'orniéreur LCPC.....	94
<b>Fig. V.31.</b> Variation de la profondeur d'orniérage en fonction de la teneur en MR....	94
<b>Fig. V.32.a.</b> Variation de la profondeur d'orniérage en fonction du type d'addition...	95
<b>Fig. V.32.b.</b> Comparaison de la profondeur d'orniérage des trois meilleurs résultats.....	95
<b>Fig. V.33.</b> Éprouvette après la fin de l'essai orniérage.....	96

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1.</b> Classification suivant la granularité.....	09
<b>Tableau V.1.</b> Propriétés physique des bitumes.....	56
<b>Tableau V.2.</b> Caractéristiques techniques d'additive (1).....	57
<b>Tableau V.3.</b> Propriétés de polyéthylène de haute et de faible densité HDPE (HMA 025) LDPE.....	57
<b>Tableau V.4.</b> Propriétés de dioxyde de titane.....	58
<b>Tableau V.5.</b> Propriétés du bitume (2) modifié (modification à 1300t/min pendant 2h).....	59
<b>Tableau V.6.</b> Résultats des Analyses granulométriques des agrégats utilisés.....	65
<b>Tableau V.7.</b> Caractéristiques des granulats.....	65
<b>Tableau V.8.</b> Analyse chimique sommaire des granulats.....	66
<b>Tableau V.9.</b> Fuseau de référence de BBSG 0/14.....	68
<b>Tableau V.10.</b> Teneur en liant adopté.....	70
<b>Tableau V.11.</b> Performances PCG des enrobés classiques.....	71
<b>Tableau V.12.</b> Performances Marshall des enrobés classiques.....	71
<b>Tableau V.13.</b> Résultats d'essai PCG.....	73
<b>Tableau V.14.</b> Les propriétés physiques du bitume.....	75
<b>Tableau V.15.</b> Propriétés physiques et thermiques des déchets de caoutchouc usagés.....	76
<b>Tableau V.16.</b> L'indice de pénétration du bitume modifié.....	81
<b>Tableau V.17.</b> La moyenne des résultats du test Marshall.....	85

# LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

(MC)	Mélange de caoutchouc	(BBSG)	Béton bitumineux semi grenu
(RM)	Rubber Mixture of different types, sections and brands of end of life Tyres	(MQ)	Quotient Marshall = (stabilité / fluage)
(PI)	Indice de Pénétration	(LTPS)	Laboratoire de travaux public du sud
(CRMB)	Crumb Rubber Modified Bitumen	(AP)	Amorphous Polialfaolefin
(SEM)	Scanning Electron Microscopy	(SE)	cellulosed fiber
(FTIR)	Fourier Transform Infrared Spectroscopy	(BE)	cellulosed fiber mixed with bitumen
(EDX)	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy	(PE)	PolialEfin
(ATG)	Analyse thermique gravimétrique	(SBS)	Stiren-Butadien-Stiren copolymer
(L.A)	L'essai Los Angeles	(M.D.E)	L'essai Micro Deval
(TBA)	Essai de Température Bille Anneau	(DSR)	L'essai 'Dynamic Shear Rheometer'



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

La route joue un rôle important dans le développement socio-économique de pays. Pour qu'une économie se développe, que de la richesse soit créée et que la prospérité soit partagée, il faut que les personnes et les biens puissent circuler. Les structures routières sont soumises à différents types de sollicitations : les chargements mécaniques causés par le trafic et les sollicitations climatiques. Pour assurer le rôle de voie de liaison, les chaussées doivent présenter des propriétés permettant la circulation des usagers dans des conditions optimales de sécurité et de confort.

Devant l'augmentation de niveau de trafic, des camions plus lourds, de nouveaux modèles d'essieux et une augmentation de la pression des pneus ont été ajoutés aux conditions déjà sévères de charge et d'environnement sur le réseau routier. Prolonger la durée de vie des chaussées est une préoccupation, aujourd'hui, prioritaire et indispensable qui permet: une réduction des entraves à la circulation causées par la multiplication des chantiers de grande envergure, une réduction des interventions de reconstruction et de renforcement qui engendrent des risques d'accident et des effets de pollution comme le bruit et la poussière.

Pour la rationalisation du budget d'entretien des réseaux routiers, il est nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux de chaussées et en particulier, le bitume et les enrobés bitumineux pour répondre aux effets du changement climatique et du fort volume de circulation. Cela s'applique non seulement à la conception des chaussées et construction de nouvelles chaussées, mais aussi sur l'entretien et réhabilitation des chaussées en service. Pour cela il est nécessaire d'adopter de nouvelles procédures et de nouveaux matériaux, afin de protéger ou d'entretenir la structure des chaussées existantes et, en outre, de développer une conception appropriée pour les nouveaux ouvrages routiers.

Les mélanges bitumineux sont les principaux matériaux utilisés pour construire la couche de surface de chaussées. La fatigue et l'orniérage sont les deux principaux problèmes de rupture dans les chaussées souples qui affectent l'aptitude au service de la chaussée bitumineuse. Les propriétés du bitume ont un effet direct sur le contrôle de la fatigue et des problèmes d'orniérage [1]. L'orniérage et la fissuration de surface se produisent dans la plupart des chaussées avant leur date initiale prévue concevoir des vies. Cela réduira non seulement la durée de vie de la route, mais influencera, également, la sécurité des usagers de la route [2].

L'enrobé bitumineux est un matériau complexe qui se comporte, différemment, avec la température et le temps de chargement. Les variations thermiques entraînent des changements de rigidité du mélange. En effet, à basse température, les matériaux bitumineux sont rigides et fragiles tandis qu'à haute température leur rigidité diminue et leur comportement devient ductile.

En appliquant le concept de développement durable dans le domaine de la construction routière, ce dernier nécessite de minimiser l'utilisation de matière première naturelle non renouvelable et la construction d'un revêtement routier à très longue durée de vie.

L'objectif de ce travail est fondé sur des études expérimentales, et il comporte deux volets principaux:

1) Évaluation de l'influence des conditions climatiques et des contraintes de trafic sur le comportement de la structure de chaussées, tout en étudiant les phénomènes de fatigue et d'orniérage des chaussées bitumineuses.

2) Détermination de l'effet de quelques ajouts sur l'amélioration des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux afin d'améliorer les caractéristiques des chaussées souples, dans le but de diminuer la portée des phénomènes de dégradations : fatigue et orniérage.

Pour réaliser cette étude nous avons effectué une série de tests dans trois laboratoires qui possèdent l'équipement nécessaire pour effectuer tous les essais :

- Laboratoire de recherche en Génie civil, de l'université des sciences et de la technologie Houari-Boumediène (USTHB), Alger ;
- Laboratoire de contrôle technique des travaux publics CTTTP- Alger ;
- Laboratoire des travaux publics du Sud LTPS- Ghardaïa.

Durant ce travail expérimental 446 éprouvettes en béton bitumineux sont préparées et testées (environ 2000 kg de granulat et 220 kg de bitume).

Le manuscrit de la thèse est composé de cinq chapitres, une conclusion générale et des annexes, qui sont organisés comme suit:

Le premier chapitre « Généralités sur les chaussées », est consacré à la recherche bibliographique sur les différents types des chaussées, sur les caractéristiques des granulats des liants hydrocarbonés, et l'influence des propriétés de ces matériaux sur les caractéristiques des chaussées souples, et à la fin de ce chapitre une présentation de l'effet des conditions climatiques et des contraintes de trafic sur les performances de la structure de chaussée.

Le deuxième chapitre « Phénomène d'orniérage des chaussées souples » porte sur l'étude du phénomène d'orniérage et l'explication des mécanismes de son apparition. Il comporte aussi une présentation des différents types d'orniérage, les facteurs influençant sur le comportement de ce dernier et les essais employés pour l'étude des déformations permanentes au laboratoire et in-situ.

Dans le troisième chapitre « phénomène de fatigue des chaussées souples » un exposé sur les différentes techniques de caractérisation du comportement à la fatigue, les essais au laboratoire qui caractérisent la fatigue des enrobés bitumineux, les modes de sollicitations utilisés pour évaluer le comportement et les critères de fatigue. Ainsi que les diverses sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques auxquelles sont soumises les structures de chaussée durant sa vie. Et à la fin du chapitre, nous avons présenté une comparaison de l'orniérage des chaussées bitumineuses avec le phénomène de fatigue.

Le quatrième chapitre « Modification des caractéristiques d'enrobé bitumineux » est dédié pour étudier les techniques et méthodologies des processeurs de modification des produits bitumineux, à travers la recherche bibliographique, nous avons présenté les processus, les objectifs et le mécanisme de la modification, les facteurs influençant les propriétés de bitume modifié, la notion de la compatibilité et la stabilité au stockage.

Dans le cinquième chapitre « Étude expérimentale » nous exposons les différentes techniques expérimentales qui ont été utilisées lors de l'élaboration de cette étude pour les différents matériaux utilisés dans ce travail : le bitume, le polymère et les granulats. On retrouve notamment le procédé de modification du bitume par le polymère sous forme de poudrette de caoutchouc.

La conclusion générale synthétise les principaux apports de la thèse et présente quelques perspectives de développement liées à l'approche utilisée. La thèse est complétée par des annexes présentant en détail l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus.

## CHAPITRE I

### GÉNÉRALITÉS SUR LES CHAUSSEES

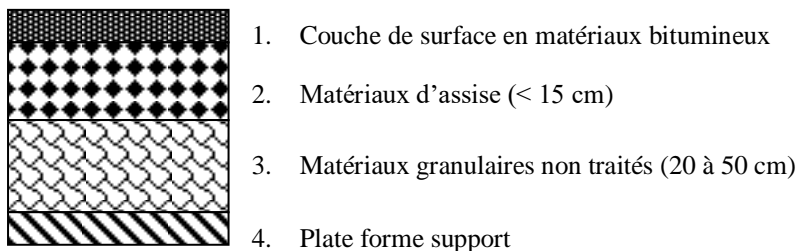
#### I.1. Introduction

Une chaussée routière est, en général, définie [NF P 98086] comme une structure composite réalisée par une superposition des couches des matériaux granulaires, le tout reposant sur un sol support. Les structures de chaussées routières sont soumises, en service, à des sollicitations très complexes. Le trafic et le climat ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées. La couche de roulement qui est la première couche exposée aux différentes contraintes, joue un rôle capital dans la structure de la chaussée, car elle participe à la durabilité de la structure par la résistance aux sollicitations exercées par le trafic ainsi que par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau [120]. D'après le guide technique SETRA-LCPC, 1994 et le catalogue SETRA-LCPC, 1998, les structures de chaussées sont regroupées en six familles principales ou catégories, respectivement: les chaussées souples, les chaussées bitumineuses épaisses, les chaussées semi-rigides ou à assise traitée aux liants hydrauliques, les chaussées mixtes, les chaussées à structures inverses et les chaussées rigides [3].

#### I.2. Types de chaussées

##### I.2.1. Chaussées souples

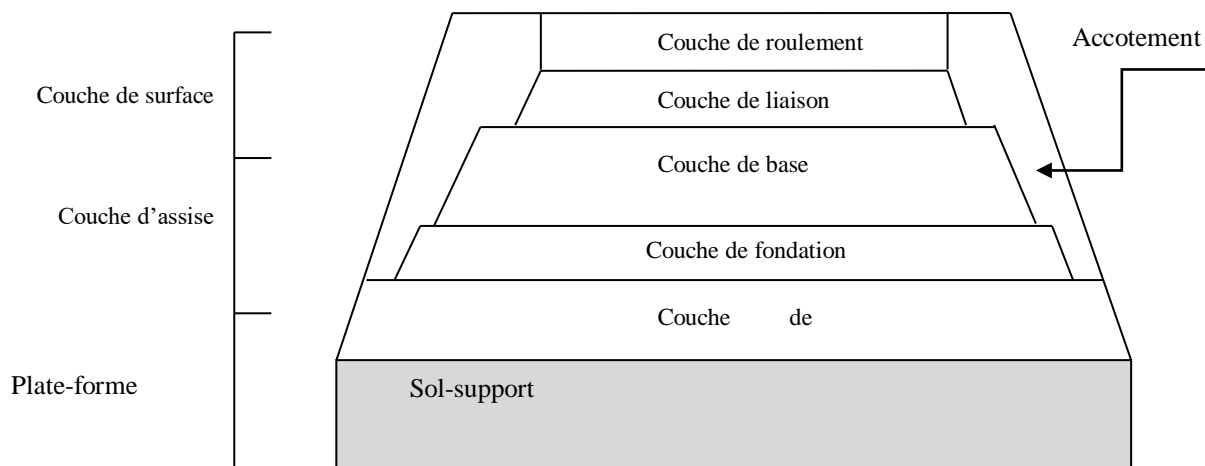
Ces structures comportent une couverture bitumineuse, relativement, mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.



**Fig. I.1.** Chaussées souples

La structure d'une chaussée (figure I.1) comprend trois types de couches avec d'éventuelles sous-couches, respectivement:

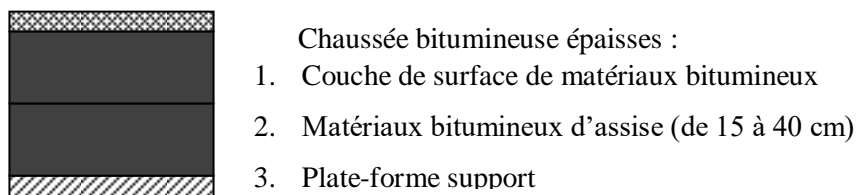
- ✓ La couche de surface qui est en contact avec la circulation. Elle peut être composée de deux sous-couches: une couche de liaison et une couche de roulement.
- ✓ La couche d'assise qui est l'élément structurel principal de la chaussée. Elle se décompose en deux sous-couches: la couche de fondation et la couche de base.
- ✓ La couche de forme, qui fait la transition entre la structure de la chaussée et la partie supérieure des terrassements. Son interface avec la couche d'assise est dénommée plate-forme de chaussée. Sa fonction est de répartir sans dommage sur le sol les efforts dus à la circulation des véhicules. Son interface avec le sol support est dénommée arase de terrassement [4].



**Fig. I.2.** Constitution d'une structure chaussée type

### I.2.2. Chaussées bitumineuses épaisses

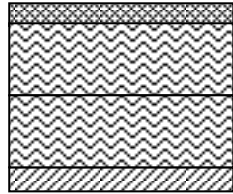
Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.



**Fig. I.3.** Chaussée bitumineuse épaisse

### I.2.3. Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ces structures sont qualifiées couramment de “semi-rigides”. 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.

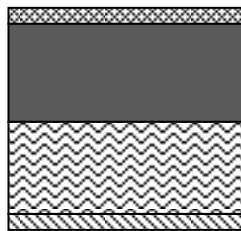


- Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques:
1. Couche de surface de matériaux bitumineux (6 à 14 cm)
  2. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 50 cm)
  3. Plate-forme support

**Fig. I.4.** Chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

### I.2.4. Chaussées à structure mixte

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base: 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l’épaisseur de matériaux bitumineux à l’épaisseur totale de chaussée soit de l’ordre de 1/2 [4].

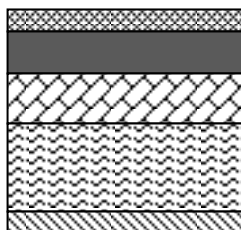


- Chaussée à structure mixte:
1. Couche de surface de matériaux bitumineux
  2. Matériaux bitumineux d’assise (10 à 20 cm)
  3. Matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
  4. Plate-forme support

**Fig. I.5.** Chaussée à structure mixte

### I.2.5. Chaussées à structure inverse

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d’une quinzaine de centimètres d’épaisseur totale, sur une couche de grave non traité (environ 12 cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L’épaisseur totale atteint 60 à 80 cm [4].

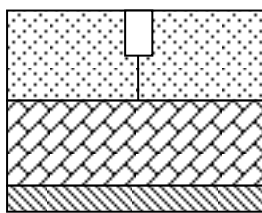


- Chaussée à structure inverse:
1. Couche de surface de matériaux bitumineux
  2. Matériaux bitumineux d’assise (10 à 20 cm)
  3. Matériaux granulaires non traités (~ 12 cm)
  4. Matériaux traitée aux liants hydrauliques (20 à 40 cm)
  5. Plate-forme support

**Fig. I.6.** Chaussée à structure inverse

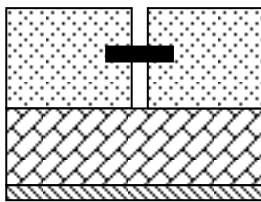
### I.2.6. Chaussées en béton de ciment ‘rigides’

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur qui sert de couche de roulement éventuellement recouverte d'une couche mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment), soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques. La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (“béton armé continu”), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints. Les figures de I.7 à I.11 présentent les structures de chaussée en béton de ciment.



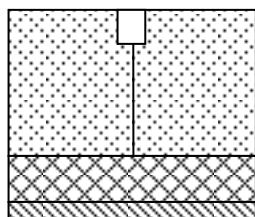
- Dalles non goudonnées avec fondation :
1. Béton de ciment (20 à 28 cm)
  2. Béton maigre (12 à 18 cm) ou matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 20 cm)
  3. Plate-forme support

**Fig. I.7.** Dalles non goudonnées avec fondation



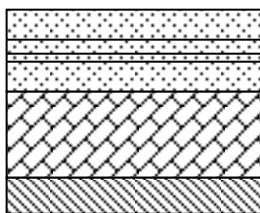
- Dalles goudonnées avec fondation :
1. Béton de ciment (17 à 23 cm)
  2. Béton maigre
  3. Plate-forme support

**Fig. I.8.** Dalles goudonnées avec fondation



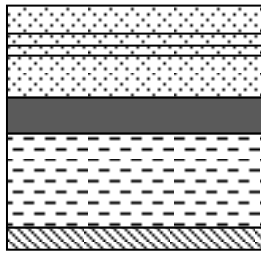
- Dalles sans fondation :
1. Béton de ciment (28 à 39)
  2. Couche drainante (matériaux granulaires ou géotextiles).
  3. plate-forme support

**Fig. I.9.** Dalles sans fondation



- Béton armé continu (1) :
1. Béton de ciment (18 à 24 cm)
  2. Béton maigre (12 à 14 cm)
  3. Plate-forme support

**Fig. I.10.** Béton armé continu 1



Béton armé continu (2) :

1. Biton de ciment (18 à 24 cm)
2. Matériaux bitumineux d'assise (5 cm)
3. Sable traité aux liants hydrauliques (50 à 60 cm)
4. Plate-forme support

**Fig. I.11.** Béton armé continu 2

Ce travail porte sur l'étude de chaussées souples pour raison que toutes les chaussées routières nationales sont des chaussées souples, c'est aussi le type le plus courant au monde.

### **I.3. Présentation de l'enrobé bitumineux et les propriétés de ses composants**

#### **I.3.1. Définition de l'enrobé bitumineux**

L'enrobé bitumineux est un matériau composite constitué d'un mélange de granulats (grave, sable, fine), d'un liant hydrocarboné (bitume, en général 5 à 7% en masse et éventuellement des additifs). Le liant hydrocarboné confère la cohésion tandis que les propriétés mécaniques spécifiques de l'ensemble sont assurées par le squelette minéral.

#### **I.3.2. Granulats**

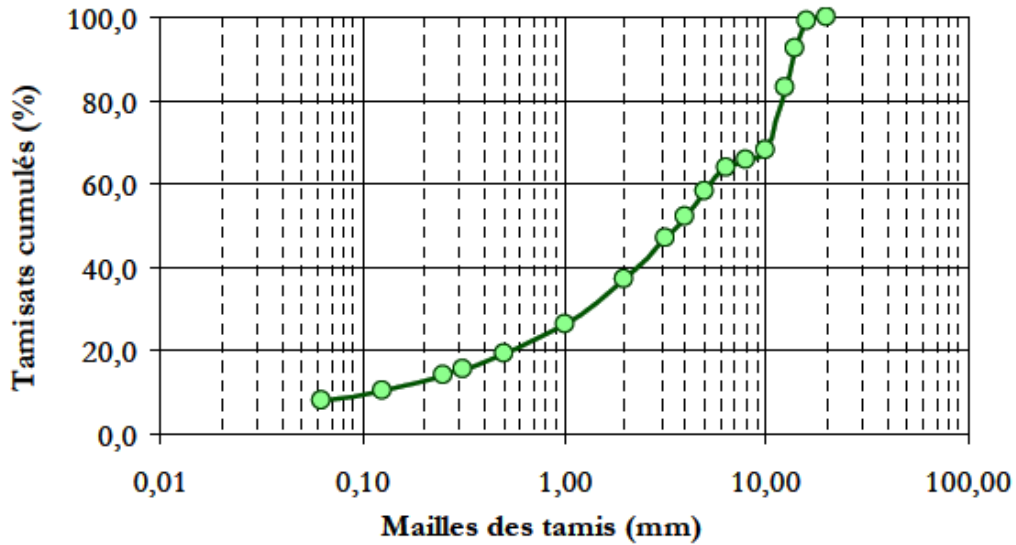
On appelle « granulats » un ensemble de grains de dimension comprise entre 0 et 80mm. Les matériaux granulaires constituent environ 95% de la masse de l'enrobé (80-85% du volume). Cette importance quantitative des composants minéraux a une influence sur les caractéristiques mécaniques et sur les performances du matériau bitumineux.

Comme pour les sols, les granulats font l'objet d'une classification basée sur un certain nombre d'essais de laboratoire. Dans le cadre de cette étude, nous résumons quelques caractéristiques principales des granulats.

##### **I.3.2.1. Granularité**

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires dans les matériaux étudiés, en portant en abscisse les ouvertures de mailles de tamis et en ordonnant les pourcentages de tamis cumulés. On obtient ainsi une courbe dite courbe granulométrique (Figure I.12).





**Fig. I.12.** Exemple de courbe granulométrique.

Les granulats sont désignés par d et D, qui représentent, respectivement, la plus petite et la plus grande des dimensions demandées.

On distingue :

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

**Tableau I.1.** Classification suivant la granularité [9].

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 $6.30 < D \leq 80.00$

### I.3.2.2. Caractéristiques intrinsèques des gravillons

Il s'agit des caractéristiques régies par la qualité propre de la roche. Elles concernent sa dureté, sa résistance à l'usure par frottement et sa résistance au polissage.

Les contraintes auxquelles sont soumises les couches de chaussée se concentrent dans les granulats; leur résistance mécanique est donc un paramètre très important. Nous citons ci-

dessous les essais les plus couramment utilisés pour déterminer les caractéristiques mécaniques des granulats.

- L'essai Los Angeles (L.A) ou l'essai de résistance aux chocs permet d'évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic ;
- L'essai Micro Deval en présence d'eau (M.D.E) ou l'essai de résistance à l'usure et à l'attrition permet de quantifier à la fois l'usure par frottement réciproque des granulats dans une assise (attrition), et l'usure par frottement des pneumatiques sur les gravillons à la surface des revêtements ;
- L'essai de résistance au polissage des granulats utilisés pour les couches de surface ;
- L'essai de sensibilité au gel permet de chiffrer la dégradation des granulats saturés d'eau sous l'action du gel.

### **I.3.2.3. Caractéristiques de fabrication des gravillons**

Il s'agit de caractéristiques résultant du mode de fabrication des granulats. Elles regroupent :

- Les caractéristiques granulométriques ;
- Le coefficient d'aplatissement (A) ou la forme des gravillons ;
- La propreté superficielle (P).

### **I.3.2.4. Domaine d'utilisation**

Les granulats doivent présenter des caractéristiques spécifiques selon leur emploi et les performances attendues. Le type d'enrobé bitumineux (et aussi enrobé, béton, enduit...), la position et la fonction de la couche de revêtement (et aussi fondation, base, liaison, surface ou roulement), le type de trafic (fort, moyen, faible) et les sollicitations (zones d'arrêt, forte sinuosité du tracé, etc...) qu'il engendre, les effets du climat (chaud, tempéré ou froid) sont autant de paramètres qui imposent le choix d'un granulat spécifique.

Notons que les propriétés physiques générales des granulats ne sont que très difficilement modifiables, ne serait-ce que pour des raisons économique. Des précautions lors de l'extraction et du transport, le concassage et le lavage peuvent améliorer ou préserver sensiblement sa forme et sa propreté. Par contre l'utilisation d'un explosif puissant et fortement dosé lors de l'extraction de la roche peut créer une microfissuration préjudiciable à la résistance mécanique du granulat.

### **I.3.3. Liants hydrocarbonés**

Les liants hydrocarbonés sont des substances constituées, essentiellement, d'assemblages d'atomes de carbone et d'hydrogène qui, au contact de particules solides telles que les granulats par exemple, développent des forces d'adhésion et de cohésion assurant de la sorte une certaine rigidité, des résistances à la déformation en traction, compression et cisaillement.

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés :

- Les liants naturels, que l'on trouve en l'état dans la nature, le plus souvent associée à des matières minérales, et qui sont utilisés depuis des temps très anciens. Il s'agit des roches asphaltiques qui, après broyage, donnent la poudre d'asphalte ainsi que des bitumes naturels.
- Les goudrons, qui proviennent de la pyrogénéation (à l'abri de l'air) de matières d'origine végétale : houille, lignite, bois. Les goudrons routiers sont essentiellement tirés de la houille.
- Les bitumes, qui sont produits en raffinerie à partir de la distillation fractionnée de certains pétroles bruts. Les bitumes sont employés en technique routière pour leurs propriétés agglomérantes et d'étanchéité. Pour des raisons principalement économiques, mais aussi liées au comportement général de ces matériaux ou à des considérations d'environnement, les goudrons de houille ne sont plus guère utilisés en technique routière, alors, lorsqu'on parle de liant hydrocarboné, il s'agit pratiquement toujours de bitume [5].

De nombreux facteurs, internes et externes, affectent le comportement de la chaussée bitumineuse. Les facteurs internes sont liés aux propriétés des matériaux utilisés au mélange bitumineux, tandis que les facteurs externes qui affectent le comportement du mélange bitumineux comprennent principalement la méthode de construction, les conditions climatiques, et les contraintes du trafic.

### **I.4. Influence des propriétés des matériaux sur les performances des chaussées souples (facteurs internes)**

Une meilleure connaissance des propriétés des matériaux bitumineux utilisés en construction routière permettra de formuler des enrobés suffisamment performants pour résister de manière durable aux efforts appliqués. Plusieurs paramètres peuvent influencer sur le comportement de l'enrobé bitumineux [7]:

- la forme des granulats.
- la compacité de l'enrobé.
- la teneur en bitume et la formule granulométrique.
- le type de bitume utilisé [6].

**Sreedhar et Coleri [10]**, ont analysé l'influence de la teneur en liant, la teneur en vides d'air, la gradation des agrégats et la modification des polymères sur la performance de fissuration et d'orniérage et ont constaté que :

- L'augmentation de la teneur en liant a amélioré les performances de fissuration, ce qui suggère que l'augmentation de la teneur en liant des mélanges d'asphalte.
- La teneur en vides d'air (densité) a affecté de manière significative la mesure d'indice de flexibilité. Une réduction de 2 % du contenu des vides d'air augmente l'indice de flexibilité de 1.03 à 2.38 fois.
- Bien que la diminution de la teneur en vide d'air ait été déterminée pour améliorer la résistance à la fissuration par fatigue. La teneur en vide d'air n'a pas été observée comme ayant un effet significatif sur le module dynamique des mélanges.

La résistance à l'orniérage du mélange d'asphalte dépend fortement du type de granulométrie choisie. **J.R. Dukatz, L. Ervin [11]**, ont montré que même les mélanges réalisés avec les meilleurs matériaux peuvent présenter une faible résistance à l'orniérage sans une gradation globale.

**Ali Topal and Burak Sengoz [12]**, ont évalué l'effet de la granulométrie des agrégats sur la résistance à l'orniérage des mélanges d'asphalte. Les propriétés physiques des granulats minéraux affectent directement les propriétés d'un mélange et, par conséquent, les performances de la chaussée. Les propriétés physiques des granulats qui contrôlent la performance des mélanges d'asphalte sont principalement la gradation, la forme des particules et l'absorption.

**Pouranian et al [13]**, ont analysé l'influence des caractéristiques de forme des granulats grossiers sur les performances de compactage des mélanges d'asphalte, et ont montré que la pente de compactage des mélanges d'asphalte diminue avec la rondeur et la régularité de l'augmentation des granulats grossiers.

### **I.5. Influence des conditions climatiques et des contraintes de trafic sur les performances de la chaussée souple (facteurs externes)**

Les chaussées routières sont en permanence soumises à des sollicitations mécaniques et thermiques qui vont participer, plus ou moins rapidement selon leurs niveaux de sollicitation, à la dégradation du revêtement. Ces éléments, responsables des dégradations, ont pour origine:

- les sollicitations du trafic: principalement les effets dynamiques dus aux passages répétés des poids lourds, les effets statiques lors du ralentissement du trafic, les frottements de surface pneus-chaussée et les contraintes de cisaillement sont toutes des pressions auxquelles l'enrobé sera exposé pendant sa durée de vie [6].
- Les sollicitations climatiques: entraînant des variations de température au sein des enrobés bitumineux. Ces variations sont soit de courte durée (journalières) ou soit de longues durées (saisonniers). Le facteur thermique régional et son instabilité, dans une même journée, ont un rôle important dans l'évolution des propriétés viscoélastiques du liant en place et restent les principales causes de dégradation des chaussées [14].

**Yared H. Dinegdaea and Björn Birgisson [15]**, ont étudié l'effet de la circulation des camions sur les performances de fissuration par fatigue descendante de chaussées souples en utilisant un nouveau cadre d'analyse basé sur la mécanique. Ce dernier est basé sur la mécanique prédite du temps d'initiation de la fissuration par fatigue descendante en utilisant la mécanique de la rupture et la morphologie du mélange. Pour réduire le niveau de complexité impliqué, les données de trafic ont été caractérisées et incorporées dans le cadre à l'aide de l'approche de la charge équivalente à un seul essieu. Ce travail intègre les spectres de charge à l'essieu et d'autres paramètres de caractérisation du trafic dans le cadre d'analyse basée sur la mécanique et étudie l'impact de ces paramètres de caractérisation du trafic sur les performances de fissuration par fatigue prévues. Les entrées de caractérisation du trafic étudiées sont le taux de croissance du trafic, les spectres de charge à l'essieu, le dérapage latéral des roues et les facteurs d'ajustement du volume. À cette fin, une approche d'intégration du trafic qui intègre la simulation de Monte-Carlo et des entrées représentatives de la caractérisation du trafic est développée.

L'importance de ces paramètres de caractérisation du trafic a été établie en évaluant un certain nombre de sections de chaussée sur le terrain. Il ressort des résultats qu'il a été observé que tous les paramètres de caractérisation du trafic, à l'exception du dérapage des roues de camion, ont une influence significative sur les performances prévues de fissuration par fatigue descendante.

**Zainab Ahmed Alkaissi [16]** a étudié l'effet de la température élevée sur les dommages d'orniérage de la chaussée flexible en imposant deux modèles d'investigation à l'aide du programme d'éléments finis ABAQUS ver.6.12.1. deux modèles ont été utilisés, le premier modèle induit la charge de trafic et le second implique des conditions combinées de trafic et de charge thermique. Les résultats obtenus ont montré qu'il y a un effet significatif des

conditions de charge thermique et de trafic sur les dommages d'orniérage de la chaussée souple et des températures plus élevées fourniront une profondeur d'orniérage élevé par; 2.29, 3.1 et 4.3 fois pour la couche bitumineuse, la couche de base et la couche de fondation respectivement. L'augmentation de la température à environ 45 °C à la surface de la chaussée souple entraîne une réduction du nombre maximal de répétitions pour provoquer l'orniérage d'environ 3 fois moins si l'on compare le modèle d'orniérage basé sur la charge de trafic.

La résistance à l'orniérage des chaussées souples en fonction de la température élevée ainsi que de la charge de trafic appliquée. Des dommages plus importants sont, également, obtenus sous une charge thermique et de trafic combiné par rapport au modèle de conditions de charge de trafic uniquement.

La variation de la température sur la route dépend des conditions météorologiques (incontrôlables). En climat froid, la fonte des neiges et le déneigement durant l'hiver exposent la route à un phénomène de gel/dégel, mais dans les régions chaudes, l'été est très rigoureux. La température de surface dépasse souvent 40 °C. Les différences de température entre le jour et la nuit sont très importantes. Le temps est souvent instable, combiné aux changements rapides de température, entraînant un phénomène de chauffage/refroidissement dû à l'ensoleillement et à la ventilation provoquée par le flux d'air. Ces gradients provoquent des contraintes thermiques et des modifications internes des propriétés viscoélastiques des couches superficielles [17].

D'après l'étude de l'effet du cyclage thermique sur le comportement de fluage-récupération de bitume routier qui a été réalisé par M'hammed merbouh, le comportement du liant bitumineux après un certain nombre de cycles thermiques (durée de fonctionnement) dépend de la nature, des caractéristiques climatiques de la région et du temps d'exposition du liant aux cycles thermiques [17].

En fonctionnement, la structure de la couche superficielle souffre de ces phénomènes thermocycliques et se détériore progressivement. Le facteur géoclimatique et ses évolutions sont devenus des paramètres essentiels dans la prédiction du comportement des chaussées sur site et l'estimation de leur durée de vie. Cependant, les méthodes actuelles de conception des chaussées ne tiennent pas compte des conditions climatiques spécifiques et de l'histoire thermique des matériaux bitumineux, pour chaque région. En réalité l'effet de ce phénomène s'ajoute à l'effet du trafic et il n'est pas pris en compte lors des essais standards pour caractériser la fatigue.

Ces actions diverses, agissant, simultanément, sur le revêtement bitumineux conduisent aux dégradations couramment observées, notamment:

- les fissurations: les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet de passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux [18].
- Les déformations permanentes (ou orniérage): les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux, mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées [18].

## **I.6. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons présenté une revue de la littérature sur les chaussées et plus particulièrement les chaussées souples. Outre les essais expérimentaux, les simulations numériques sont devenues un outil incontournable pour étudier le comportement des chaussées sous différents types de sollicitation. Dans ce contexte, le modèle numérique proposé par **Zainab Ahmed Alkaissi [16]**, dans la littérature a donné des résultats comparables à ceux obtenus par les essais expérimentaux.

Les structures de chaussées routières sont soumises, en service, à des sollicitations très complexes. Le trafic et le climat ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées. La couche de roulement joue un rôle capital dans la structure de la chaussée, car elle participe à la durabilité de la structure par la résistance aux sollicitations exercées par le trafic ainsi que par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau. Des propriétés des matériaux (facteurs internes), des conditions climatiques et des contraintes des trafics (facteurs externes) ont une influence significative sur les performances des chaussées souples. Les propriétés physiques des granulats minéraux affectent directement les propriétés d'un mélange et par conséquent, les performances de la chaussée. Le comportement du liant bitumineux après un certain nombre de cycles thermiques (durée de fonctionnement) dépend de la nature, des caractéristiques climatiques de la région et du temps d'exposition du liant aux cycles thermiques.

## CHAPITRE II

### PHÉNOMÈNE D'ORNIÉRAGE DES CHAUSSEES SOUPLES

#### II.1. Introduction

Le phénomène d'orniérage est une dégradation longitudinale de la chaussée facilement mesurable et visible en surface; des traces permanentes et creusées dans la chaussée font leur apparition suite aux passages répétés des véhicules lourds. Il s'agit d'un des problèmes majeurs de dégradation des chaussées souples (chaussées bitumineuses). Il peut provenir soit d'une déformation du sol support, soit d'un amincissement par fluage des couches bitumineuses. Dans un premier temps, afin de bien comprendre les phénomènes impliqués dans le processus d'orniérage des couches bitumineuses d'une chaussée, on parle de la composition d'un enrobé bitumineux, et on décrit les essais permettant d'appréhender l'évolution des propriétés mécaniques du mélange.

La croissance du trafic lourd met les chaussées à rude épreuve de plusieurs façons. Les charges axiales statiques et dynamiques, les contraintes de cisaillement, l'usure de surface et la sollicitation par choc sont toutes des pressions auxquelles l'enrobé sera exposé pendant sa durée de vie. La charge axiale statique est une charge immobilisée sur l'enrobé, celle-ci peut créer une déformation permanente due au fluage de l'enrobé. Les températures élevées en été favorisent ce phénomène. Ce type de problème s'observe entre autres dans les cours d'entreposage et sur les quais de déchargement de marchandises [6].

#### II.2. Définition du phénomène d'orniérage

L'orniérage est une déformation permanente longitudinale de la chaussée caractérisée par un tassement de celle-ci qui se crée sous le passage répété des roues du poids lourd. La formation d'ornières s'observe, principalement, sur les routes à fort trafic, près des feux tricolores et dans les carrefours giratoires.

La profondeur d'ornière est la distance perpendiculaire maximale entre la base d'une règle et la zone de contact de l'indicateur avec la surface de chaussée à un endroit précis (Figure II.1), mesurée dans les traces des roues.





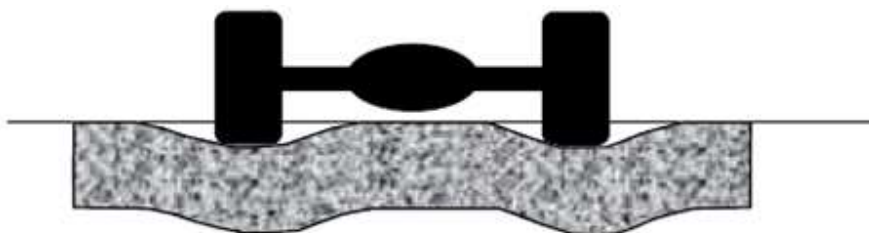
**Fig. II.1.** Orniépage de la chaussée [19, 20]

Les déformations permanentes (Orniépage) d'une chaussée bitumineuse demeurent relativement complexes. De nombreux éléments viennent influencer ce comportement tels que: la configuration et le nombre d'essieux des véhicules, l'interaction entre les différentes charges, la configuration géométrique de la chaussée, les pneumatiques ainsi que la variabilité des propriétés thermiques et mécaniques des enrobés bitumineux en fonction de la température et de la vitesse de sollicitation.

### **II.2.1. Les types d'orniépage**

#### **II.2.1.1. Orniépage des couches support**

Ce type d'orniépage, encore appelé orniépage de grand rayon ou orniépage structurel, trouve son origine dans le tassement du sol support (couches non liées) sous l'action d'un trafic lourd et canalisé, assorti ou non d'une chute de portance.



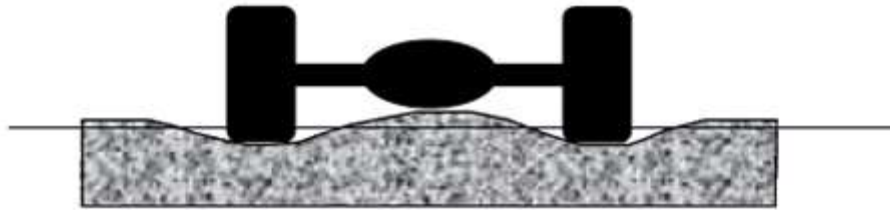
**Fig. II.2.** Orniépage du sol support

#### **II.2.1.2. Orniépage des couches bitumineuses**

Il s'agit d'une dégradation de l'enrobé par accumulation des déformations permanentes, qui trouvent leur origine dans les multiples compressions subies par le matériau lors du passage des charges roulantes. Cet effet concerne la couche de roulement et/ou la couche de liaison et,

dans certains cas, la couche d'assise bitumineuse. L'enrobé se déforme pour donner des ornières de faible rayon, avec des bourrelets latéraux caractéristiques et parfois du ressuage (remontée de liant à la surface).

Cette dégradation de la chaussée s'explique par une combinaison d'un effet de densification (diminution du volume et donc augmentation de la densité) et d'un effet de cisaillement de l'enrobé [21].



**Fig. II.3.** Orniérage des couches bitumineuses de surface

La résistance à l'ornière de fluage peut se définir par la capacité d'un enrobé à maintenir intact son squelette minéral (agencement des granulats) sous l'effet des charges du trafic qu'il supporte. L'orniérage est presque uniquement causé par l'instabilité de l'enrobé [22]. Ce travail étudiera l'orniérage dû à la déformation des couches bitumineuses de surface.

### **II.3. Essais employés pour l'étude des déformations permanentes [21 et 23]**

De nombreux essais ont été développés dans le but de caractériser ou de mesurer la résistance aux déformations permanentes des enrobés bitumineux, en basant sur leur caractère homogène ou non.

#### **II.3.1 Essais sur liants**

##### **II.3.1.1 Essais non homogènes**

###### **a. Température Bille Anneau (TBA) ( EN 1427 )**

Le point de ramollissement est la température à laquelle un produit bitumineux atteint un certain degré de ramollissement dans des conditions normalisées. Une bille d'acier (diamètre=9,53 mm, masse=3,5 ± 0,05 g) est placée sur un échantillon de bitume, contenu dans un anneau de métal (diamètre intérieur = 16 ± 0,1 mm, hauteur = 6,4 ± 0,1 mm). L'ensemble est chauffé à une vitesse constante déterminée (5°C/min). La température à laquelle l'échantillon devient assez mou pour la bille, ayant pénétré le produit bitumineux, tombe enveloppée de celui-ci, d'une hauteur de (25.4 mm), est prise comme le point de ramollissement du produit étudié. La valeur obtenue est considérée depuis longtemps comme

une valeur attachée aux comportements à la déformation permanente aux températures de service élevées [25- 27].

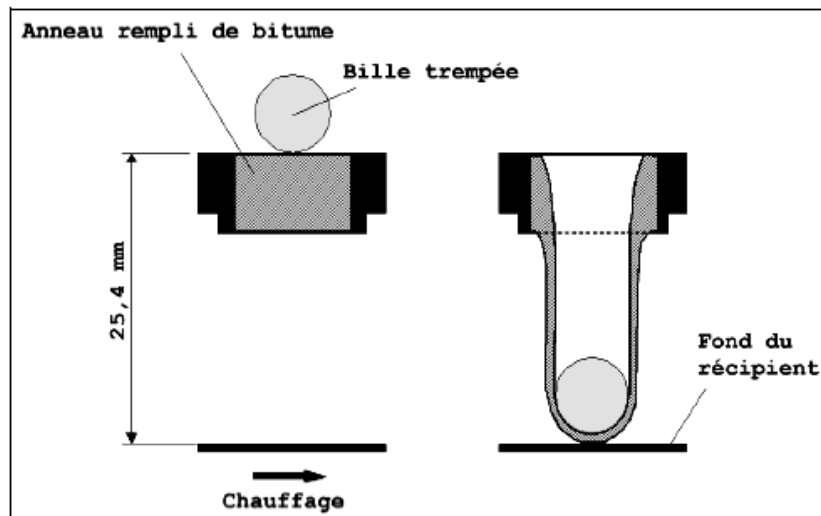


Fig. II.4. Principe de l'essai de détermination de La Température Bille Anneau [30]

#### b. Pénétrabilité ( EN 1426 )

La pénétrabilité à l'aiguille d'un produit bitumineux est donnée par la profondeur, exprimée en dixièmes de millimètre, à laquelle une aiguille en acier inoxydable (son corps a un diamètre compris entre 1,00 et 1,02 mm) pénètre dans l'échantillon de bitume. Cet essai est réalisé dans des conditions normalisées de charge (100 g), température, et temps (5 s). La charge comprend l'aiguille, son support et éventuellement une masse additionnelle.

La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25 °C ( $Pen_{25}$ ), ce qui en fait un indicateur pour les températures courantes de la chaussée. Cette mesure peut être réalisée à plusieurs autres températures et ainsi fournir une indication sur la susceptibilité du liant.

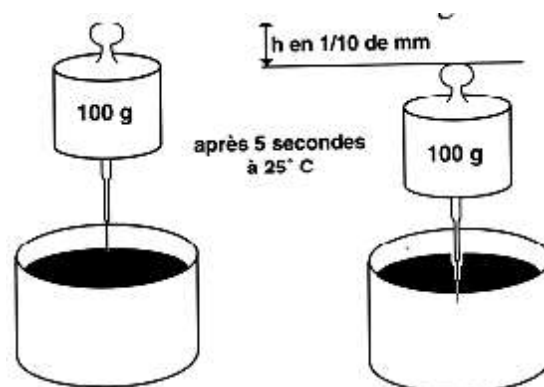


Fig. II.5. Essai de pénétrabilité [28]

### II.3.1.2. Essais homogènes au rhéomètre

#### a. Essai 'Dynamic Shear Rheometer' DSR

La rhéologie est une science, particulièrement, adoptée à l'étude des corps viscoélastique tels que les bitumes afin de pouvoir prédire leurs comportements sous sollicitation mécanique. Les essais dynamiques en traction ou en compression sont l'un des moyens d'accéder à la rhéologie du bitume [29].

L'essai DSR (Dynamic Shear Rheometer : rhéomètre à cisaillement dynamique) a été développé pour la méthode de spécification des liants SUPERPAVE [30]. Ce rhéomètre de cisaillement permet de réaliser des mesures de viscosité sous sollicitation monotones ou cycliques, de mesures le module complexe, ou encore de fatigue sur liant et mastics bitumineux. Des essais de cisaillement plan-plan, cône-plan, cyclique-cyclique avec différents rayons sont possibles sur une plage de température allant de -40 °C à +200 °C [29].

Le DSR mesure la déformation de cisaillement générée par l'application de la contrainte de cisaillement. Il permet de caractériser le comportement viscoélastique des liants, notamment par la détermination du module de cisaillement  $G^*$  (rapport des amplitudes de contrainte et de déformation) et de l'angle de phase. La partie réelle de  $G^*$  est associée à la composante élastique de la déformation, tandis que la partie imaginaire contient les informations sur la composante visqueuse, non réversible [21].

La méthode de spécification SUPERPAVE propose le critère  $G^* / \sin(d)$  comme indicateur de l'orniérage pour les bitumes purs, des travaux antérieurs ont confirmé que la température de ramollissement bille-anneau, la viscosité dynamique à 60 °C et le critère  $G^*/\sin(d)$  étaient de bons indicateurs d'orniérage [30 - 33]. Cependant ces paramètres ne sont plus corrects pour les bitumes modifiés, avec par exemple une sous-estimation du comportement à l'orniérage pour les enrobés modifiés aux SBS [34].

#### b. Essai de fluage et viscosité à taux zéro

L'essai retenu par Desmazes [34] est un essai de fluage suivi d'un essai de relaxation. D'après les auteurs, la fonction de fluage  $J(t)$  d'un fluide viscoélastique se décompose en trois contributions, aussi bien en fluage qu'en relaxation:

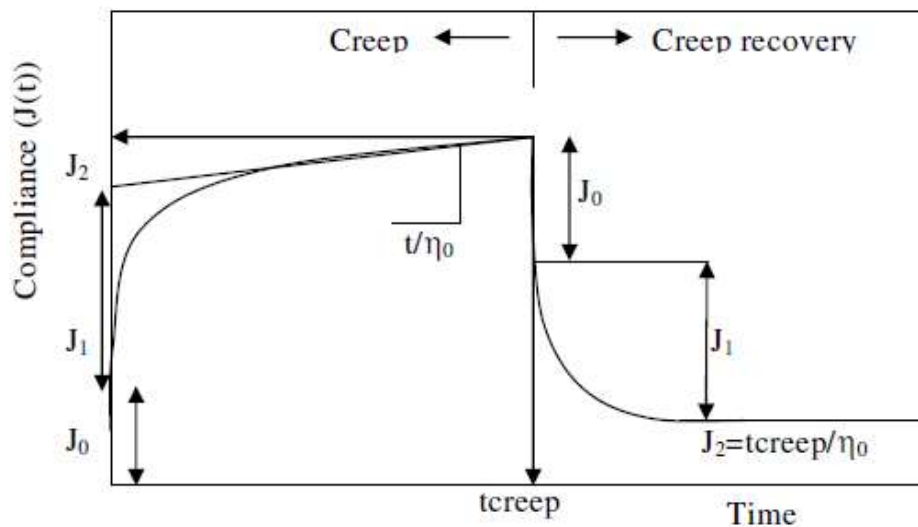
- Une composante élastique instantanée  $J_0$  ;
- Une composante élastique différée  $J_1$  ;
- Une composante visqueuse de dissipation  $J_2$ .

Dans la zone d'évolution à vitesse nulle de  $J(t)$  lors de l'essai de fluage, la viscosité à taux zéro (ZSV) est déterminée à partir de l'inverse de la pente de la courbe:

$$\eta_0 = \lim_{t_{\text{creep}} \rightarrow \infty} 1/(J_{\text{creep}}(t)/t) \quad (\text{II.1})$$

la ZVS se déduit aussi de l'essai de relaxation par:

$$\eta_0 = \lim_{t_{\text{recovery}} \rightarrow \infty} J_{\text{creep}}/J_{\text{recovery}}(t_{\text{recovery}}) \quad (\text{II.2})$$



**Fig. II.6.** Détermination de  $\eta_0$  à partir des essais de fluage et de relaxation

L'appareillage préconisé pour ces essais est un rhéomètre à contrainte contrôlée, complété par un système de régulation de la température afin de garantir l'homogénéité en température de l'échantillon; il peut s'agir:

- D'un rhéomètre cône/plan d'ouverture variant entre 1 et 2 mm pour les liants purs.
- D'un rhéomètre plan/plan d'ouverture 2 mm pour les liants modifiés.



**Fig. II.7.** Exemple de rhéomètre

### **II.3.2. Essais sur mélanges bitumineux (non homogènes)**

#### **II.3.2.1. Essai de compression Marshall**

Le test Marshall selon la norme (ASTM D6927), (ASTM, 2006) est utilisé pour déterminer la stabilité et la valeur d'écoulement des mélanges qui reflète la performance du mélange. La stabilité liée à la charge maximale supportée par éprouvette compactée est soumise à une vitesse de chargement de 51 mm / min à 60 °C. Le comparateur à cadran a été fixé pendant le chargement pour mesurer l'écoulement plastique (déformation) en même temps que la charge maximale enregistrée. Les grandeurs SM (force maximale appliquée) et FM (valeur de la déformation en 1/10 mm correspondant à la stabilité), fournies par cet essai sont liées à l'orniérage [21]. Malgré la popularité de ce test, il est établi depuis longtemps qu'il permet une piètre estimation du classement des enrobés par rapport à l'orniérage, en comparaison d'essais plus réalistes tels que les essais triaxiaux à chargement répété.

Pendant cet essai, il n'est pas possible d'avoir accès à la déformation au cours du temps de l'éprouvette; de plus, la température et la vitesse de déformation sont fixées, ce qui disqualifie l'essai pour la caractérisation fondamentale de l'orniérage.

#### **II.3.2.2. Essais de compression diamétrale sous chargement répété**

Les essais de compression diamétrale, utilisés sous chargements répétés (l'essai est plus fréquemment utilisé sous chargement unique pour la détermination du module sécant des enrobés. Cet essai a pour but d'atteindre un état de traction dans la zone centrale d'un échantillon cylindrique de faible épaisseur. Les grandeurs mesurées au cours de l'essai sont la variation de diamètre de l'éprouvette et de la force d'application à partir desquelles est déduit par calcul le module de déformation et la résistance à la traction des matériaux.

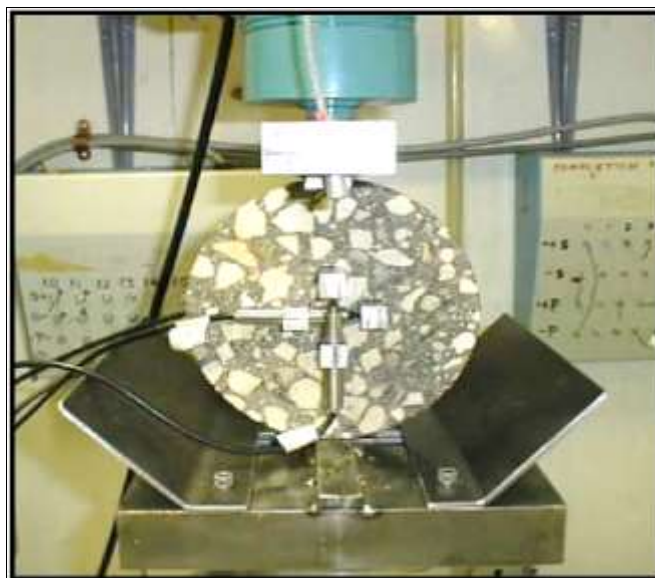
**Thiessen, M., A. Shalaby, and K. L. [35]**, ont étudié les corrélations entre le taux d'orniérage comme indicateur de performance et les propriétés volumétriques et mécaniques de plusieurs enrobés, à l'aide d'un essai de compression diamétrale modifié. L'essai est monotone, conduit à une vitesse de 0.1mm/min, bien plus basse que les vitesses couramment employées dans ce type d'essai, afin de suivre au mieux l'établissement des déformations de l'éprouvette. Les déformations verticales et horizontales sont mesurées au cours de l'essai réalisé à une température de 25 °C.

Il ressort de cette étude que:

✓ De toutes les propriétés liées au mélange testé (pourcentage de bitume, compacité, stabilité Marshall, VMA, pénétrabilité, densité), la pénétrabilité est le paramètre le mieux corrélé à l'orniérage.

✓ Des données issues de l'essai, il apparaît qu'aucune valeur de pic n'est corrélée à l'orniérage; et c'est aussi bien pour la contrainte que pour la déformation. Ni la force de rupture ni les déformations de rupture ne semblent non plus corrélées à l'orniérage.

Le coefficient de Poisson, rapport de la déformation latérale à la déformation axiale apparaît comme fortement corrélé à l'orniérage, et ce qu'il soit considéré à 10% ou à 25% du chargement ultime  $f$  [35].



**Fig. II.8.** Appareil d'essai et instrument de l'éprouvette [35]

Pour évaluer la résistance des enrobés bitumineux aux déformations permanentes, les essais de roulage sont fréquemment utilisés, ce qui nécessite des équipements spécialisés ainsi que des échantillons de taille relativement importante. Pour cette raison, les chercheurs recherchent un test plus simple qui aidera à évaluer la résistance à l'orniérage des enrobés bitumineux. Pour cette raison une étude a été faite par "**Piotr Zieliński**" [36] pour examiner expérimentalement la relation entre résultats ITS et les paramètres d'orniérage, c'est-à-dire la profondeur d'orniérage proportionnelle (PRDAIR) et la vitesse d'alignement des roues (WTSAIR). Les échantillons de béton bitumineux (AC), ainsi que SMA et BBTM, ont été compactés avec le marteau Marshall, mais les tests ITS ont été effectués avec une presse Marshall typique, à une vitesse de chargement de 50 mm/min. Les résultats des tests ont indiqué la nécessité d'une analyse séparée des mélanges de type continu (AC) et des mélanges à gradient d'écart (SMA et BBTM).

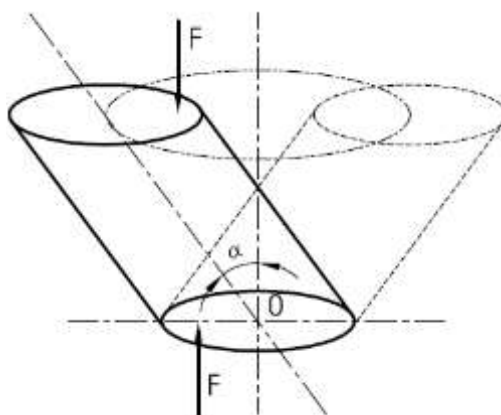
La relation entre les résultats ITS et les paramètres d'orniérage dépend : du type de gradation du mélange (des coefficients de corrélation plus élevés ont été obtenus pour les

mélanges présentant des écarts) et des températures d'essai ITS (les résultats d'essai à 40 °C ont obtenu de meilleures corrélations que ceux obtenus à 25 °C). À l'aide des analyses de régression, les limites de prédiction ainsi que les limites de confiance ont été calculées, ce qui a permis de développer des critères pour les classifications de la résistance des mélanges d'asphalte aux catégories d'orniépage, sur la base du test ITS [36].

### II.3.2.3. Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG)

L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG), est un essai caractérisant l'évolution du pourcentage de vides d'un mélange hydrocarboné soumis à un compactage isotherme. Ce compactage est obtenu par la combinaison d'un cisaillement giratoire et d'une force résultante axiale appliquée par une tête mécanique [NF P 98-252].

Le pétrissage est provoqué par le mouvement de l'axe de l'éprouvette qui engendre approximativement une surface conique de révolution de sommet 0 et d'angle au sommet 2 $\alpha$  pendant que les extrémités de l'éprouvette restent, sensiblement, perpendiculaires à l'axe de la surface conique (voir figure II.9), où la valeur de la force F doit rester constante pendant la durée de l'essai [121].



**Fig. II.9.** Schéma du mouvement de l'éprouvette

Il s'agit en réalité d'un essai utilisé lors des études de formulation des enrobés bitumineux. Un grand nombre de compositions granulométriques ont été testées à la PCG entre 1973 et 1977 [37], conduisant à la relation liant la compacité du mélange au nombre de girations:

$$C = C_1 + K_1 \ln(\text{ng}) \quad (\text{II.3})$$

Avec **C** est la compacité en % du mélange, **C1** la compacité au bout de la première giration (qui semble liée à la mise en place de l'enrobé), **K1** un coefficient expérimental qui semble lié à l'évolution du compactage après mise en place du matériau et **ng** le nombre de girations



effectuées. Une étude simultanée à l'orniéreur a été faite, ce qui a permis de constater que plus la mise en place est facile (mesurée par C1), plus l'ornière apparaît rapidement.

Le coefficient C1 devenait ainsi un indicateur de sensibilité à l'orniérage. Il est cependant utile de préciser que la PCG n'est pas, suffisamment, sensible lorsqu'on aborde les mélanges à comportement "limite" utilisés dans des conditions extrêmement sévères (trafic lourd très important, lent, canalisé et chaussée orientée en plein sud); autant de conditions qui sont généralement remplies (couplées ensemble ou non) dans les cas d'orniérage [21].

#### **II.3.2.4. Simulateurs de trafic**

Ces essais consistent à l'application d'une charge roulante sur une éprouvette parallélépipédique ou cylindrique, dans des conditions de température fixées entre 45°C et 60°C et aussi constantes que possible. Le passage répété de la charge provoque une ornière dont on mesure la profondeur. Il existe plusieurs appareils de ce type; on peut citer parmi les plus courants [21]:

- L'APA (Asphalt Pavement Analyzer) développé aux États-Unis ;
- Le HWTD (Hamburg Wheel Tracking Device), développé en Allemagne ;
- Le PUR wheel développé à l'université de Purdue ;
- L'orniéreur TRL (Royaume Uni),
- L'orniéreur type LPC développé en France, que nous décrirons plus particulièrement.

Le simulateur de trafic LPC est un outil de base pour la formulation et l'étude des enrobés bitumineux. L'essai d'orniérage pratiqué sur ce simulateur rend compte de l'influence des différents paramètres sur le comportement à chaud des enrobés. Il permet de comparer des enrobés et, également, de les évaluer par rapport aux exigences spécifiées dans les normes. Il n'est en revanche pas prédictif de l'ornière sur chaussées et des décalages seraient parfois observés entre les performances en laboratoire et in situ. Cet essai consiste à soumettre une plaque de matériau au passage d'une roue va-et-vient. L'éprouvette a une forme parallélépipédique (L = 500 mm, l = 180 mm, h = 100 ou 50 mm). Elle est soit issue d'un prélèvement effectué sur la chaussée, soit fabriquée en laboratoire. Le pneumatique exerce une charge constante de 5 kN en étant gonflé à 0.6 MPa. Il est animé d'un mouvement de va-et-vient à la fréquence de 1 Hz sur une longueur de 410 mm. L'essai se fait à 60 °C pour les matériaux de surface [21].

On relève l'ornière à plusieurs reprises en cours d'essai sur cinq profils; on en déduit la courbe d'évolution de la profondeur moyenne d'ornière en fonction du nombre de cycles. Les

courbes d'évolution de l'ornière moyenne exprimée en % de l'épaisseur en fonction du nombre de cycles sont généralement de la forme :

$$Y = A (N/1000)^b \quad (\text{II.4})$$

Où  $b$  = pente de la droite de régression et  $A$  la profondeur d'ornière à 1000 cycles.



**Fig. II.10.** Ornièreur type LPC

Les essais à l'orniéreur ont, largement, été employés pour mettre en évidence l'impact des caractéristiques de formulation sur l'ornière mesurée, ceci permettant d'affiner la formulation du mélange en termes de résistance à l'orniérage. Cependant, leur portée est beaucoup trop large pour appréhender de manière satisfaisante l'orniérage des chaussées. On expose ensuite quelques facteurs influençant le comportement d'orniérage des mélanges bitumineux. Le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation des déformations permanentes. Cela constitue donc un phénomène lié aux irréversibilités et aux non-linéarités déjà existantes dans le domaine des faibles déformations.

## II.4. Facteurs influant sur le comportement d'orniérage

### II.4.1. Granulats : L'angularité et le squelette granulaire

Plusieurs chercheurs **Van de Loo 1974 [38]**, **Grimaux et Hiernaux 1977 [39]**, **Verstraeten et al 1995 [40]**, **Vanelstraete et Francken 1995 [41]**, ont montré que l'angularité des granulats influençant fortement le comportement à l'orniérage d'un enrobé bitumineux. Les résultats sont clairs : pour un même enrobé (liant, teneur en vides et granulométrie identiques), l'ajout de sable roulé ou arrondi augmente la profondeur de l'ornière comparativement à un enrobé avec des granulats anguleux. Les arêtes arrondies des granulats roulés augmentent l'effet de billes et de roulement dans la matrice granulaire versus les arêtes anguleuses d'une matrice de granulats concassés qui freinent cet effet en s'imbriquent les unes par rapport aux autres.

De plus, **Grimaux, J. P., & Hiernaux, R. (1977) [42]** et **Brown, S. F., & Pell, P. S. (1974) [43]** ont montré que lors l'utilisation d'une granulométrie continue, le remplissage des vides (VAM de 11 à 17%) entre les granulats grossiers s'effectue plus facilement par la présence de particules fines. Ceci confère au mélange une meilleure compacité, stabilité, rigidité et résistance aux déformations permanentes.

Par contre, un surdosage en particules fines crée l'effet inverse. En desserrant les grains grossiers et en favorisant les translations et les rotations des granulats, il accélère ainsi l'apparition d'ornières. Exception à la règle, les enrobés SMA possèdent une granulométrie discontinue et présentent une excellente résistance à l'orniérage. Les enrobés SMA peuvent avoir des VAM semblables à ceux des enrobés denses (12 à 18%).

### II.4.2. Type de liant

**Vanelstraete, A., et al (1996) [44]** ainsi que **Nguyen, D. T. (2006) [45]** ont montré que la résistance à l'orniérage des enrobés s'accroît, généralement, en présence d'une augmentation de la dureté du liant. Dans l'industrie routière, il existe principalement deux catégories de liant hydrocarboné: les liants non modifiés et les liants modifiés. L'industrie du bitume peut fournir des liants non modifiés dont la viscosité est plus appropriée aux hautes températures, permettant ainsi d'atténuer les déformations permanentes de l'enrobé: ce sont les bitumes « durs ». Cependant, le gain de viscosité à haute température se traduit par une perte de flexibilité du bitume à basse température. Ce qui peut entraîner un risque accru de fissurations thermiques.

Pour pallier ce risque, l'utilisation des liants modifiés s'est de plus en plus répandue. Les ajouts de polymères dans les liants améliorent ses caractéristiques viscoélastiques,

particulièrement à haute température, augmentant par le fait même la résistance à l'orniérage de l'enrobé sans le rendre plus propice à la fissuration thermique. Inversement, ils améliorent la résistance à la fissuration sans atténuer le niveau de résistance à l'orniérage [44].

### **II.4.3. Teneur en vide**

La teneur en vides de l'enrobé influe sur sa résistance à l'orniérage. Plus la teneur en vides est élevée (vide de formulation  $\neq$  vide lié à un compactage insuffisant), plus la résistance à l'orniérage sera bonne, à la condition que ces vides soient le fruit d'une bonne formulation et non pas le résultat d'un sous compactage [44].

**Nguyen, D. T. (2006) [45]** a montré l'effet d'un sous-compactage (% de vides élevés) à l'essai à l'orniéreur MLPC. Une diminution de la compacité génère rapidement une augmentation de l'instabilité de l'enrobé. De plus, ils ont montré l'importance de l'étape de précompactation du finisseur. Plus cette dernière est efficace, plus la résistance à l'orniérage sera bonne.

Pour réduire la portée de phénomène d'orniérage, les chercheurs proposent des solutions techniques depuis plusieurs décennies, comme la modification du bitume, qui s'avère prometteuse à l'avenir. Cette technique améliore les performances des liants bitumineux et réduit la fréquence de la réparation des chaussées qui contribue à l'épuisement des matériaux de construction.

La modification du bitume peut être réalisée par plusieurs additifs : polymères [46,47], pneus recyclés [48], additifs chimiques [49], fibres [50,51] et d'autres matériaux [52,53].

## **II.5. Conclusion**

Dans ce chapitre on a défini le phénomène d'orniérage avec une présentation des mécanismes de son apparition. Une présentation des essais sur mélanges bitumineux susceptibles de caractériser ou de mesurer la résistance aux déformations permanentes a été faite, ainsi que les expressions analytiques proposées par divers auteurs sur la base de ces essais. Dans ce chapitre les paramètres de formulation et de sollicitation qui influent sur l'apparition et le développement de l'orniérage ont été présentés.

L'influence de la température se manifeste à travers des changements des propriétés mécaniques avec la température. L'influence du temps se traduit par l'influence de la durée de sollicitation et de la vitesse (fréquence) de sollicitation. Un aspect de cette influence est le comportement dissymétrique en compression et traction des matériaux bitumineux. L'apparition des déformations permanentes est provoquée par des déformations plastiques du

squelette granulaire de type translation/rotation relative des grains, accompagnées par des déformations visqueuses de type fluage du liant enrobant les particules. Ce mécanisme révèle de nouveau l'influence de la température et l'origine plastique des déformations permanentes des matériaux bitumineux. Ces caractéristiques et propriétés mécaniques ont des relations directes avec l'apparition et l'accumulation des déformations permanentes des matériaux bitumineux. Ils doivent être pris en compte lors de la modélisation des matériaux bitumineux. Des facteurs importants de la formation de l'orniépage ont été présentés afin d'avoir une vue générale sur l'ensemble du problème et sur les conditions à prendre en compte dans les calculs structurels de l'orniépage.

## CHAPITRE III

### PHÉNOMÈNE DE FATIGUE DES CHAUSSEES SOUPLES

#### III.1. Introduction

Les enrobés bitumineux sont soumis, sur la route, à des sollicitations de courte durée à chaque passage d'un véhicule lourd. Ainsi, la chaussée, qui se comporte comme un matériau rigide reposant sur un support déformable, est soumise à des efforts de flexion. Des contraintes de traction apparaissent alors à la base du revêtement et sont répétées à chaque passage de roues. Dans le cas de passage d'un grand nombre de véhicules, les fissures seront amorcées à la base de la chaussée due au phénomène de fatigue [54].

#### III.2. Caractérisation du comportement à la fatigue

Le phénomène de fatigue d'un matériau se caractérise par sa rupture après application répétée d'un grand nombre de sollicitations cycles dont l'amplitude est inférieure à celle conduisant à la rupture au premier chargement.

L'essai classique permettant de caractériser le phénomène de fatigue consiste à soumettre une éprouvette de matériau étudié à des sollicitations répétées et à noter le nombre de cycles ( $N$ ) entraînant la rupture de l'éprouvette. La résistance à la fatigue pour  $N$  cycles de sollicitation est considérée comme la durée de vie de l'éprouvette testée.

La courbe représentant la durée de vie de l'éprouvette  $N$ , en fonction de l'amplitude de la sollicitation  $\varepsilon$  est appelée courbe de Wöhler du matériau. Cette courbe est caractérisée par la relation suivante :

$$\varepsilon = A.N^b \quad \text{(III.1)}$$

La courbe devient donc une droite en coordonnées logarithmiques. Le constant  $A$  et la pente  $b$  sont déterminés par une régression linéaire sur les résultats expérimentaux en logarithmes. A partir de la fonction de la courbe de Wöhler, la valeur de  $\varepsilon_6$  peut être calculée. Elle correspond à l'amplitude de la sollicitation qu'il faudrait appliquer au matériau pour obtenir une durée de vie à l'essai de fatigue de  $10^6$  cycles. Cette valeur est ensuite utilisée pour le dimensionnement routier [54].

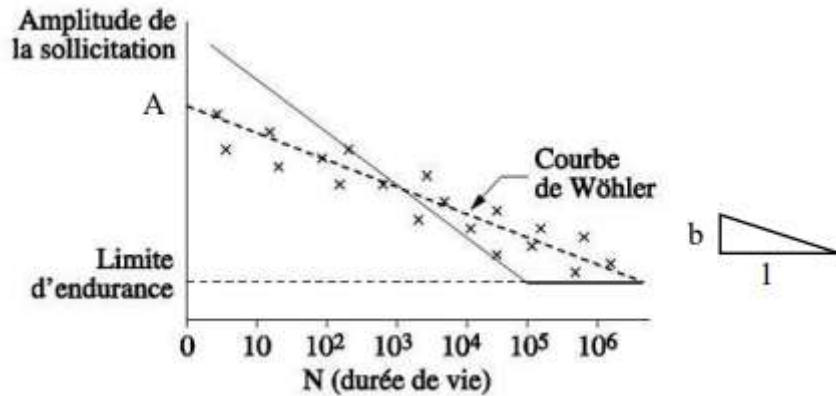


Fig. III.1. La courbe de Wöhler

### III.3. Types d'essais

Les essais de fatigue au laboratoire caractérisant la fatigue des enrobés bitumineux peuvent être regroupés en trois grands types:

- les essais de flexion (2, 3 et 4 points) ;
- les essais de traction-compression (directe et indirecte) ;
- les essais de cisaillement.

Les essais de flexion visent à représenter les efforts répétés de traction par flexion provoqués dans la chaussée par le passage de véhicules. Les essais de traction ont pour but de représenter directement les efforts de traction engendrés à la base de la chaussée par ces flexions. En fin, les essais de cisaillement ont été mis au point pour prendre en compte les efforts de cisaillement engendrés dans les couches de surface.

### III.4. Types de chargement

L'essai de fatigue est, généralement, réalisé suivant deux modes de sollicitations: sollicitation en déplacement et sollicitation en force.

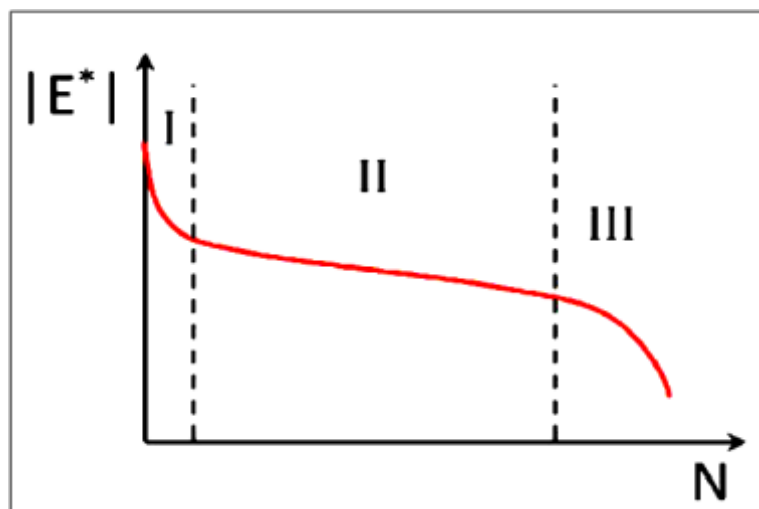
**III.4.1. Sollicitation en déplacement:** le signal de sollicitation appliquée à l'éprouvette est un signal de déplacement avec une amplitude et une fréquence constantes. La force évolue au cours de l'essai. Si le champ de déformation de l'éprouvette est homogène, le mode de l'essai est alors à « *déformation imposée* » (la déformation est identique en chaque point de l'éprouvette).

**III.4.2. Sollicitation en force:** l'essai est piloté en force et ce sont l'amplitude et la fréquence de ce signal qui restent constantes pendant l'essai. Le déplacement évolue au cours de l'essai.

Si le champ de contrainte dans l'éprouvette est homogène, le mode de l'essai est alors à « *contrainte imposée* » (la contrainte est identique en chaque point de l'éprouvette) [54].

Le comportement en fatigue des enrobés bitumineux est un comportement complexe. La fatigue des enrobés bitumineux est liée à plusieurs phénomènes tels que la viscoélasticité du bitume et les caractéristiques du mélange (les granulats, le liant et la qualité des liens entre eux). Durant les essais de fatigue, on distingue trois phases dans l'évolution du module de rigidité en fonction du temps ou de nombre de cycles de chargement [56]:

- la **phase I** ou phase d'accommodation est caractérisée par une décroissance rapide du module de rigidité et la création des microfissures. Ceci est dû aux chargements répétés, ainsi qu'aux phénomènes de thixotropie et échauffement thermique qui est considéré avoir une influence sur le comportement du matériau pendant cette phase. Ces deux phénomènes ne sont pas étudiés dans ce travail.
- **Phase II** (phase quasi-stationnaire), est caractérisée par une décroissance du module plus modérée et quasi linéaire. Le rôle de la fatigue sur la chute de module est alors prédominant. Bien que l'influence des phénomènes biaisant soit faible pendant cette phase, ils doivent être considérés.
- **Phase III** (phase de rupture), le module présente une diminution accélérée liée à une concentration brutale des contraintes dans le voisinage des zones endommagées. Durant cette phase, le développement rapide des fissures est important. L'apparition de macro-fissures par accumulation des micro-fissures lors des phases I et II mène à la rupture de l'éprouvette. Dans cette phase, les contraintes et les déformations ne sont plus homogènes au sein de l'éprouvette et l'analyse en termes de milieux continus ne vérifie plus les hypothèses de son cadre d'application [54].



**Fig. III.2.** Distinction des trois phases dans un essai de fatigue [55]



La figure III.2. représente l'évolution type de la norme du module complexe  $|E^*|$  en fonction du nombre de cycles dans un essai de fatigue.

### III.5. Critères de fatigue

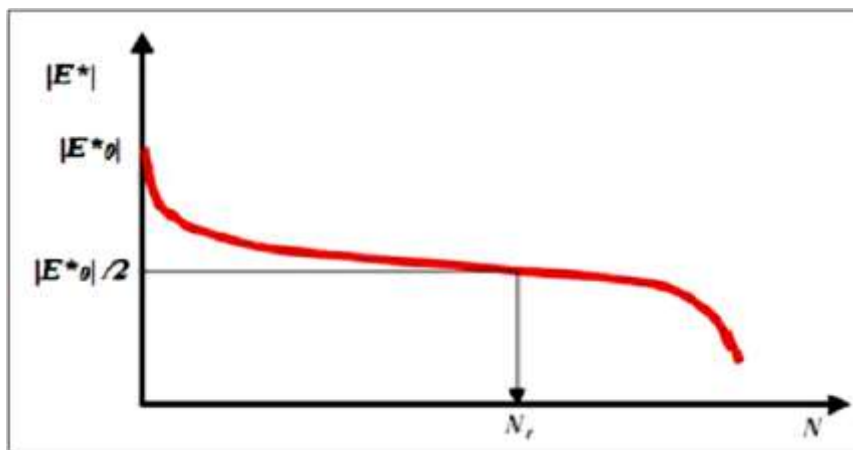
La fatigue des enrobés bitumineux est déterminée, non seulement par la rupture physique des éprouvettes, mais aussi par des critères de fatigue basés sur les valeurs mesurées au cours de l'essai. On peut classer ces critères en deux grands types:

- Critères basés sur les mesures globales ;
- Critères basés sur les mesures locales.

#### III.5.1. Critères sur les mesures globales

##### III.5.1.1. Critère classique: Nf-50%

C'est le critère le plus simple pour déterminer la durée de vie en fatigue du matériau testé. Il est détaillé dans la Norme européenne (NF EN 12697-24, 2012) pour les enrobés bitumineux. Il consiste à déterminer le nombre de cycles où la norme de module complexe de l'éprouvette testée réduit de 50% par rapport à sa valeur initiale  $|E_0^*|$  [54,57].



**Fig. III.3.** Définition du critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie Nf-50% [54]

##### III.5.1.2. Changement de concavité de la courbe de fatigue: Nf-co

Ce critère est basé sur le changement de concavité de la courbe de fatigue ( $|E^*|$  vs  $N$ ) (fig. III.4.). Ce point marque la fin de la deuxième phase du test de fatigue où les macro-fissures apparaissent. À partir de ce point, les champs de déformation et de contrainte ne sont plus homogènes et l'éprouvette est considérée comme fatiguée. Le nombre de cycles de ce moment correspond  $N_{f-co}$ .

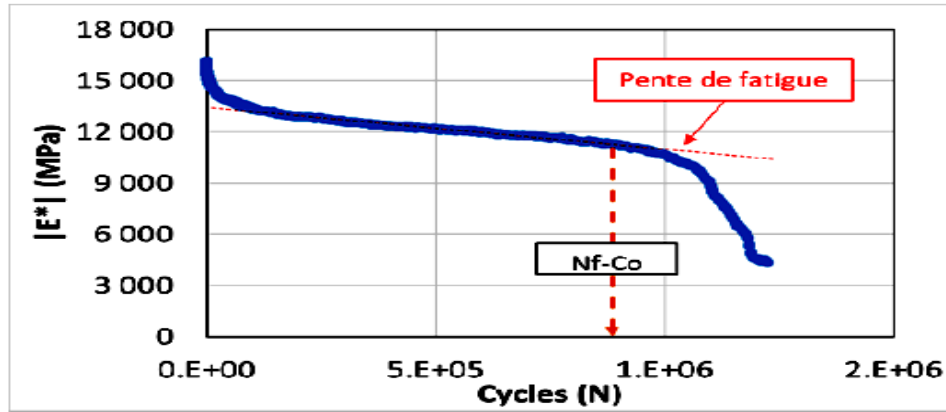


Fig. III.4. Évolution de module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue  $N_{f-Co}$

### III.5.1.3. Critère basé sur l'angle de phase $N_{f-\phi_{max}}$

Ce critère, proposé par [58] et utilisé dans les travaux de Mangiafico, S., 2014 [59] et de Ramirez Cardona, 2016 [60], consiste à identifier deux points d'inflexion sur la courbe  $|E^*|$ -N. Le deuxième point d'inflexion (SIP – Second Inflexion Point) correspond à la valeur maximale de l'angle de phase du module complexe (Figure III.5.). Il est lié, étroitement, à un changement du comportement mécanique du matériau, en raison de l'accumulation de dommages par fatigue. Pour cette raison, le nombre de cycles correspondant au SIP est considéré comme la durée de vie en fatigue  $N_{f-\phi_{max}}$ .

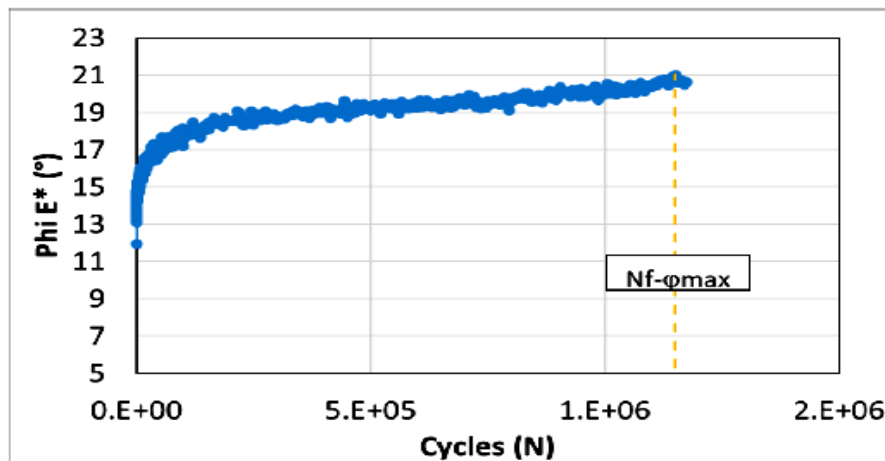


Fig. III.5. Évolution de l'angle de phase du module complexe durant l'essai de fatigue et critère de fatigue  $N_{f-\phi_{max}}$  (Test - SG3B1(5.7)0FT)

### III.5.2. Critères sur les mesures locales

L'analyse de l'évolution des mesures de chaque extensomètre au cours des essais de fatigue peut révéler des changements locaux de l'éprouvette. Ces changements sont liés à la

perte de l'homogénéité due au développement de macro-fissures dans l'éprouvette au cours d'essai.

### III.5.2.1. Critère basé sur les écarts relatifs des amplitudes de 3 extensomètres : $N_f - \Delta \epsilon_i$

Le premier considère l'écart relatif ( $\Delta \epsilon_i$ ) (Eq. III.2) entre l'amplitude de déformation d'un l'extensomètre ( $\epsilon_i$ ) au cycle considéré et sa valeur initiale ( $\epsilon_{i0}$ ) au cycle 60<sup>ème</sup>. Lorsqu'un des extensomètres présente une valeur  $\Delta \epsilon_i$  supérieur à 25% (en valeur absolue), le champ de déformation est considéré comme hétérogène et la rupture de l'éprouvette atteinte. Le nombre de cycles de ce moment correspond  $N_f - \Delta \epsilon_i$  (Figure III.6).

$$\Delta \epsilon_i = (\epsilon_i - \epsilon_{i0}) / \epsilon_{i0} \quad \text{(III.2)}$$

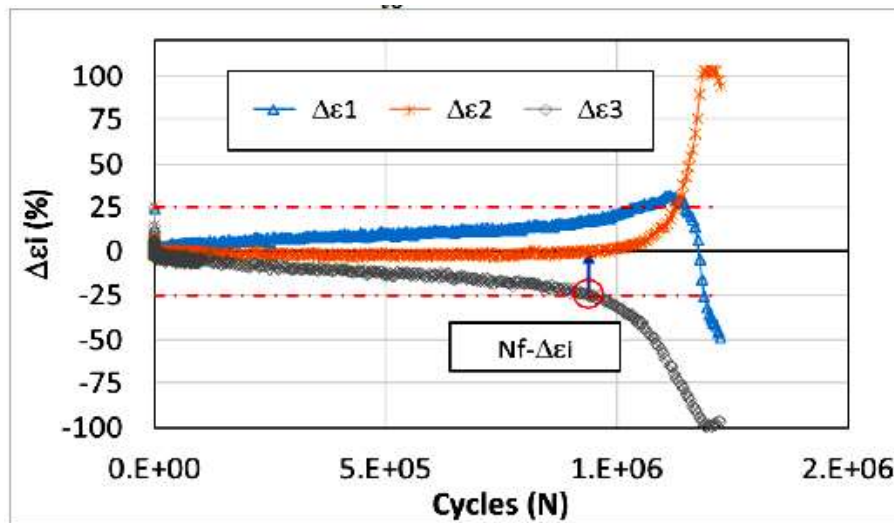
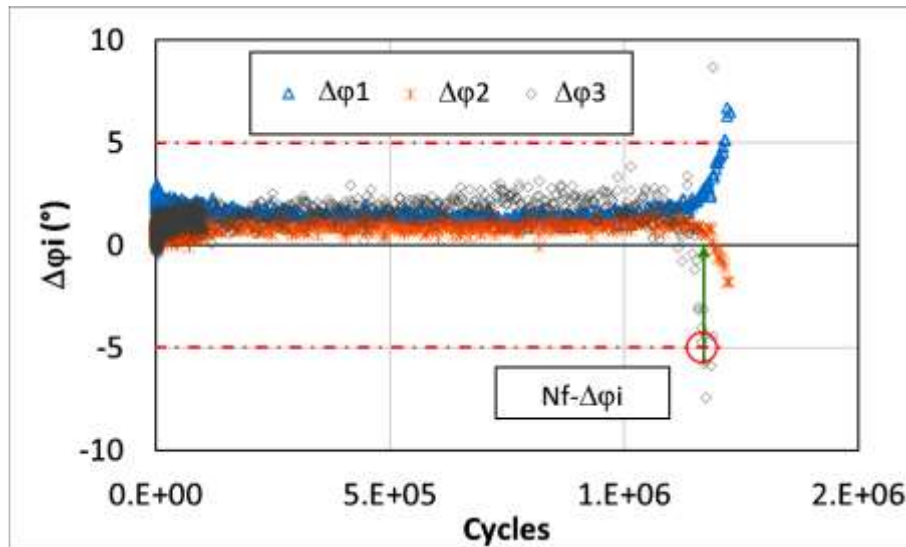


Fig. III.6. Critère basé sur les valeurs  $|\Delta \epsilon_i| \geq 25\%$  (Test - SG3B1 (5.7)0FT)

### III.5.2.2. Critère basé sur les écarts d'angles de phase de 3 extensomètres par rapport à celle de la déformation moyenne: $N_f - \Delta \phi$

Ce critère tient en compte de l'évolution de l'angle de phase du signal de déformation de chaque extensomètre. Quand la différence ( $\Delta \phi_i$ ) (Eq. III.3) entre l'angle de phase mesurée par extensomètre ( $\phi_i$ ) et celle de la déformation moyenne ( $\phi$ ) est supérieure à  $5^\circ$  (en valeur absolue), la rupture de l'éprouvette atteinte. Le nombre de cycles de ce moment correspond  $N_f - \Delta \phi$  (Figure III.7).

$$\Delta \phi_i = \phi_i - \phi \quad \text{(III.3)}$$



**Fig. III.7.** Critère basé sur les valeurs  $|\Delta\phi_i| \geq 5^\circ$  (Test - SG3B1 (5.7)0FT)

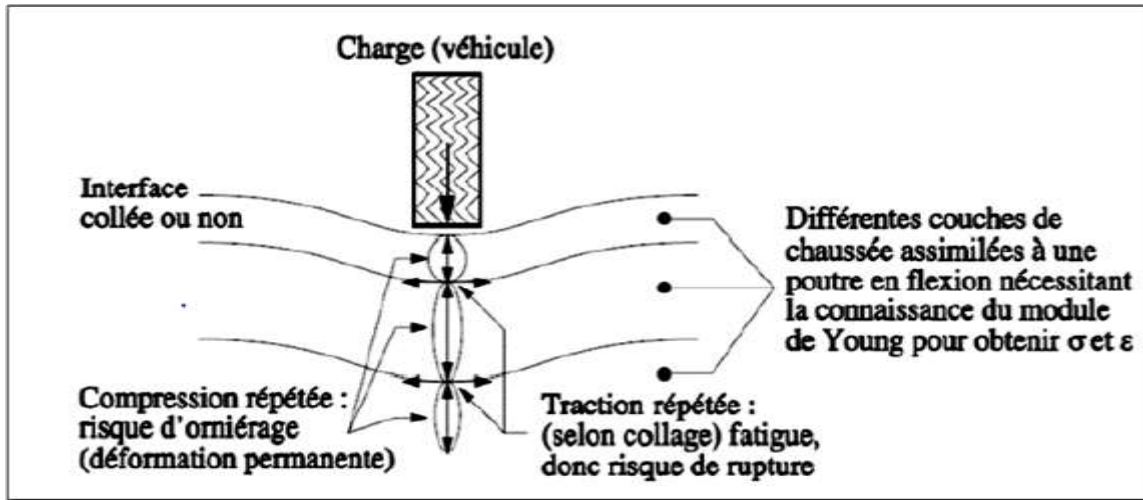
La couche bitumineuse, sous l'effet de passages de poids lourds et de variations thermiques, est soumise au phénomène de « fissuration de fatigue ». Dans le cas des chaussées souples, la fissuration de fatigue est due aux efforts répétés de traction-flexion à la base de la couche de surface bitumineuse, qui entraînent la fatigue de celle-ci et l'apparition en surface de la fissuration longitudinale. Avec le temps, ces fissures évoluent vers un faïençage à mailles fines [3].

### III.6. Sollicitation des couches routières en enrobés bitumineux [54]

Les structures routières sont soumises à diverses sollicitations mécaniques, thermiques et chimiques. Durant la vie des chaussées, ces sollicitations peuvent se combiner et causer des détériorations dans les couches routières. Elles sont liées aux contraintes mécaniques générées par le passage des véhicules (effet du trafic), aux effets créés par les changements du climat (effets climatiques) et aux actions de l'entretien hivernal des chaussées (effet de la saumure).

#### III.6.1. Effet du trafic

Les couches de chaussées subissent des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic. La répétition des chargements dus au trafic peut aboutir à des microfissures qui s'accumulent et entraîner le développement de fissures à travers le matériau, puis à travers les couches de chaussées. En particulier, la fissuration à la surface de la chaussée favorise les infiltrations d'eau. Ces dernières peuvent conduire à la réduction de portance du support, au décollement des couches et à une accélération de la dégradation des matériaux [31].



**Fig. III.8.** Schématisation des sollicitations induites par le trafic sous une roue [31].

Les compressions répétées sous l'effet des charges créent, également, des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû aux déformations des couches d'enrobés bitumineux, mais également aux tassements différentiels des couches non liées inférieures éventuelles.

### III.6.2. Effet de la température

La température a deux effets mécaniques principaux :

1. Changement de rigidité (module) du matériau. Un enrobé bitumineux que l'on chauffe devient plus « mou », par contre à basse température il présente les caractéristiques d'un matériau plus « dur ».
2. Création de contraintes et déformations dues aux dilatations-contractions thermiques différées de chacune des couches lors des changements de température.

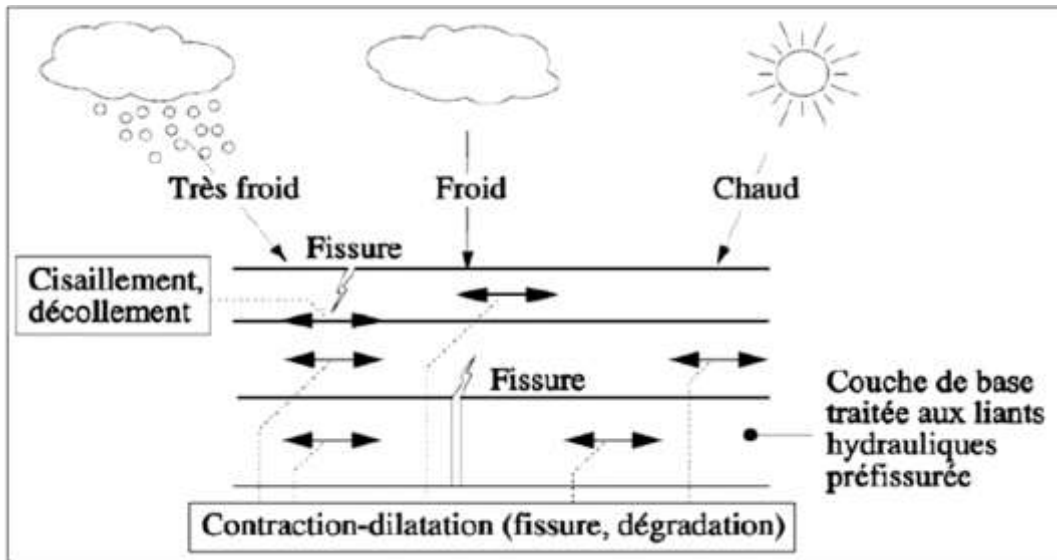


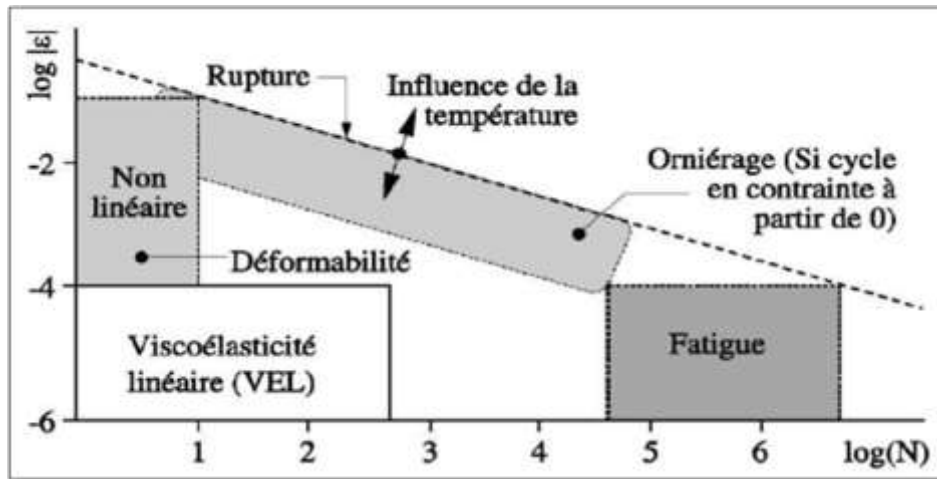
Fig. III.9. Schématisation des sollicitations induites par la température dans les structures routières [31]

### III.7. Comportements des matériaux bitumineux

#### III.7.1. Grandes classes de comportement

Le comportement des enrobés bitumineux est complexe. Ils présentent différents types de comportements en fonction des sollicitations imposées. Malgré le comportement complexe des enrobés, il est possible d'identifier, généralement, quatre grands types de comportements principaux en considérant l'amplitude de la déformation ( $\epsilon$ ) et le nombre de cycles de chargement appliqué ( $N$ ) (pour une température fixée):

- Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations de « faibles amplitudes » ( $\epsilon < 10^{-4}$  m/m) le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire (VEL).
- Pour un faible nombre de chargements et des déformations de quelques pourcents, on observe un comportement fortement non linéaire.
- Lors de chargements de plusieurs milliers de cycles sous faibles déformations, des phénomènes d'endommagement apparaissent, le matériau se fatigue.
- Lorsque des cycles déviatoires en contraintes sont appliqués à partir d'une contrainte nulle, des déformations irréversibles non négligeables se produisent pour des amplitudes de déformation « proches » de la rupture. Leur accumulation crée de l'ornièrage.



**Fig. III.10.** Comportements des enrobés bitumineux à température fixée, ( $\epsilon$ ) déformation - ( $N$ ) nombre de chargements [31]

La Figure III.10. Fournis un ordre de grandeur des différents domaines de comportement type pour une température fixée. Les frontières indiquées, pour les différents comportements, sont des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et la direction du chemin de sollicitation (compression, cisaillement, etc.).

Pour l'application au dimensionnement des chaussées, les quatre propriétés mécaniques des enrobés bitumineux sont tenues en compte [31]:

- la rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire - VEL) ;
- le comportement en fatigue ;
- le comportement à l'orniéragé qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes ;
- la fissuration et la propagation de fissures au travers de la structure de chaussée, en particulier à basse température.

### III.7.2. Comparaison de l'orniéragé des chaussées bitumineuses avec le phénomène de fatigue

#### III.7.2.1. Nature incrémentale des déformations permanentes et comparaisons avec le phénomène de fatigue [21]

De manière générale, la variation de déformation d'un enrobé sous chargement peut être décomposée dans le cadre de l'hypothèse des petites déformations, en une composante réversible  $\delta\epsilon^{rév}(t)$  et une composante irréversible  $\delta\epsilon^{perm}(t)$ , soit sous forme tensorielle pour le bilan d'un cycle:

$$\delta\epsilon(t) = \delta\epsilon^{rév}(t) + \delta\epsilon^{perm}(t) \quad \text{(III. 4)}$$

La composante irréversible  $\delta\varepsilon^{\text{perm}}(t)$  apparaissant à chaque cycle (chaque passage de roue) est quasiment indétectable; elle est masquée par la composante réversible  $\delta\varepsilon^{\text{rév}}(t)$  dont l'amplitude est bien plus importante [61]. Cependant, au bout de quelques dizaines ou quelques centaines de milliers de cycles, la déformation permanente  $\delta\varepsilon^{\text{perm}}(t)$  (Eq. III. 5) issue du cumul sur le temps des incréments de déformation irréversible deviennent mesurables et susceptible de conduire à la ruine par orniérage de la chaussée.

$$\varepsilon^{\text{perm}}(t) = \sum_{\text{chargements}} \delta\varepsilon_p(u) \quad (\text{III. 5})$$

La fatigue des matériaux bitumineux apparaît par accumulation des micro-dégradations au bout de quelques centaines de milliers de cycles (pour les différentes classes de comportement des enrobés). Cependant, les phénomènes mis en jeu sont très différents de ceux qui interviennent dans le processus de l'accumulation des déformations permanentes (orniérage). En effet, l'apparition de la fatigue se traduit par une chute de la rigidité du matériau, alors que pour le phénomène d'orniérage, l'accumulation des déformations peut se faire sans modification notable de la rigidité du matériau [21].

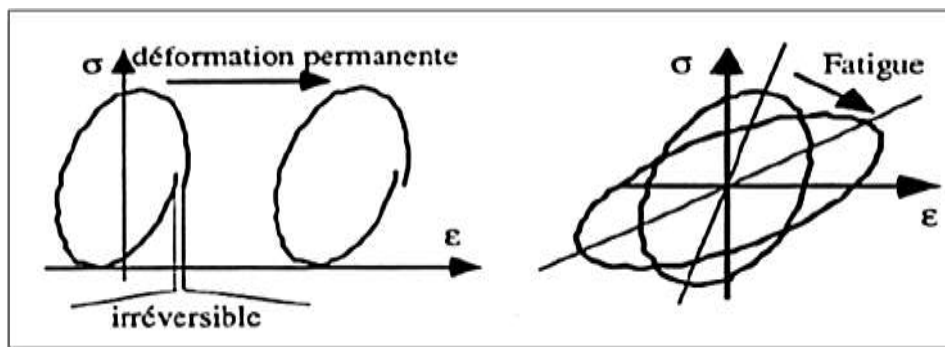


Fig. III.11. Distinction entre le phénomène d'orniérage et la fatigue [21].



### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, une caractérisation du comportement à la fatigue est présentée. Les essais de fatigue au laboratoire caractérisant la fatigue des enrobés bitumineux peuvent être regroupés en trois grands types:

- les essais de flexion (2, 3 et 4 points) ;
- les essais de traction-compression (directe et indirecte) ;
- les essais de cisaillement.

Par la suite une présentation des sollicitations des couches routières en enrobés bitumineux, ainsi que les grandes classes de comportement, les types de chargement, les critères de fatigue qui sont classés en deux grands types: (1) critères basés sur les mesures globales et (2) critères basés sur les mesures locales.

Une comparaison de l'orniéage des chaussées bitumineuses avec le phénomène de fatigue a été faite, de manière générale, la variation de déformation d'un enrobé sous chargement peut être décomposée dans le cadre de l'hypothèse des petites déformations, en une composante réversible  $\delta\varepsilon^{\text{rév}}(t)$  et une composante irréversible  $\delta\varepsilon^{\text{perm}}(t)$ , la composante irréversible  $\delta\varepsilon^{\text{perm}}(t)$  apparaissant à chaque cycle (chaque passage de roue) est quasiment indétectable; elle est masquée par la composante réversible  $\delta\varepsilon^{\text{rév}}(t)$  dont l'amplitude est bien plus importante. Cependant, au bout de quelques dizaines ou quelques centaines de milliers de cycles, la déformation permanente  $\delta\varepsilon^{\text{perm}}(t)$  issue du cumul sur le temps des incréments de déformation irréversible deviennent mesurables et susceptible de conduire à la ruine par orniéage de la chaussée.

D'autre part, les conditions climatiques, telles que la température, influent sur les deux phénomènes (orniéage et fatigue), mais d'une façon inverse. La haute température va intensifier la dégradation par orniéage, et la basse température approfondir la fissuration par fatigue.

## CHAPITRE IV

### MODIFICATION DES CARACTÉRISTIQUES D'ENROBÉ BITUMINEUX

#### IV.1. Introduction

L'amélioration des caractéristiques des chaussées souples routières s'avère indispensable devant la croissance des trafics et les performances de plus en plus grandes des véhicules. Cette amélioration s'est développée, entre autres, par l'introduction de nouvelles techniques et procédés de modification des produits bitumineux [29]. La modification est définie comme étant une modification dans les propriétés pendant la fabrication par l'emploi d'un ou plusieurs ajouts. Les mélanges sont modifiés et appliqués aux routes principalement en utilisant l'un des deux processus, les processus secs et humides. Dans un processus à sec, l'ajout est utilisé comme partie de l'agrégat dans le mélange chaud pour remplacer une partie de la fraction solide. Le procédé humide, où l'ajout fonctionne comme un modificateur du liant, initialement développé par Charles Mc Donald, fait référence à tout procédé dans lequel le caoutchouc granulé, entre 5 et 25 % en masse du bitume, est d'abord mélangé au bitume jusqu'à ce qu'il réagisse et que ses propriétés soient modifiées. Il est ensuite ajouté au mélange en tant que liant modifié. Le procédé sec ainsi que le procédé humide utilisés pour modifier les enrobés bitumineux présentent certains inconvénients. Pour le procédé humide, un équipement coûteux est nécessaire, tandis que le procédé sec nécessite de longs temps de digestion pour obtenir des résultats acceptables. Cela semble avoir produit une stagnation dans le développement de cette technologie.

Le développement du caoutchouc prédigéré a ouvert la possibilité d'utiliser cette technologie, dans un procédé appelé semi-humide qui conserve les avantages offerts par le caoutchouc sans les inconvénients des deux autres procédés. Une étude comparative du comportement mécanique d'enrobés bitumineux additionnés de caoutchouc par trois procédés différents son été réalisée par Francisco Chavez et al. Pour les procédés secs et semi-humide, deux ensembles d'échantillons ont été fabriqués, le premier ensemble sans temps de digestion et le second avec 30 minutes de temps de digestion. Les résultats ont montré qu'après 30 min de temps de digestion, le mélange de procédés sec continuait à montrer un comportement inférieur par rapport au mélange semi-humide avec le même temps de digestion, notamment en ce qui concerne la sensibilité à l'humidité. Les résultats ont, également, montré que le mélange semi-humide avec 30 min de temps de digestion maintenait et même dépassait les résultats obtenus par le mélange de procédés humide.

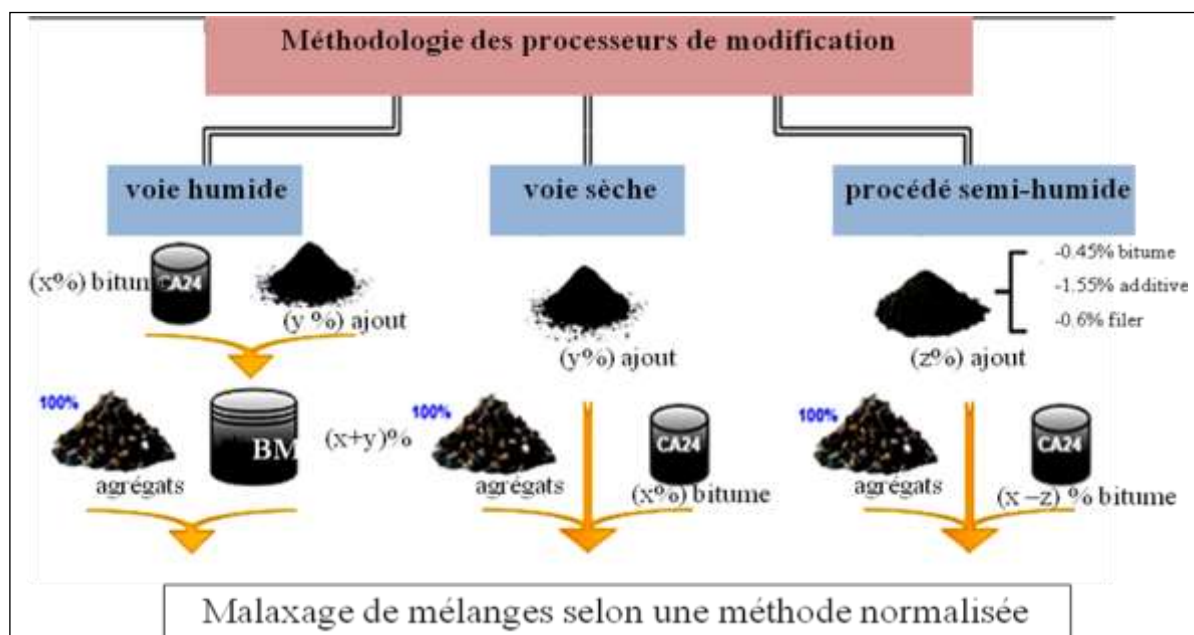


Fig. IV.1. Méthodologie des processeurs de modification [62]

## IV.2. Insuffisances des mélanges bitumineux

Le bitume pur, lorsque son grade est bien choisi pour le produit bitumineux concerné (enrobé ou enduit) et dans une application donnée, répond dans une grande majorité de cas à l'objectif qui est de garantir des propriétés d'adhésion et des propriétés mécaniques satisfaisantes dans les conditions de trafic et de climat auxquelles on a affaire. Cependant, l'accroissement du trafic poids lourds, avec une augmentation de la charge et de la pression des pneumatiques, induit un risque accru d'orniérage des chaussées bitumineuses. En effet, le poids total en charge a passé de 19 à 26 tonnes des années 60 aux années 70, pour atteindre 40 tonnes depuis 1989 [21]. Ces dernières années, de super poids lourds de 60 tonnes sont en circulation dans certains pays [63]. Ces conditions de trafic alliées à des impératifs d'économie (investissements plus durables dans le temps, couches de plus en plus minces) ont amené les bitumes purs à certaines limites d'emploi: [18]

- Le bitume pur ne permet plus à l'enrobé de type traditionnel (béton bitumineux 0/10 ou 0/14 à granulométrie continue, semi-grenu ou grenu) – même en choisissant un grade dur (35/50 par exemple) – d'assurer dans tous les cas une résistance à l'orniérage satisfaisante sous trafic très lourd et canalisé pour des températures durablement élevées; un grade plus dur, s'il apporte à l'enrobé un meilleur comportement à l'orniérage accroissent à l'inverse les risques de fissuration thermique à basse température;

- Certains mélanges enrobés de granularité ouverte n'auront pas la résistance mécanique souhaitée du fait de la cohésivité et de l'adhésivité obtenues avec un bitume pur, ni même une durabilité satisfaisante du fait d'une richesse en liant faible;
- De même, les enduits superficiels sous trafic élevé et lourd ne présentent pas la même durabilité lorsqu'ils sont formulés avec un bitume pur pour les mêmes raisons de qualités mécaniques et d'adhésivité [18].

### IV.3. Objectifs de la modification

Les objectifs recherchés par la modification des bitumes par des polymères sont multiples. Il s'agit avant tout de modifier le comportement thermique, où on conserve une consistance, suffisamment, élevée aux hautes températures pour éviter ressues et déformations permanentes, diminuer la fragilité à basse température pour éviter fissurations et arrachements de gravillons.

Ces objectifs dépendent aussi des domaines d'application et des techniques projetés [64]:

- ✓ Enduits superficiels ;
  - Amélioration de la résistance sous les sollicitations de traction et de cisaillement
  - Assurer la durabilité ;
  - Éviter le ressuage ;
  - Améliorer l'adhésivité/tenue à l'eau.
- ✓ Enrobés ouverts
  - Améliorer les propriétés antidérapantes ;
  - Augmenter la viscosité aux températures d'application.
- ✓ Enrobés à chaud épais (> 5 cm), enrobés minces (3 à 4 cm)
  - Assurer la résistance à l'orniérage ;
  - Améliorer le comportement à basse température ;
  - Améliorer le comportement à la fatigue.
- ✓ Couche d'assise de chaussée
  - Augmenter la résistance à la fatigue sous les chargements répétés du trafic ;
  - Apport d'une certaine flexibilité [63].

Donc, l'objectif de la modification des bitumes est donc le développement d'un bitume "idéal". Ce bitume devrait avoir une susceptibilité thermique très faible sur toute la plage des températures de service. Sa susceptibilité au temps de charge devrait être faible, alors que sa

résistance à l'orniérage, à la rupture et à la fatigue devrait être forte. De plus, ce bitume devrait conserver les propriétés d'adhésivité et de cohésion des liants traditionnels. Enfin, la résistance au vieillissement devrait être élevée tant en service que lors de la mise en œuvre.

Ces modifications introduites dans les bitumes devraient ainsi entraîner une diminution de la déformation permanente aux hautes températures, une meilleure résistance à la fissuration aux basses températures et un meilleur comportement des enrobés en service sous charges lourdes et répétées [47].

#### **IV.4. Mécanisme de la modification**

Pour qu'un polymère soit efficace, il faut qu'il soit compatible avec la matrice bitumineuse. Le polymère doit améliorer la résistance de bitume à des températures élevées sans pour autant le rendre trop visqueux à la température de malaxage ou bien trop rigide à des températures basses. Si ce bitume est appelé à être utilisé dans les enrobés, il doit être capable de se malaxer dans des équipements conventionnels. Dans tous les cas [18].

Il existe deux principaux procédés de modification. Ainsi, le polymère peut être ajouté directement au bitume pour obtenir un BMP (Bitume Modifié par Polymère), qui peut ensuite être utilisé, pratiquement, comme le serait un bitume « pur ». ce processus est appelé 'procédé humide'. En parallèle, certains modifiants sont plutôt ajoutés en centrale d'enrobage comme additifs, au même moment que les granulats. Dans ce cas, le bitume et le polymère n'ont pas le temps d'obtenir la morphologie d'un liant modifié. Le comportement des modifiantes relève donc soit de la modification du squelette granulaire, soit de celle du liant, ou des deux [18].

Les liants modifiés sont des liants bitumineux dont les propriétés ont été modifiées par emploi d'un ajout qui, introduit dans le bitume de base, en modifiant la structure chimique et/ou les propriétés physiques et mécaniques.

La modification des propriétés des bitumes par l'addition de polymère est souvent expliquée par le gonflement du polymère par les huiles du bitume. Pour qu'un polymère soit utilisable dans la modification d'un bitume, il doit être moins gonflable, éventuellement soluble, dans les fractions hydrocarbonées de faibles masses moléculaires du liant [65]. Cela induit qu'un liant bitume-polymère peut être considéré comme un système à deux phases :

- Une phase polymère gonflée par les huiles ;
- Une phase bitume plus riche en résines et en asphaltées que le bitume de base.

Le gonflement du polymère est, essentiellement, un processus de diffusion dans lequel les huiles (fraction maltène) du bitume migrent en particules de polymère, qui entraîne le gonflement de ce dernier [66]. Le processus de gonflement est influencé par le type de bitume, la source caoutchouc et composition, méthode de production caoutchouc, taille des particules caoutchouc et morphologie [67 - 70]. Une plus grosse particule mettra plus de temps à gonfler qu'une particule plus fine, car le taux de pénétration de l'huile malténique dans les particules caoutchouc est inversement proportionnel à la taille des particules caoutchouc (profondeur de pénétration) [71].

Différentes procédures ont été développées pour produire les bitume-polymères. Les principaux facteurs influençant le taux de dispersion des polymères dans la matrice bitumineuse : les dimensions des particules de polymère, la température, et le cisaillement appliqué aux mélanges.

La température de mélange est, généralement, comprise entre 150 °C et 200 °C ou plus. La durée de mélange varie de quelques minutes à quelques heures. La durée optimale de mélange est atteinte quand les propriétés désirées du bitume-polymère sont atteintes [46].

Les propriétés de bitume modifié dépendent de plusieurs facteurs:

1. Les conditions de mélange: la durée du mélange, vitesses de mélange et la température influent sur les propriétés de bitume modifié par caoutchouc (CRMB) [72,73].

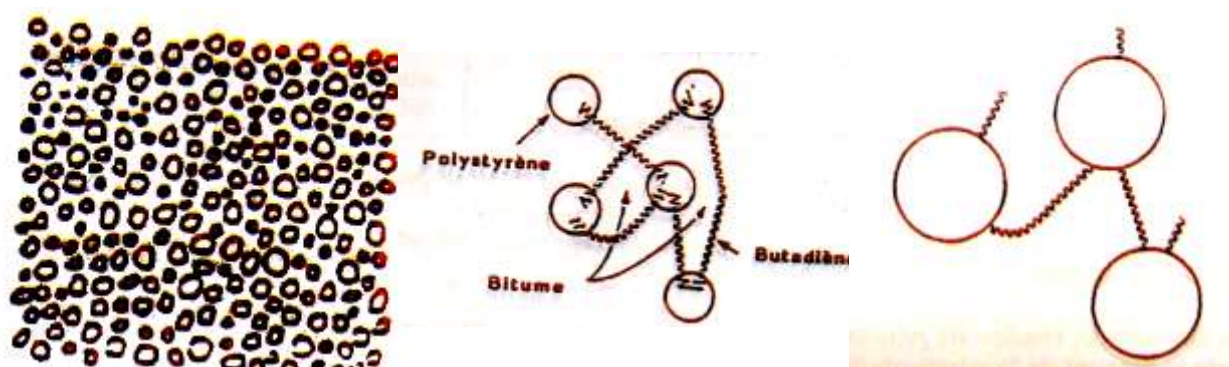
2. Propriétés du bitume pure: [67] ont montré que le degré de pénétration et la composition chimique du bitume affectent les propriétés du bitume modifié. D'après **Duan et al (2021)**[74] la source du bitume a une influence plus élevée que le facteur du pourcentage Crumb Rubber (CR) sur les propriétés rhéologiques du CRMB à haute température.

3. Propriétés du caoutchouc : l'amélioration des propriétés du bitume avec déchet des pneus dépend des marques de pneus [75], composition chimique de pneus [67], teneur et de type de caoutchouc [68, 76], la taille des particules CRM et la méthode de production CR [69].

Lorsque le polymère est ajouté au bitume préalablement chauffé, ce dernier commence immédiatement à pénétrer dans les particules du polymère. Sous l'influence du cisaillement de l'agitation, le polymère gonflé devient mobile et se disperse dans le bitume [65].

Le taux de dispersion est tributaire des paramètres suivants [31]:

- ✓ La température: la vitesse de diffusion du bitume dans les particules de polymère augmente avec la température et modifie le moment où le cisaillement devient efficace.
- ✓ La taille des particules: plus elles sont petites, plus la surface de l'échange est importante et plus la vitesse de diffusion du bitume est grande dans les particules (étape 1 et 2)
- ✓ Le cisaillement: malgré le gonflement les molécules deviennent d'autant plus mobiles qu'elles ont été rompues (étape 3 et 4)



Étape 01 : fines particules de polymère en suspension dans le bitume

Étape 02 : microstructure du polymère

Étape 03 et 04 : domaine de polystyrène gonflé par le bitume et dispersion ultérieure par cisaillement

**Fig. IV.2.** Mécanismes de la dispersion d'un copolymère (polystyrène – butadiène) dans le bitume [31]

Corté, J. F.[31], constate que la compatibilité des systèmes macromoléculaires thermoplastiques était assurée par un processus de dissolution-gonflement du polymère par les huiles du bitume. L'incorporation de polymère, même à faible dose, entraînera une augmentation brutale de la viscosité des maltènes, et donc une meilleure résistance à l'écoulement. De plus, il faut noter que cet ajout de polymère enrichi la phase bitume en asphaltées, diminue la distance inter micellaire et conduit donc à des liants dont la susceptibilité thermique se trouve diminuée.

La modification des liants bitumineux avec des polymères vise toujours la création d'un changement dans le comportement rhéologique de ce liant, ceci est à l'image du développement de spécifications basées sur des essais rhéologiques aux États-Unis [77] et qui

se généralisent ces dernières années en Europe [78]. En Algérie les spécifications sont basées sur des paramètres essentiellement empiriques.

Les enrobés bitumineux fondent sur les liants pour formuler des chaussées souples, et durables; ce changement dans le comportement rhéologique de liant a une influence sur le comportement de ces enrobés bitumineux. Aussi, et tant que la rhéologie est définie comme une science, particulièrement, adaptée à l'étude des corps viscoélastiques afin de pouvoir prédire leurs comportements sous sollicitations mécaniques [79].

## **IV.5. Principaux agents utilisés dans la modification des bitumes**

L'emploi d'un agent chimique dans le bitume de base modifie la structure chimique et les propriétés «physiques et mécaniques». Les polymères constituent la famille d'agents modifiants chimiques la plus utilisée pour la modification des bitumes. On classe les polymères en deux grandes catégories:

### **IV.5.1. Polymères thermodurcissables**

Ils durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique. L'enchaînement de leurs molécules forme un réseau tridimensionnel qui s'oppose à toute mobilité thermique. Ils sont, relativement, peu utilisés en association avec le bitume en technique routière.

### **IV.5.2. Polymères thermoplastiques**

Ils se fluidifient et deviennent malléables sous l'effet de la chaleur, de façon réversible. Ils sont formés, en première approximation, de chaînes macromoléculaires linéaires, éventuellement ramifiées. Ils sont combinés au bitume à température élevée, alors que le mélange se présente sous une forme fluide plus ou moins visqueuse.

On peut tenter de dresser les caractéristiques du polymère thermoplastique pour la modification des bitumes, un tel thermoplastique doit être :

- solide et élastique à la température ambiante, mais présenter une faible viscosité aux températures d'enrobage et de mise en œuvre des bétons bitumineux ;
- compatible avec les bitumes et les granulats, c'est-à-dire conduire à un mélange homogène présentant de bonnes propriétés adhésives et chimiquement stables aux températures habituelles de mise en œuvre des enrobés;
- non toxique tant en ce qui concerne le produit lui-même que les produits de décomposition susceptibles d'apparaître par dégradation thermique;
- recyclable avec les technologies habituellement utilisées dans le domaine routier [46].



### IV.5.3. Fibres

D'autre part les fibres sont aussi utilisées pour améliorer les performances de mélange bitumineux, **Qinwu Xu et al [80]**, ont étudié les effets et les mécanismes de renforcement des fibres pour les mélanges de béton bitumineux (AC) sous la température ambiante et les effets de l'eau. Quatre types de fibres typiques - polyester, polyacrylonitrile, lignine et amiante - sont étudiés. Des tests en laboratoire ont été menés sur l'AC renforcé de fibres (FRAC) pour mesurer sa résistance, sa déformation et son comportement à la fatigue. Les résultats montrent que les fibres ont, considérablement, amélioré la résistance à l'orniérage, la durée de vie à la fatigue et la ténacité du courant alternatif. La résistance à la flexion et la déformation ultime à la flexion, et la résistance à la traction indirecte fractionnée (SITS) à basse température se sont également améliorées.

Les fibres polymères (polyester et polyacrylonitrile) ont amélioré la résistance à l'orniérage, la durée de vie à la fatigue et le SITS de manière plus significative que les fibres de lignine et d'amiante, ce qui peut être, principalement, dû à leur plus grande fonction de mise en réseau ; tandis que les fibres de lignine et d'amiante entraînent une plus grande résistance à la flexion et une contrainte de flexion ultime, ce qui peut être principalement dû à leur plus grand effet de stabilisation de l'asphalte. Cependant, l'effet des fibres sous l'effet de gel-dégel de l'eau ne semble pas prometteur, et le SITS du FRAC avec des fibres de lignine et d'amiante diminue même dans une certaine mesure sous cet effet. Ils ont constaté également qu'une teneur en fibres de 0,35 % en masse de mélange permet d'atteindre les rendements optimums de résistance à l'orniérage et SITS pour la fibre polyester **[80]**.

Plusieurs études antérieures ont montré que l'utilisation d'additifs tels que des fibres pour modifier les mélanges d'asphalte pouvait améliorer l'efficacité et augmenter la qualité et la durée de vie des chaussées. L'article de **Dong Luo et al [81]**, présentent une revue de littérature du rôle de la lignine et de la fibre de verre comme modificateur dans les enrobés bitumineux. Pour évaluer certaines propriétés principales du mélange, certains tests tels que la flexion à basse température, la résistance à la traction indirecte, le suivi de chargement de roue, le suivi de roue de Hambourg, l'immersion Marshall, le gel-dégel le fendage, la fatigue en flexion au troisième point et la fatigue en traction indirecte sont appliqués pour analyser l'orniérage, la résistance à la fissuration à basse température, la résistance aux dommages causés par l'humidité et la résistance à la fatigue d'un mélange d'asphalte modifié avec de la lignine ou de la fibre de verre.

Les résultats ont indiqué que la qualité du mélange d'asphalte s'améliorait considérablement en ajoutant de la fibre de lignine ou de la fibre de verre. Des recherches antérieures ont démontré une amélioration évidente des performances à basse température dans la chaussée lors de l'ajout de 0,2 à 0,4 % de fibres de lignine aux mélanges d'asphalte, avec une amélioration limitée des performances à haute température.

Au contraire, les mélanges d'asphalte modifiés avec 0,2 à 0,6 % de fibres de verre de mélanges d'asphalte ont considérablement amélioré la résistance aux hautes températures. Il est donc difficile d'améliorer toutes les performances du mélange en n'utilisant qu'un seul adjuvant à la fois. Ainsi, une nouvelle façon de modifier le mélange d'asphalte, appelée technologie de double mélange ou modification composite, est capable d'améliorer les propriétés globales du mélange d'asphalte [81].

#### **IV.6. Notion de la compatibilité**

Les problèmes majeurs qui se posent durant la préparation et l'utilisation des mélanges bitume-polymère sont la dispersion de polymère dans le bitume et la stabilité de mélange obtenus [18].

Comme chaque bitume possède une composition chimique propre qui dépend de l'origine de son brut et dans une moindre mesure, du procédé de raffinage, composition qui est généralement insuffisamment définie pour prédire une compatibilité avec tel ou tel polymère, le meilleur moyen de tester la compatibilité d'un couple bitume-polymère demeure l'essai de laboratoire. Pourtant, certains chercheurs ont formalisé la notion de compatibilité bitume-polymère selon des principes généraux qui permettent d'anticiper grossièrement l'aptitude d'un bitume à former de bons BmP [82,83]:

- ✓ Une forte teneur en asphaltées diminue la compatibilité bitume-polymère ;
- ✓ L'aromaticité des maltènes doit se situer dans une gamme optimale pour garantir une bonne compatibilité.

La compatibilité des bitumes et des polymères est le sujet pour lequel il n'y a pas de référence absolue et dont l'interprétation dépend du sens donné au terme « compatible ».

La compatibilité peut être définie de deux façons [64]:

- en terme thermodynamique, la compatibilité se définit comme une situation où le bitume et le polymère forment une seule phase. Nous nous référerons à cette définition de la compatibilité en parlant de solubilité d'un polymère dans le bitume est qu'il n'y aura pas de séparation de phases et qu'un tel mélange peut être stocké sans agitation.

- en terme pratique, la compatibilité se définit comme une situation où le bitume et le polymère peuvent se combiner pour former un produit dont les propriétés se trouvent améliorées et où ce mélange peut être manipulé sans précautions excessives.

On considère, alors, que la compatibilité a le sens de convenance. L'implication pratique pour un tel mélange bitume/polymère est qu'il peut y avoir une séparation de phase si le mélange est stocké sans agitation.

#### **IV.7. Stabilité au stockage**

L'un des problèmes techniques de processus de modification du bitume est l'instabilité au stockage de bitume modifié. La tendance à la séparation de phases engendrée par les problèmes de compatibilité peut être appréciée à l'aide de l'essai de stabilité au stockage. Cet essai est, généralement, effectué aux températures de stockage et de transport des liants bitumineux. L'instabilité se manifeste, généralement, par une démixtion ou crémage de la phase polymère vers le haut du mélange [29]. La stabilité au stockage des bitumes modifiés est considérée comme un critère important de la production et de l'utilisation des bitumes modifiés [85].

L'essai de stabilité au stockage est utilisé dans plusieurs pays afin de cerner, sur des liants modifiés par des polymères, les précautions à prendre durant leurs opérations de stockage et de transport.

Le principe de cet essai est de maintenir le liant à 160 °C, dans un tube en aluminium en position verticale pendant 48h, de le refroidir durant 4h à une température de -7 °C. Il est ensuite procédé à un découpage en trois parties. La séparation, éventuelle, des phases (bitume et polymère) est appréciée par la détermination de la variation de la TBA des parties supérieures et inférieures. Pour que le bitume modifié soit stable, la différence de la valeur de TBA des deux parties (supérieure et inférieure) ne doit pas dépasser 2.5 °C [29].

#### **IV.8. Amélioration de la résistance des couches bitumineuses au phénomène d'orniérage en modifiant le liant hydrocarboné**

Le développement industriel a eu pour conséquence directe l'obtention d'un volume considérable de déchets et sous-produits industriels, tels que les déchets de pneumatiques usagés, peu valorisés dans le domaine du génie civil : Béton bitumineux ainsi que sur mortier, pour améliorer leurs caractéristiques de performance [88 - 92].

Le liant hydrocarboné a été modifié en incorporant une faible teneur du mélange de caoutchouc de pneus usés dans du bitume afin d'évaluer l'effet gonflant du mélange

caoutchouteux (MC) sur la raideur du béton bitumineux. Le caoutchouc utilisé est un mélange de différents types, sections et marques de pneus. L'influence de l'ajout de 3%, 6% et 9% MC en poids de bitume sur le comportement mécanique du béton bitumineux a été étudiée, par rapport à la limite de l'indice de pénétration du bitume modifié. Les résultats expérimentaux enregistrés ont montré que l'utilisation d'une faible teneur en MC comme additif au bitume améliore la susceptibilité thermique (pénétration de l'indice PI), ce qui entraîne une amélioration de la stabilité Marshall, et une augmentation du module de rigidité du béton bitumineux à différentes températures. De plus, une réduction remarquable de la profondeur des ornières a été observée.

Dans les zones chaudes, les problèmes de fluage et d'orniérage affectent la plupart des chaussées bitumineuses sur les routes fortement chargées. Cela entraîne une augmentation du coût d'entretien des routes existantes [93]. Les bitumes disponibles sur le marché algérien a une résistance moyenne au phénomène d'orniérage, notamment dans les régions chaudes, du fait de leur dureté moyenne (35/50) [94].

La technique de modification du bitume par de caoutchouc des pneus usés n'est pas nouvelle, mais elle est encore améliorée dans de nombreux travaux de recherche récents tels que [74, 95, 96]. En raison de la tendance mondiale à développer des infrastructures de transport durables en adoptant diverses sources de matériaux recyclés, qui encourage la recherche sur le recyclage dans le domaine des travaux routiers [97].

Le phénomène de gonflement est un processus de diffusion dans lequel les fractions les plus légères du bitume migrent vers les particules de caoutchouc [66, 67, 98, 99]. Le gonflement joue le rôle le plus important dans la technique de modification du bitume [100], et il dépend, principalement, de la teneur en caoutchouc qui affecte, significativement, les propriétés du bitume modifié [101].

Les spécifications internationales recommandent une dose de MC de 17 à 22 %; leurs conditions d'assemblage préconisées sont donc basées sur une concentration aussi élevée, non transposable directement pour l'assemblage de faibles teneurs en MC (7,5 %) [97].

**Rodríguez-Alloza et al. [102]**, a noté que les mélanges bitumineux à forte teneur en caoutchouc présentent un inconvénient majeur: ils nécessitent des températures de mélange et d'installation plus élevées en raison de la viscosité élevée causée par la forte teneur en caoutchouc et, par conséquent, ils produisent de plus grandes quantités d'émissions de gaz à effet de serre que les mélanges bitumineux conventionnels.

Sur la base des résultats d'études antérieures [97, 103], les conditions de malaxage (température, vitesse et temps de malaxage), qui jouent toutes un rôle essentiel dans les propriétés du bitume modifié, ont été bien choisies.

Les bitumes avec un PI supérieur à + 2 sont fragiles aux basses températures [104]. Une forte teneur en caoutchouc (15% CR) provoque un durcissement excessif du bitume modifié (PI supérieur à + 2) qui peut affecter la souplesse des chaussées à basse température. La plupart des études précédentes se sont concentrées sur la qualité du caoutchouc modifié bitume à forte teneur, soit plus de 15 % en poids de bitume de base [74, 95, 96, 102, 105, 106].

Ce travail s'inscrit dans la continuité des travaux précédents qui s'intéressent à l'amélioration des caractéristiques des bitumes par ajout de caoutchouc; mais dans notre cas, nous avons examiné l'utilisation d'une faible teneur en caoutchouc afin de produire un bitume robuste avec une bonne consistance à haute température et qui favoriserait une flexibilité plus adéquate à température moyenne.

Plusieurs études avaient indiqué que la différence de composition des pneumatiques (entre marques, types et sections de pneumatiques) avait un impact significatif sur les propriétés du bitume modifié [67, 105, 107, 108]. De plus, il a été indiqué que les conditions de mélange affectent les propriétés chimio-rhéologiques du bitume modifié [93, 103].

Selon la littérature, il y a un nombre faible de recherche qui étudie l'utilisation du mélange de différents types, et marques de pneus en complément du bitume à faible teneur. C'est pourquoi notre étude expérimentale a été réalisée pour bien comprendre l'effet de l'utilisation d'un mélange de bitume modifié à faible teneur en caoutchouc sur les performances du mélange bitumineux.

## IV.9. Conclusion

Ce chapitre est axé sur les études de modification des bitumes par les ajouts de manière générale et en particulier les polymères. Bien que la technique de modification existe depuis plusieurs années, reste un axe de recherche très étudié en raison des multiples facteurs influant sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bitumes et de leurs enrobés.

A travers la recherche bibliographique, nous avons présenté les processus, les objectifs et le mécanisme de la modification, les facteurs influençant les propriétés de bitume modifié, la notion de la compatibilité et la stabilité au stockage.

Afin d'améliorer les caractéristiques du bitume pur qui ne répondent plus aux exigences actuelles, les polymères s'avèrent être des agents modifiants efficaces. Mais des conditions sont nécessaires pour optimiser cette amélioration. Cette modification introduite dans les bitumes devrait ainsi entraîner une diminution de la déformation permanente aux hautes températures, une meilleure résistance à la fissuration aux basses températures et un meilleur comportement des enrobés en service sous charges lourdes et répétées. Il faut noter que l'amélioration du liant n'est, généralement, appréciée que par le biais de l'amélioration d'une seule propriété de l'enrobé.

## CHAPITRE V

### ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

#### V.1. Introduction

Pour étudier les déformations permanentes des enrobés bitumineux, orniérage et fatigue une série d'essais effectués dans trois laboratoires :

- La fabrication des bitumes modifiés a été réalisée en partie au niveau du laboratoire LEEGO de la faculté de génie civil de l'USTHB, Alger.

- La caractérisation des matériaux a été réalisée au niveau de laboratoire de l'organisme de contrôle technique de travaux publics (CTTP), Alger.

- L'étude de formulation, et les essais mécaniques sur les granulats et les enrobés ont été réalisés au sein de laboratoire de travaux publics du sud LTPS-Ghardaïa.

Lors des essais mécaniques, on mesure : les déformations cycliques, qui nous permettent d'obtenir des informations sur l'évolution de la rigidité du matériau (module complexe et l'angle de phase) et les déformations permanentes, qui donnent des informations sur la résistance à l'orniérage.

Parmi les facteurs influençant l'orniérage des enrobés bitumineux, on trouve les caractéristiques du bitume. Pour cela on a modifié le bitume existant sur le marché algérien 35/50 avec quelques ajouts dans le but qu'il doit être, suffisamment, rigide aux températures élevées de service, pour maintenir le squelette granulaire, et aussi de limiter le fluage des enrobés, pour avoir une diminution du phénomène d'orniérage. Et aussi il doit être, suffisamment, mou aux basses températures de service pour permettre aux contraintes de se relaxer et résister ainsi à la fissuration par fatigue ou au retrait thermique. Autrement dit, le comportement de l'enrobé est gouverné par celui du bitume qui le compose [29].

Ce chapitre présente les caractéristiques de différents constituants minérales, pour calculer la formule utilisée dans la composition d'enrobés. Nous exposons aussi la méthode de formulation et le calcul théorique de la composition témoin, et la caractérisation de ce dernier.

Ensuite, les résultats de l'étude de l'influence de la modification du bitume par ajout du déchet de caoutchouc des pneus usés sur les caractéristiques des mélanges fabriqués à différentes teneurs seront présentés.

## V.2. Modification du bitume

Avant de commencer l'étude expérimentale sur les enrobés, on a essayé d'améliorer les propriétés du bitume par l'utilisation de nombreux additifs.

Le bitume utilisé dans cette étude est commercialisé par l'entreprise NAFTAL (une filiale de la compagnie pétrolière algérienne SONATRACH). Il est prélevé de la station d'enrobage de Ben Nasser à SOUK-AHRAS (Algérie). Les propriétés physiques de bitume sont résumées dans le tableau V.1.

**Tableau V.1.** Propriétés physique des bitumes

<i>Essai</i>	<i>Norme</i>	<i>Bitume (1)</i>	<i>Bitume (2)</i>	<i>Spécification Limite [11]</i>
<i>Pénétrabilité en 1/10 mm à 25 °C</i>	EN 1426 ASTM D-5	48	36	35 à 50
<i>Point de ramollissement (TBA) en (°C)</i>	ASTM D-36 EN 1427	51.7	50.5	50 à 58
<i>Ductilité (mm)</i>	ASTM D-113	>1000	>1000	> 600
<i>Densité relative (g/cm<sup>3</sup>)</i>	ASTM D-70	1.029	1.027	1 à 1.1

Les essais sont réalisés sur deux bitumes de même grade 35/50, mais la valeur de pénétration (consistance) est différente avec un transcender de 12 (1/10mm). Le premier est amélioré avec les ajouts : LDPE, LUCOBIT 1210A et l'autre avec HDPE, TiO<sub>2</sub> et la poudre de caoutchouc (PC) respectivement avec les pourcentages suivants : 1%, 2%, 3%, 4% et 5% en poids du bitume pour les quatre ajouts mentionnés au-dessus et aussi pour le PC la variation de pourcentage de 3% à 12% avec un pas de 3% .

Les résultats montrent une amélioration significative du point de ramollissement (TBA), de la pénétration et de la susceptibilité thermique (IP). Pour la stabilité au stockage, le bitume amélioré avec LUCOBIT est stable pendant le stockage par contre le LDPE au-delà de 3% est instable, et aussi les autres mélanges sont instables pour tout les pourcentages étudiés.



**V.2.1. Identification des additives utilisés**

**V.2.1.1. Description d'additive 1**

Lucobit 1210A est une matière synthétique (ECB) composée de copolymères d'éthylène et de bitumes spéciaux. Ses caractéristiques sont présentées au tableau.V.2.

**Tableau V.2.** Caractéristiques techniques d'additive (1) [12]

<i>Propriétés</i>	<i>Unité</i>	<i>LUCOBIT 1210A</i>
<i>Densité (23 °C)</i>	g/cm <sup>3</sup>	0.97
<i>Allongement à la rupture (23 °C)</i>	%	700 - 800
<i>Module d'élasticité</i>	MPA	17
<i>Intervalle de ramollissement</i>	°C	80-100
<i>Plage de porosité</i>	°C	< -30

**V.2.1.2. Description d'additive 2**

Polyéthylène de haute densité HDPE (HMA 025), c'est une matière vierge, qui a été fournie par la société spécialisée dans l'importation et la distribution des matières premières, Sarl POLYCHIMICAL (Algérie).

**V.2.1.3. Description d'additive 3**

Polyéthylène de faible densité LDPE est une matière vierge sous forme granulaire, qui a été fournie par la Sarl POLYCHIMICAL.

**Tableau V.3.** Propriétés de Polyéthylène de haute et de faible densité HDPE (HMA 025) et LDPE [13]

<b>Propriétés</b>	<b>Essai</b>	<b>Valeur typique HDPE (HMA 025)</b>	<b>Valeur typique LDPE</b>
<b>Index de Fusion (190°C/2.16 kg)</b>	ASTM D1238	8g /10 min	0.70g /10 min
<b>Densité</b>	ASTM D473/D1505	0.964 g/cm <sup>3</sup>	0.919 g/cm <sup>3</sup>
<b>Température de fusion</b>	ASTM D3418	134 °C	113 °C
<b>Point de Cristallisation</b>	ASTM D3418	116 °C	-----

#### V.2.1.4. Description d'additif 4

La poudrette de caoutchouc (PC) des pneus usés est obtenue à partir de broyage de ces derniers. On a utilisé les particules de diamètre inférieur à 2.0 mm. (voir titre V.4.2. Caractérisation)

#### V.2.1.5. Description d'additif 5

Dioxyde de titane fin ( $TiO_2$ ) : il a une forme micrométrique. Il est constitué de particules primaires dont le diamètre est, généralement, compris entre 0.1 et 0.4 $\mu m$  avec une surface spécifique BET (Bunauer-Emmet-Teller) d'environ 5-15  $m^2/g$ .

**Tableau V.4.** Propriétés de Dioxyde de titane

Propriétés physico-chimiques			
Masse molaire	79.89 $g.mol^{-1}$	Température d'ébullition	2755. °C
Masse volumique	3.9 à 4.3 $g.cm^{-3}$	Stabilité	Très stable
Solubilité	Insoluble dans l'eau	Combustible	Non combustible
Température de fusion	1855.0 °C	Flammable	Inflammable

#### V.2.2. Présentation des Matériels

La modification a été réalisée au niveau de laboratoire de routes de la faculté de Génie Civil de l'USTHB (Algérie). L'appareillage utilisé est le suivant :

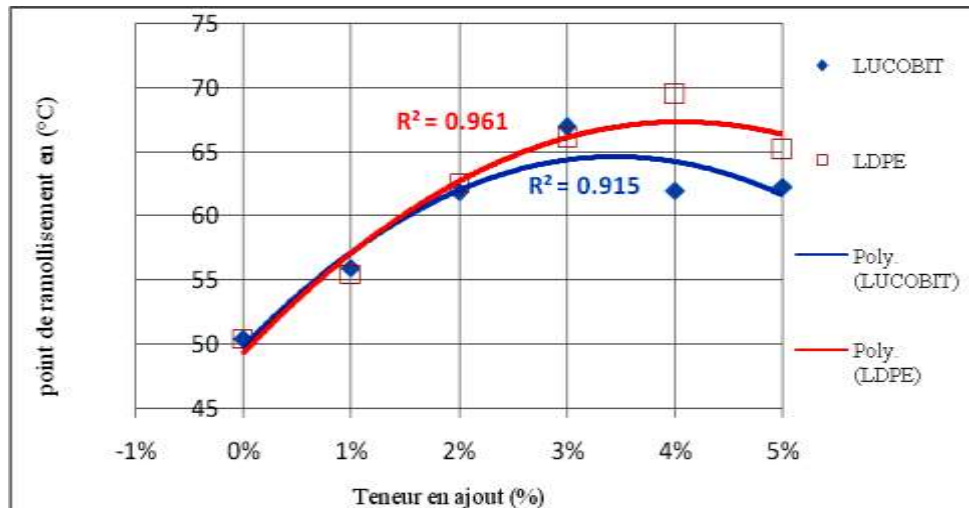
- un agitateur électrique à hélice muni d'un variateur de vitesse de rotation (vitesse Max = 2200 t/min) ;
- une plaque chauffante réglable de capacité 400 °C ;
- un thermomètre allant de -50 °C à 400 °C ;
- un récipient dans lequel on effectue la modification, ce dernier est équipé d'un couvercle hermétique pour empêcher l'évaporation des huiles du bitume lors du chauffage.

#### V.2.3. Résultats et discussions

Les résultats des essais sont présentés sous forme des graphiques et des tableaux montrant l'évaluation de l'influence des polymères sur l'amélioration des caractéristiques du bitume.

**Tableau V.5.** Propriétés de bitume (2) modifié (Modification à 1300 t/min pendant 2 h)

<i>Ajout</i>	<i>TBA (C°)</i>	<i>Pénétration (1/10mm)</i>	<i>Index de pénétration</i>
<i>B 0%</i>	50.5	36	- 1.76
<i>B-1% LDPE</i>	55.5	30	- 1.01
<i>B-2% LDPE</i>	62.6	26	0.07
<i>B-3% LDPE</i>	66.1	22.5	0.39
<i>B-4% LDPE</i>	69.5	26	1.23
<i>B-5% LDPE</i>	65.2	26	0.52
<i>B-1% Lucobit</i>	56	30	- 0.91
<i>B-2% Lucobit</i>	61.9	24	- 0.21
<i>B-3% Lucobit</i>	67	27	0.9
<i>B-4% Lucobit</i>	62	29	0.18
<i>B-5% Lucobit</i>	62.3	30	0.3



**Fig. V.1.** Influence de type et de teneur en ajout sur le point de ramollissement de Bitume (2)

La figure V.1. montre, clairement, que le point de ramollissement augmente en fonction de la teneur en polymère. Ce résultat conduit à constater que la consistance des bitumes est très différente de celle des bitumes modifiés. La pente des courbes est presque la même pour les deux mélanges. Cette figure montre que les valeurs du point de ramollissement des bitumes modifiés sont plus élevées que celles du bitume de base. Ces valeurs élevées indiquent que l'ajout de polymère rend le liant plus rigides, par conséquent, la résistance à la déformation est augmentée. Pour des faibles teneurs en polymères (3% en Lucobit et 4% en LDPE) on constate une augmentation plus prononcée des valeurs de point de ramollissement.

D'après les résultats de point de ramollissement en fonction de la teneur en HDPE, PC et TiO<sub>2</sub> présentés dans la figure V.1., on remarque que:

- L'incorporation de LDPE et Lucobit dans le bitume influe, positivement, sur les valeurs de point de ramollissement avec une augmentation pour tous les mélanges par rapport au bitume de référence ;
- La plus grande valeur de point de ramollissement est obtenue par le mélange modifié à 4% LDPE avec une amélioration de 37 %.

La valeur du coefficient de corrélation exprime la qualité de l'ajustement. En effet, le coefficient de corrélation R<sup>2</sup> obtenu est supérieur à 0.9 et il est très proche de 1, ce qui démontre qu'il existe des très bonnes corrélations entre les résultats.

Les résultats de la valeur de pénétration des bitumes modifiés sont présentés dans la figure 2 qui illustre, clairement, l'amélioration de la dureté du bitume modifié quelque soit le polymère utilisé. La diminution de la valeur de pénétration obtenue par la modification avec les deux types de polymère est un indicateur de l'amélioration de la rigidité du liant. On remarque une sévère diminution de la valeur de pénétration avec l'augmentation de teneur en ajout avec 22.5 et 24 (1/10mm) pour les deux polymères, et après un négligeable accroissement mais on remarque une amélioration significative par rapport au bitume de référence.

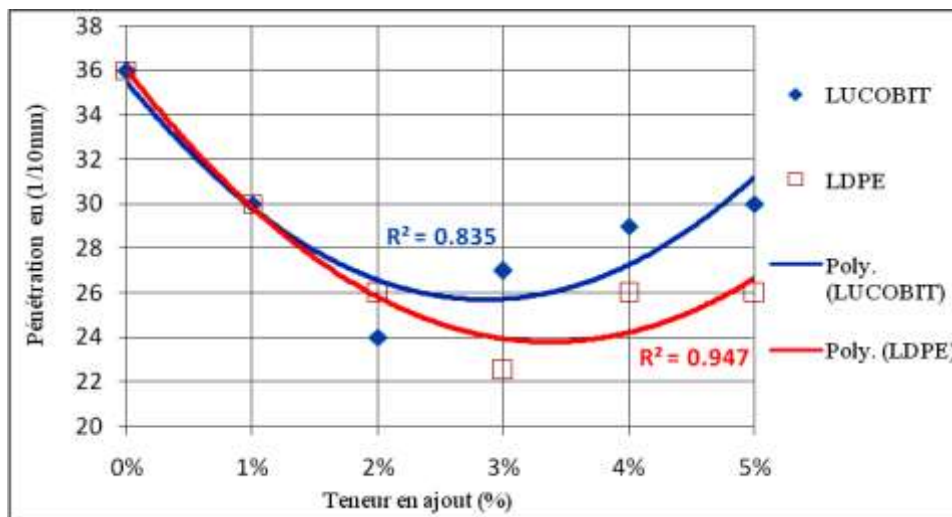
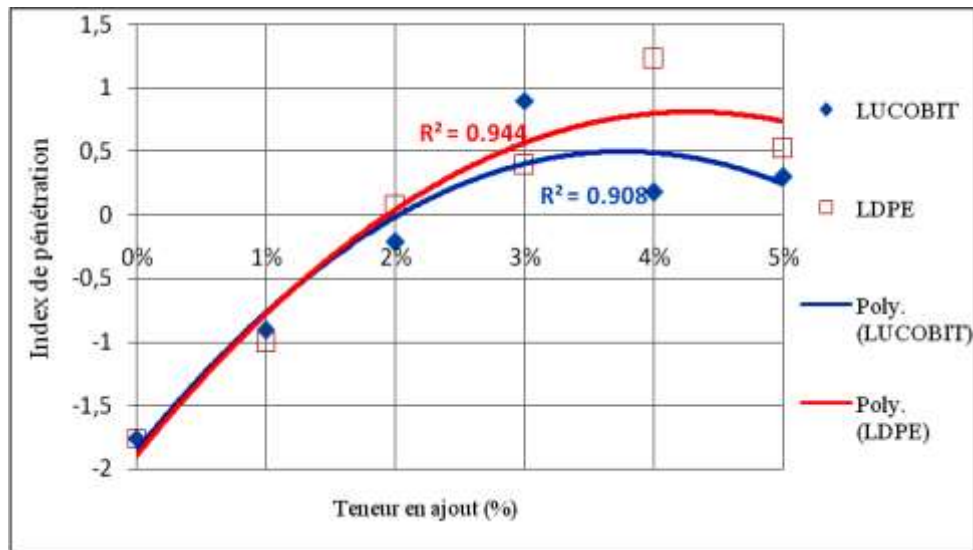


Fig. V.2. Influence de type et de teneur en ajout sur la pénétration de Bitume (2)

Les valeurs de l'index de pénétration (IP) sont calculées pour le bitume témoin et les différents mélanges de bitumes qui sont présentés sur la figure V.3.



**Fig. V.3.** Influence de type et de teneur en ajout sur l'indice de pénétration de bitume (2)

Les courbes de cette figure montrent que le paramètre de l'index de pénétration augmente avec l'ajout des deux types de polymères. Ce paramètre reflète la sensibilité à la température du bitume. À forte teneur en polymère, il est clair que l'index de pénétration des bitumes modifiés est plus élevé que pour le bitume de base. Généralement, la raison majeure de cette augmentation peut être due à l'augmentation de point de ramollissement et à la diminution de la valeur de pénétration simultanément.

Un perfectionnement continue avec l'augmentation de teneur en ajout. La consistance de bitume est, vraiment, améliorée surtout à 4% de LDPE et 3% de Lucobit. Ceci montre que la modification réduit, considérablement, la susceptibilité thermique du bitume.

La modification de bitume (1) a été effectuée avec les trois aditifs HDPE, poudre de caoutchouc (PC) et le TiO<sub>2</sub>. Les résultats sont présentés dans la figure V.4.

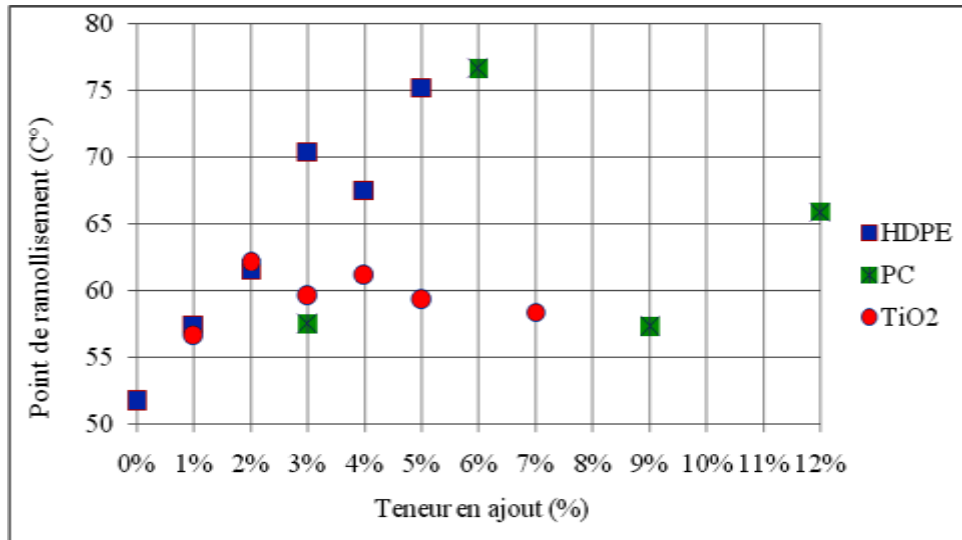


Fig. V.4. Influence de type et teneur ajout sur le point de ramollissement de Bitume (1)

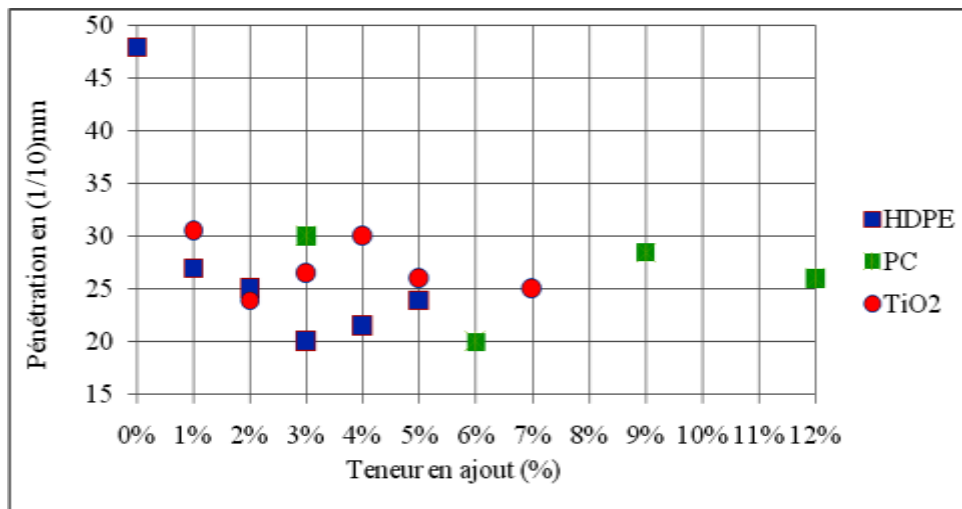
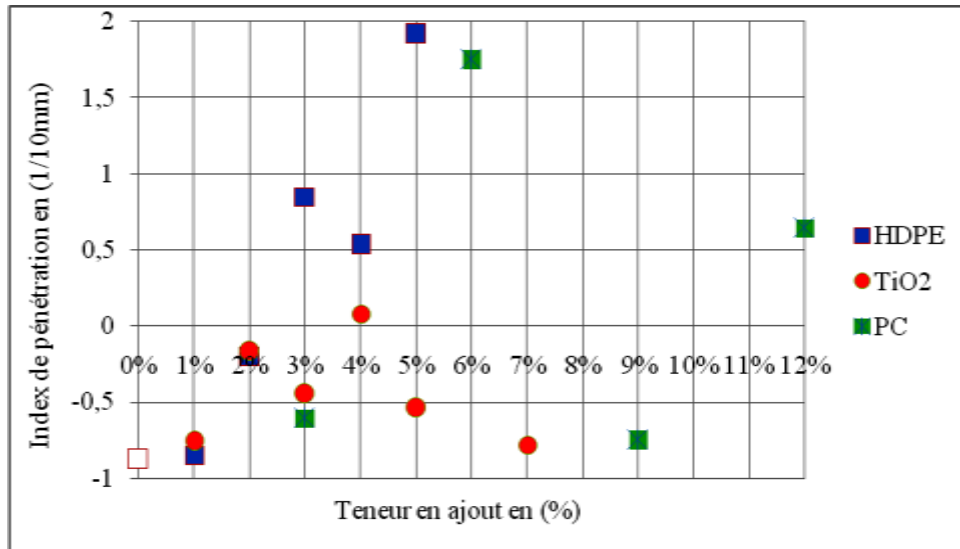


Fig. V.5. Influence de type et teneur ajout sur la pénétration de Bitume (1)

Le diagramme de figure V.5. montre la variation de la pénétration en fonction de teneur en HDPE, PC et TiO<sub>2</sub>. Selon cette figure, il apparaît, clairement, que les bitumes modifiés avec LDPE présentent des meilleures pénétrations par rapport de celles de bitume de référence (0% LDPE).

La pénétration maximale est notée à la teneur de 3% en LDPE, ensuite elle croit tout en restant très inférieure à celle de bitume de référence.



**Fig. V.6.** Influence de type et teneur ajout sur l'indice de pénétration de bitume (1)

Les valeurs de l'index de pénétration (IP) ont été calculées pour le bitume témoin et les différents mélanges de bitumes, les résultats sont présentés sur la figure V.3.

Une nette amélioration des caractéristiques de bitume est notée suite à l'ajout de HDPE, les meilleures performances sont enregistrées à la teneur de 5% HDPE avec:

- une augmentation de point de ramollissement de 45.5% ;
- une diminution de la valeur de pénétration de 50% ;
- la consistance du bitume représenté par l'index de pénétration est amélioré par l'incorporation de HDPE avec une diminution importante de la valeur de susceptibilité thermique.

#### V.2.4. Stabilité au stockage

La stabilité au stockage est un critère nécessaire pour l'évaluation de la possibilité de séparation polymère-bitume, utilisé pour le bitume modifié avec polymère avant de le préparer et de le stocker. Dans cette étude la stabilité au stockage est évaluée avec la différence de la valeur de point de ramollissement de la partie supérieure et inférieure, pour le LDPE est stable jusque 3% mais au delà il est instable et pour Lucobit, la stabilité est assurée pour tout les pourcentages.

### V.3. ESSAIS SUR ENROBES BITUMINEUX

Une étude expérimentale détaillée sur le comportement d'enrobé bitumineux à base des bitumes purs et bitumes modifiés par poudre de caoutchouc des pneus usés est effectuée :

- Analyses empiriques des bitumes modifiés,
- Formulation d'enrobé témoin (à base de liant pur) est caractérisée ;
- Évaluation de la modification de bitume sur les performances de béton bitumineux par l'essai Marshall, l'évaluation de la compactabilité avec la presse à cisaillement giratoire (PCG), le test d'orniérage de suivre une roue (orniéreur LCPC) et le module de rigidité avec l'essai de flexion deux points sur éprouvette trapézoïdale.

#### V.3.1. Caractéristique des constituants

Dans ce travail, on a utilisé des agrégats de nature calcaire (tableau V.8), prélevés depuis la station de concassage de ALCO-GAZ, au niveau de la wilaya de Ghardaïa, Algérie.

Les agrégats sont classés de trois classes granulaires, un sable concassé 0/3, un gravier de classe 3/8 et 8/15. L'utilité de ses classes est de formuler un enrobé semi-grenu de classe granulaire 0/14 suivant le fuseau proposé par l'organisme national de Contrôle Technique de Travaux Publics Algérien « CTTP » (tableau V.9 et figure V.7).

L'ensemble de ces agrégats sont soumis aux essais suivants :

- Analyse granulométrique (NF P 18-586);
- Masse volumique absolue (NF T 66 007);
- Résistance à la fragmentation (Essai Los Angeles) (NF P 18-573 );
- Résistance à l'usure (Essai Micro Deval en présence d'eau) (NF P 18-572 );
- Analyse chimique (NF EN 1744-1).

Les résultats de différentes analyses sont regroupés dans les tableaux V.6. , V.7., et V.8.



**Tableau V.6.** Résultats des Analyses granulométriques des agrégats utilisés

Tamis (mm)	Tamisât cumulés en (%)		
	0/3	3/8	8/15
20	100	100	100
16	100	100	98
14	100	100	89
12.5	100	100	84
10	100	100	58
8	100	100	28
6.3	100	83	6
5	98	46	4
4	97	19	2
3.15	95	7	2
2	79	2	0
1	53	0	0
0.8	38	0	0
0.315	29	0	0
0.16	21	0	0
0.08	15	0	0
<b>Masse volumique absolue (g/cm<sup>3</sup>)</b>	2.65	2.61	2.61

**Tableau V.7.** Propriétés physiques des agrégats.[119]

Essai	Norme	Classes granulaires		
		0/3	3/8	8/15
<b>Propreté (%)</b>	NF P 18-591	-	2.1	1.5
<b>Équivalent de sable (%)</b>	EN 933-8	38	-	-
<b>Abrasion LA (%)</b>	NF EN 1097-2	-	16	11
<b>Micro-Deval (%)</b>	NF EN 1097-1	-	24	21
<b>Densité spécifique</b>	NF EN 1097-3	2.70	2.61	2.65
<b>Absorption de l'eau (%)</b>	NP EN 1097-6	2.61	2.4	2.5
<b>Module de finesse</b>	NP EN 933-1	2.9	-	-
<b>Compacité (%)</b>	NF P 18-555	0.62	0.58	0.60
<b>Porosité (%)</b>	NF P 18-555	0.38	0.42	0.4

**Tableau V.8.** Analyse chimique des agrégats

<b>Granultas</b>	<b>Sable</b>	<b>Graviers</b>
<b>Fractions</b>	0/3	3/8 et 8/15
<b>Insolubles (SiO<sub>2</sub>+ silicate)</b>	5.14 %	7.2 %
<b>Oxyde de fer et d'Al (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b>	1.48 %	2.4 %
<b>Gypes (CaSO<sub>4</sub>,2H<sub>2</sub>O)</b>	Traces	Traces
<b>Chlorures (Na Cl)</b>	0.19 %	0.23 %
<b>Carbonates (CaCO<sub>3</sub>)</b>	95.08 %	94.5 %
<b>Anhydride carbonique (CO<sub>2</sub>)</b>	41 %	43 %
<b>Perte au fer (PF)</b>	41.7%	42.09 %
<b>Eau de constitution</b>	0.27 %	0.5 %

Les agrégats concassés ont une forte teneur en carbonates (CaCO<sub>3</sub>), ce sont de type calcaire. D'après les résultats des essais Los Angeles, Micro-Deval et l'analyse chimique on peut dire que les agrégats utilisés présentes de bonnes performances en terme dureté, et l'adhésion à partir le taux de carbonate important, ce qui joue un rôle très important dans la formulation d'enrobés bitumineux.

### V.3.2. Formulation d'enrobé bitumineux

L'objectif principal de la formulation d'enrobé est de déterminer une composition optimale de granulats, liants et de pourcentage de vide, qui permet d'atteindre les performances visées. Plusieurs méthodes de formulation existent, on cite les plus connues telles que:

**a-La méthode Hveem** qui est développée par Francis N.Hveem. La procédure de formulation peut se définir en plusieurs étapes :

- Choix des matériaux selon des spécifications bien définies et choix de la courbe granulométrique ;
- Détermination de la teneur en liant approximatif selon des essais de centrifuge kérosène équivalent (CKE) et la surface capacité ;
- Préparation des échantillons avec des teneurs en liant, -0.5%, -1,0% et + 0,5 % du liant approximatif, la confection se fait par une énergie de compactage ;

- Test de stabilité et de ressuage effectué sur les éprouvettes confectionnées, et le choix fait pour la teneur qui donne plus de stabilité et moins de ressuage ;
- Choix de la teneur en liant optimale qui est au moins égale à 4 %. Si cette valeur est celle de la teneur en liant maximale préparée (estimation + 0.5 %) alors il faut préparer un échantillon supplémentaire avec une teneur en liant supérieure de + 0.5 % et refaire la procédure.

**b-La méthode de Marshall mix design** qui est développée dans la fin des années 30 par Bruce Marshall, puis révisée et améliorée par l'armée américaine, cette méthode recommandée par la norme VSS de Suisse. Dans cette méthode le choix du liant ne possédant pas une procédure de sélection, le choix est laissé à l'ingénieur qui devra réaliser des essais qu'il juge nécessaires. Ce choix prend à partir des résultats de stabilité, fluage, pourcentage de vide et compacité qui prend après la mesure des densités apparentes et absolues.

**c-La méthode SUPERPAVE** « Superior Performance Asphalt Pavement » développée aux États-Unis pour remplacer la méthode MARSHALL, elle connaît une grande application dans le domaine. Ainsi, en 2000, 62% de la production totale en tonnes de revêtement bitumineux s'est faite par l'utilisation de cette méthode. C'est une méthode développée dans le programme de recherche SHRP dans les années 90. Le choix de liant est dépend, outre des caractéristiques physiques du liant (pénétration, viscosité, etc.), des conditions climatiques et du type de trafic. Il existe une graduation des liants ( performance grading ( PG) system) qui est fonction de la température maximale et minimale de la chaussée et des conditions de trafic. La détermination de ces trois paramètres associée avec une fiabilité minimale du résultat (reliability design) permet de définir le grade minimal du liant à utiliser. Pour le choix de la teneur en liant optimale, des échantillons sont fabriqués avec quatre teneurs en liant différentes (variation de  $\pm 0.5$  %) et soumis au compactage dans la Superpave Gyratory Compactor ( PCG) (presse à cisaillement giratoire). On trace le graphique densité théorique maximal de l'enrobé en fonction du nombre de girations pour les quatre échantillons. Ensuite on détermine graphiquement la teneur en liant qui satisfait le pourcentage de vides voulu et le nombre de girations nécessaires pour l'obtenir. Le nombre de girations est défini par les conditions de trafic.

**d-La méthode française** qui s'appelle la méthode de module de richesse, c'est la méthode la plus connue en Europe, qui repose sur deux grands axes, le premier est la détermination de la quantité minimale de liant en fonction de leur granulométrie du mélange,

et le deuxième est l'utilisation de la presse à cisaillement giratoire pour estimer le comportement lors du compactage du mélange.

Les valeurs de teneur en liant à prendre avec une marge du module de richesse k (cette grandeur, qui est proportionnelle à une épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant les granulats) selon le type de l'enrobé avec la prise en compte les masses volumiques des différents éléments qui sont exprimés dans le coefficient correcteur. La surface spécifique est calculée par la formule V.1 qui relie K à la teneur en liant TL.

$$TL = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[4]{\Sigma} \quad (V.1)$$

Il y a aussi d'autres méthodes qui prennent une façon analytique avec des logiciels tels que C.R.R qui utilise des logiciels spécifiques PRADO.

L'étude de la formulation des enrobés bitumineux de façon générale contient deux phases :

- Composition granulaire;
- Teneur en liant.

### V.3.3. Composition granulaire

La première phase vise à déterminer la meilleure composition granulaire, cette dernière est exprimée par une courbe granulométrique de mélange de différentes fractions, où doit assurer une compatibilité comparativement au fuseau de référence de mélange d'un béton bitumineux semi-grenu BBSG de classe 0/14 (tableau V.9).

**Tableau V.9.** Fuseau de référence de BBSG 0/14

Fuseau granulométrique	Tamis(mm)	Béton bitumineux 0/14		
		min	milieu	max
	14	94	97	100
	10	72	78	84
	6.3	50	58	66
	2	28	34	40
	0.08	7	8.5	10

Cette composition est la meilleure composition compatible avec le fuseau de référence mentionné dans le tableau V.9.

Dans ce cas et à partir des analyses granulométriques des trois fractions 0/3, 3/8 et 8/15, on trouve que la meilleure composition granulaire qui est compatible avec le fuseau, et donne une bonne surface spécifique est la composition représentée dans la figure V.7.

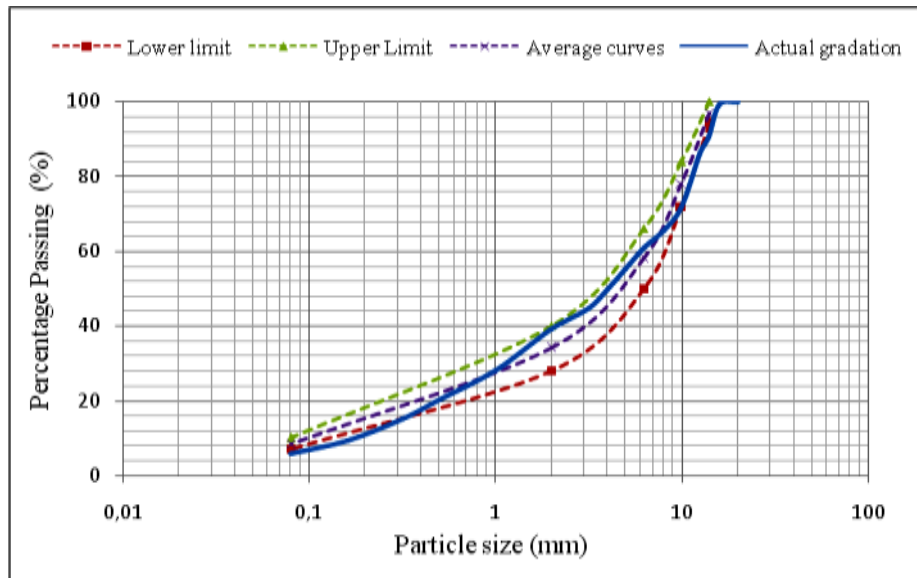


Fig. V.7. La courbe de mélanges comparativement au fuseau de référence

### V.3.4. Teneur en liant

L'objectif est l'obtention d'un enrobage complet de l'ensemble du squelette minéral. La méthode choisie c'est la méthode française, ou méthode de module de richesse. Pour la formulation des enrobés on adopte ces quelques caractéristiques physiques:

- ✓ Coefficient correcteur de la masse volumique :

$$\alpha = 2.65/M \quad (\text{V.2})$$

Selon les proportions des constituants et ces masses volumiques, on a :

$$\text{MVR}_g = 2.628 \rightarrow \alpha = 2.65/M = 1 \quad (\text{V.3})$$

- ✓ Surface spécifique de mélange :

$$100.\Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f \quad (\text{V.4})$$

D'où

G : proportion des éléments supérieure à 6.3 mm ;

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

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

f : proportion des éléments inférieure à 0.08 mm.

Donc on trouve que la surface spécifique : 12.134 m<sup>2</sup>/kg

La teneur en liant est calculée en fonction de module de richesse (k) qui exprime l'épaisseur d'enrobage. La formule de calcul est Eq.V.5:

$$\text{Teneur en liant} = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[4]{\Sigma} \quad (\text{V.5})$$

Le tableau V.10. représente les valeurs de module de richesse et les teneurs en liant adoptées pour caractériser notre témoin.

**Tableau V.10.** Teneurs en liant adoptées.

Module de richesse	3.55	3.73	3.85
Coef. correcteur	1.009		
Surface spécifique	12.134		
Teneur en liant extérieure	<b>5.8</b>	<b>6.2</b>	<b>6.4</b>
Densité théorique	2.421	2.412	2.406

### V.3.5. Performance mécanique de mélange bitumineux témoin

L'étude de la formulation des enrobés bitumineux à chaud, a pour but:

- ✓ De déterminer les caractéristiques adéquates des constituants en fonction du trafic et du climat considérés ;
- ✓ De définir les teneurs des différents constituants qui permettent l'obtention des mélanges bitumineux les plus performants, selon leur utilisation dans la structure de chaussée (couche de base ou couche de roulement) en tenant compte des paramètres de trafic et de climat.

Dans le but d'adopter la meilleure composition, on a examiné les mélanges des trois teneurs en liants. Les essais ont été réalisés sur ces mélanges au niveau du laboratoire LTPS. La confection a été faite suivant la norme EN 12697-35, sous une température de 160 °C. Le bitume utilisé est de classe 35/50, c'est le liant le plus utilisé dans nos chantiers.

Les essais PCG, Marshall selon le protocole normalisé de EN 12697 numéros 31 et 34 respectivement et les essais d'orniérage, de module de rigidité en flexion deux points sur éprouvette trapézoïdale sont effectués sur les mélanges de différentes teneurs en liant calculées précédemment.

**V.3.5.1. Essai Marshall**

La méthodologie de formulation en Algérie préconise l’essai Marshall afin d’évaluer la résistance des bétons bitumineux.

Les dimensions des éprouvettes cylindriques sont 101,6 mm de diamètre et 63,5 mm de hauteur. Les échantillons sont compactés par l’application de 50 coups par face à 150 °C conformément à la norme ASTM D 1559. Après une journée de conservation à la température ambiante, les éprouvettes sont immergées dans un bain de 60 °C pendant 35 min.

La stabilité Marshall est la valeur (en KN) qui correspond à la force maximale enregistrée durant l’essai alors que le fluage (en mm) est la déformation mesurée à la force maximale. Le rapport entre la stabilité (S) et le fluage (F) définit ainsi le quotient Marshall (QM) qui permet d’évaluer la résistance des éprouvettes d’enrobés. Une valeur plus grande du quotient indique que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes [84, 29].

Les mesures de l’essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) ce fait au moment d’essai, d’où la mesure de l’évolution de pourcentage de vide en fonction de nombre de girations, contrairement l’essai Marshall d’où les valeurs de stabilité et fluage sont pris après 24 heures et l’éprouvette laissée à température ambiante, et 35 min de conservation dans l’eau. Dans chaque composition on a examiné 2 éprouvettes de PCG et 04 pour l’essai Marshall. Les résultats de la moyenne sont résumés dans les tableaux V.11.

**Tableau V.11.** Performances PCG des enrobés classiques

<b>Module de richesse proposé</b>	3.55	3.73	3.85
<b>Teneur en liant extérieure</b>	<b>5.8</b>	<b>6.2</b>	<b>6.4</b>
<b>Densité théorique</b>	2.422	2.413	2.407
<b>V 80</b>	6.21	5.99	4.58
Volume de vide à 80 girations : 4 à 9			

**Tableau V.12.** Performances Marshall des enrobés classiques

Module de richesse proposé	3.55	3.73	3.85	Spécification (CTTP)
Teneur en liant extérieure	<b>5.8</b>	<b>6.2</b>	<b>6.4</b>	
Densité théorique	2.422	2.413	2.407	
Stabilité (kN)	12.1	12.7	11.4	Supérieure à 10.5 kN
Fluage (mm)	3.8	4.5	4.9	Inférieure à 4 mm

Les résultats physiques des enrobés sont acceptables, en termes de compactabilité et les pourcentages de vides sont aussi acceptables, contrairement au fluage qui dépasse les valeurs recommandées ici en Algérie par l'organisme CTTP. Sur la base des différents résultats de chaque dosage, le dosage 5.8 % présente des résultats acceptables et adoptés comme témoin.

### V.3.5.2. Analyse empirique d'enrobé bitumineux

L'analyse empirique de la modification des caractéristiques des enrobés par des polymères, commence après le choix de la formule de base de l'enrobé pur ou témoin, et par l'analyse de modifiant choisi qui est le mélange de poudrette de caoutchouc des pneus usés (MC). Les liants utilisés pour la suite de ce travail sont ceux de classe 35/50, modifié par trois teneurs en mélange de caoutchouc.

La vérification des performances physico – mécaniques est présentée dans ce chapitre, par des essais empiriques de la presse à cisaillement giratoire pour la compatibilité, ce qui couvre avec l'essai Marshall le risque d'apparition d'orniérage.

#### ➤ Presse à cisaillement giratoire (comportement de compactabilité)

La presse à cisaillement giratoire permet d'étudier l'aptitude au compactage des enrobés bitumineux par l'estimation du pourcentage de vides en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobé, donnée par la formulation [86]. L'enrobé est compacté à une température constante dans un moule cylindrique tournant sur lui-même en créant un effet de pétrissage. On observe l'augmentation de compacité (diminution de pourcentage de vide) en fonction du nombre de girations, simulant l'effet de compacteur à pneus sur chantier [87].

Au but de réaliser l'essai, on prend 10 kg d'agrégats chauffés à 165 °C et on les mélange avec les différents liants. On verse le mélange dans des moules d'un diamètre de 150 mm ce qui est compatible avec la condition  $h_{\min}/D$ .

$$0.66 \leq h_{\min}/D = 0.76 \leq 1.05 \quad (\text{V.6})$$

On Met le moule dans la presse et on commence à expérimenter avec 200 girations et puis on note les résultats.





**Fig. V.8.** Essai la presse à cisaillement giratoire **Fig. V.9.** Extraction d'éprouvettes de PCG

Le tableau **V.13.** présente un exemple du résultat de l'essai PCG, qui est la masse volumique apparente des éprouvettes au moment d'essai et le pourcentage de vide aussi.

**Tableau V.13.** Résultats d'essai PCG.

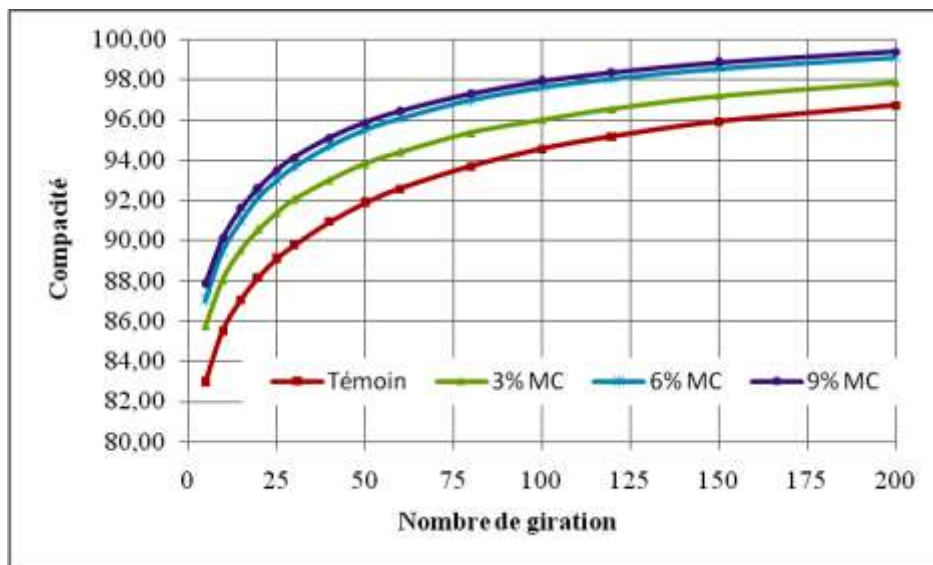
Girations	0 % MC		3 % MC		6 % MC		9 % MC	
	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de vide (%)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de vide (%)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de vide (%)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de vide (%)
5	2075.8	15.6	2123.0	12.3	2092.5	13.6	2129.8	12.0
10	2131.9	13.3	2177.3	10.1	2147.4	11.3	2191.2	9.5
15	2167.4	11.9	2210.3	8.7	2181.2	9.9	2227.4	8.0
20	2192.3	10.9	2234.9	7.7	2205.8	8.9	2254.7	6.9
25	2212.0	10.1	2254.7	6.9	2225.7	8.1	2273.6	6.1
30	2228.0	9.4	2271.3	6.2	2240.7	7.4	2289.8	5.4
40	2251.8	8.5	2294.7	5.2	2265.3	6.4	2313.6	4.4
50	2270.7	7.7	2313.0	4.5	2284.4	5.6	2330.9	3.7
60	2285.0	7.1	2327.8	3.8	2298.4	5.1	2343.5	3.2
80	2308.1	6.2	2349.8	2.9	2321.0	3.8	2360.0	2.5
100	2324.1	5.5	2365.6	2.3	2337.2	3.5	2372.1	2.0
120	2337.2	5.0	2376.6	1.8	2350.4	2.9	2379.8	1.7
150	2353.0	4.4	2390.8	1.2	2365.0	2.3	2388.3	1.3
200	2368.9	3.7	2407.2	0.6	2383.7	1.5	2397.4	1.0

D'après les résultats de l'essai sur les quatre mélanges, on observe que les compositions modifiées présentent des pourcentages de vides inférieures à celui du témoin, Les valeurs sont

inférieures de la spécification, ce qui caractérise un taux de vide entre 2 et 7 % pour la 80<sup>ème</sup> giration. Le taux de vide diminue dans ce nombre de girations par 53 %, 34 % et 60 % pour 3%, 6% et 9% de liant modifié par mélange de caoutchouc respectivement. Ce dernier est dû à la bonne lubrification des mélanges modifiés à cause de l'amélioration de viscosité des liants.

L'évolution sur le grand élevé d'énergie de compactage tel que 200 girations, a donné aux enrobés modifiés un taux de vide très faible et proche de zéro. Ce dernier signifie que ces enrobés sont très compacts par rapport au témoin.

L'évolution de pourcentages de vide exprimé par des courbes présentées sur la figure V.10.



**Fig. V.10.** Courbe de compacité en fonction de nombre de girations des différents mélanges

On note que les courbes des enrobés modifiés commencent par des taux de vide inférieurs à celui de témoin. Ce dernier est dû à la bonne lubrification de mélange, ce qui forme plus de vide sous une faible énergie de compactage (5 girations) et une continuité avec cette option au cours de compactage, alors on obtient des pourcentages de vide plus bas.

## V.4. Matériaux et méthodes

### V.4.1. Matériaux

#### V.4.1.1. Bitume

Dans cette étude, on utilise du bitume de grade 35/50 (bitume pur) fourni par la société nationale NAFTAL (station de Ghardaia). Le tableau V.14. présente les principales propriétés physiques du bitume [119].

**Tableau V.14.** Les propriétés physiques du bitume.

Essai	Norme	Résultat
<b>Pénétrabilité (1/10 mm) à 25°C</b>	EN 1426 ASTM D-5	36
<b>Point de ramollissement (TBA) (°C)</b>	EN 1427 ASTM D-36	50.5
<b>Ductilité (mm)</b>	EN 13589 ASTM D-113	>1000
<b>Densité relative (g/cm<sup>3</sup>)</b>	ASTM D-70	1.027

#### V.4.1.2. Agrégats

Les agrégats sont les ossatures solides, qui composent entre 90 et 94% du poids du mélange et fournissent le plus des caractéristiques du béton bitumineux. Les propriétés physiques des granulats concassés sont définies dans le tableau V.7. Trois classes granulaires sont utilisées dans ce travail, le pourcentage retenu de chaque fraction est la suivante (43 % sable 0/3; 17% gravier 3/8; 37% de gravier 8/15, et 3% de filler). Ils sont extraits de la station de concassage ALCO-GAZ, dans la wilaya de Ghardaïa, Algérie, voir le Tableau V.7.

#### V.4.1.3. Agent de modification (mélange de caoutchouc des pneus en fin de vie)

Plusieurs marques de pneus d'occasion (Aptany, Continental, Iris, Dunlop, Bridgestone, Michelin, Rapid, Mazzini, Triangle, Goodride, Riken, Jinyu, Cumho, Torque, Goodrich, Goodyear et Hankook) de toutes saisons et de différents types (Moto, Bicyclettes, Véhicules agricoles, Véhicules lourds, Véhicules légers et Engins de chantier) ont été collectées; et elles sont utilisées en complément du bitume sous forme de miettes après broyage et tamisage à sec (Fig. V.5). La taille des particules est inférieure à 80 µm. Le besoin de caractérisation du mélange est dû à la variation dans le choix des pneumatiques (type, section et marque différents). Les propriétés physiques et thermiques des déchets de caoutchouc usagés sont présentées dans le tableau V.15.

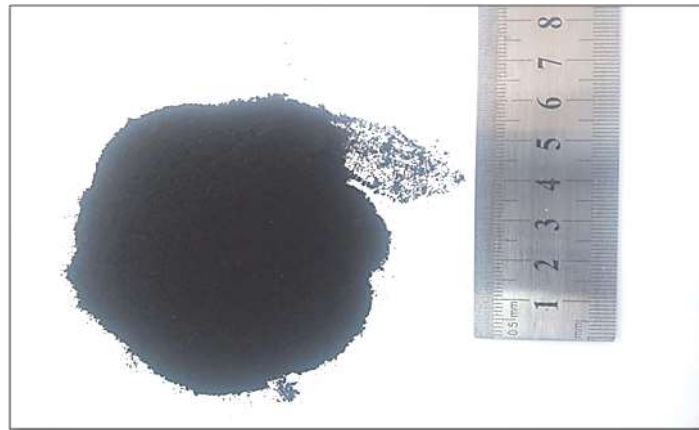


Fig. V.11. Mélange de caoutchouc de (ELT) inférieur à 80  $\mu\text{m}$

Tableau V.15. Propriétés physiques et thermiques des déchets de caoutchouc usagés

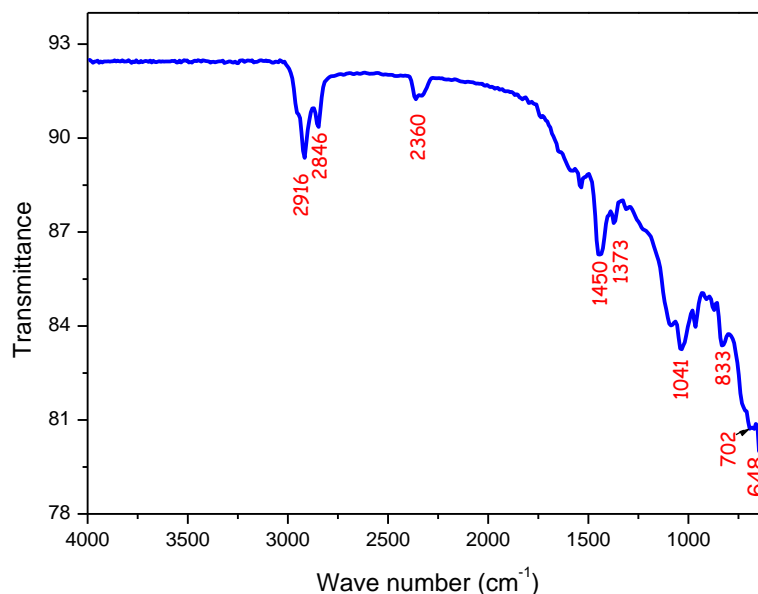
Propriétés	Déchets de caoutchouc	Méthode d'essai
Densité apparente (kg/m <sup>3</sup> )	1493	NP EN 1097-3
Densité spécifique (kg/m <sup>3</sup> )	807	NP EN 1097-6
Compacité (%)	54	NF P 18-555
Porosité (%)	46	NF P 18-555

#### V.4.2. Caractérisation

Les propriétés chimiques et physiques de mélange de caoutchouc (MC) ont été étudiées par la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ou spectroscopie IRTF (ou encore FTIR, de l'anglais Fourier Transform InfraRed spectroscopy), dispersion d'énergie Spectroscopie à rayons X (EDX) et analyse thermogravimétrique (TGA).

##### a. Analyse par spectroscopie infrarouge à transformée de fourier (FTIR)

Le spectre présenté sur la Figure V.12. est obtenu avec fourier spectromètre infrarouge à transformée (FTIR), (IRAffinity-1S SHIMADZU) dans le domaine spectral 4000-600  $\text{cm}^{-1}$  à une température égale à 20 °C. Il est réalisé avec un nombre d'onde de 1  $\text{cm}^{-1}$  résolution après 32 balayages continus où il a révélé l'existence:

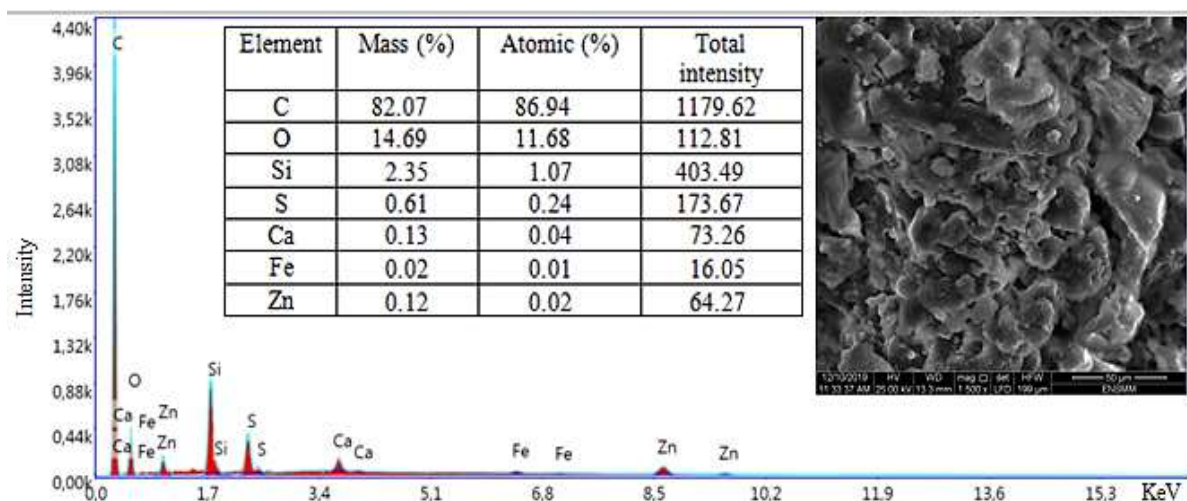


**Fig. V.12.** Spectres FTIR du mélange de caoutchouc

Deux bandes d'absorption à  $2916\text{ cm}^{-1}$  et  $2846\text{ cm}^{-1}$  sont dues à la présence de groupes C–H saturés. Une bande d'absorption d'environ  $2360\text{ cm}^{-1}$  est due à la vibration d'élongation indiquant la présence de liaisons C≡C bonds d'un alcyne disubstitué ou aux vibrations d'élongation indiquant la présence d'une liaison nitrile C≡N [108]. Deux bandes d'absorption à  $1450\text{ cm}^{-1}$  et à  $1373\text{ cm}^{-1}$  correspondent, successivement, à la déformation du groupement méthylène (-CH<sub>2</sub>) et du groupement méthyle (-CH<sub>3</sub>). Une bande d'absorption d'environ  $1041\text{ cm}^{-1}$  indique la présence de la liaison S=O [109, 110]. Une bande d'absorption d'environ  $702\text{ cm}^{-1}$  indique la présence du groupement -C-S, qui peut être due à un traitement avec des dérivés soufrés [103]. Enfin, les bandes d'environ ( $972, 833$  and  $648\text{ cm}^{-1}$ ) sont, généralement, associées aux vibrations de valences des groupes des chaînes C–X (X: Cl ou Br)[119].

### b. Caractéristiques de la microstructure

La microscopie électronique à balayage (SEM) avec spectrométrie à rayons X à dispersion d'énergie (EDX) est utilisée dans cette étude. L'imagerie au microscope est réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (SEM), la morphologie de la surface du mélange de caoutchouc est illustrée à la figure V.13.

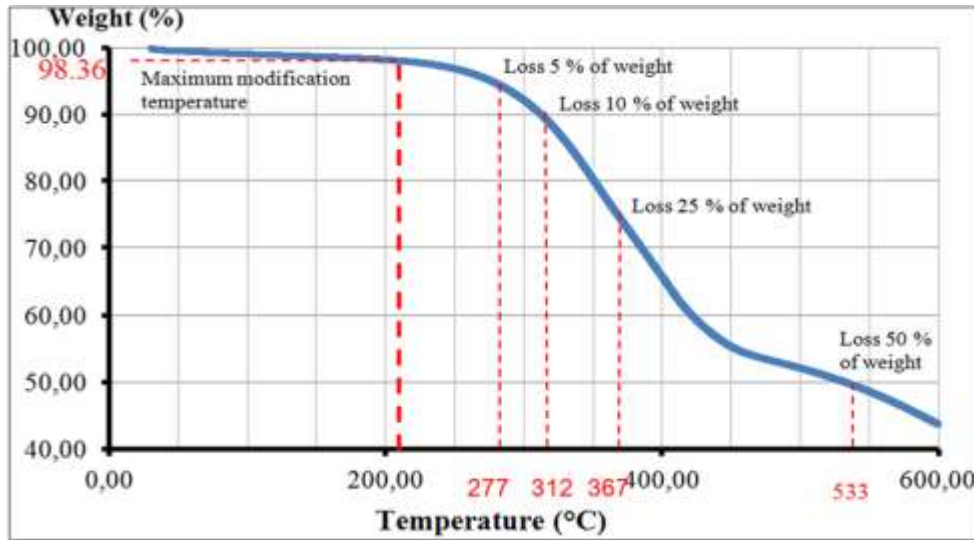


**Fig. V.13.** Résultats EDX du mélange de caoutchouc

La figure V.13. montre que le mélange de caoutchouc avait des surfaces rugueuses et non homogènes de différentes tailles et formes. Les particules sont entourées de différents bords et coins. Ces propriétés peuvent augmenter la valeur de gonflement du RM en raison de l'absorption des composants légers du bitume. L'analyse élémentaire de la surface RM est réalisée par analyse par spectroscopie à rayons X à dispersion d'énergie pour accéder au nombre d'éléments existants. Les résultats sont exprimés en masse et en pourcentage atomique dans le tableau de la Figure V.13. L'analyse a indiqué que les principaux éléments à la surface du RM étaient: le carbone (C), l'oxygène (O), de petites quantités de silicium (Si) et des traces de soufre (S), calcium (Ca), fer (Fe) et zinc (Zn) [119].

### c. Analyse thermique gravimétrique (ATG)

L'Analyse thermique gravimétrique (ATG) est utilisée pour évaluer la stabilité thermique du mélange de caoutchouc. Un échantillon RM de masse  $m=11.30\text{mg}$  est placé dans un moule, et soumis à une plage de température entre 30 et 600°C avec une vitesse de température progressive de 10°C/ min, sous un débit d'azote de 20 ml/min pour éviter toute dégradation oxydative. Une perte de 5% de la valeur initiale de poids du polymère est choisi par [111]. Comme critère pour définir l'indice de stabilité thermique. [103] a indiqué que nous pouvions prendre la valeur à laquelle le polymère avait perdu les 5%, 10%, 25% et 50% consécutivement de son poids initial, comme critère pour définir l'indice de stabilité thermique.



**Fig. V.14.** Analyse thermogravimétrique (ATG) d'un échantillon MC

La figure V.14. montre que la température correspondant à la perte de 5 % du poids du MC est de 277 °C, ce qui est supérieur à la température maximale de modification (200 °C). La perte de 10, 25 et 50 % du poids initial correspond, respectivement, aux températures suivantes: 312, 367 et 533 °C. Une perte de 1,64 % du poids initial est constatée pour une température de 200 °C, ce qui correspond à la température maximale de modification du bitume. Le MC a une stabilité suffisante et il est utilisé pour la modification du bitume.

#### V.4.3. Méthodes (Fabrication des échantillons de liant caoutchouc)

Les paramètres de fabrication du mélange tel que la température, la vitesse et le temps de malaxage sont optimisés de manière à respecter les recommandations et conclusions des travaux de [97, 103]. En effet, selon [103], à température idéale de gâchage pour le bitume est comprise entre (170 et 200 °C). [97] recommandent, afin de réduire l'influence du temps de mélange sur l'évolution des propriétés rhéologiques du CRMB, de choisir un temps de mélange compris entre 30 et 90 min. Concernant la vitesse de mélange, on a pris la valeur de 700 rpm considérée par [97] comme la plus utilisée dans la littérature similaire. Le bitume modifié à base du mélange de caoutchouc est fabriqué à l'aide d'un agitateur mécanique (hélice) avec un taux de cisaillement de 700 tr/min pendant 90 min à une température de 195 °C ± 5 °C. Lors de la fabrication, l'échantillon est fermé avec un couvercle pour minimiser l'oxydation du bitume. Les pourcentages d'ajout sont de 3 à 9 % avec un pas de 3 %, par rapport au poids total de bitume.

Le bitume est préchauffé à la température de modification (195 °C). Ensuite, le RM est ajouté au mélange toutes les 5 min avec une proportion de 3 % du poids total du bitume pour éviter l'agglutination du caoutchouc.



**Fig. V.15.** Modification du bitume

A la fin de la préparation du mélange, les tests de pénétration à l'aiguille (NF EN 1426) et de température de ramollissement (Méthode Bille et Anneau, selon EN 1427) sont réalisés directement. Les résultats sont présentés dans le tableau V.12.

## V.5. Résultats et discussions

### V.5.1. Sensibilité à la température

La susceptibilité thermique du bitume est la valeur à laquelle la consistance du bitume change avec le changement de température. L'indice de pénétration (IP) est déterminé à partir du point de ramollissement (test bille et anneau) et de la pénétration à 25 °C.

Le PI est donné par la formule suivante :

$$PI = (1952 - 500 \cdot \log(\text{pen}_{25}) - 20 \cdot SP) / (50 \cdot \log(\text{pen}_{25}) - SP - 120) \quad (\text{V.7})$$

Avec  $\text{Pen}_{25}$  est la pénétration à 25 °C et SP est le point de ramollissement du bitume [112].

L'indice de pénétration est un indicateur de la sensibilité thermique du bitume. Les bitumes normaux ont un PI compris entre -2 et +2. Les bitumes avec un PI supérieur à +2 sont cassants à basse température, tandis que les valeurs PI inférieurs à -2 indiquent une sensibilité élevée à la température [104].



**Tableau V.16.** L'indice de pénétration du bitume modifié

	Point de ramollissement (C°)	Pénétration (1/10mm)	Indice de Pénétration
<b>0% MC</b>	50.5	36	- 1.76
<b>3% MC</b>	57.5	30	- 1.01
<b>6% MC</b>	76.6	20	1.75
<b>9% MC</b>	79.3	17	1.80
<b>10% MC</b>	82	16	2.04
<b>12% MC</b>	85.1	15	2.31

Le tableau V.16. montre les résultats de l'indice de pénétration qui est obtenu pour un pourcentage d'amélioration qui a varié entre 3 et 12% RM avec un pas de 3%. Il est constaté qu'avec 12 % RM la valeur de l'indice de pénétration dépassait +2, ce qui entraîne un durcissement excessif du bitume et détériore les propriétés à basse température (bitume cassant) [104]. Un pourcentage supérieur à 9 % est effectué pour vérifier le choix du contenu (10 %); ce pourcentage dépasse, également, le seuil de +2. Ainsi, dans ce travail, la valeur maximale de RM est de 9 % en raison de la valeur élevée de PI (supérieure à +2) pour les pourcentages supérieurs à 9 %.

Trois pourcentages d'ajout sont choisis pour étudier l'effet de la teneur du mélange de caoutchouc (RM) sur la variation des propriétés du bitume. Nous commençons avec un pourcentage de 3% RM, car il est considéré comme le pourcentage minimum, ce qui donne un résultat positif en termes de variation de pénétrabilité et de point de ramollissement.

Certaines valeurs du contenu RM sont ignorées, car elles donnent des résultats très proches entre elles. C'est pourquoi nous choisissons des valeurs comprises entre une borne inférieure égale à 3% et une borne supérieure égale à 9% avec un pas de variation estimé à 3%. Nous avons montré qu'au-dessus de 9% de teneur en MR, l'indice de pénétration du PI dépasse la valeur de +2. À cet effet, nous considérons cette limite (RM = 9%) comme une valeur critique. [119]

Les paramètres qui ne sont pas mentionnés dans nos travaux (température, temps et vitesse de mélange) sont les mêmes dans tous les mélanges étudiés (considérés comme constants).

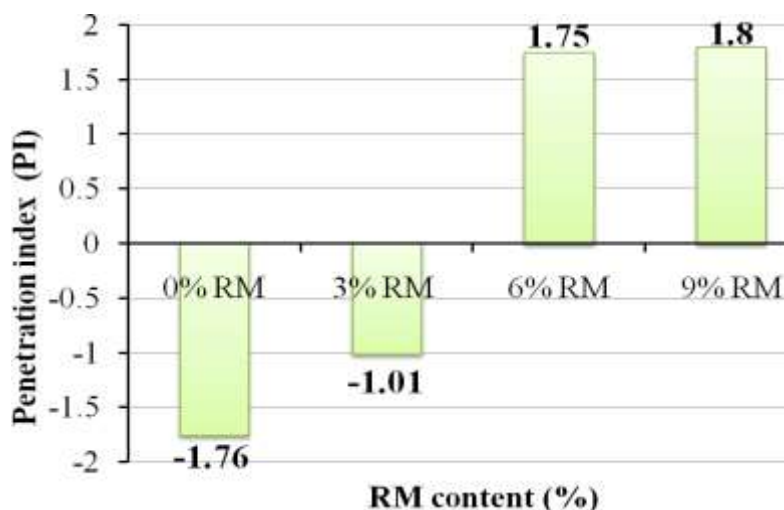


Fig. V.16. L'indice de pénétration du bitume modifié

### V.5.2. Propriétés physiques conventionnelles

La pénétration et le point de ramollissement du bitume modifié avec différents pourcentages de caoutchouc sont indiqués dans le tableau V.16 et la figure V.16. La valeur de pénétration diminue avec l'augmentation du dosage de MC, ce qui signifie qu'une augmentation de la rigidité du liant est fonction du dosage de MC. Une diminution de la pénétration par rapport aux dosages suivants : 3 %, 6 %, 9 % RM est la suivante: 16,67 %, 44,44 % et 52,77 %, respectivement, par rapport au bitume témoin (0 % MC). Ainsi, l'ajout du caoutchouc au bitume augmente la dureté du liant. Le point de ramollissement augmente après la modification. L'amélioration du point de ramollissement est proportionnelle à la teneur en caoutchouc. Une augmentation du point de ramollissement de 57 % par rapport au bitume témoin est obtenue avec 9 % MC, suivi de 6 % et 3 % de MC qui représente respectivement une augmentation de 51,68 % et 13,86 %. Suite à une diminution des valeurs de pénétration et à l'augmentation de la température de ramollissement après l'ajout de MC, il est constaté que l'augmentation de la valeur de PI suit l'augmentation de la teneur en caoutchouc.

### V.5.3. Formulation de béton bitumineux

L'étude de formulation consiste à déterminer le pourcentage des différents constituants du mélange présentant les meilleures caractéristiques. Dans cette étude la formulation du Béton bitumineux semi-grenu (SGBC 0/14) est déterminée selon la méthode de conception Marshall. Le pourcentage retenu de chaque fraction est le suivant: 43 % de sable 0/3 ; 17 % de gravier 3/8 ; 37 % gravier 8/15 et 3 % filler. La granulométrie des agrégats est conforme aux spécifications du ministère des travaux publics, comme illustrés à la Fig. V.17. La teneur

optimale en liant du mélange témoin est déterminée à l'aide de la méthode de conception Marshall. La densité maximale, le pourcentage de vide le plus bas, et la stabilité maximale sont utilisés pour sélectionner la teneur optimale en bitume. La teneur en bitume retenue est égale à 5,8 % du poids total de l'enrobé. Cette teneur est considérée par la suite comme le mélange témoin (0% MC).

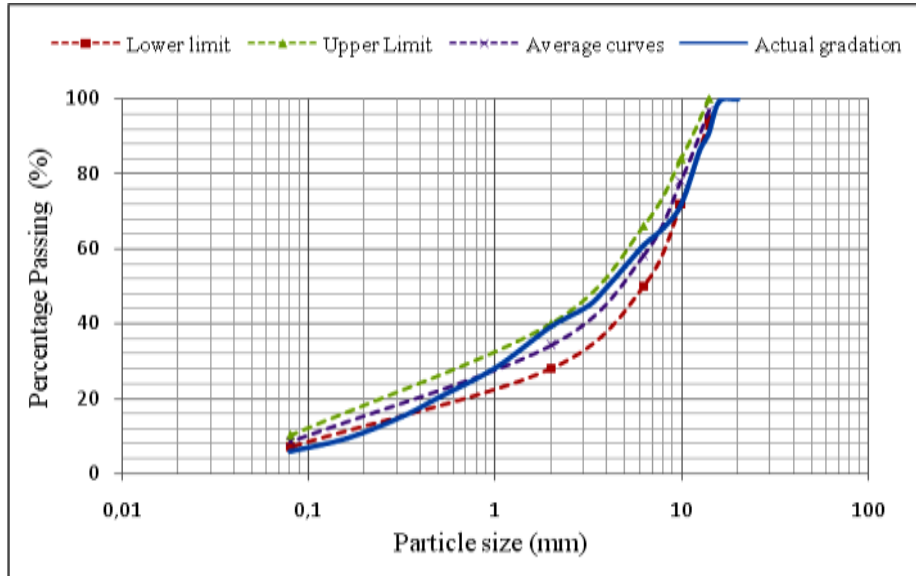


Fig. V.17. Gradation globale combinée.



Fig. V.18. Malaxeur à température 165 °C



**Fig. V.19.** Mélange bitumineux après malaxage

L'essai Marshall est réalisé selon la norme NF EN 12697-34, pour déterminer le pourcentage de vides, la résistance maximale à la déformation « la stabilité » et la déformation à charge maximale « le fluage » du béton bitumineux.



**Fig. V.20.** Transporte du mélange bitumineux

La relation entre stabilité et fluage est appelée quotient de Marshall  $MQ = (\text{stabilité} / \text{fluage})$ ; il représente la charge nécessaire pour produire un fluage de 1 mm. Le quotient de Marshall peut être utilisé comme indicateur de résistance à la déformation permanente [113].

**Tableau V.17.** La moyenne des résultats du test Marshall

	Mélange témoin (0%)	3% MC	6% MC	9% MC
Stabilité Marshall (KN)	14.35	16.61	17.66	18.47
Valeur de fluage (0.1 mm)	3.57	3.94	3.52	4.75
Marshall Quotient (MQ)	4.04	4.51	5.01	4.46



**Fig. V.21.** Éprouvette de l'essai Marshall



**Fig. V.22.** Éprouvette dans la presse de compression Marshall

Le tableau V.17. montre les résultats du test de Marshall (stabilité, fluage et quotient de Marshall). L'amélioration de la stabilité Marshall est proportionnelle à la teneur en MC jusqu'à 9 %. Une amélioration de la Stabilité Marshall de 15,76 % est enregistrée avec une teneur de 6 % MC. Le creep du mélange de 3 % et 9 % MC est supérieur à celui du témoin (10,36 % et 25,82 % respectivement); et le meilleur creep obtenu est avec une teneur de 6 % MC.

En combinant les résultats de Marshall Stability avec ceux de creep, nous remarquons que le mélange de 6 % MC a la valeur la plus élevée de Marshall Quotient (MQ) avec une amélioration de 24 % par rapport au témoin (0 % MC). La valeur MQ du mélange modifié à 9 % MC est inférieure à celles du mélange de 6 % et 3 % MC, respectivement, en continuation de 12,33 % et 1,12 %, et supérieure à celle du témoin au taux de 10,39 %. Le mélange de 9 % MC donne la déformation la plus élevée (4,75 (0,1 mm)). En revanche, il présente la meilleure valeur de Stabilité Marshall (18,47 KN).

#### **V.5.4. Module complexe de rigidité**

L'essai de flexion deux points sur éprouvette trapézoïdale, selon la norme NF EN 12697-26 (annexe A), est utilisé pour évaluer l'influence de la modification du bitume sur le module de rigidité du béton bitumineux. En utilisant cette méthode, l'effet de la température et de la

fréquence sur le module de rigidité est examiné. Les essais sont effectués sur tous les mélanges à des températures de 10, 15, 20, 25 et 30 °C. La fréquence appliquée varie entre 0,5 Hz et 30 Hz pour chaque température de test. L'éprouvette est maintenue dans l'enceinte pendant 4 heures avant le début de l'essai. Lors de l'essai, l'éprouvette est soumise à une force sinusoïdale appliquée en tête à une déflexion imposée correspondant à une déformation inférieure à 50 micro-déformations pendant une durée de 30 secondes. La force, la déflexion et l'angle de phase ont été mesurés pendant les 10 dernières secondes du test. Les résultats des essais effectués sur l'ensemble des éprouvettes sont présentés dans les figures V.28 (a), (b), (c) et (d) qui montrent la variation du module de rigidité des mélanges en fonction de la température, de la fréquence et de MC contenu.



**Fig. V.23.** La plaque dans le compacteur

La plaque d'enrobé a été coupée par une scie mécanique suivant des profils mentionnés dans la norme NF P 98 – 250 – 3 tels que la figure V.24. présente.

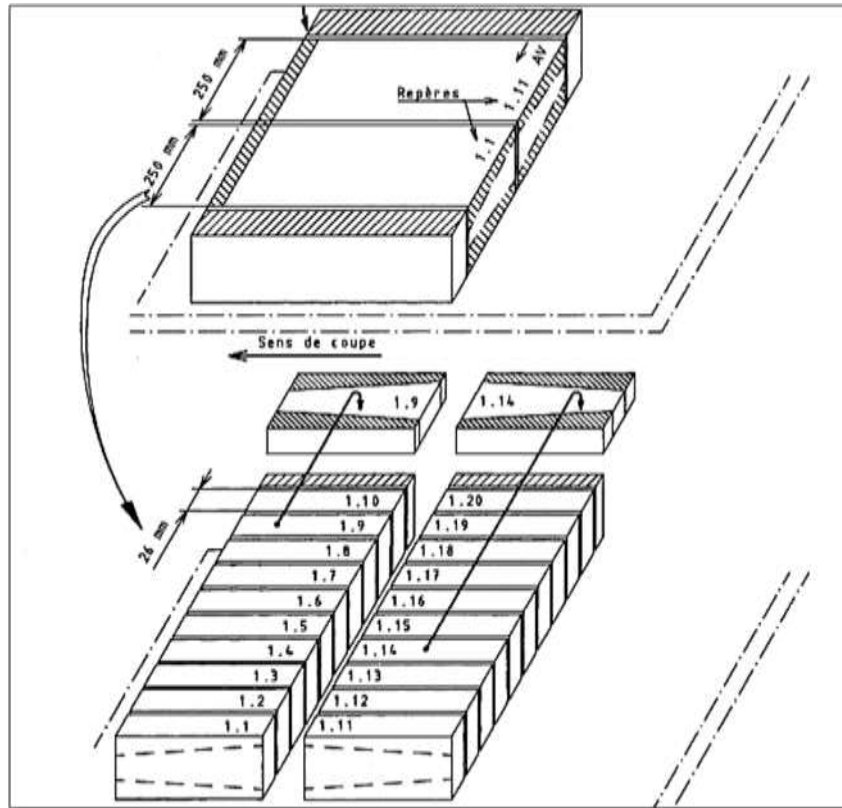


Fig. V.24. Les étapes de l'acquisition trapézoïdale.



Fig. V.25. Opération de coupage d'une plaque de fatigue.





**Fig. V.26.** Fixation des éprouvettes trapézoïdales à la base



**Fig. V.27.** Les éprouvettes trapézoïdales placées dans la machine de flexion

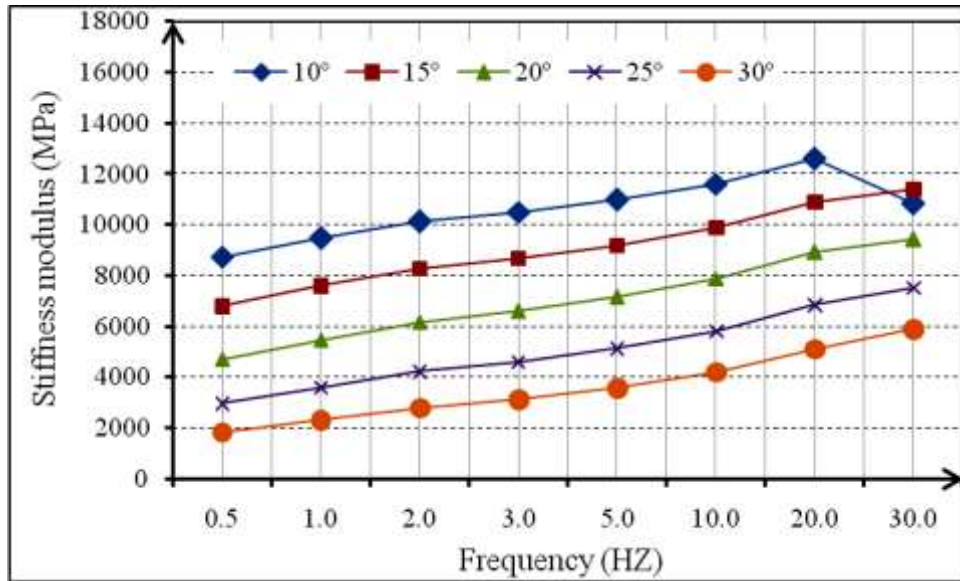


Fig. V.28. (a) Variation du module de rigidité du mélange témoin en fonction de la température et de la fréquence

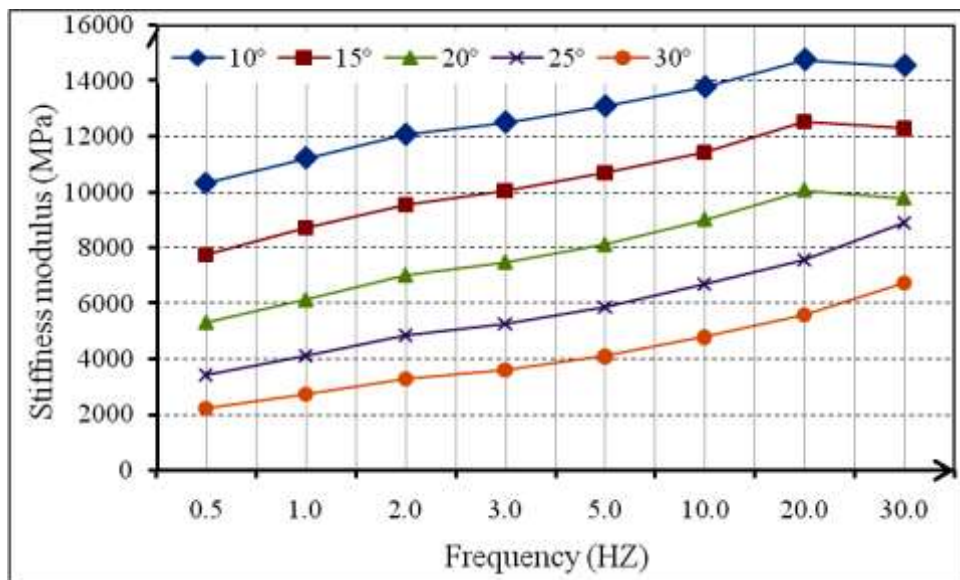
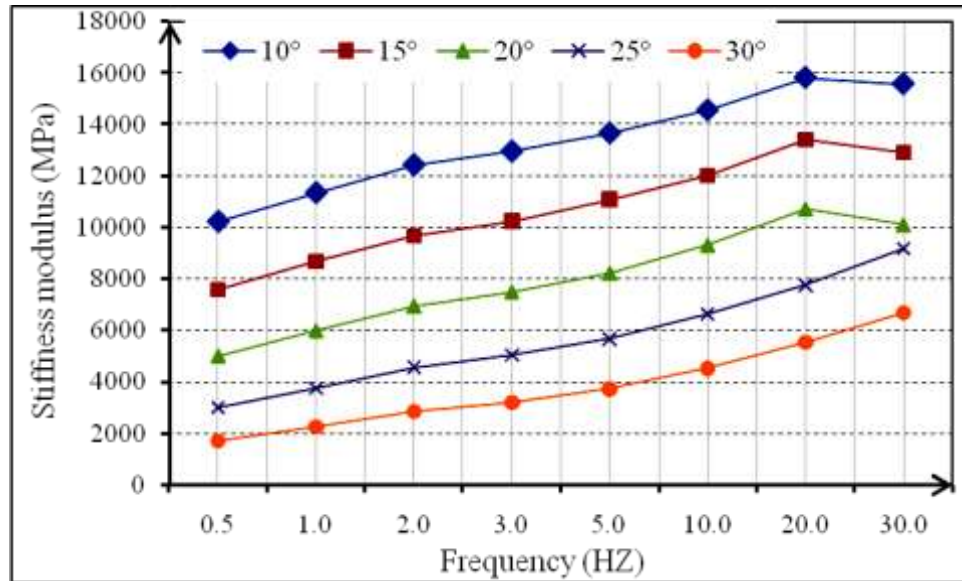
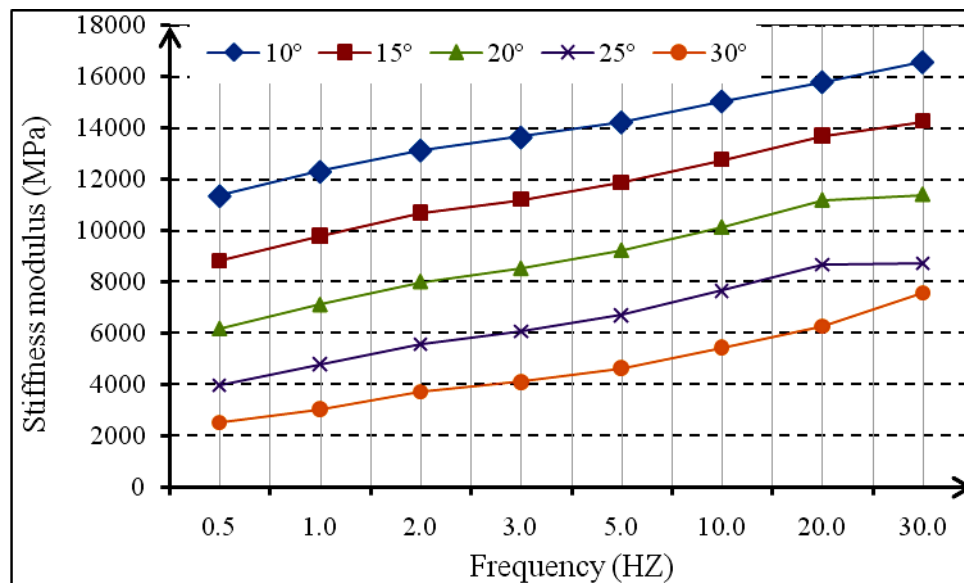


Fig. V.28. (b) Variation du module de rigidité du mélange 3% MC en fonction de la température et de la fréquence



**Fig. V.28. (c)** Variation du module de rigidité du mélange 6% MC en fonction de la température et de la fréquence



**Fig. V.28.(d)** Variation du module de rigidité du mélange 9% MC en fonction de la température et de la fréquence

En général, les résultats montrent une diminution considérable du module de rigidité du béton bitumineux avec l'augmentation de la température. Par exemple, là où la fréquence est égale à 10 Hz et la température égale à 10 °C et 30 °C, on a remarqué une diminution du module de rigidité des mélanges 9 %, 6 %, 3 % et témoin (0 %) MC, respectivement, de 63,89%, 68,94%, 65,26% et 63,64%. La valeur du module de rigidité a augmenté avec l'augmentation de la fréquence, à l'exception de quelques valeurs liées à la fréquence de 30

HZ. On a remarqué une baisse relative, peut-être due à la forte vibration de la machine d'essai. Les résultats obtenus montre que la modification du bitume avec MC augmente la rigidité du béton bitumineux. L'effet de la modification du bitume avec MC est, clairement, visible pour toutes les températures et les fréquences en comparant les mélanges bitumineux modifiés avec le mélange témoin.

Une augmentation de la valeur du module de rigidité à 15 °C et 10 HZ était de 15 % pour 3 % MC, 21 % pour 6 % MC et plus de 28 % pour 9 % MC. L'amélioration de la sensibilité thermique du liant par l'incorporation de MC s'est bien répercutée sur le module de rigidité du béton bitumineux.

Une forte amélioration du module de rigidité peut provoquer une fragilisation et augmenter le potentiel de fissuration du béton bitumineux, notamment à basse température. L'amélioration du module de rigidité de 28% (la valeur la plus élevée) est acceptable en raison du climat chaud de notre région. Le module de rigidité diminuant à mesure que la température augmente, la capacité du béton bitumineux à résister aux contraintes à haute température de fonctionnement est limitée; il nous faut donc maîtriser la déformation du béton bitumineux à haute température.

#### V.5.5. Résistance à l'orniérage

L'étude de la résistance aux déformations permanentes (orniérage) a été faite avec l'orniéreur LCPC (voir l'annexe C) au laboratoire LTPS de Ghardaia (Algérie).

La susceptibilité du béton bitumineux à se déformer est évaluée par la profondeur d'ornière formée en fonction du passage répété d'une roue (charge roulante ( $F = 5000 \pm 50$  N) en statique) à une température fixée à  $60 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$  pour une fréquence de roulement relative de  $1\text{HZ} \pm 0,1\text{HZ}$  conformément à la norme NF EN 12697-22. La profondeur d'orniérage est mesurée à 1 000, 3 000, 10 000, 30 000 cycles. Le mélange des éprouvettes est préparé selon la norme EN 12697-35. Les éprouvettes sont des plaques de dimensions  $(500 \times 180 \times 100)$  mm  $\pm 2$  mm, qui sont compactées conformément à la norme EN 12697-33.

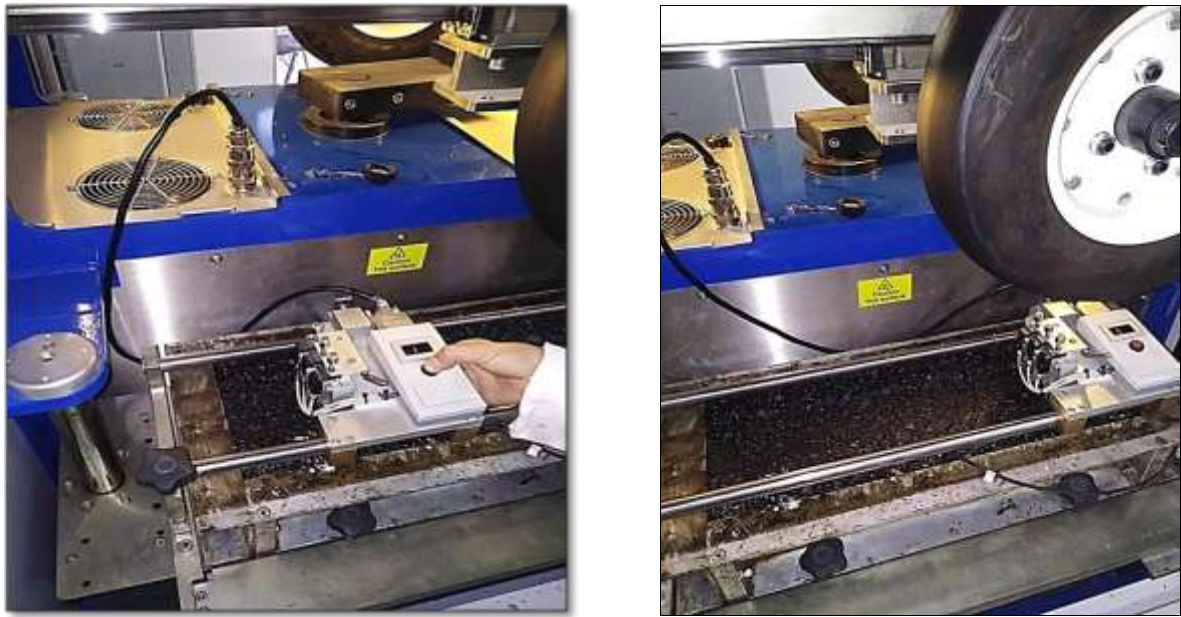
Le compactage est effectué selon un plan de balayage spécifié (fort compactage avec une roue). D'après l'étude de **Özen, H.** (2011) [114] Le compacteur du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées a montré une bonne corrélation avec le rouleau de terrain réel.

Toutes les éprouvettes sont conditionnées à 60 °C pendant 14 h avant d'être soumises au test. Le pourcentage d'orniérage a été donné pour chaque série de mesures à partir des 15 valeurs de déformation locale  $m_{ij}$  et de l'épaisseur de l'éprouvette  $h$ , (100 mm dans notre cas) à l'aide de l'équation V.8.

$$P_i \% = 100 - \sum_{j=1}^{15} \frac{(m_{ij} - m_{0j})}{(15 * h)} \quad (V.8)$$

Où

- $P_i$  est le pourcentage de profondeur d'ornièrè mesurée (%);
- $m_{ij}$  est la déformation locale en millimètres (mm) ;
- $m_{0j}$  est la mesure initiale à l'emplacement j :
- h est l'épaisseur de l'éprouvette, en millimètres (mm).



**Fig. V.29.** Mesure de la profondeur d'ornièrage

D'un point de vue mécanique, les matériaux bitumineux sont soumis à une charge de courte durée à chaque passage de véhicule. Les chargements répétés créent une déformation permanente (ornièrè) [115]. Les tests de suivi de roue sont très répétables (pas de temps de repos). La déformation d'un béton bitumineux est de nature incrémentale ; elle peut être constituée de deux composantes à la fois : réversible et irréversible.

La récupération partielle de la composante réversible nécessite une période de repos qui existe, effectivement, dans [116]. Une étude comparative réalisée par [117] a indiqué une bonne corrélation entre les résultats du testeur d'ornièrage français et les profondeurs d'ornièrage réelles lorsque la température et les niveaux de trafic sont pris en compte.

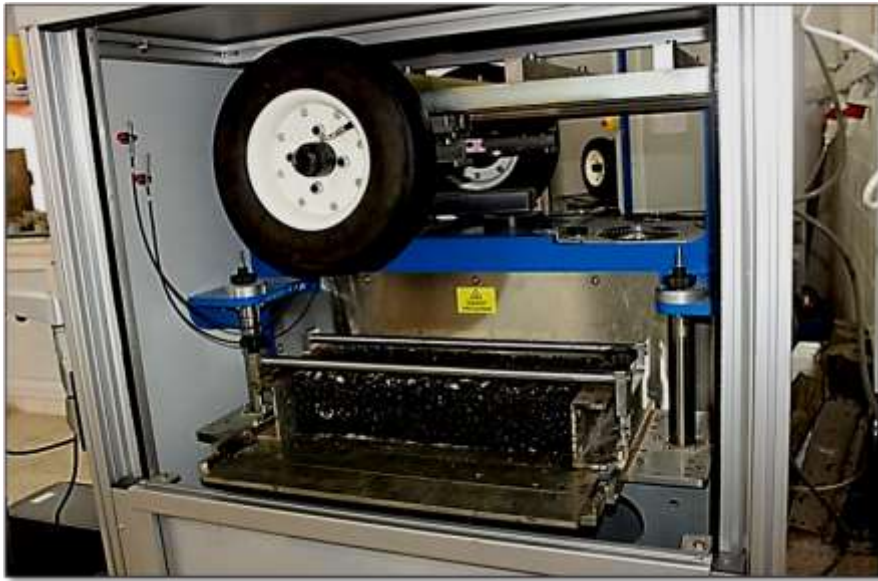


Fig. V.30. Éprouvette dans l'ornièreur LCPC

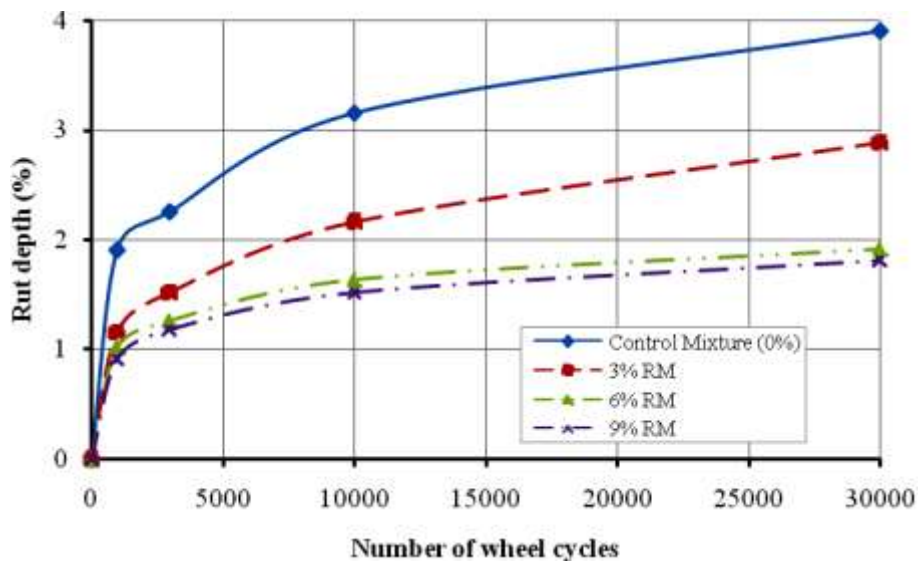


Fig. V.31. Variation de la profondeur d'ornièrage en fonction de la teneur en MC

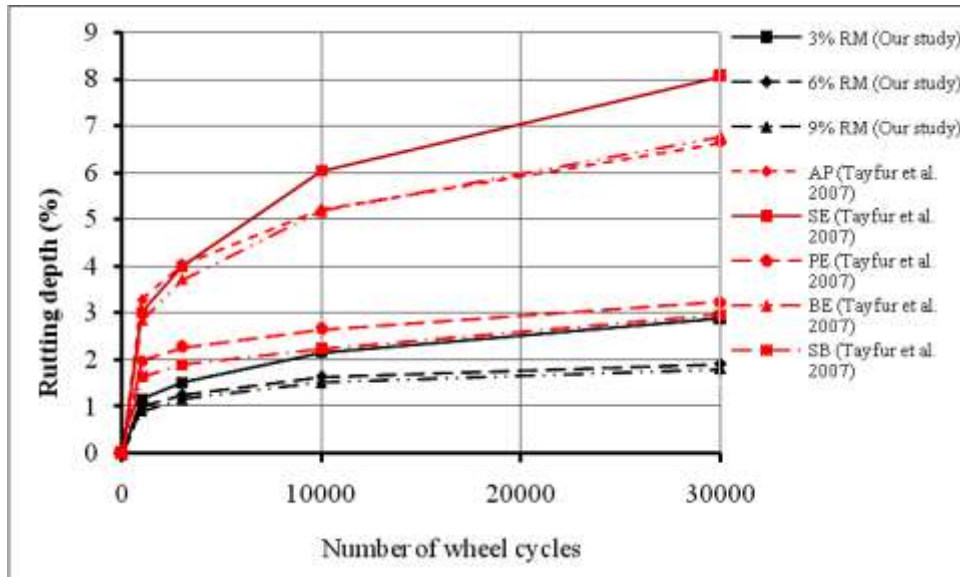


Fig V.32.a. Variation de la profondeur d'orniérage en fonction du type d'addition

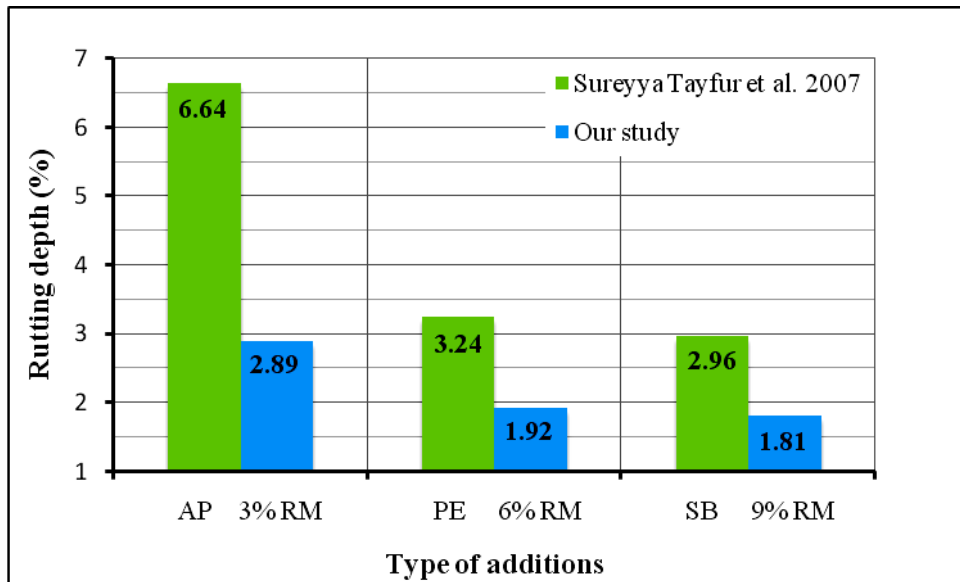
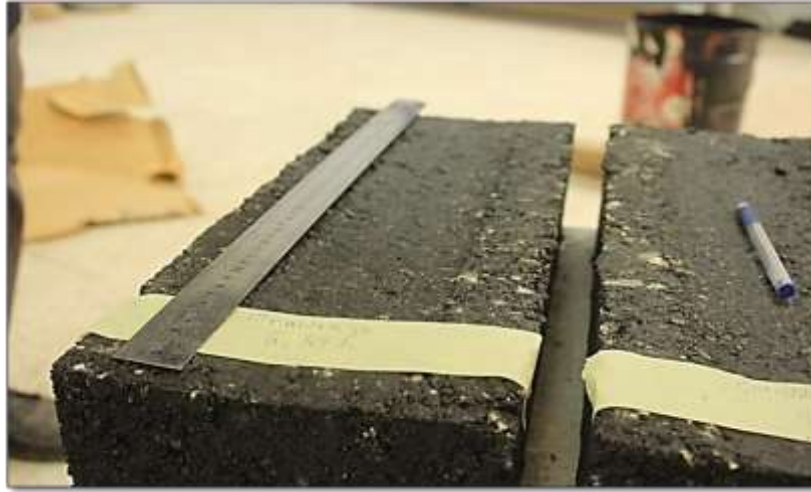


Fig. V.32.b. Comparaison de la profondeur d'orniérage des trois meilleurs résultats



**Fig.V.33.** éprouvette après la fin de l'essai orniérage

La figure V.33. montre la relation entre la profondeur d'orniérage en pourcentage (%) et le nombre de cycles des mélanges : témoin, 3 %, 6 % et 9 % MC. L'ajout de MC au liant bitumineux a un impact significatif sur le béton bitumineux en réduisant sa valeur de déformation permanente. Le pourcentage de profondeur d'orniérage des mélanges préparés avec du bitume modifié est inférieur à celui du mélange témoin. Au début, la valeur de la déformation des mélanges modifiés est, relativement, proche l'une de l'autre, par contre avec l'augmentation du nombre de cycles (5000 cycles) la différence s'est accentuée. La profondeur des ornières est inversement proportionnelle à la teneur en caoutchouc jusqu'à 30 000 cycles. Le mélange à 9 % de MC présente la plus grande résistance à la prise permanente avec une amélioration de 53 % par rapport au témoin, suivie par une réduction de 50 % et 25 % de l'orniérage des mélanges à 6 % MC et 3 % MC, respectivement.

Comme le montre la figure V.31, la plus grande profondeur d'orniérage est enregistrée dans le mélange témoin. Les mélanges préparés avec du bitume modifié présentent une résistance élevée à la déformation permanente lors de l'essai de roulage à 60°C.

Cette observation est confirmée par plusieurs auteurs [118] qui ont réalisé des essais sur des mélanges en faisant varier le type d'adjonction « Amorphous Polialfaolefin (AP), cellulose fibre (SE), cellulose fibre mélangée avec bitume (BE), PolialEfin (PE) et Copolymère Stiren-Butadien-Stiren (SBS) » avec des pourcentages différents en fonction du poids de bitume, du poids des granulats ou du poids total du mélange. Les auteurs ont constaté que la profondeur d'orniérage diminue par rapport au mélange témoin (profondeur minimale d'orniérage valeur 2,96 mm, Figure V.32.b) Les figures V.32.a et V.32.b présentent une comparaison de nos



résultats avec [118]. La figure V.26.b présente une comparaison des trois meilleures améliorations données par [118].

## V.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés la série des essais effectués sur la modification de bitume, sur la détermination du module complexes du béton bitumineux et sur la résistance au phénomène d'orniérage.

Les résultats expérimentaux de cette étude sur le bitume et le béton bitumineux (témoin et modifié) ont permis de tirer certaines conclusions dont :

- L'ajout d'un mélange de caoutchouc à faible teneur (3 %, 6 % et 9 %) au bitume a suffisamment amélioré leurs sensibilités thermiques ;
- La valeur de l'indice de pénétration (IP) d'une teneur en MR de 10 % dépasse le seuil de +2; ainsi, le pourcentage maximum de MR retenu est de 9 % en poids du bitume ;
- La Stabilité Marshall du béton bitumineux modifié est améliorée grâce à la bonne résistance du bitume modifié ;
- Le quotient de Marshall (MQ) ne peut pas être un indicateur de déformation permanente en raison de la contradiction de ces valeurs avec les résultats de l'essai d'orniérage.
- Le mélange préparé avec du bitume modifié (9 % MC) présente la plus grande résistance à la déformation permanente, tandis que la valeur la plus faible est obtenue par le mélange témoin.
- Le module de rigidité diminue avec l'augmentation de la température et augmente avec une fréquence croissante ; la rigidité du béton bitumineux est améliorée avec une concentration croissante de mélange de caoutchouc, ceci en raison de la diminution de la valeur de pénétration qui rend le liant plus rigide.
- Un bitume modifié préparé avec un mélange à faible teneur en caoutchouc est plus robuste. Il a une bonne consistance à haute température et maintient une flexibilité plus adéquate à des températures moyennes par rapport au mélange témoin.
- Une bonne corrélation est observée entre l'indice de pénétration thermique du bitume et le module de rigidité du béton bitumineux, où les deux ont convenu que l'ajout d'un mélange de caoutchouc à faible teneur est suffisant pour améliorer la résistance du béton bitumineux à la déformation permanente.
- la plus grande profondeur d'orniérage est enregistrée dans le béton bitumineux témoin.

- Les mélanges préparés avec du bitume modifié présentent une résistance élevée à la déformation permanente lors de l'essai de roulage à 60°C.
- Il est possible d'utiliser le mélange de caoutchouc de différentes catégories de pneumatiques dans le bitume sans nuire aux propriétés du mélange final, ce qui facilite la mise en oeuvre du procédé d'incorporation.
- L'ajout d'un mélange de caoutchouc à faible teneur au bitume pourrait aider à réduire le coût du cycle de vie des chaussées. Son utilisation peut avoir un impact économique dans le but de conserver les ressources naturelles et de protéger l'environnement.

## Conclusion générale

Les essais expérimentaux et les simulations numériques sont devenus un outil incontournable pour étudier le comportement des chaussées sous différents types de sollicitation.

L'objectif de ce travail de recherche exposé dans cette thèse est l'étude et la comparaison des phénomènes d'orniérage et de fatigue des chaussées bitumineuses, dans le but de pouvoir minimiser le risque de ces deux phénomènes à partir de l'étude des caractéristiques du enrobés bitumineux et ses constituants surtout le bitume. Le bitume présente des propriétés qui varient avec la température dans le sens d'une fragilité aux basses températures et d'un fluage aux températures élevées.

Pour l'amélioration des caractéristiques de bitume et par conséquent la résistance de l'enrobé à l'orniérage et au fatigue on a modifié le bitume avec du mélange de la poudrette de caoutchouc.

La modification de bitume a permis d'une part, de recycler des déchets industriels, et d'autre part, de corriger des formules d'enrobés bitumineux présentant une faible résistance aux déformations permanentes. La modification de bitume avec du mélange des caoutchoucs est une solution pratique, économique et performante pour l'amélioration de la résistance des enrobés bitumineux aux déformations permanentes qui se traduisent par des ornières.

La modification du bitume par le mélange de caoutchouc (MC) a changé ses caractéristiques :

- diminution de la pénétrabilité ;
- augmentation de la ductilité ;
- diminution de la susceptibilité thermique.

La modification effectuée sur le bitume pour une heure de malaxage avec une température comprise entre 190 et 200 °C à une vitesse de 600 tr/mn.

Notre étude expérimentale a montré que l'effet de l'utilisation d'un de bitume modifié à faible teneur de caoutchouc (faibles quantités d'émissions de gaz à effet de serre pour préparer le bitume modifié) a bien amélioré les performances du mélange bitumineux.

Une comparaison de l'orniérage des chaussées bitumineuses avec le phénomène de fatigue a été faite, la variation de déformation d'un enrobé sous chargement peut être décomposée dans le cadre de l'hypothèse des petites déformations, en une composante réversible  $\delta_{\text{rév}}(t)$  et une composante irréversible  $\delta_{\text{perm}}(t)$ . La composante irréversible  $\delta_{\text{perm}}(t)$  apparaissant à chaque cycle (chaque passage de roue) est quasiment indétectable; elle est masquée par la composante réversible  $\delta_{\text{rév}}(t)$  dont l'amplitude est bien plus importante. Cependant, au bout de quelques dizaines ou quelques centaines de milliers de cycles, la déformation permanente  $\delta_{\text{perm}}(t)$  issue du cumul sur le temps des incréments de déformation irréversible deviennent mesurables et susceptible de conduire à la ruine par orniérage de la chaussée.

La fatigue des matériaux bitumineux apparaît par accumulation des micro-dégradations au bout de quelques centaines de milliers de cycles. Cependant, les phénomènes mis en jeu sont très différents de ceux qui interviennent dans le processus de l'accumulation des déformations permanentes (orniérage).

En effet, l'apparition de la fatigue des enrobés bitumineux se traduit par une chute de module de rigidité du matériau, alors que pour le phénomène d'orniérage, l'accumulation des déformations peut se faire sans modification notable de la rigidité du matériau.

D'autre part, les conditions climatiques, telles que la température, influent sur les deux phénomènes (orniérage et fatigue), mais d'une façon inverse. La haute température va intensifier la dégradation par orniérage, et à la basse température approfondir la fissuration par fatigue.

Le quotient de Marshall (MQ) (utilisé pour la formulation des enrobés) ne peut pas être un indicateur de déformation permanente en raison de la contradiction de ces valeurs avec les résultats de l'essai d'orniérage.

Les perspectives et les recommandations :

- D'associer au à l'ajout MC un autre composé pour améliorer encore le comportement du mélange bitumineux,
- D'étudier l'influence du temps, la taille de particule et la vitesse de malaxage,
- De compléter l'étude physico-chimique des bitumes par une étude rhéologique;
- De revoir les spécifications en vigueur en Algérie qui ne se basent à aucun moment sur le comportement rhéologique des bitumes.

## Conclusion générale

---

- De vérifier le comportement des formules d'enrobés développés dans cette recherche par la réalisation et le suivie de planches expérimentales en vraies grandeurs;
- D'estimer l'impact de la valorisation des déchets dans la technique routière par une analyse de cycle de vie.

## Références bibliographiques

- [1] **Subhy, A.** (2017). Advanced analytical techniques in fatigue and rutting related characterizations of modified bitumen: Literature review. *Construction and Building Materials*, 156, 28-45.
- [2] **Georgouli, K., Plati, C., & Loizos, A.** (2021). Autonomous vehicles wheel wander: Structural impact on flexible pavements. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 388-398.
- [3] **Arsenie, I. M.** (2013). Étude et modélisation des renforcements de chaussées à l'aide de grilles en fibre de verre sous sollicitations de fatigue. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg.
- [4] **Tran, Q. D.** (2004). Modèle simplifié pour les chaussées fissurées multicouches. Thèse de Doctorat, Marne-la-vallée, école nationale des ponts et chaussées ENPC.
- [5] **Nguyen, M. L.** (2009). Étude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux. Thèse de Doctorat, l'institut national de sciences appliquées, INSA de Lyon.
- [6] **Haddadi, S.** (2007). Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux. Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie houari boumediene, Alger.
- [7] **Saunier, J.** (1968). Contribution a l'étude des propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux: première thèse; Pollution atmosphérique par le gaz d'échappement des véhicules à moteur: deuxième thèse de doctorat, propositions données par la Faculté. Impr. Louis-Jean.
- [8] **SETRA, L.** (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussée. Guide technique.
- [9] **Faure, M.,** (2003). Routes. Vol. 2. ENTPE-ALEAS, 255p.
- [10] **Sreedhar, S., & Coleri, E.** (2018). Effects of binder content, density, gradation, and polymer modification on cracking and rutting resistance of asphalt mixtures used in Oregon. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(11), 04018298.
- [11] **Dukatz, E. L.** (1989). Aggregate properties related to pavement performance. In *Proceedings of the association of asphalt paving technologists* (Vol. 58, pp. 492-501).
- [12] **Topal, A., & Sengoz, B.** (2005). Determination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 19(2), 155-163.
- [13] **Pouranian, M. R., Shishehbor, M., & Haddock, J. E.** (2020). Impact of the coarse aggregate shape parameters on compaction characteristics of asphalt mixtures. *Powder Technology*, 363, 369-386.
- [14] **Merbouh, M. H.** (2012). Effect of thermal cycling on the creep-recovery behavior of road bitumen. *Energy Procedia*, 18, 1106-1114.
- [15] **Dinegdae, Y. H., & Birgisson, B.** (2018). Effects of truck traffic on top-down fatigue cracking performance of flexible pavements using a new mechanics-based analysis framework. *Road Materials and Pavement Design*, 19(1), 182-200.
- [16] **Alkaissi, Z. A.** (2020). Effect of high temperature and traffic loading on rutting performance of flexible pavement. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 32(1), 1-4.
- [17] **Merbouh, M. H.** (2012). Effect of thermal cycling on the creep-recovery behavior of road bitumen. *EnergyProcedia*, 18, 1106-1114.

- [18] **Dekhli, S.** (2015). Étude de l'influence de la variation de la fréquence sur le comportement rhéologique des bitumes purs et des bitumes modifiés aux polymères Eva et Sebs. Thèse de Doctoral, Université des sciences et de la technologie houari boumediene, Alger.
- [19] <https://admacademie.ma/recherche-innovation/3>.
- [20] **Elaroui, y.** (2019). Module complexe Du Béton bitumineux, Projet de Fin d'Année. DOI: 10.13140/RG.2.2.19120.92165.
- [21] **Dongmo-Engeland, B. J.** (2005). Caractérisation des déformations d'orniérages des chaussées bitumeuses. Thèse de Doctorat, l'institut national des sciences appliqués, INSA de Lyon.
- [22] **Shalaby, A.** (2000). Strength testing of in-service asphalt pavements in Manitoba and correlation to rutting. In Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association (Vol. 45, pp. 203-227).
- [23] **Du, Y., Chen, J., Han, Z., & Liu, W.** (2018). A review on solutions for improving rutting resistance of asphalt pavement and test methods. *Construction and Building Materials*, 168, 893-905.
- [24] **GRILLET, D.** (2006). Modélisation du refroidissement d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée sur une chaussée. *Revue scientifique des ISILF n°20*.
- [25] **Champion, L., Gerard, J. F., Planche, J. P., & Martin, D.** (1999). Eurobitume Workshop'99 on Performance Related Properties for Bituminous Binders.
- [26] **Goodrich, J. L.** (1991). Asphaltic binder rheology, asphalt concrete rheology and asphalt concrete mix properties (with discussion). *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 60.
- [27] **Barbe, B., Caroff, G., Maia, A., & Hiernaux, R.** (1988). Permanent deformation in bituminous mixes: effects of consistency of bitumen, type of aggregate, and mix composition. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 57).
- [28] <https://slideplayer.fr/slide/13287239/>.
- [29] **Saoula, S.** (2010). Approche modéliste et valorisation des enrobés modifiés par ajout de polymères-impact sur l'environnement. Thèse de Doctoral, Université des sciences et de la technologie houari boumediene, Alger.
- [30] **Di Benedetto, H., Partl, M. N., Francken, L., & De La Roche Saint André, C.** (2001). Stiffness testing for bituminous mixtures. *Materials and Structures*, 34(2), 66-70.
- [31] **Corté, J. F., & Di Benedetto, H.** (2004). *Matériaux routiers bitumineux*. Editions Lavoisier.
- [32] **Jolivet, Y., Malot, M., Ramond, G., & Pastor, M.** (1994). Contribution des mesures rhéologiques sur liants à la prévision de l'orniérage en laboratoire. *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, (194).
- [33] **Champion, L., Gerard, J. F., Planche, J. P., & Martin, D.** (1999). Eurobitume Workshop'99 on Performance Related Properties for Bituminous Binders.
- [34] **Desmazes, C., Lecomte, M., Lesueur, D., & Phillips, M.** (2000). A protocol for reliable measurement of zero-shear-viscosity in order to evaluate the anti-rutting performance of binders. In

proceedings of the papers submitted for review at 2nd euraspalt and eurobitume congress, held 20-22 september 2000, barcelona, spain. book 1-session 1.

[35] **Shalaby, A.** (2000). Strength testing of in-service asphalt pavements in Manitoba and correlation to rutting. In Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association (Vol. 45, pp. 203-227).

[36] **Zieliński, P.** (2022). Indirect tensile test as a simple method for rut resistance evaluation of asphalt mixtures–polish experience. *Road Materials and Pavement Design*, 23(1), 112-128.

[37] **Moutier, F.** (1977). Utilisations et possibilités de la presse à cisaillement giratoire. *BULL. LIAISON LAB. PONTS CHAUSS.*, (SPEC V).

[38] **Van de Loo, P. J.** (1974). Creep testing, a simple tool to judge asphalt mix stability. In *Association of Asphalt Paving Technologists Proc* (Vol. 43).

[39] **Grimaux, J. P., & Hiernaux, R.** (1977). Utilisation de l'orniéreur type LPC. *BULL. LIAISON LAB. PONTS CHAUSS.*, (SPEC V).

[40] **Verstraeten, T., Williams, G. A., Chang, S., Cox Jr, M. S., Trese, M. T., Moussa, M., & Friberg, T. R.** (1995). Lens-sparing vitrectomy with perfluorocarbon liquid for the primary treatment of giant retinal tears. *Ophthalmology*, 102(1), 17-20.

[41] **Vanelstraete, A., & Francken, L.** (1995). Orniérage: synthèse des principaux constats et résultats. *Bulletin CRR*, (25), 9-16.

[42] **Grimaux, J. P., & Hiernaux, R.** (1977). Utilisation de l'orniéreur type LPC. *BULLETIN DE LIAISON LAB. PONTS CHAUSS.*, (SPEC V).

[43] **Brown, S. F., & Pell, P. S.** (1974). Repeated loading of bituminous materials. In Proceedings of the Second International Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa.

[44] **Vanelstraete, A., Francken, L., & Reynaert, R.** (1996). Influence of binder properties on the performance of asphalt mixes. In euraspalt & eurobitume congress, strasbourg, 7-10 MAY 1996. volume 2. PAPER E&E. 5.101.

[45] **Nguyen, D. T.** (2006). Prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses. Thèse de Doctorat, Ecole des Ponts, Paris Tech.

[46] **Dony, A.** (1991). Liants bitumes-polymères de la fabrication a la mise en oeuvre en enrobes: influence de la nature du bitume sur leurs propriétés mécaniques, leur micromorphologie et leur stabilité thermique (No. CR15) PhD Thesis, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI.

[47] **Haddadi, S., Ghorbel, E., & Laradi, N.** (2008). Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA. *Construction and Building Materials*, 22(6), 1212-1219.

[48] **Yao, Z., Zhang, J., Gao, F., Liu, S., & Yu, T.** (2018). Integrated utilization of recycled crumb rubber and polyethylene for enhancing the performance of modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 170, 217-224.

[49] **Das, A. K., & Panda, M.** (2017). Investigation on rheological performance of sulphur modified bitumen (SMB) binders. *Construction and Building Materials*, 149, 724-732.



- [50] **Chen, J. S., & Lin, K. Y.** (2005). Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers. *Journal of materials science*, 40(1), 87-95.
- [51] **Peltonen, P. V.** (1991). Characterization and testing of fibre-modified bitumen composites. *Journal of materials science*. 26(20), 5618 - 5622.
- [52] **Farias, L. G. A., Leitinho, J. L., Amoni, B. D. C., Bastos, J. B., Soares, J. B., Soares, S. D. A., & de Sant'Ana, H. B.** (2016). Effects of nanoclay and nanocomposites on bitumen rheological properties. *Construction and building materials*. 125, 873 - 883.
- [53] **Fernandes, S. R., Silva, H. M., & Oliveira, J. R.** (2018). Developing enhanced modified bitumens with waste engine oil products combined with polymers. *Construction and Building Materials*, 160, 714-724.
- [54] **Tran, D. T.** (2020). Endommagement des enrobés bitumineux soumis à des cycles de gel/dégel. Thèse de Doctoral, Université de Lyon.
- [55] **Di Benedetto, H. Olard, F., Sauzéat, C., & Delaporte, B.** (2004). Linear viscoelastic behavior of bituminous materials: From binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design*, 5(sup1), 163-202.
- [56] **Di Benedetto, H. Nguyen, Q. T. & Sauzéat, C.** (2011). Nonlinearity, heating, fatigue and thixotropy during cyclic loading of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design*, 12(1), 129 - 158.
- [57] **Feng, D., Yi, J., Wang, D., & Chen, L.** (2010). Impact of salt and freeze – thaw cycles on performance of asphalt mixtures in coastal frozen region of China. *Cold Regions Science and Technology*, 62(1), 34-41.
- [58] **Kim, Y. R., Little, D. N., & Lytton, R. L.** (2003). Fatigue and healing characterization of asphalt mixtures. *Journal of materials in Civil Engineering*, 15(1), 75-83.
- [59] **Mangiafico, S.** (2014). Linear viscoelastic properties and fatigue of bituminous mixtures produced with Reclaimed Asphalt Pavement and corresponding binder blends. PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.
- [60] **Ramirez Cardona, A. D.** (2016). Characterisation of Thermomechanical Properties of Bituminous Mixtures Used for Railway Infrastructures. PhD Thesis, Ecole Nationale des Travaux publics de l'Etat (ENTPE)- Université de Lyon, France.
- [61] **Neifar, M., Di Benedetto, H., & Dongmo, B.** (2003). Permanent deformation and complex modulus: two different characteristics from a unique test. In performance testing and evaluation of bituminous materials ptebm'03. proceedings of the 6th international rilem symposium held zurich, switzerland, 14-16 APRIL 2003.
- [62] **Chavez, F., Marcobal, J., & Gallego, J.** (2019). Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt mixtures with rubber incorporated by the wet, dry, and semi-wet process. *Construction and Building Materials*, 205, 164-174.
- [63] **Saoula, S.** (2010). Approche modéliste et valorisation des enrobés modifiés par ajout de polymères-impact sur l'environnement Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie houari boumediene, Alger.

- [64] **PIARC.** (1999). Use of modified bituminous binders, special bitumens with additives in road pavements, Laboratoire Central des ponts et chaussée.
- [65] **Dony, A.** (1991). Liants bitumes-polymères de la fabrication à la mise en oeuvre en enrobé: influence de la nature du bitume sur leurs propriétés mécaniques, leur micromorphologie et leur stabilité thermique (No. CR15).
- [66] **Artamendi, I., Khalid, H., Page, G. C., Redelius, P. G., Ebels, L. J., & Negulescu, I.** (2006). Diffusion kinetics of bitumen into waste tyre rubber. *Asphalt Paving Technology*, 75, 133.
- [67] **Airey, G. D., Rahman, M. M., & Collop, A. C.** (2003). Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method. *International Journal of Pavement Engineering*, 4(2), 105-119.
- [68] **Liu, S., Cao, W., Fang, J., & Shang, S.** (2009). Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2701-2708.
- [69] **Loderer, C., Partl, M. N., & Poulikakos, L. D.** (2018). Effect of crumb rubber production technology on performance of modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 191, 1159-1171.
- [70] **Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., & Dalmazzo, D.** (2012). Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53, 546-555.
- [71] **Bressi, S., Fiorentini, N., Huang, J., & Losa, M.** (2019). Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: state of the art and statistics. *Coatings*, 9(6), 384.
- [72] **Tayfur, S., Ozen, H., & Aksoy, A.** (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21(2), 328-337.
- [73] **Jamal, M., & Giustozzi, F.** (2020). Low-content crumb rubber modified bitumen for improving Australian local roads condition. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122484.
- [74] **Duan, H., Zhu, C., Li, Y., Zhang, H., Zhang, S., Xiao, F., & Amirkhanian, S.** (2021). Effect of crumb rubber percentages and bitumen sources on high-temperature rheological properties of less smell crumb rubber modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 277, 122248.
- [75] **French, T.** (1989). *Tyre Technology*, Adam Hilger, Bristol, United Kingdom, <https://trid.trb.org/view/349843>.
- [76] **Genever M, O'Farrell K, Randell P, & Rebbechi O.** (2017). National market development strategy for used tyres. <https://www.tyrestewardship.org.au/reports-facts-figures/market-development-strategy/>.
- [77] **Brûlé, B., Ramond, G., & Such, C.** (1987). Relations composition-structure-propriétés des bitumes routiers-Etat des recherches au LCPC. *Bulletin de liaison laboratoire des ponts et chaussées* (148).
- [78] **Brule, B.** (1977). Caractérisation de produits bitumineux par chromatographie sur gel perméable. *Bulletin de liaison laboratoire des ponts et chaussées (SPEC V)*.

- [79] **Lesueur, D.** (2002). La rhéologie des bitumes: Principes et modification. *Rhéologie*, 2, 1-30.
- [80] **Xu, Q., Chen, H., & Prozzi, J. A.** (2010). Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects. *Construction and Building materials*, 24(10), 2003-2010
- [81] **Luo, D., Khater, A., Yue, Y., Abdelsalam, M., Zhang, Z., Li, Y., & Iseley, D. T.** (2019). The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: A review. *Construction and Building Materials*, 209, 377-387.
- [82] **Laval, C., & Quivoron, C.** (1973). Mise en évidence d'une corrélation entre le rapport hydrophile/lipophile des résines époxydes et leur compatibilité avec le bitume routier. *crhebd ACAD SCI, C*, (9).
- [83] **Van Beem, E. J., & Brassier, P.** (1973). Bituminous binders of improved quality containing Cariflex thermoplastic rubber. *J. Inst. Petrol*, 59(566), 91-97.
- [84] **Si Bachir, D.** (2014). Comportement rhéologique des bitumes modifiés par des polymères: Influence du vieillissement. Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie houari boumediene, Alger.
- [85] **Navarro, F. J., Partal, P., Martinez-Boza, F., & Gallegos, C.** (2004). Thermo-rheological behavior and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens. *Fuel*, 83(14-15), 2041-2049.
- [86] **Amba, J. C.** (2008). Caractérisation des gradients de propriétés d'une couche de mortier et influence sur la fissuration: expérimentation et modélisation. Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier.
- [87] **Moutier, F.** (1977). Uses and possibilities of the gyratory shear press (No. Special Volume).
- [88] **Guendouz, M., Debieb, F., Boukendakdji, O., Kadri, E. H., Bentchikou, M., & Soualhi, H.** (2016). Use of plastic waste in sand concrete. *J. Mater. Environ. Sci*, 7(2), 382-389.
- [89] **Guendouz, M., & Boukhelkhal, D.** (2017). Recycling of rubber waste in sand concrete. *Journal of Building Materials and Structures*, 4(2), 42.
- [90] **Balamuralikrishnan R., & Saravanan J.** (2021). Effect of Addition of Alccofine on the Compressive Strength of Cement Mortar Cubes, *Emerg. Sci. J.*, vol. 5, No. 2, pp. 155–170, doi: 10.28991/esj-2021-01265.
- [91] **Kadhim, A. A. & Al-Mutairee, H. M. K.** (2020). An Experimental Study on Behavior of Sustainable Rubberized Concrete Mixes, *Civ. Eng. J.*, vol. 6, No. 7, pp. 1273–1285, doi: 10.28991/cej-2020-03091547.
- [92] **Prasad, D. Pandey, A. & Kumar, B.** (2021). Sustainable production of recycled concrete aggregates by lime treatment and mechanical abrasion for M40 grade concrete. *Constr. Build. Mater*, vol. 268, p. 121119, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121119.
- [93] **Alzaim, M., Gedik, A., & Lav, A. H.** (2020). Effect of modulus of bituminous layers and utilization of capping layer on weak pavement subgrades. *Civil Engineering Journal*, 6(7), 1286-1299. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091548>.

- [94] **Bensaada, A., Soudani, K., & Haddadi, S.** (2021). Effects of short-term aging on the physical and rheological properties of plastic waste-modified bitumen. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(3), 1-12. 2021. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00471-7>.
- [95] **Ren, S. Liu, X. Lin, P. Wang, H. Fan, W. & Erkens. S.** (2021). The continuous swelling-degradation behaviors and chemo-rheological properties of waste crumb rubber modified bitumen considering the effect of rubber size. *Constr. Build. Mater.* vol. 307, p. 124966, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124966.
- [96] **Liu, Q. Liu, J. Yu, B. Zhang, J. & Pei. J.** (2022). Evaluation and optimization of asphalt binder and mixture modified with high activated crumb rubber content. *Constr. Build. Mater.* vol. 314, p. 125676, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125676.
- [97] **Jamal, M. & Giustozzi. F.** (2020). Low-content crumb rubber modified bitumen for improving Australian local roads condition, *J. Clean. Prod.*, vol. 271, p. 122484, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122484.
- [98] **Shen J. & Amirkhanian. S.** (2005). The influence of crumb rubber modifier (CRM) microstructures on the high temperature properties of CRM binders,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 265–271, doi: 10.1080/10298430500373336.
- [99] **Loderer, C. Partl, M. N. & Poulikakos. L. D.** (2018). Effect of crumb rubber production technology on performance of modified bitumen. *Constr. Build. Mater.*, vol. 191, pp. 1159–1171, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.046.
- [100] **Wang, H. Liu, X. Apostolidis, P. Erkens, S. & Scarpas. T.** (2019) Numerical investigation of rubber swelling in bitumen. *Constr. Build. Mater.*, vol. 214, pp. 506–515, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.144.
- [101] **AbdTayh S. & Yousif. R. A.** (2018). Effect of blending speed and blade level on the properties of reclaimed rubber modified bitumen. *Journal of Engineering and Applied Sciences* <https://www.researchgate.net/publication/329572514>.
- [102] **Rodríguez-Alloza, A. M. Gallego, J. & Pérez. I.** (2013). Study of the effect of four warm mix asphalt additives on bitumen modified with 15% crumb rubber. *Constr. Build. Mater.* vol. 43, pp. 300–308, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.02.025.
- [103] **Soudani, K. Cerezo, V. & Haddadi. S.** (2016). Rheological characterization of bitumen modified with waste nitrile rubber (NBR). *Constr. Build.Mater.*, vol. 104, pp. 126–133, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.029.
- [105] **Liu, S. Cao, W. Fang, J. & Shang. S.** (2009). Variance analysis and performance evaluation of different crumb rubber modified (CRM) asphalt. *Constr. Build. Mater.* vol. 23, No. 7, pp. 2701–2708, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.12.009.
- [106] **Jamal, M., Martinez-Arguelles, G., & Giustozzi, F.** (2021). Effect of waste tyre rubber size on physical, rheological and UV resistance of high-content rubber-modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 304, 124638.
- [107] **French. T.** (1989). *Tyre Technology*, Adam Hilger, Bristol, United Kingdom, <https://trid.trb.org/view/349843>.

- [108] **Genever, M. O'Farrell, K. Randell, P. & Rebbechi, O.** (2017). National market development strategy for used tyres. <https://www.tyrestewardship.org.au/reports-facts-figures/market-development-strategy/>.
- [109] **Li, J. Chen, Z. Xiao, F. & Amirkhanian. S. N.** (2021). Surface activation of scrap tire crumb rubber to improve compatibility of rubberized asphalt. *Resour. Conserv. Recycl.* vol. 169, p. 105518, doi: 10.1016/j.resconrec.2021.105518.
- [110] **Xiang, Y., Fan, H., & Liu, Z.** (2020). Structural characteristics of silane-modified ground tyre rubber and high-temperature creep property of asphalt rubber. *Construction and Building Materials*, 236, 117600.
- [111] **García-Morales, M., Partal, P., Navarro, F. J., Martínez-Boza, F., Gallegos, C., González, N., & Muñoz, M. E.** (2004). Viscous properties and microstructure of recycled EVA modified bitumen. *Fuel*, 83(1), 31-38.
- [112] **Boukhelkhal. D. & Read. J.** (2003). *The Shell bitumen handbook*, 5th ed. London. <https://trid.trb.org/view/741018>.
- [113] **Cheriet, F., Soudani, K., & Haddadi, S.** (2015). Influence of natural rubber on creep behavior of bituminous concrete. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2769-2776.
- [114] **Özen, H.** (2011). Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples. *Construction and Building Materials*, 25(2), 756-765.
- [115] **Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., De La Roche, C., Bankowski, W., Partl, M., & Grenfell, J.** (2011). Rutting of bituminous mixtures: wheel tracking tests campaign analysis. *Materials and structures*, 44(5), 969-986.
- [116] **Berthe-julienne dongmo-engeland.** (2005) characterization of rutting deformation of bituminous pavements. Thèse de Doctoral, l'institut national des sciences appliquées, INSA de Lyon.
- [117] **Aschenbrener, T.** (1994). Comparison of results obtained from the LCPC rutting tester with pavements of known field performance. *Transportation Research Record*, (1454).[Online]. <https://www.codot.gov/programs/research/pdfs/1992/frenchrutting.pdf>.
- [118] **Tayfur, S., Ozen, H., & Aksoy, A.** (2007). Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*, 21(2), 328-337.
- [119] **Bouchouk, K., Ninouh, T., & Hamrouni, A.** (2022). Improvement of the resistance of bituminous layers to the phenomenon of rutting by modifying the hydrocarbon binder. *Innovative Infrastructure Solutions*, 7(2), 1-10.
- [120] **Ninouh, T., & Rouili, A.** (2013). The Protection and Enhancement of the Roman Roads in Algeria. *International Journal of Social, Behavioural, Educational, Economic and Management Engineering*, 7, 1772-1775.
- [121] **Ninouh, T.** (2013). Characterization of Mechanical Properties of Recycled Asphalt. *AWAM International Conference on Civil Engineering & Geohazard Information Zonation. Caspian Journal of Applied Sciences Research*, 2(AICCE'12 & GIZ' 12), pp. 343-348, 2013.

# Annexes

## Annexe A. Analyse granulométrique et propriétés des granulats

### Analyse granulométrique et propriétés des granulats (formulation 1)

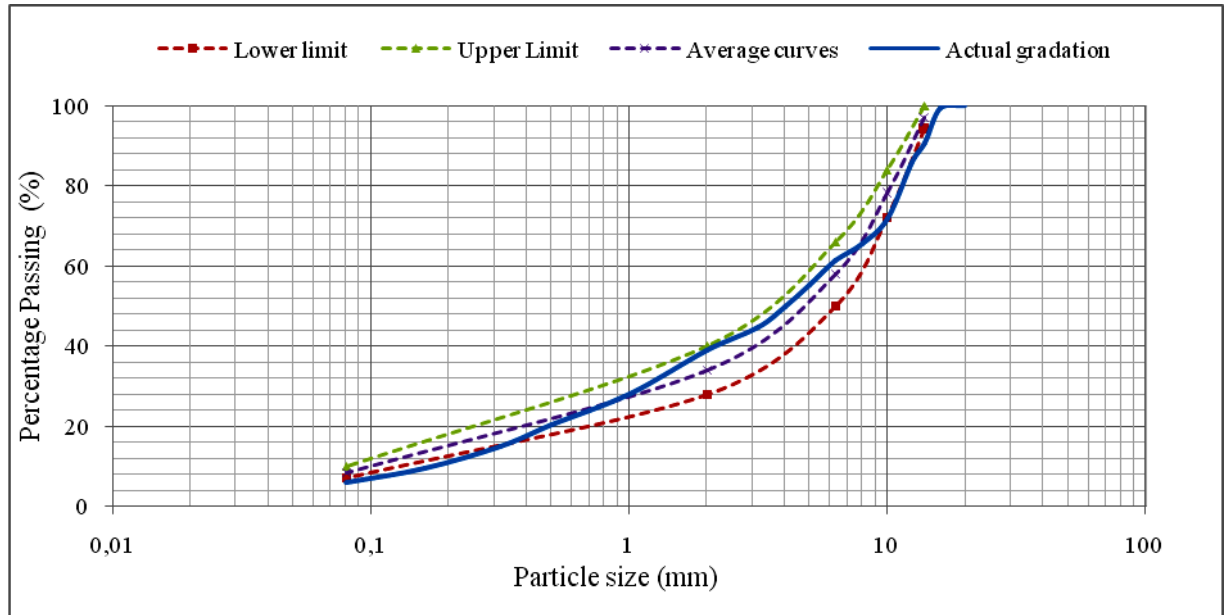


Figure A.1. Courbe analyse granulométrique (formulation 1)

Tableau A.1. des propriétés des granulats (formulation 1)

Essais	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Spécification
Masse volumiques apparente	1.51	1.15	1.17	
Masse volumiques absolue	2.68	2.61	2.57	NF EN 1097-3
Propreté superficielle	-	2.50	1.71	NF P 18-591
Coefficient d'absorption d'eau	-	3.84	3.49	NP EN 1097-6
MDE	-	23	21	NF EN 1097-1
LA	-	24	22	NF EN 1097-2
Coefficient d'Aplatissement	-	29	21	

## Analyse granulométrique et propriétés des granulats (formulation 2)

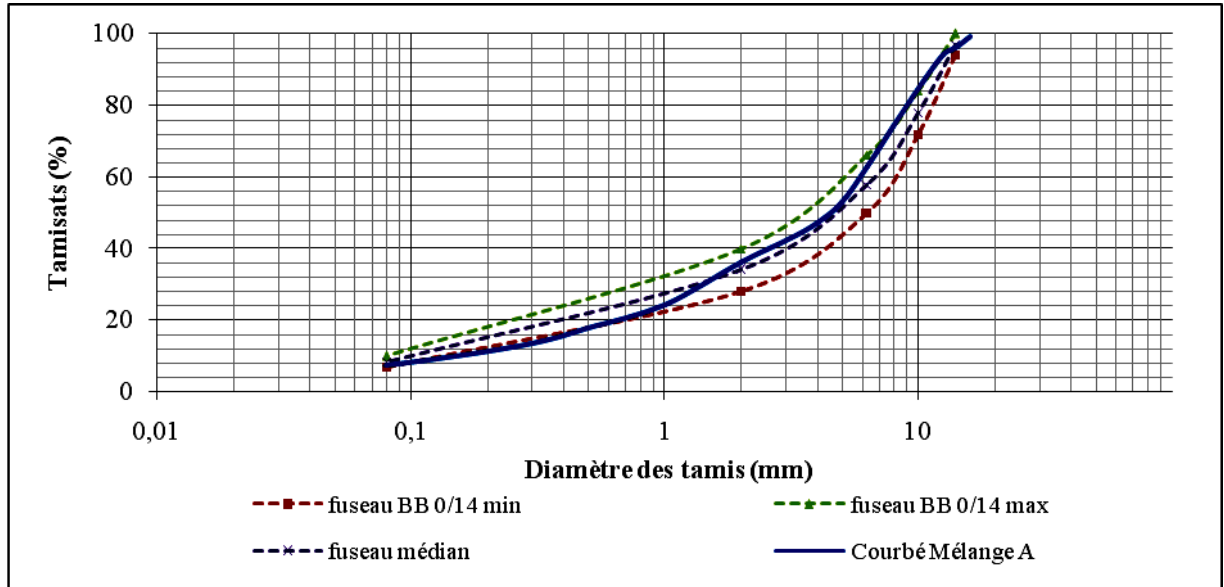


Figure A.2. Courbe analyse granulométrique (formulation 2)

Tableau A.2. des propriétés des granulats (formulation 2)

Essais	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Spécification
Masse volumiques apparente	1.49	1.17	1.19	
Masse volumiques absolue	2.66	2.62	2.59	NF EN 1097-3
Propreté superficielle	-	2.2	1.6	NF P 18-591
Coefficient d'absorption d'eau	-	3.2	3.1	NP EN 1097-6
MDE	-	21	19	NF EN 1097-1
LA	-	23	20	NF EN 1097-2
Coefficient d'Aplatissement	-	20	18	



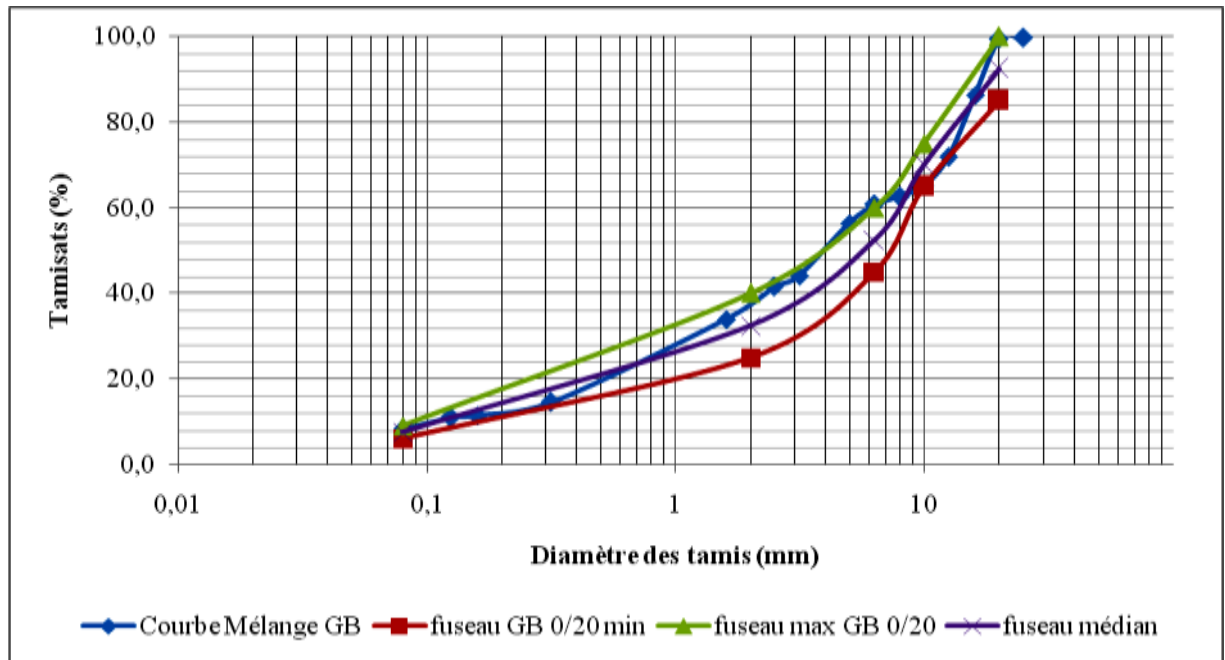
**Analyse granulométrique et propriétés des granulats (formulation 3)**

Figure A.3. Courbe analyse granulométrique (formulation 3)

Tableau A.3. des propriétés des granulats (formulation 3)

Essais	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Spécification
Masse volumiques apparente	1.55	1.28	1.34	
Masse volumiques absolue	2.63	2.63	2.61	NF EN 1097-3
Propreté superficielle	-	3.77	2.65	NF P 18-591
Coefficient d'absorption d'eau	-	0.33	0.17	NP EN 1097-6
MDE	-	13	23	NF EN 1097-1
LA	-	24	23	NF EN 1097-2
Coefficient d'Aplatissement	-	21	9	

## Annexe B. Caractéristiques des enrobés

**Tableau B.1.** La moyenne des résultats du test Marshall (formulation 1)

	<b>TL = 5.5</b>	<b>TL = 5.8</b>	<b>TL = 6.0</b>	<b>Specification</b>
<b>Stabilité Marshall (KN)</b>	14.35	16.61	17.66	NF EN 12697-34
<b>Valeur de fluage (0.1 mm)</b>	3.57	3.94	3.52	NF EN 12697-34

**Tableau B.2.** La moyenne des résultats du test Marshall (formulation 2)

	<b>TL = 5.9</b>	<b>TL = 6.2</b>	<b>TL = 6.4</b>	<b>Specification</b>
<b>Stabilité Marshall (KN)</b>	12.3	11.1	10.12	NF EN 12697-34
<b>Valeur de fluage (0.1 mm)</b>	3.6	4.12	5.07	NF EN 12697-34

**Tableau B.3.** La moyenne des résultats du test Marshall (formulation 3)

	<b>TL = 5.9</b>	<b>TL = 6.11</b>	<b>TL = 6.3</b>	<b>Specification</b>
<b>Stabilité Marshall (KN)</b>	10.5	9.4	8.7	NF EN 12697-34
<b>Valeur de fluage (0.1 mm)</b>	4.01	4.78	5.51	NF EN 12697-34

**Tableau B.4. Résultats des essais PCG (Formulation 1, TL = 5.5)**

Girations	Hauteur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de Vide (%)
5	132.998	2126.134	12.172
10	129.608	2181.755	9.874
15	127.511	2217.632	8.392
20	126.102	2242.402	7.369
25	124.959	2262.920	6.521
30	124.108	2278.440	5.880
40	122.807	2302.568	4.884
50	121.863	2320.408	4.147
60	121.117	2334.699	3.556
80	120.049	2355.482	2.698
100	119.306	2370.146	2.092
120	118.756	2381.126	1.638
150	118.179	2392.755	1.158
200	117.535	2405.860	0.617

**Tableau B.5. Résultats des essais PCG (Formulation 1, TL = 5.8)**

Girations	Hauteur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de Vide (%)
5	134.216	2106.849	12.968
10	130.562	2165.805	10.533
15	128.362	2202.927	9.000
20	126.758	2230.808	7.848
25	125.642	2250.626	7.029
30	124.729	2267.094	6.349
40	123.359	2292.279	5.309
50	122.349	2311.192	4.527
60	121.602	2325.385	3.941
80	120.469	2347.271	3.037
100	119.661	2363.110	2.383
120	119.146	2373.320	1.961
150	118.533	2385.606	1.453
200	117.888	2398.646	0.915

**Tableau B.6. Résultats des essais PCG (Formulation 1, TL = 6.0)**

Girations	Hauteur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de Vide (%)
5	143.481	1970.804	18.588
10	139.192	2031.528	16.080
15	136.689	2068.730	14.543
20	134.908	2096.036	13.415
25	133.556	2117.255	12.539
30	132.469	2134.625	11.821
40	130.794	2161.969	10.692
50	129.445	2184.492	9.761
60	128.459	2201.258	9.069
80	126.790	2230.239	7.871
100	125.642	2250.626	7.029
120	124.794	2265.921	6.397
150	123.717	2285.638	5.583
200	122.578	2306.873	4.706

**Tableau B.7. Résultats des essais PCG (Formulation 2, TL = 5.9)**

Girations	Hauteur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de Vide (%)
5	132.998	2126.134	12.172
10	129.445	2184.492	9.761
15	127.280	2221.655	8.226
20	125.840	2247.085	7.176
25	124.697	2267.681	6.325
30	123.850	2283.185	5.684
40	122.578	2306.873	4.706
50	121.671	2324.081	3.995
60	120.989	2337.173	3.454
80	120.017	2356.109	2.672
100	119.370	2368.879	2.144
120	118.919	2377.855	1.774
150	118.369	2388.895	1.317
200	117.857	2399.293	0.888

**Tableau B.8. Résultats des essais PCG (Formulation 2, TL = 6.2)**

Girations	Hauteur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de Vide (%)
5	137.447	2057.318	16.324
10	133.426	2119.323	13.802
15	131.054	2157.678	12.242
20	129.380	2185.589	11.107
25	128.099	2207.460	10.218
30	127.082	2225.123	9.499
40	125.577	2251.785	8.415
50	124.467	2271.870	7.598
60	123.620	2287.426	6.965
80	122.349	2311.192	5.999
100	121.442	2328.457	5.296
120	120.793	2340.971	4.787
150	120.081	2354.854	4.223
200	119.242	2371.415	3.549

**Tableau B.9. Résultats des essais PCG (Formulation 2, TL = 6.4)**

Girations	Hauteur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de Vide (%)
5	137.447	2057.318	16.324
10	133.426	2119.323	13.802
15	131.054	2157.678	12.242
20	129.380	2185.589	11.107
25	128.099	2207.460	10.218
30	127.082	2225.123	9.499
40	125.577	2251.785	8.415
50	124.467	2271.870	7.598
60	123.620	2287.426	6.965
80	122.349	2311.192	5.999
100	121.442	2328.457	5.296
120	120.793	2340.971	4.787
150	120.081	2354.854	4.223
200	119.242	2371.415	3.549

**Tableau B.10. Résultats des essais PCG (Formulation 3, TL = 5.9)**

Girations	Hauteur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de Vide (%)
5	135.136	2092.497	13.561
10	131.680	2147.418	11.293
15	129.640	2181.208	9.897
20	128.196	2205.784	8.882
25	127.049	2225.691	8.059
30	126.200	2240.677	7.440
40	124.826	2265.335	6.422
50	123.781	2284.448	5.632
60	123.033	2298.353	5.058
80	121.831	2321.019	4.121
100	120.989	2337.173	3.454
120	120.309	2350.393	2.908
150	119.565	2365.004	2.304
200	118.628	2383.685	1.533

**Tableau B.11. Résultats des essais PCG (Formulation 3, TL = 6.11)**

Girations	Hauteur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de Vide (%)
5	133.161	2123.534	13.631
10	129.478	2183.944	11.174
15	127.474	2218.266	9.778
20	126.070	2242.977	8.773
25	125.088	2260.583	8.057
30	124.273	2275.409	7.454
40	123.033	2298.353	6.521
50	122.156	2314.840	5.850
60	121.474	2327.842	5.321
80	120.501	2346.648	4.556
100	119.789	2360.589	3.989
120	119.242	2371.415	3.549
150	118.628	2383.685	3.050
200	118.083	2394.689	2.602

**Tableau B.12. Résultats des essais PCG (Formulation 3, TL = 6.3)**

Girations	Hauteur (mm)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Indice de Vide (%)
5	143.481	1970.804	18.588
10	139.192	2031.528	16.080
15	136.689	2068.730	14.543
20	134.908	2096.036	13.415
25	133.556	2117.255	12.539
30	132.469	2134.625	11.821
40	130.794	2161.969	10.692
50	129.445	2184.492	9.761
60	128.459	2201.258	9.069
80	126.790	2230.239	7.871
100	125.642	2250.626	7.029
120	124.794	2265.921	6.397
150	123.717	2285.638	5.583
200	122.578	2306.873	4.706

## Annexe C. Orniérage

### Description d'orniéreur

Ce matériel est utilisé pour évaluer la résistance à l'orniérage des enrobés bitumineux dans les conditions que simulent celles du trafic. Pour les chaussées ne subissant pas une charge supérieure à 13 tonnes par essieu, le dispositif standard est adapté. Au-delà, c'est l'appareil de grandes dimensions qui doit être utilisé. Deux échantillons de 500 x 180 mm préalablement compactés dans des moules adaptés subissent le passage répété d'une charge roulante à température spécifiée. La charge est simulée par une roue équipée d'un pneumatique lisse de dimensions normalisées. Elle circule sur l'échantillon sur une longueur de 410 mm en lui appliquant une charge de 5000 N en effectuant des mouvements d'aller retour à la fréquence de 1 Hz (1 A/R à la seconde). La profondeur de l'ornière provoquée par la charge roulante est mesurée après plusieurs nombres de cycles spécifiés. A la fin de chaque série de cycles de chargement, l'opérateur doit mesurer la profondeur d'orniérage en 15 points. Cette opération est optimisée grâce à un dispositif particulièrement simple d'utilisation qui permet la prise en compte simultanée des trois mesures à effectuer selon un axe perpendiculaire à l'axe longitudinal de l'éprouvette. Les trois mesures sont, immédiatement, reportées sur l'écran de l'ordinateur pour une visualisation 3D du résultat, simplement en appuyant sur un bouton déclencheur. L'opération est répétée 5 fois sur la longueur de l'éprouvette. Le logiciel de l'orniéreur permet à l'opérateur de choisir un essai normalisé ou de personnaliser la procédure. Il peut également définir précisément les conditions de mise en température (départ retardé, mise en température durant la nuit,)

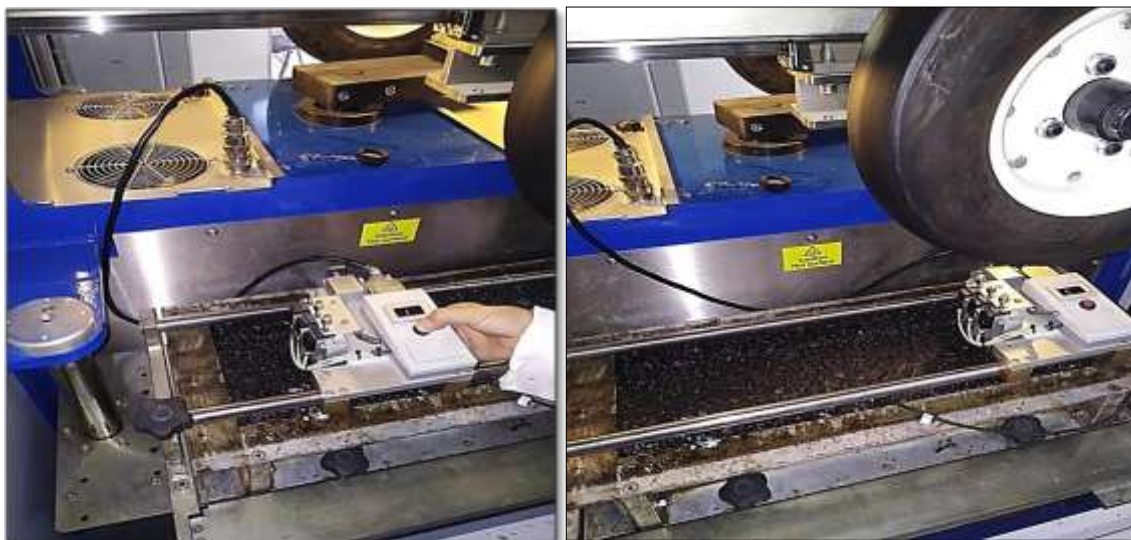


Figure.C.1. Mesure de la profondeur d'orniérage



Figure.C.2. Orniéreur double poste

### Principe de mesure

Deux roues animées d'un mouvement alternatif, avec ou sans effet de dérapage, passent chacune sur une plaque de matériau dont on observe les dégradations. Les contraintes induites dans le matériau résultent de l'application d'une charge sur chacun des supports des éprouvettes. Un résultat est la moyenne de l'évolution de l'ornière constatée sur au moins deux éprouvettes. Le nombre final de cycles est variable suivant les matériaux, la température, le but de l'étude.

**Tableau C.1.** Caractéristiques d'orniéreur

Caractéristique	Valeur
Course longitudinale du chariot	0,35 – 0,41 – 0,45 – 0,50 m
Fréquence du mouvement	1 Hz
Nombre de roues	2
Charge maximale par roue	550 daN
Pression de gonflage maximum	7.105Pa
Température d'essai	35° C à 60° C
Encombrement de l'éprouvette	L = 0,50 m ; l = 0,18 m, e min = 0,02 m ; e max = 0,14 m,
Course de la porte éprouvette	0,15 m
Présélection du nombre de cycles par compteur.	



**Applications :**

Étudier l'aptitude à l'orniéage de matériaux hydrocarbonés destinés aux couches de roulement ou de base, selon la norme NF EN 12697-22, dispositif de grandes dimensions. Étudier également des enduits superficiels normaux ou antidérapants. Dans ce cas, il est possible de faire dérapier latéralement la roue pour augmenter les effets d'arrachement. Étudier l'évolution de la texture sous trafic.

**Tableau C.2. Orniérage (formulation 1, éprouvette 1)**

Cyc	% Orn A	% Orn B		L2 Ligne 1	L2 Ligne 2	L2 Ligne 3	L1 Ligne 1	L1 Ligne 2	L1 Ligne 3	C Ligne 1	C Ligne 2	C Ligne 3	R1 Ligne 1	R1 Ligne 2	R1 Ligne 3	R2 Ligne 1	R2 Ligne 2	R2 Ligne 3
0	0	0	A	- 9.3826 33	- 12.17989 9	- 11.87935 7	- 6.3377 96	- 10.761 832	- 11.16 1402	- 7.258 892	- 10.790 232	- 10.967 669	- 8.3314 07	- 11.688 011	- 11.097 349	- 9.7442 16	- 12.477 714	- 12.655 082
			B	- 9.2903 65	- 12.67139 3	- 11.71588 2	- 6.3717 06	- 10.649 018	- 11.29 2261	- 7.297 929	- 10.584 722	- 10.847 421	- 8.2174 52	- 11.673 811	- 11.069 841	- 9.6054 18	- 12.026 060	- 12.695 951
1000	1.94	1.90	A	1.4751 07	2.315841	1.409184	1.7325 70	2.2747 99	2.195 499	1.718 380	2.1757 93	1.8724 81	1.8721 65	2.3359 51	2.0984 36	1.7625 60	2.1758 14	1.6724 80
			B	1.3434 08	3.014027	1.088129	1.8208 94	2.1560 68	2.430 100	1.836 671	2.0093 33	1.7369 07	1.6387 36	2.2929 55	2.0465 65	1.7755 71	1.7245 55	1.6119 63
3000	2.36	2.25	A	1.8504 87	2.671635	1.517643	2.0957 22	2.7903 43	2.630 902	1.950 624	2.6885 75	2.4139 84	1.9995 26	2.8925 19	2.5090 83	2.3851 70	2.9461 78	2.1149 61
			B	1.7664 99	3.029411	1.500744	1.8299 62	2.5635 34	2.232 439	1.728 632	2.5848 33	2.3770 44	1.9328 87	2.8605 69	2.4902 20	2.2617 50	2.5028 08	2.1507 22
1000 0	3.39	3.15	A	2.6371 27	3.802522	2.439539	2.8993 10	3.8924 27	3.625 880	2.415 508	4.1460 56	3.7531 96	2.8815 84	5.0446 24	3.2671 06	3.1934 96	3.8873 35	2.9378 31
			B	2.5101 59	3.311443	2.369196	2.6189 61	3.5244 07	2.915 016	2.445 475	3.4250 05	3.2812 48	2.7865 55	5.1649 30	3.2258 45	3.0767 79	3.5106 27	3.0117 09
3000 0	3.93	3.90	A	3.1974 34	4.901453	2.998334	3.1737 44	4.7057 74	3.816 073	3.012 482	4.5235 41	4.2392 87	3.7320 95	4.8825 07	3.6329 53	3.8291 14	4.6853 04	3.6581 34
			B	3.1808 72	4.889239	2.982612	3.3149 04	4.5882 27	3.957 935	3.117 366	4.3697 03	3.8923 02	3.7076 47	4.9184 01	4.1202 23	3.6201 31	4.0774 49	3.7999 95

Tableau C.3. Orniérage (formulation 1, éprouvette 2)

Cyc	% Orn A	% Orn B		L2 Ligne 1	L2 Ligne 2	L2 Ligne 3	L1 Ligne 1	L1 Ligne 2	L1 Ligne 3	C Ligne 1	C Ligne 2	C Ligne 3	R1 Ligne 1	R1 Ligne 2	R1 Ligne 3	R2 Ligne 1	R2 Ligne 2	R2 Ligne 3
0	0	0	<b>A</b>	- 10.858 540	- 12.91714 1	- 12.86846 6	- 9.6854 63	- 12.917 141	- 12.86 8466	- 9.638 540	- 12.917 141	- 12.868 466	- 11.841 171	- 12.917 141	- 12.868 466	- 12.080 521	- 12.917 141	- 12.868 466
			<b>B</b>	- 10.540 724	- 12.91714 1	- 12.86846 6	- 9.9973 63	- 12.917 141	- 12.86 8466	- 12.08 0915	- 12.917 141	- 12.868 466	- 12.092 745	- 12.917 141	- 12.868 466	- 9.8108 54	- 12.917 141	- 12.868 466
30	-0.04	- 0.03	<b>A</b>	0.5149 72	0.000000	0.000000	- 0.5421 77	0.0000 00	0.000 000	- 2.252 709	0.0000 00	0.0000 00	- 0.2567 00	0.0000 00	0.0000 00	1.9644 70	0.0000 00	0.0000 00
			<b>B</b>	0.2263 35	0.000000	0.000000	- 0.1825 66	0.0000 00	0.000 000	0.222 788	0.0000 00	0.0000 00	1.5882 97	0.0000 00	0.0000 00	- 2.2988 46	0.0000 00	0.0000 00
100	0.01	0.02	<b>A</b>	0.8197 75	0.000000	0.000000	- 0.1190 82	0.0000 00	0.000 000	- 1.979 448	0.0000 00	0.0000 00	- 0.3663 20	0.0000 00	0.0000 00	1.7377 41	0.0000 00	0.0000 00
			<b>B</b>	0.4089 01	0.000000	0.000000	- 0.0039 43	0.0000 00	0.000 000	0.453 463	0.0000 00	0.0000 00	- 0.0114 35	0.0000 00	0.0000 00	- 0.5591 33	0.0000 00	0.0000 00
300	-0.31	0.12	<b>A</b>	- 1.2263 18	0.000000	0.000000	- 2.4743 15	0.0000 00	0.000 000	- 2.412 012	0.0000 00	0.0000 00	- 0.0686 11	0.0000 00	0.0000 00	1.5149 55	0.0000 00	0.0000 00
			<b>B</b>	0.7854 68	0.000000	0.000000	0.4258 55	0.0000 00	0.000 000	0.803 220	0.0879 64	0.0000 00	0.0402 20	0.0000 00	0.0000 00	- 0.3915 51	0.0000 00	0.0000 00
1000	0.33	0.39	<b>A</b>	1.5871 02	0.000000	0.220851	0.8442 16	0.0000 00	0.000 000	- 1.113 535	0.7167 31	0.0000 00	0.3958 92	0.0000 00	0.0000 00	2.2964 80	0.0000 00	0.0000 00
			<b>B</b>	1.4889 17	0.000000	0.189020	1.1423 15	0.0000 00	0.000 000	1.305 969	0.8847 69	0.0000 00	0.6837 43	0.0000 00	0.0279 01	0.0599 35	0.0000 00	0.0000 00

Tableau C.4. Orniérage (formulation 1, éprouvette 3)

Cyc	% Orn A	% Orn B		L2 Ligne 1	L2 Ligne 2	L2 Ligne 3	L1 Ligne 1	L1 Ligne 2	L1 Ligne 3	C Ligne 1	C Ligne 2	C Ligne 3	R1 Ligne 1	R1 Ligne 2	R1 Ligne 3	R2 Ligne 1	R2 Ligne 2	R2 Ligne 3
0	0	0	<b>A</b>	- 5.6229 22	- 8.535156	- 8.236958	- 5.9738 53	- 9.0148 06	- 9.072 397	- 4.093 027	- 9.5540 19	- 9.7954 51	- 5.6623 53	- 9.1950 70	- 7.3095 70	- 5.9312 68	- 7.7975 38	- 5.5298 58
			<b>B</b>	- 9.2477 79	- 11.59689 2	- 10.34678 1	- 7.9319 73	- 11.740 080	- 11.06 1982	- 6.575 956	- 11.395 325	- 11.373 605	- 7.4075 46	- 11.115 263	- 11.362 602	- 6.8381 68	- 10.751 182	- 10.646 222
1000	2.02	1.02	<b>A</b>	2.2901 09	2.447542	1.761642	1.9222 27	2.6001 97	1.965 201	1.518 062	2.3623 52	1.9412 37	2.2881 38	2.6345 16	2.1219 78	2.0109 45	2.0337 63	0.3725 24
			<b>B</b>	1.2424 65	1.313532	0.962765	0.9530 38	1.7296 80	0.569 803	- 0.291 391	1.1955 89	1.0712 29	0.8907 36	0.9103 98	0.7996 89	1.4163 41	1.3648 04	1.1533 54
3000	2.43	1.26	<b>A</b>	2.8228 11	2.944148	2.243016	2.4032 76	3.2159 26	2.348 337	1.589 036	2.6353 09	2.3180 87	2.7624 83	3.2534 01	2.4536 34	2.4462 54	2.2436 08	0.7210 77
			<b>B</b>	1.5038 90	1.538369	1.318004	1.2073 65	1.8803 60	0.862 169	0.104 096	1.4488 27	1.2464 92	1.0815 79	1.1825 70	0.9439 08	1.5992 98	1.6176 46	1.3761 65
1000 0	3.09	1.64	<b>A</b>	3.4245 15	3.613125	2.707493	3.0798 97	3.8742 53	2.920 093	2.434 418	3.5180 78	3.0049 81	3.3212 08	3.9823 34	3.1519 19	2.9257 25	3.1930 34	1.1922 33
			<b>B</b>	1.8772 98	1.842097	1.637090	1.5614 50	2.4669 09	1.198 941	0.436 889	1.8973 18	1.6276 68	1.4167 38	1.6239 61	1.2185 91	2.1714 31	1.9225 56	1.7058 61
3000 0	3.58	1.92	<b>A</b>	3.8890 01	4.136551	2.988458	3.5439 90	4.7002 18	3.424 651	2.980 919	3.9567 01	3.5205 44	3.7683 45	4.6209 38	3.6364 34	3.3823 26	3.5961 55	1.5478 59
			<b>B</b>	2.1588 33	2.207359	1.580896	1.7802 89	2.6992 40	1.578 152	1.232 200	2.1533 16	1.6944 72	1.7270 55	2.0081 55	1.3887 45	2.3973 67	2.2803 21	1.9569 64

Tableau C.5. Orniérage (formulation 1, éprouvette 4)

Cyc	% Orn A	% Orn B		L2 Ligne 1	L2 Ligne 2	L2 Ligne 3	L1 Ligne 1	L1 Ligne 2	L1 Ligne 3	C Ligne 1	C Ligne 2	C Ligne 3	R1 Ligne 1	R1 Ligne 2	R1 Ligne 3	R2 Ligne 1	R2 Ligne 2	R2 Ligne 3
0	0	0	<b>A</b>	- 9.8092 77	- 12.06313 9	- 12.44837 9	- 9.2584 26	- 12.260 762	- 11.25 2178	- 8.892 901	- 10.534 232	- 10.888 683	- 9.1736 49	- 10.479 798	- 10.721 672	- 8.5037 19	- 10.807 194	- 9.5875 72
			<b>B</b>	- 9.7134 59	- 12.12546 4	- 10.75546 7	- 8.9311 49	- 12.917 141	- 12.75 2539	- 10.15 7059	- 12.781 053	- 12.746 252	- 9.9413 71	- 12.917 141	- 12.868 466	- 10.524 163	- 12.917 141	- 12.868 466
1000	1.27	0.91	<b>A</b>	1.0094 32	1.011778	1.804515	1.0886 85	1.4421 29	1.340 410	1.200 272	1.3312 74	1.3973 87	1.2010 62	1.0827 70	1.4315 73	1.1785 83	1.3711 15	1.0987 26
			<b>B</b>	1.2266 96	1.150627	0.965911	0.9412 13	1.1356 44	1.063 773	0.712 125	1.3849 38	0.7572 56	0.9215 02	0.9013 36	0.7631 51	0.8335 74	0.8496 63	0.0000 00
3000	1.65	1.18	<b>A</b>	1.1730 70	1.841708	2.285898	1.3907 24	2.2255 12	0.858 241	1.493 242	1.6058 11	1.7105 79	1.4979 75	1.8030 35	1.7310 11	1.8378 62	1.8393 27	1.3875 53
			<b>B</b>	1.5622 51	1.410572	1.179683	1.2318 17	1.3320 83	1.235 500	1.200 280	1.6007 05	1.2850 14	1.1391 61	1.2062 51	1.0327 29	1.1269 41	1.1833 73	0.0000 00
10000	2.01	1.52	<b>A</b>	1.6892 19	2.170286	2.771996	1.8035 63	2.4365 44	1.259 459	1.863 101	2.0479 88	2.0988 27	1.8390 50	2.1024 22	1.9557 86	2.0432 95	2.2818 99	1.7156 76
			<b>B</b>	1.9474 89	1.932827	1.551035	1.6209 97	1.7502 05	1.507 042	1.550 820	1.8622 28	1.6681 58	1.5102 04	1.2374 13	1.4524 20	1.4435 71	1.5131 38	0.1901 99
30000	2.26	1.81	<b>A</b>	1.9896 81	2.099285	3.165354	2.1099 39	2.6578 31	2.297 278	2.234 142	2.2120 79	1.9770 08	2.1789 42	2.2676 95	2.3507 14	1.9510 27	2.5000 29	1.9451 65
			<b>B</b>	2.2932 96	2.288228	1.781704	1.7156 31	2.1004 80	2.138 933	1.695 531	2.3805 40	1.9306 61	1.7471 83	1.8389 57	1.6850 57	1.5279 53	1.6156 96	0.4609 56

## Annexe D. Module de rigidité

**Tableau D. 1. Variation du module de rigidité du mélange témoin en fonction de la température et de la fréquence**

Fréquence (Hz)	Température (°C)	Charge (kN)	Défor (mm)	Effort (KPa)	Microdéfo	Angle de phase (°)	Rigidité (MPa)	Composant réel E1 (MPa)	Composant imaginaire E2 (MPa)	Module complexe E* (MPa)
0.5	10.0	0.010170	0.027949	191.524892	21.896063	10.238001	8747	8608	1555	$E^* = 8608 + i 1555$
1.0	10.0	0.012825	0.032501	241.532053	25.461967	9.092587	9486	9367	1499	$E^* = 9367 + i 1499$
2.0	10.0	0.014275	0.033843	268.873680	26.513252	8.804634	10141	10022	1552	$E^* = 10022 + i 1552$
3.0	10.0	0.015010	0.034322	282.793423	26.888437	8.549990	10517	10401	1563	$E^* = 10401 + i 1563$
5.0	10.0	0.015869	0.034761	299.234957	27.231865	7.649775	10988	10891	1461	$E^* = 10891 + i 1461$
10.0	10.0	0.017479	0.036352	330.779962	28.478384	7.504809	11615	11517	1510	$E^* = 11517 + i 1510$
20.0	10.0	0.018737	0.036439	359.423510	28.546796	4.890113	12591	12547	1054	$E^* = 12547 + i 1054$
30.0	10.0	0.022577	0.052488	446.378477	41.119780	6.593161	10856	10791	1187	$E^* = 10791 + i 1187$
0.5	15.0	0.007981	0.028180	150.302597	22.076718	13.707949	6808	6614	1613	$E^* = 6614 + i 1613$
1.0	15.0	0.010236	0.032365	192.779301	25.355493	12.180862	7603	7432	1604	$E^* = 7432 + i 1604$
2.0	15.0	0.011889	0.034460	223.953343	26.996212	11.687269	8296	8124	1680	$E^* = 8124 + i 1680$
3.0	15.0	0.012575	0.034777	236.946519	27.244900	11.288486	8697	8529	1701	$E^* = 8529 + i 1701$
5.0	15.0	0.013442	0.035195	253.522590	27.572015	10.301091	9195	9047	1642	$E^* = 9047 + i 1642$
10.0	15.0	0.014963	0.036503	283.404536	28.597067	9.585108	9910	9774	1641	$E^* = 9774 + i 1641$
20.0	15.0	0.016360	0.036776	314.698600	28.810716	6.652713	10923	10853	1239	$E^* = 10853 + i 1239$
30.0	15.0	0.024019	0.052938	473.637491	41.472272	8.386139	11421	11309	1591	$E^* = 11309 + i 1591$
0.5	20.0	0.005586	0.028534	105.197344	22.354119	19.160880	4706	4445	1545	$E^* = 4445 + i 1545$
1.0	20.0	0.007519	0.033014	141.605280	25.863565	17.178152	5475	5231	1617	$E^* = 5231 + i 1617$
2.0	20.0	0.008962	0.034845	168.821415	27.298021	16.196200	6184	5939	1724	$E^* = 5939 + i 1724$

Annexe D. Module de rigidité

3.0	20.0	0.009654	0.035175	181.940343	27.556663	15.256864	6602	6370	1736	$E^* = 6370 + i 1736$
5.0	20.0	0.010556	0.035538	199.176180	27.840886	13.976581	7154	6943	1725	$E^* = 6943 + i 1725$
10.0	20.0	0.012011	0.036836	227.800535	28.857825	13.124758	7894	7691	1780	$E^* = 7691 + i 1780$
20.0	20.0	0.013446	0.037169	259.830420	29.118365	10.095094	8923	8792	1524	$E^* = 8792 + i 1524$
30.0	20.0	0.019786	0.053418	393.975281	41.848283	10.764931	9415	9266	1663	$E^* = 9266 + i 1663$
0.5	25.0	0.003629	0.029278	68.340944	22.936578	25.518269	2979	2689	1284	$E^* = 2689 + i 1284$
1.0	25.0	0.005095	0.034021	95.952493	26.652492	23.048264	3600	3313	1409	$E^* = 3313 + i 1409$
2.0	25.0	0.006189	0.035111	116.607194	27.506537	21.880891	4239	3934	1579	$E^* = 3934 + i 1579$
3.0	25.0	0.006824	0.035568	128.649916	27.864699	20.679659	4617	4320	1629	$E^* = 4320 + i 1629$
5.0	25.0	0.007678	0.035997	144.975112	28.200808	19.085948	5141	4860	1677	$E^* = 4860 + i 1677$
10.0	25.0	0.009034	0.037571	171.746014	29.433868	17.361389	5835	5574	1725	$E^* = 5574 + i 1725$
20.0	25.0	0.010437	0.037806	203.177820	29.617374	14.445524	6860	6657	1655	$E^* = 6657 + i 1655$
30.0	25.0	0.015658	0.053642	316.115292	42.023377	13.586105	7523	7340	1648	$E^* = 7340 + i 1648$
0.5	30.0	0.002274	0.029560	42.822220	23.157592	30.476146	1849	1594	938	$E^* = 1594 + i 938$
1.0	30.0	0.003225	0.033459	60.738251	26.211816	28.224927	2317	2042	1096	$E^* = 2042 + i 1096$
2.0	30.0	0.004167	0.035635	78.524152	27.916857	27.248269	2813	2501	1287	$E^* = 2501 + i 1287$
3.0	30.0	0.004678	0.035934	88.230336	28.151055	26.287899	3134	2811	1386	$E^* = 2811 + i 1386$
5.0	30.0	0.005432	0.036431	102.666324	28.540131	24.679350	3597	3271	1497	$E^* = 3271 + i 1497$
10.0	30.0	0.006593	0.038007	125.735504	29.775162	22.514781	4223	3909	1597	$E^* = 3909 + i 1597$
20.0	30.0	0.007827	0.038361	153.962528	30.052653	19.281733	5123	4860	1620	$E^* = 4860 + i 1620$
30.0	30.0	0.012177	0.054290	250.531207	42.531590	16.865882	5891	5679	1564	$E^* = 5679 + i 1564$