



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire Matériaux de Génie
Civil et Environnement



Thèse de Doctorat en Sciences

En Génie Civil

Présentée par:

SADOUDI Lyacia

Ingénieur d'État en génie civil de l'ENP ; Magister en génie civil de l'ENP

THEME

Etude des performances d'un enrobé modifié par polymère Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)

Soutenue le 08 juin 2020

, devant le jury composé de :

Mr A.BALI	Professeur, ENP d'Alger	Président
Mme. R.MITICHE-KETTAB	Professeur, ENP d'Alger	Directrice de Thèse
Mr N. BOURAHLA	Professeur, ENP d'Alger	Examineur
Mr S.HADDADI	Professeur, USTHB	Examineur
Mr M.N. OUDJIT	Professeur, USTHB	Examineur
Mr. M. TAKI	Professeur, ENSTP	Examineur

ENP 2020



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil
Laboratoire Matériaux de Génie
Civil et Environnement



Thèse de Doctorat en Sciences

En Génie Civil
Option : Matériaux

Présentée par:

SADOUDI Lyacia

Ingénieur d'État en génie civil de l'ENP ; Magister en génie civil de l'ENP

THEME

Etude des performances d'un enrobé modifié par polymère Styrene-Butadiene-Styrene (SBS)

Soutenue le 08 juin 2020

, devant le jury composé de :

Mr A.BALI	Professeur, ENP d'Alger	Président
Mme. R.MITICHE-KETTAB	Professeur, ENP d'Alger	Directrice de Thèse
Mr N. BOURAHLA	Professeur, ENP d'Alger	Examineur
Mr S.HADDADI	Professeur, USTHB	Examineur
Mr M.N. OUDJIT	Professeur, USTHB	Examineur
Mr. M. TAKI	Professeur, ENSTP	Examineur

ENP 2020

ملخص: يعتبر تركيز حركة المرور وارتفاع درجة الحرارة من الأسباب الرئيسية لتدهور الطرق. تتطلب هذه القيود استكشاف خطوط بحث جديدة لتحسين أداء الخرسانة الإسفلتية العادية. تتكون هذه الدراسة من دراسة أداء بوليمر ستايرين-بوتادين-ستايرين. تم إجراء التحقيقات في المختبرات لمعرفة ذلك؛ تقييم قابلية التشغيل، معلمات مارشال، مقاومة الماء، معامل الصلابة، مقاومة التشوه الدائم (التجوية)، الزحف الاستاتيكي وقياس التشوه المحلي عن طريق الارتباط بين الصور. يحتوي هذا البوليمر على فتات مطاطية ناتجة عن استعادة باطن الأحذية وسجاد المركبات، والتي تم إدخالها في الخليط البيتوميني بالطريق الجاف. تم تحضير الخليط المتحكم والمعدل بمحتوى مثالي من البيتومين 50/40 ونسب مختلفة من المطاط. يتم تقدير النسب المئوية من المطاط المضاف إلى الخليط باستخدام اختبار قابلية التشغيل. تشير النتائج التي تم الحصول عليها من خصائص الخليط المعدل إلى أن إدخال المطاط في خليط التحكم بنسب مئوية مختلفة من المطاط (0.25%، 0.5% و 0.75%) يعطي خليط يمكن التحكم فيه. أفضل النتائج تم الحصول عليها في الخليط المعدل بنسبة 0.25%.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الإسفلتية، المطاط، قابلية التشغيل، إعدادات مارشال، معامل الصلابة، زحف ثابت، التشوه، الدائم الارتباط بين الصور.

Abstract. Concentration of traffic and high temperature are considered the main causes of roads degradation. These constraints require the exploration of new research directions to improve the performance of the ordinary bituminous concrete. This research consists in the study of the performances of a concrete bituminous modified by polymer SBS. Investigations to the laboratories were made to know; workability, Marshall Parameters, moisture susceptibility, stiffness modulus, permanent deformation resistance (rutting), static creep and local deformation measurement by CID. This polymer has a rubber resulting from the recovery of soles of shoes and carpets of vehicles, which has been introduced into the bituminous mixture by the dry process. A control and modified mixture was prepared with an optimum 40/5 feather bitumen content, different aggregate fractions, and various percentages of rubber. The percentages of rubber added to the mixture are estimated using a workability test. The results obtained from the properties of the modified mixture indicate that the introduction of rubber in the control mixture at different percentages of rubber (0.25%, 0.5% and 0.75%) gives a workable mixture, with better performances at a percentage of 0.25% of rubber.

Keywords: bituminous concrete; rubber; workability; Marshall Parameters; stiffness modulus, creep static, rutting, CID.

Résumé : La concentration du trafic et la haute température sont considérées comme les principales causes de dégradation des routes. Ces contraintes nécessitent l'exploration de nouvelles pistes de recherche pour améliorer les performances du béton bitumineux ordinaire. Cette recherche consiste en l'étude des performances d'un enrobé modifié par polymère Styrene-Butadiene-Styrene (SBS). Des investigations aux laboratoires ont été effectuées à savoir : l'évaluation de l'ouvrabilité, des paramètres Marshall, de la tenue à l'eau, du module de rigidité, de la résistance aux déformations permanentes (orniéage), du fluage statique et de la mesure de déformations locales par corrélation des images. Ce polymère se présente sous forme de poudrette issu de la récupération de semelles de chaussures et de tapis de véhicules ; elle a été introduite dans le mélange bitumineux par voie sèche. Des mélanges témoin et modifiés ont été préparés avec une teneur optimale en bitume de classe 40/50, différentes fractions d'agrégats et divers pourcentages de caoutchouc broyé. Les pourcentages de caoutchouc ajouté au mélange sont estimés à l'aide d'un test de maniabilité. Les résultats obtenus des propriétés du mélange modifié indiquent que l'introduction de caoutchouc dans le mélange témoin à des pourcentages différents de caoutchouc (0,25%, 0,5% et 0,75%) donne un mélange maniable, avec de meilleures performances à un pourcentage de 0,25% de poudrette de caoutchouc.

Mots clés : béton bitumineux; caoutchouc; maniabilité; Paramètres Marshall; module de rigidité, fluage statique, orniéage, corrélation des images.

REMERCIEMENTS

Louange à ALLAH Tout-Puissant qui m'a donné la force et la patience à achever ce travail.

J'aimerais remercier de tout mon cœur ma mère qui ma soutenus pendant toutes ma vie par « le DOU3A » avant de nous avoir quitté.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont également à Madame Kettab , directrice de thèse, pour m'avoir proposé ce sujet. Ses qualités intellectuelles et sa modestie ont grandement contribué à l'aboutissement de cette thèse.

Je remercie également mes frères **Chikh Mohamed , Abdelaziz, Abdelkader, Smail et mes belles sœurs.**

Je remercie au fond de mon cœur ma femme

Je remercie tous ce et celles qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse et plus particulièrement :

Je tiens à remercier les responsables et le staff technique des laboratoires : LMGCE (Mr Bali), LEEGO USTHB (Mr Haddadi), LCTP (Mr Sanhadji), SNTP(Mr Saker), EPTRC (Mr feroudji), Université Paul Sabatier (Mr Zitoune).

J'adresse ici mes vifs remerciements aux membres du jury, en acceptant d'examiner ce travail.

J'adresse ici mes vifs remerciements à Monsieur Bali , Monsieur Haddadi, Monsieur Si-Bachir, Monsieur Khouaouci pour leurs aides.

J'exprime également mes vifs remerciements à Monsieur Arous de la faculté de chimie USTHB pour l'essai FTIR , Monsieur Miroud de la faculté mécanique pour le MEB, Monsieur Bediar Université de Bouverdes .

J'exprime ma profonde reconnaissance à mes amis **RIYAD, MALIK, BRAHIM, FARES, Taki** pour leurs aides.

Mes sincères remerciements et ma profonde gratitude vont également aux personnels de la bibliothèque centrale.

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail :

A la mémoire de mon père **DAHMANE**

A la mémoire de ma mère **FATMA** pour son dévouement.

A notre chère directrice de thèse madame Kettab

A mes frères : **Cheikh Mohamed , Abdelaziz, Abdelkader, Smail**

A ma chère femme pour sa présence quotidienne à mes côtés

A mes belles sœurs

A tous mes enfants

A Mes neveux et mes nièces

Et à toute la famille **SADOUDI** où qu'elle soit.

A tous les enseignants du département de génie civil chacun par son nom.

A tous les enseignants de la faculté de génie civil USTHB.

A toutes ces personnes que j'estime : **Fares, Farid, Farid, Riyad, Brahim, Foudil,**

Abdelouaheb, Oussama, Anis, Essedik, Salim,.

TABLE DE MATIERES

LISTE DE FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE	19
PARTIE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux et les enrobés bitumineux	
1.1. Le bitume	23
1.1.1. Différentes sources de bitume	23
1.1.2. Composition de bitume	24
1.1.3. Propriétés de bitume	26
1.1.4. Les types de bitume	27
1.1.5. Caractéristiques de bitume	29
1.1.6. Notion de PG (Performance Grade)	29
1.1.7. Interaction entre le bitume et les granulats	29
1.1.8. Assurances qualité du bitume	30
1.1.9. Domaine d'utilisation des bitumes	31
1.2 Les Granulats	31
1.2.1 Les différents types de granulats	32
1.2.2 Techniques de fabrication	33
1.2.3 Les Caractéristiques des Granulats	34
1.2.3.2 Caractéristiques physico-chimiques	35
1.2.3.3 Caractéristiques physiques et mécaniques	36
1.3 Les enrobés bitumineux	36
1.3.1 Les différents types d'enrobes	37
1.3.1.1 Les enrobés à chaud	37
1.3.1.2 Les enrobés coulés à froid	39
1.3.1.3 Les enrobés tièdes	40
1.3.2 Domaines d'utilisation des enrobés bitumineux	40
1.3.2.1 Technique routière	40
1.3.2.2 Travaux hydrauliques	41
1.3.3 Les qualités exigées des enrobés bitumineux	41
1.3.4 Modification des enrobés	42

1.4 Les polymères	42
1.4.1 Structure des Polymères	43
1.4.2 Poudrette de caoutchouc	45
1.4.2.1 Choix de la poudrette de caoutchouc	45
1.4.3 L'utilisation de la poudrette de caoutchouc dans les enrobés bitumineux	45
1.4.4. Les procédés d'utilisation	46
1.4.5. Les avantages	46
1.5 Les Chaussées	46
1.5.1 Différents types de chaussées	46
1.5.1.1 Chaussées souples	46
1.5.1.2 Chaussées semi-rigides	48
1.5.1.3 Chaussées rigides	48
1.5.2 Les dégradations de chaussées	48
1.5.2.1 Influence de l'effet de trafic et climatique sur les chaussées	48
1.5.2.2 Types de dégradations	50

Chapitre 2 : Généralités sur les enrobés modifiés

2.1. Introduction	55
2.2 Modification des enrobés par addition d'EVA par le procédé humide et à sec (Smail Haddadi et al)	55
2.3. Modification des enrobés par addition d'acétate de vinyle et d'éthylène (EVA) et le polyéthylène haute densité (PEHD), et de deux déchets industriels à base d'EVA noté DEVA et du copolymère statistique styrène-butadiène (SBR) noté DSBR. (Saoula Samia et al)	56
2.4. Modification des enrobés par addition d'acétate de vinyle et d'éthylène (EVA) par procédé à sec (BAZZINE Rabia et al)	59
2.5. Modification des enrobés par addition poudrette de caoutchouc fine et grenue par voie humide (KEBAÏLI Nabil et al)	60
2.6. Modification des enrobés par addition de poudrette de caoutchouc par procédé à sec (J.L. Feiteira Dias Et al)	63
2.7. Modification des enrobés par addition de poudrette de caoutchouc par voie sèche par rapport au temps de digestion (Huynh Tan Tai Nguyen et al)	64
2.8. Modification des enrobés par un liant modifié avec Zycosoil et addition de poudrette de	65

caoutchouc par procédé à sec (Mahyar Arabani et al)	
2.9. Modification des enrobés par procédé à sec par addition de poudrette de caoutchouc en fonction du temps de digestion (F. Moreno et al)	68
2.10. Modification des enrobés par addition de déchets de polyéthylène téréphtalate (PET) par voie sèche (Taher Baghaee Moghaddam et al)	70
2.11. Modification d'un enrobé de mastic de pierre par procédé à sec par un polymère SBS (Celaledin E. Sengul et al)	71

PARTIE II : ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre 3 : Principaux essais sur enrobés bitumineux

3.1 Essais d'identification des matériaux	76
3.1.1. Essais de caractérisation de bitume	76
3.1.2. Essais d'identification des agrégats	82
3.1.2.1. Essais de Fabrication	82
3.1.2.2. Essais Intrinsèques	89
3.1.3. Essai de traction des polymères	92
3.2. Formulation de l'enrobé	94
3.2.1 Méthodologie de formulation d'un enrobé	94
3.2.2. Méthode du L.C.P.C	94
3.4. Essais sur enrobés bitumineux	95
3.4.1. Essai Marshall (fluage et stabilité)	95
3.4.2. Essai de la Presse à cisaillement Giratoire	97
3.4.3. Essai Duriez (Essai de compression simple type LCPC)	99
3.4.4. Essai du module de rigidité	101
3.4.5 Essai d'orniérage	102
3.4.6 Fluage statique	103
3.4.7. Mesure de déformations par corrélation d'images	108

Chapitre 4 : Caractéristiques des matériaux et choix de formulation optimale

4.1 Bitume	112
4.1.1 Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C	112

4.1.2 Point de ramollissement billes et anneaux	113
4.1.3 Essai de ductilité	113
4.1.4 Points d'éclaire et de feu	113
4.1.5 Perte de masse au chauffage	114
4.2 Granulats	115
4.2.1 Caractérisation des granulats	115
4.2.1.1 Caractéristiques de fabrication des granulats	115
4.2.1.2 Caractéristiques intrinsèques des granulats	118
4.2.1.3 Composition chimique de la roche	121
4.3 Polymère	121
4.3.1 Caractéristiques de la poudrette de caoutchouc	121
Chapitre 5 : Etude de l'enrobé modifié	
5.1 Introduction	127
5.2 Formulation optimale du mélange	127
5.2.1 Fuseau granulaire	127
5.2.2 Détermination des teneurs en bitume	127
5.2.3 Préparation du mélange et détermination de la teneur optimale en liant	128
5.2.3.1 Essai à la presse de cisaillement giratoire PCG	128
5.2.3.2 Essai Marshall	129
5.3 Enrobé modifié	130
5.3.1 Préparation du mélange modifié	130
5.3.2 Résultats des essais	130
5.3.2.1 Résultats de l'essai PCG	130
5.3.2.2 Résultats des propriétés Marshall	132
5.3.2.3 Résultats de l'essai Duriez (sensibilité à l'eau)	134
5.3.2.4 Résultats de Module de rigidité	135
5.3.2.5 Résultats de l'essai d'orniérage	136
5.3.2.6 Résultats de Fluage Statique	137
5.3.2.7 Mesure des déformations locales par corrélation des images	146
CONCLUSION GENERALE	166
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	169

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 . Classes granulaires [41]	32
Tableau 2.2. Module de rigidité (Mpa) Sm et coefficient de variation (%) des mélanges [61]	63
Tableau 2.3. Paramètres de la fatigue [61]	63
Tableau 2.4. Taux de profondeur ($R_{rd-105/120}$) et profondeur totale après 120 min (R_{rd-120}) [61]	64
Tableau 3.1. Spécifications d'équivalent de sable [79]	86
Tableau 3.2 . Charge de boulets relatifs à la classe granulaire [81]	90
Tableau 3.3. Charge de boulets suivant le type de classe granulaire [82]	91
Tableau 3.4 Valeurs du module de richesse [84]	95
Tableau 4.1. Caractéristiques du bitume utilisé	114
Tableau.4.2. Coefficients d'aplatissement des granulats	116
Tableau.4.3. Résultat de l'essai de la propreté du gravier	117
Tableau.4.4. Résultats de l'essai d'équivalent de sable	118
Tableau.4.6. Masse volumique réelle de différentes fractions granulaires.	119
Tableau 4.7. Résultats d'essai Micro-Deval.	120
Tableau 4.8. Résultats d'essai LOS ANGELES.	120
Tableau 4.9. Résultats de l'analyse chimique de la roche.	121
Tableau 5.1. La surface spécifique du mélange.	128
Tableau 5.2. Les teneurs en liant	128
Tableau 5.3. Résultats des Propriétés Marshall en fonction de la teneur en bitume	129
Tableau 5.4. Résultats de compression simple.	131
Tableau 5.5. Variation de module de rigidité en fonction du pourcentage de la poudrette	135
Tableau 5.6. Variation de la profondeur d'orniérage en fonction de teneur en poudrette.	136
Tableau.5.7. Variation de la déformation initiale et finale comme pourcentage de la déformation totale.	144
Tableau 5.8. Variation des valeurs du RVE en (%) en fonction de pourcentage de poudrette à 20°C et 60°C.	145
Tableau 5.9. Charges de début d'endommagement et rupture des éprouvettes.	148

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1. Composition du bitume [25]	24
Figure 1.2. Fabrication des granulats de roches massives [44]	34
Figure 1.3. Modèle schématique de la synthèse d'un polymère [52]	42
Figure 1.4. Polymère linéaire (a): homopolymère, (b): copolymère statistique, (c): copolymère alterné, (d): copolymère séquencé	43
Figure 1.5. (a) : Homopolymère ramifié et (b) : copolymère ramifié	43
Figure 1.6. Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.	44
Figure 1.7. Schématisation des sollicitations induites par le trafic	48
Figure 1.8. Sollicitations induites par la température	48
Figure 1.9. Fissure transversale [54]	49
Figure 1.10. Fissure longitudinale en piste de roues [54]	50
Figure 1.11. Fissures en carrelage [54]	50
Figure 1.12. Ornière [56]	51
Figure 1.13. Ressuage [54]	51
Figure 1.14. Nid de-poule	52
Figure 1.15. Désenrobage [53].	53
Figure 2.1. Stabilité Marshall en fonction d'EVA [57]	55
Figure 2.2. Fluage en fonction d'EVA [57]	55
Figure 2.3. Quotient Marshall en fonction d'EVA [57]	56
Figure 2.4. Stabilité et fluage Marshall [58]	57
Figure 2.5. Quotient Marshall [58]	57
Figure 2.6. Stabilité et fluage Marshall (PEHD) [58]	57
Figure 2.7. Quotient Marshall (PEHD) [58]	57
Figure 2.8. Stabilité et fluage Marshall (PEHD) [58]	58
Figure 2.9. Quotient Marshall (PEHD) [58]	58
Figure 2.10. Stabilité et fluage Marshall (PEHD) [58]	58
Figure 2.11. Quotient Marshall (PEHD) [58]	58
Figure 2.12. Variation des paramètres Marshall en fonction de la poudrette [59]	59
Figure 2.13. Effet des poudrettes (F) et (G) sur la stabilité Marshall (bitume TOT) [60]	61
Figure 2.14. Effet des poudrettes (F) et (G) sur la stabilité Marshall (bitume NAF) [60]	61
Figure 2.15. Effet des poudrettes (F) et (G) sur la compacité (bitume TOT) [60]	61
Figure 2.16. Effet des poudrettes (F) et (G) sur la compacité (bitume NAF) [60]	61
Figure 2.17. Effet des poudrettes (F) et (G) sur le fluage (bitume TOT) [60]	62
Figure 2.18. Effet des poudrettes (F) et (G) sur le fluage (bitume NAF) [60]	62
Figure 2.19. Stabilité Marshall [62]	62
Figure 2.20. Fluage Marshall [62]	65
Figure 2.21. Traction indirecte [62]	65

Figure 2.22. Profondeur d'ornièrè [62]	65
Figure 2.23. Traction indirecte conditionnée et inconditionnée ITS [63]	67
Figure 2.24. Tenue à l'eau TSR [63]	67
Figure 2.25. Module de rigidité ITSM [63]	67
Figure 2.26. Comportement en fatigue à 20°C [63]	67
Figure 2.27. variation de la déformation permanente [63]	67
Figure 2.28. Densité moyenne des mélanges [64]	68
Figure 2.29. Résistance à la traction indirecte des mélanges [64]	69
Figure 2.30. Tenue à l'eau des mélanges [64]	69
Figure 2.31. Profondeur d'ornièrè des mélanges à 1000 cycles [64]	70
Figure 2.32. Paramètre Marshall du mélange conventionnel et modifié [66]	71
Figure 2.33. Résistance à la traction indirecte et tenue à l'eau à 25°C [66].	71
Figure 2.34. déformant permanente des échantillons à 25 et 40°C [66]	72
Figure 2.35. déformant permanente moyenne à 25 et 40°C [66]	72
Figure 3.1. Essai de pénétrabilité pour le bitume [67]	77
Figure 3.2. L'appareil de pénétrabilité à l'aiguille [67]	78
Figure 3.3. Détermination du point de ramollissement [68]	78
Figure 3.4. L'essai de Bille Anneau réalisé [68]	79
Figure 3.5. L'essai de ductilité [70]	80
Figure 3.6. L'essai RTFOT [72]	81
Figure 3. 8. Echantillonneur granulats [76]	83
Figure 3.9. Matériel de l'essai granulométrique [77]	83
Figure 3. 10. Schéma de principe de l'équivalent de sable [79]	85
Figure 3. 11. Grille à Fonte [80].	87
Figure 3.12. Appareil au bleu de méthylène	89
Figure 3.11. Essai de bleu méthylène	89
Figure 3.13. La machine de l'essai Los Angeles [81]	90
Figure 3.14. Machine Micro Deval [82].	92
Figure 3.15: Eprouvette en position d'essai [83]	93
Figure 3.15 : Damme et presse Marshall [85]	97
Figure 3.16. Presse à cisaillement Giratoire (PCG) [86]	98
Figure 3.17 : Schéma représentant le principe de compactage à la PCG [86]	98
Figure 3.18 : Dispositif de l'essai Duriez [87]	100
Figure 3.19. Dispositif d'essai (Nottingham University) [88]	102
Figure 3.20. Essai d'orniérage [89]	103
Figure 3.21. Dispositif d'essai de fluage statique.	104
Figure 3.22. Contrainte appliquée et les Déformations mesurées	106

Figure 3.23. Type de moucheti aléatoire illustré au niveau de la zone d'étude	109
Figure 3.24. Image de référence	110
Figure 3.27. Image déformée	110
Figure.4.1. Essai de pénétrabilité.	112
Figure .4.2. Essai Bille-Anneau	113
Figure 4.3. Essai de ductilité	113
Figure 4.4. Point d'éclair et point	113
Figure 4.5. Perte de masse au chauffage	114
Figure 4.6. Les différentes fractions de granulats	115
Figure 4.7. Courbes granulométriques	116
Figure.4.8. Agitateur de l'équivalent de sable.	117
Figure.4.9. Essai de l'équivalent de sable.	118
Figure.4.10. dispositif de la masse volumique	119
Figure.4.11. Dispositif de l'essai MDE	119
Figure.4.12. Dispositif de l'Essai Los Angeles.	120
Figure.4.13. Essais chimiques.	121
Figure.4.14. Spectre FTIR de la poudrette	122
Figure.4.15. Microstructure de la poudrette	123
Figure.4.16. Microanalyse de de la poudrette	124
Figure.4.17: Essai de traction	124
Figure4.18. Evolution de la masse de la poudrette en fonction de la température	125
Figure 5.1. Fuseau de référence et courbe du mélange	127
Figure 5.2. Pourcentage de vide pour chaque giration.	129
Figure 5.3. Indice de vide en fonction des girations pour différentes teneurs en poudrette	131
Figure 5.4. Etat des éprouvettes après démoulage	131
Figure 5.5. Indice des vides du mélange.	132
Figure 5.6. Compacité du mélange.	132
Figure 5.7. La densité apparente du mélange.	132
Figure 5.8. Stabilité du mélange.	132
Figure 5.9. Fluage Marshall du mélange.	133
Figure 5.10. Quotient Marshall du mélange.	133
Figure 5.11. Tenue à l'eau en fonction du pourcentage de la poudrette.	134

Figure 5.12. Variation de module de rigidité en fonction du taux de la poudrette	135
Figure 5.13. Variation de la profondeur d'orniérage pour les différents teneurs en poudrette.	137
Figure 5.14. Courbe de fluage – recouvrance de BB 0/14 à 20°C.	138
Figure 5.15. Courbe de fluage – recouvrance de BB 0/14 à 60°C.	139
Figure 5.16. La déformation totale après 1 heure de chargement à 20°C et 60°C en fonction de pourcentage de poudrette	139
Figure 5.17. Module de rigidité en fluage statique après 1 heure de chargement à 20°C et 60°C en fonction de pourcentage de poudrette.	140
Figure 5.18. La déformation initiale après 15 secondes de chargement à 20°C et 60°C en fonction de pourcentage de poudrette.	141
Figure 5.19. Le module de rigidité en fluage statique après 15 secondes de chargement à 20°C et 60°C en fonction de pourcentage de poudrette	142
Figure 5.20. La déformation finale en fonction de pourcentage de poudrette à 20°C et 60°C	143
Figure 5.21. La déformation réversible en fonction de pourcentage de poudrette à 20°C et 60°C.	144
Figure 5.22. La déformation permanente en fonction de pourcentage de poudrette à 20°C et 60°C.	145
Figure 5.23. Figure 5.23. Dispositif expérimental pour l'essai de compression (Duriez) avec l'instrumentation associée pour la corrélation d'images numériques. (a) vue globale du montage et (b) zoom de la zone entourée sur la vue globale.	147
Figure 5.24. Etat de l'éprouvette 0 %. Avec : a) avant endommagement. (b) au début d'endommagement. C) à la rupture.	149
Figure 5.25. Etat de l'éprouvette 0.25 %. Avec : a) avant endommagement. (b) au début d'endommagement. C) à la rupture.	150
Figure 5.26. Etat de l'éprouvette 0.5 %. Avec : a) avant endommagement. (b) au début d'endommagement. C) à la rupture.	151
Figure 5.27. Etat de l'éprouvette 0.75 %. Avec : a) avant endommagement. (b) au début d'endommagement. C) à la rupture.	152
Figure 5.28. Champs de déplacement à la microstructure des échantillons à charge maximale	154
Figure 5.29. Evolution de la déformation ε_{yy} de l'échantillon de 0% au cours de l'essai de compression à différents niveaux de chargement	156
Figure 5.30. Evolution de la déformation ε_{yy} de l'échantillon de 0.25% au cours de l'essai de compression à différents niveaux de chargement	158
Figure 5.31. Evolution de la déformation ε_{yy} de l'échantillon de 0.75% au cours de l'essai de compression à différents niveaux de chargement.	158
Figure 5.32. Evolution de la déformation ε_{xx} de l'échantillon de 0% au cours de l'essai de compression à différents niveaux de chargement	160
Figure 5.33. Evolution de la déformation ε_{xx} de l'échantillon de 0.25% au cours de l'essai de compression à différents niveaux de chargement.	161
Figure 5.34. Evolution de la déformation ε_{xx} de l'échantillon de 0.75% au cours de l'essai de compression à différents niveaux de chargement.	162

Figure 5.35. Zone d'étude de contrainte-déformation	163
Figure 5.36. Diagramme contrainte-déformation	164

Liste des abréviations et nomenclature

01	SBS	Styrene-Butadiene-Styrene
02	PCG	Presse à cisaillement giratoire
03	PG	Performance Grade
04	MTQ	Ministère travaux publics Québec
05	MF	Module de finesse
06	BBM A 0/10	Béton bitumineux mince A 0/10 mm
07	BBM A 0/14	Béton bitumineux mince A 0/14 mm
08	BBM B 0/10	Béton bitumineux mince B 0/10 mm
09	BBM B 0/14	Béton bitumineux mince B 0/14 mm
1	BBM C 0/10	Béton bitumineux mince C 0/10 mm
11	BBTM 0/6	Béton bitumineux très mince 0/6 mm
12	BBTM0/10	Béton bitumineux très mince 0/10 mm
13	BBUM	Béton bitumineux ultra-minces
14	BBDr	Béton bitumineux drainant
15	BBME	Béton Bitumineux à Module Elevé
16	EVA	l'acétate de vinyle et d'éthylène
17	PEHD	polyéthylène haute densité
18	DSBR	copolymère statistique styrène-butadiène
19	NAF	Naftal
20	TOT	Total
21	S_m	Module de rigidité
22	CV	Coefficient de variation
23	DR(00,10,15,20,30)	pourcentages de poudrette (0%,1%,2% et 3%)
24	A(00,10,30,50)	temps de digestion (0h, 1h, 3h et 5h)
25	CR	Poudrette de caoutchouc
26	ITSM	Module de rigidité en traction indirecte
27	TSR	Tenue à l'eau
28	ITS	Traction indirecte conditionnée et inconditionnée
29	PET	déchets de polyéthylène téréphtalate
30	SMA	enrobé de mastic de pierre
31	MQ	quotient de Marshall
32	ECR	test de fluage répété
33	ES	équivalent de sable
34	CA	coefficient d'aplatissement
35	VBS	valeur au bleu du sol
36	CLA	Coefficient de Los Angeles
37	CMD	Micro Deval
38	LCPC	Laboratoire Centrale Ponts Et Chaussées
39	Σ	Surface spécifique du squelette granulaire en m ² / kg
40	G	Proportion en poids d'éléments supérieurs à 6 mm
41	S₁	Proportion en poids d'éléments compris entre 0,315 et 6 mm
42	S₂	Proportion en poids d'éléments compris entre 0,08 et 0.315 mm
43	f	Proportion en poids d'éléments inférieurs à 0,08 mm (fillers)
44	P	(%) la teneur en liant

45	K	module de richesse
46	α	le coefficient correcteur
47	BB	Béton bitumineux
48	GB	Grave bitume
49	MPA	Méga pascal
50	KN	Kilo newton
51	ϵ_{total}	Déformation totale enregistrée après 1h de chargement
52	$\epsilon_{initial}$	Déformation initiale enregistrée après 15s de chargement
53	ϵ_{final}	Déformation finale complémentaire
54	ϵ_{irre}	Déformation irréversible ou permanente
55	ϵ_{rev}	Déformation réversible
56	RVE	Recouvrement visco-élastique
57	NU	Nottingham Université
58	ϵ_{xx}	Déformation horizontale
59	ϵ_{yy}	Déformation verticale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

En raison de l'augmentation du trafic et des charges axiales des pneumatiques, il est nécessaire d'étudier les matériaux routiers afin d'améliorer les performances des chaussées à long terme. Egalement le coût élevé de la construction d'une autoroute amène les chercheurs à trouver des matériaux de conception et de qualité appropriés à la durée de vie des chaussées. Les recherches sur la géotechnique routière et les matériaux routiers, en particulier le bitume et les mélanges bitumineux, devraient être développées plus avant. Un effort majeur a été consacré à la compréhension de la performance du mélange bitumineux dans les chaussées, à la fois en laboratoire et sur site.

Depuis plusieurs années, on s'intéresse particulièrement aux mélanges de béton bitumineux modifiés par des ajouts de natures différentes.

Le béton bitumineux a été amélioré par l'incorporation de divers additifs directement dans le bitume par voie humide [1-8], afin de pouvoir être utilisé dans des conditions plus sévères ; Cela permet également d'améliorer les performances du liant. Néanmoins le comportement thermoplastique du liant présente de nombreux inconvénients, notamment aux basses températures (il a tendance à devenir dur et cassant) et aux hautes températures (il a tendance à devenir visqueux). En pratique, cette technique de modification des mélanges bitumineux est difficile à exploiter en raison de sa faisabilité à l'échelle industrielle (fabrication, stockage et transport) [9]. En outre il existe une deuxième technique de modification, qui est plus facile dans son utilisation. Cette technique appelée modification par procédé à sec [10-17] consiste à incorporer les additifs directement dans les mélanges granulaires lors du malaxage. La présente étude s'inscrivant dans le thème du comportement des enrobés modifiés par un polymère SBS provenant de la récupération des déchets de caoutchouc broyés (semelles de chaussures et tapis de véhicules) fournis par la Société d'Application d'Elastomères (SAEL Oued Smar Algérie) ; on a utilisé le procédé à sec. Des quantités de 0.25%, 0.5% et 0.75% de poudrette en poids du mélange granulaire ont été incorporées lors du malaxage. Le choix de ces pourcentages a été déterminé en fonction de la maniabilité du mélange par l'essai à la presse de cisaillement giratoire (PCG).

A cet effet, la présente étude a été menée de manière à répondre aux objectifs suivants :

- Etudier la maniabilité de l'enrobé bitumineux modifié afin de fixer la plage des pourcentages de polymère ;
- Etudier la stabilité des enrobés modifiés sans et en présence d'eau ;

Introduction générale

- Etudier le comportement aux déformations permanentes des enrobés bitumineux modifiés (orniérage) ;
- Etudier le comportement au fluage statique des enrobés bitumineux modifiés par le polymère à différentes températures ;
- Etudier les déformations locales des enrobés bitumineux, par la méthode de corrélation des images.

Outre l' introduction et la conclusion générale, cette thèse comporte 5 chapitres.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique qui présente les principales généralités sur les matériaux, les enrobés et les chaussées.

Le deuxième chapitre comporte l'état de l'art des travaux qui ont eu pour objet l'étude des enrobés bitumineux modifiés.

Le troisième chapitre décrit les différents protocoles expérimentaux et les essais effectués lors de la campagne expérimentale.

Le quatrième chapitre détaille les résultats des essais d'identification des matériaux utilisés dans cette étude, à savoir : le bitume, les granulats et le polymère.

Et enfin un cinquième chapitre qui est consacré à la détermination de la composition du mélange bitumineux par des valeurs optimales en liant et en granulats d'une part et l'étude de comportement des enrobés bitumineux modifiés à savoir : la maniabilité, les paramètres Marshall, la tenue à l'eau (Duriez), le module de rigidité, l'orniérage, le fluage statique et la mesure de champs de déformations par la méthode de corrélation d'images numériques d'autre part.

PARTIE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1 :

GÉNÉRALITÉS SUR LES MATÉRIAUX ET LES ENROBÉS BITUMINEUX

Introduction

Dans ce chapitre on va aborder les généralités sur les différents matériaux rentrant dans notre étude, et celles sur les enrobés bitumineux et les chaussées.

1.1. Le bitume

Le bitume est l'un des composants les plus importants d'un enrobé bitumineux. C'est une substance généralement extraite du pétrole obtenue après l'élimination des fractions légères (Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL), essence, diesel...) contenues dans le pétrole brut lourd lors du raffinage, d'où l'appellation «bitume raffiné» [18].

Le bitume est un matériau à forte viscosité, formé essentiellement par des hydrocarbures. Il joue le rôle d'une colle dans les enrobés bitumineux permettant de lier les granulats et de conférer à l'enrobé sa consistance, sa flexibilité et son imperméabilité [19].

1.1.1. Différentes sources de bitume

Il existe deux sources de bitume dans le monde: les sources naturelles et les sources industrielles:

- *Le bitume naturel* se trouve dans la nature. Parmi les sources de bitume naturel, nous pouvons citer celles situées à : Trinidad, Gard, Auvergne, Ain et de la Haute Savoie en France; centre de l'Irak; Île Buton, Indonésie, etc.
- *Le bitume industriel* est du bitume obtenu au cours du processus de raffinage de pétroles bruts lourds. Il est utilisé spécialement dans les constructions routières et autres. Selon la méthode de fabrication, les différents types et grades de bitume sont définis. La distillation atmosphérique et la distillation sous vide sont les processus de base utilisés dans les raffineries de pétroles bruts pour produire du bitume et d'autres produits utiles. Le pétrole brut est soumis à des opérations de décantation et de dessalage, avant une première distillation qui est faite à la pression atmosphérique à une température qui dépasse 300 °C .La redistillation sous vide du résidu nous permet d'avoir un bitume plus raffiné.

Dans le cas où le bitume obtenu après le processus de la distillation ne répond pas aux caractéristiques souhaitées, un processus de désalphaltage est réalisé afin de raffiner le bitume et avoir les caractéristiques recherchées. Cette opération est basée sur le mécanisme de séparation physique des différents constituants du bitume: les fractions lubrifiantes et celles bitumineuses [20].

1.1.2. Composition de bitume

Le bitume a une composition très complexe. Il est composé principalement par des composés aromatiques ainsi qu'aliphatiques saturés et insaturés présentant des chaînes carbonées ayant jusqu'à environ 150 atomes de carbone [21]. La composition du bitume dépend beaucoup du type de pétrole brut à partir duquel il est dérivé.

Il est constitué principalement de 80 à 88 % du carbone et de 8 à 12% d'hydrogène [22], de 0 à 2 % d'oxygène et de faibles quantités d'azote, de soufre et de divers métaux.

Le bitume a une structure colloïdale, dans laquelle les phases dispersées, constituées par des asphaltènes, sont entourées par une couche protectrice de résines. Ce complexe appelé micelle est dispersé dans une phase continue de maltènes qui constituent un mélange d'huiles aromatique et saturé [23].

Le bitume est séparé en quatre groupes génériques, selon leur polarité, comme décrit dans la (Figure 1.1) : Saturés, Aromatiques, Résines et Asphaltènes. On réfère généralement à l'acronyme SARA pour traiter de la composition d'un bitume [24]. Les asphaltées (5% à 20% du bitume) sont des solides noirs qui confèrent au bitume ses caractères de cohésion et de dureté, tandis que les maltènes ont un caractère huileux dans lesquels baignent les asphaltènes.

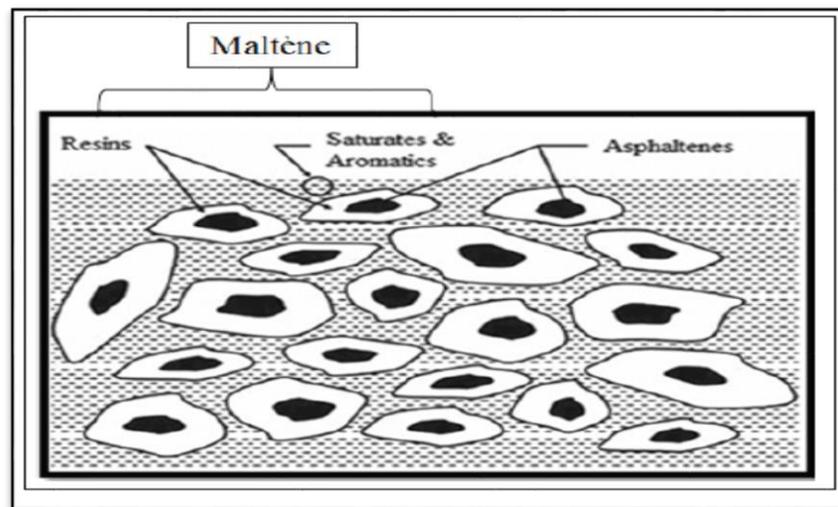


Figure 1.1. Composition du bitume [25]

- **Les asphaltènes**

Ce sont des solides noirs qui représentent moins de 20% du bitume [26]. Leur structure est proche de celle des résines mais ils ont un caractère d'aromaticité plus intense.

Les asphaltènes sont composées principalement par des atomes de carbone et d'hydrogène, avec une masse molaire qui varie entre 900 et 4 000 g/mole selon la méthode de détermination utilisée [27]. Ces molécules sont responsables du changement de la viscosité du bitume. La rigidité du bitume augmente avec l'augmentation de la concentration en asphaltène.

- **Les maltènes**

Les maltènes procurent au bitume ses propriétés de fluidité et de réticulation. Elles sont composées des saturées, des aromatiques et des résines.

- **Les Saturées**

Les saturées sont des molécules paraffiniques obtenues en faisant passer les maltènes en solution dans l'heptane. Elles contiennent des cycles naphthéniques et des cycles aromatiques, et sont caractérisées par un rapport atomique qui varie entre 1,9 et 2,0. Leur masse molaire varie entre 300 et 600 g/mole. Ces huiles sont responsables de la faible adhésivité entre le liant et les granulats et elles augmentent la susceptibilité thermique du bitume [28]. En effet, elles favorisent la fragilisation du matériau à basse température en se cristallisant.

- **Les huiles aromatiques**

Une deuxième élution des maltènes par le toluène permet d'obtenir les huiles aromatiques et naphthéno-aromatiques. Elles constituent environ 60% des maltènes qui sont responsables de la transition vitreuse du bitume. Ensuite, les résines et les asphaltènes contiennent environ 40 % des atomes de carbone qui forment des cycles aromatiques polaires. Les aromatiques sont des liquides de couleur jaune ou rouge, caractérisés par une masse moléculaire d'environ 800 g/mole [29].

- **Les résines**

Ce sont des solides noirs, composés de plusieurs cycles aromatiques et des composés polaires. Elles jouent un rôle important dans la stabilité colloïdale du bitume, leur masse molaire varie entre 1000 et 2000 g/mole.

1.1.3. Propriétés du bitume

Le bitume a été choisi comme matériau principal dans l'élaboration des routes pour sa souplesse d'emploi, ses propriétés d'adhésivité, d'élasticité, d'insolubilité dans l'eau et d'inertie à de nombreux agents chimiques.

▪ Réactivité

En général, le bitume est inerte chimiquement vis-à-vis de la plupart des composés hydrocarbonés, mais, les composés aromatiques peuvent réagir notamment avec l'oxygène.

Les bitumes soufflés ou oxydés sont d'ailleurs préparés grâce à ce type de réaction. Outre ces réactions d'oxydation, des réactions de condensation peuvent avoir lieu à des températures supérieures à 160°C en présence de H₂S₃. Les acides présents dans les résines du bitume sont aussi sensibles à certaines attaques basiques.

▪ Adhésivité

Le bitume se comporte comme une colle de très bonne qualité qui assure une liaison entre les granulats ; il adhère sur la plupart des roches. Cette adhésivité se manifeste d'une manière active par le coulage solide des granulats secs et propres entre eux et d'une manière passive en permettant une bonne adhérence. Les produits chimiques dérivés du pétrole, tels que le kérosène et le gazole ainsi que l'eau peuvent endommager l'enrobé.

▪ Cohésion

Même lors de contraintes particulières exercées sur la chaussée, l'enrobé ne se désagrège pas. La ductilité du bitume permet un écoulement lent au sein de l'enrobé et non une rupture, tandis que sa ténacité assure une résistance suffisante sous l'effet de contraintes de traction.

Le bitume n'est ni un fluide newtonien, ni un solide élastique ; Il a un comportement intermédiaire suivant la température, et la charge appliquée. La viscoélasticité confère des propriétés mécaniques de souplesse et de fermeté au bitume ; ce caractère est largement dépendant de la température et de l'origine du bitume. En première approximation, le bitume peut être considéré comme un solide ou un liquide visqueux à haute température (>80°C), un liquide ou un solide viscoélastique de (0°C à 80°C), et un solide élastique fragile à basse température (< 0°C).

1.1.4. Les types de bitume

On définit différentes catégories de bitume :

- Les bitumes purs, spéciaux, modifiés ou naturels ;
- Les bitumes industriels ou oxydés ;
- Les bitumes fluidifiés ou fluxés obtenus par soufflage à l'air ;
- Les bitumes en émulsion.

Les deux premiers ensembles de produit s'utilisent à chaud, c'est-à-dire qu'ils nécessitent des températures relativement élevées pour être mis en œuvre (>100°C pour fixer les idées).

Lorsqu'il est nécessaire d'abaisser la viscosité du bitume de façon importante, en allant au-delà des bitumes les plus mous, on a recours à des produits appelés fluidifiants ou fluxant.

Un autre moyen d'abaisser radicalement la viscosité d'un bitume est de l'émulsionner : il s'agit ici des émulsions de bitume. Dans ce cas, leur utilisation peut se faire à froid ou à une température inférieure ou égale à 60°C.

- **Le bitume pur**

Les plus communs des bitumes routiers sont obtenus en raffinerie par distillation directe, sauf les plus durs pour lesquels on peut faire la rectification à l'air ou au désasphaltage. La plage de pénétrabilité, qui caractérise la dureté, varie de 50/70 à 160/220 pour les bitumes considérés comme mous, et de 10/20 à 35/50 pour les bitumes appelés durs sur les chantiers. Les bitumes purs sont fabriqués industriellement à partir de pétroles bruts d'où l'on extrait, au préalable, les fractions les plus légères. De la partie restante, constituée par des huiles visqueuses, on sépare un bitume de la dureté désirée. Certaines variétés sont préparées à partir d'une matière de charge craquée, d'autres sont obtenues par oxydation (soufflage).

- **Le bitume oxydé**

Appelé aussi bitume soufflé, il est obtenu à partir de bitumes de pénétration, par adjonction d'huiles et insufflage d'air à haute pression. Il entre dans la fabrication de membranes pouvant servir de sous-couche aux membranes bitumineuses d'étanchéité, et sert au collage à chaud. Les différents types de bitumes oxydés sont identifiés par deux nombres.

- Leur température moyenne de ramollissement (en °C) ;
- La profondeur de pénétration (en 1/10mm) d'une aiguille dans les conditions de ce test.

- **Les bitumes modifiés**

Ils sont obtenus le plus souvent en usine, en raffinerie ou dans un dépôt par addition de polymères. Il peut s'agir d'un polymère où l'addition est réalisée par malaxage mécanique et se fait progressivement. Ils sont également appelés bitumes polymères.

Afin d'améliorer le comportement des bitumes à basse et haute températures, et d'en augmenter la longévité, des polymères ont été additionnés aux bitumes soufflés. Les bitumes modifiés sont très répandus dans les applications routières.

- **Les bitumes en émulsion**

Une émulsion est définie comme étant le mélange de deux liquides non miscibles, comme l'huile et l'eau. Habituellement, c'est de l'huile (phase dispersée), dans de l'eau (phase continue), mais il y a aussi les émulsions inverses, soit de l'eau dans l'huile. En général, la phase dispersée se présente sous forme des gouttelettes dans le deuxième liquide [31].

Dans le cas des émulsions de bitume, des gouttelettes de bitume sont dispersées dans une phase continue aqueuse. L'émulsion est composée de [31] :

- 50 à 70 % de bitume pur ;
- 30 à 50 % d'eau ;
- 0,2 à 2,5 % d'émulsifiant ;
- 0 à 30 % de solvant (parfois) ;
- 0 à 4 % de Polymères.

Pour former les émulsions du bitume, une énergie mécanique est nécessaire afin de fractionner les gouttelettes de bitume. Pour les stabiliser, il faut une grande énergie chimique qui peut être réduite par l'ajout d'un agent émulsifiant, des tensioactifs, qui crée une force de répulsion entre les gouttelettes de bitume et diminue ainsi la tension interraciale [32]. Les émulsions sont caractérisées par leur temps de rupture, c'est à dire le temps que prennent les gouttelettes du bitume pour faire coalescence [32]. En effet, elles se divisent en trois classes:

- Emulsion à rupture rapide RS (Rapid Setting);
- Emulsion à rupture moyenne MS (Medium Setting);
- Emulsion à rupture lente SS (Slow Setting) ;
- Ensuite, selon sa viscosité un de deux numéros, 1 ou 2, est attribué. 1 correspond aux émulsions à haute viscosité et 2 pour les émulsions à faible viscosité.

1.1.5. Caractéristiques de bitume

Le bitume est un mélange d'hydrocarbures qui contient des molécules polaires, des composés hétéro-organiques et des métaux, tels que du nickel, du vanadium et du fer. Le comportement mécanique du bitume est influencé par la température, la vitesse et le temps de chargement. Il est très visqueux à température ambiante (25 °C), et sa viscosité diminue avec l'augmentation de la température. Le bitume est caractérisé par sa couleur noire, sa susceptibilité thermique, son imperméabilité à l'eau, et son pouvoir adhésif. De plus, le bitume est un très bon isolant thermique et électrique, avec une forte adhérence avec la plupart des matériaux de construction usuels (pierre, béton, bois, métal, verre,...).

Ensuite, il est léger, ductile et souple.

À basse température, le bitume neuf a une certaine résistance au retrait thermique et à la fissuration, mais avec le temps et à cause du vieillissement, le bitume s'oxyde, devient rigide à basse température et perd sa ductilité. Pour caractériser le bitume, plusieurs tests peuvent être faits afin d'évaluer ses propriétés rhéologiques et mécaniques.

1.1.6. Notion de PG (*Performance Grade*)

Le PG est un système de classification des bitumes qui reflète les plages d'utilisation du bitume. La notion de PG indique la température haute au-delà de laquelle le bitume est susceptible d'avoir des déformations irréversibles (orniérage) et la température basse au-dessous de laquelle le bitume risque de se fissurer par retrait thermique [33]. Ce système de classification suggère de faire des bonds de 6 °C. Par exemple les températures hautes peuvent être : 76, 70, 64, 58, 52, 46 et les températures basses peuvent être -10, -16, -22, -28, -34, -40, -46.

1.1.7. Interaction entre le bitume et les granulats

L'interaction entre le bitume et les granulats est un facteur très important pour avoir un enrobé de bonne qualité et durable. Dans les enrobés à chaud, la teneur en bitume est généralement entre 5 à 6 % de la masse totale de l'enrobé. Il y a plusieurs types de granulats selon les carrières d'où ils sont extraits, différents par la composition, la chimie, et morphologie y compris la surface spécifique, les dimensions des particules et la friabilité.

Lors de la phase de l'enrobage, le bitume adhère à la surface des granulats et aide à les coller entre eux [34].

La fabrication de l'enrobé à chaud nécessite le chauffage du bitume. En effet, plusieurs réactions peuvent se produire à haute température, affectant ainsi les propriétés adhésives et cohésives du liant et réduisant la durée de vie du pavage [27].

Des recherches montrent que la liaison bitume-granulat est principalement de nature chimique. L'adhésion entre le bitume et les matériaux alcalins est plus forte que celle entre le bitume et les matériaux acides. Les alcalins sont plus stables dans les solutions aqueuses, ils ont un caractère hydrophobe ce qui favorise leur réaction avec le bitume [35].

Les surfaces des granulats contiennent des sites actifs chargés qui attirent les molécules polaires du bitume. En effet, l'interaction entre le film du bitume et la surface de granulat se fait grâce aux forces électrostatiques, aux liaisons d'hydrogènes ou aux interactions [36]. Cette interaction est influencée par l'humidité, les conditions climatiques, l'oxydation, les contraintes mécaniques et spécialement la température. La diffusion des molécules du bitume à la surface des granulats est accélérée à haute température, par contre le mouvement des particules diminue lorsque la température baisse [37].

D'autre part, un essai de microcalorimétrie isotherme mesurée à 160 °C montre que l'adhésivité entre bitumes et granulats est meilleure lorsque le bitume contient plus de molécules d'asphaltènes. L'adhérence entre le bitume et les granulats est contrôlée par des forces électrostatiques. Des recherches ont trouvé que la force d'adhésion est devenue plus forte après un vieillissement à court terme ce qui peut être expliqué par l'augmentation de la polarité du bitume vieilli. Ils ont trouvé qu'après un vieillissement à long terme, l'adhérence peut s'affaiblir à cause du durcissement du bitume [38].

L'utilisation de l'émulsion du bitume augmente l'interaction entre le bitume et les granulats.

Dans le cas d'une émulsion cationique, les charges positives provenant de l'émulsifiant présentent une forte interaction avec les charges négatives provenant de l'ionisation des agrégats acides chargée négativement.

1.1.8. Assurances qualité du bitume

La fabrication du bitume se fait dans un cadre parfaitement défini par les différents organismes tels que la MTQ. La maîtrise de la qualité concerne quatre domaines principaux qui sont les bruts, les procédés de fabrication, les procédures de contrôle, et les équipements de contrôle.

Les bruts font l'objet d'une évaluation complète, leurs constituants doivent satisfaire à toutes les exigences des spécifications. Pour garantir la régularité des caractéristiques du bitume, la

fabrication fait l'objet d'un contrôle continu.

Les équipements de fabrication doivent quant à eux, être entretenus et systématiquement vérifiés. Et enfin, les opérations de vérifications et étalonnages sont effectuées le plus souvent par un service différent du service utilisateur. Et finalement, après caractérisation, des essais de contrôle doivent être effectués afin de s'assurer que le bitume conserve ses propriétés dans le temps.

1.1.9. Domaine d'utilisations des bitumes

Environ 85 % des bitumes sont utilisés dans la construction routière pour les routes, les trottoirs, les stationnements, les aéroports, les pistes cyclables et cours de récréation, les bassins de rétention, etc., et 15 % pour l'étanchéité des toitures et la peinture [39]. Le bitume est également utilisé dans la protection à la corrosion et à l'abrasion des 450 000 km de câbles sous-marins par lesquels transite une grande partie des communications mondiales.

1.2 Les Granulats

Les granulats routiers sont des matériaux qui entrent dans la composition des bétons et enrobés bitumineux des chaussées routières et des ballasts de voies ferrées. Ils proviennent soit des matériaux naturels comme les alluvions ou les formations résiduelles, soit du concassage des roches massives (roches éruptives, métamorphiques ou sédimentaires) et des granulats de recyclage.

Ils ont en commun d'être définis non pas par une teneur en eau, comme les minerais métalliques, mais par des propriétés essentiellement physiques, mécaniques et chimiques : granularité, forme, état de surface, propreté, altérabilité, résistances mécaniques, affinité pour les liants, etc...

On désigne par le terme « **granulat** » un ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 et 125 mm. Ils sont désignés par **d/D** (classe granulaire), d et D représentant respectivement, la plus petite et la plus grande dimension [40].

En construction routière les granulats se classent d'abord selon leur granularité. Il existe six classes granulaires (tableau 1.1) principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés :

Tableau 1.1. Classes granulaires [41]

Famille	Dimensions	Caractéristiques
Les fillers	0/D	$D < 2$ mm et au moins 70 % de passant à 0,063 mm
Les sablons	0/D	$D < 1$ mm et moins de 70 % de passant à 0,063 mm
Les sables	0/D	$1 < D < 6,3$ mm
Les graves	0/D	$D > 6,3$ mm
Les gravillons	d/D	$d > 1$ mm et $D < 125$ mm
Les ballasts	d/D	$d > 25$ mm et $D < 50$ mm.

Les teneurs en fines sont définies par le passant à 0.063 mm.

Les granulats sont souvent désignés en fonction de leur plus petite et leur plus grande dimension comme suit :

Granulat d/D : sable ou gravier

- d : dimension minimale des grains
- D : dimension maximale des grains

1.2.1 Les différents types de granulats

Il existe plusieurs types de granulats, qui se différencient par leur nature et origine ainsi que par leur composition chimique et physique, en particulier la granulométrie et la dureté [42].

Les granulats utilisés pour le béton (routiers, de construction...) se partagent en trois grandes familles : [42]

- **Les granulats naturels [43]**

Ce sont les granulats d'origine minérale n'ayant subi aucune transformation autre que mécanique. Dans cette catégorie se rangent des granulats de roche comme le calcaire, le porphyre, le trapp...

- **Les granulats artificiels [43]**

Ce sont les granulats d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres. Dans cette catégorie se rangent des granulats transformés, comme le schiste expansé, l'argile expansée, mica expansé (vermiculite)...

- **Les granulats recyclés [42]**

Par ailleurs, on a les granulats recyclés obtenus par traitement d'une matière inorganique

utilisée précédemment dans la construction (asphalte ou bétons recyclés), tels que les bétons de démolition de bâtiments.

I.2.2 Techniques de fabrication [44]

La fabrication des granulats passe par plusieurs étapes comme suit :

▪ L'Extraction

Les matériaux alluvionnaires : leur extraction peut être réalisée directement à l'aide d'un chargeur si le milieu est sec, et grâce à des excavateurs à godets ou à une drague à la berge par tapis flottants si c'est un milieu hydraulique.

Les roches massives : l'extraction nécessite l'emploi d'explosifs. Les tirs de mine provoquent l'abattage d'une quantité de matériaux.

Ceux-ci sont ensuite acheminés jusqu'à l'installation de traitement.

▪ Transfert

Le transfert vers les installations de traitement s'effectue généralement par des tapis transporteurs : cela réduit les manutentions coûteuses.

Lorsque cela n'est pas possible, ces transferts sont assurés par des tombereaux (gros camions) ou par des barges en milieu hydraulique.

▪ Traitement

Le criblage permet de trier les granulats selon leur taille, le crible ne laissant passer dans ses mailles que les éléments inférieurs à une certaine taille. On peut ainsi obtenir des granulats de divers calibres par succession de criblage.

Les granulats sont souvent lavés; certaines utilisations nécessitent des matériaux parfaitement propres.

▪ Stockage

Les matériaux sont stockés en tas, en trémies ou en silos, par catégories : sables de différentes granulométries, graviers triés par taille et blocs d'enrochement ; ils répondent tous à des critères bien précis.

▪ Transport

La livraison est assurée par le moyen le plus adapté au trajet : camions, péniches ou trains.

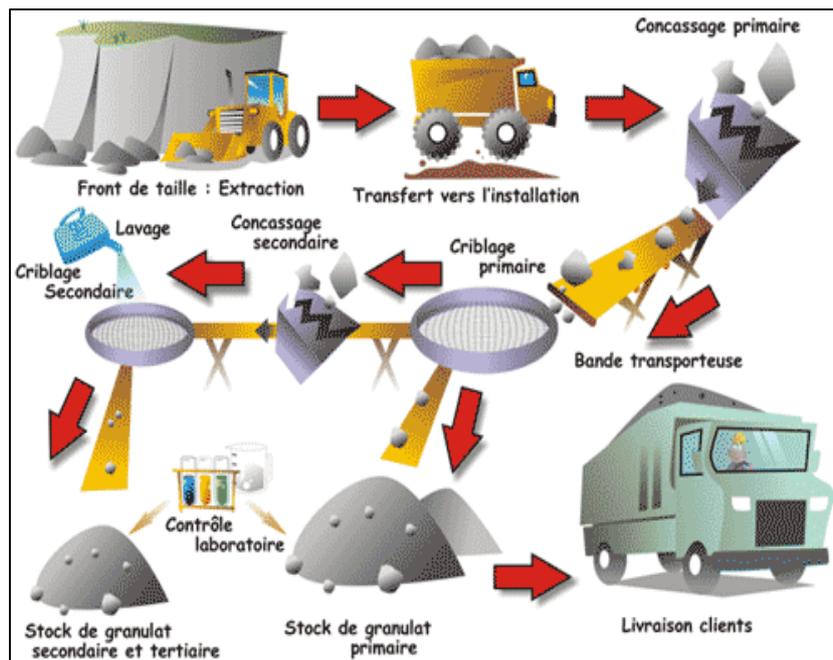


Figure 1.2. Fabrication des granulats de roches massives [44]

1.2.3 Caractéristiques des Granulats

Les granulats sont classés à partir des caractéristiques suivantes :

1.2.3.1 Caractéristiques géométriques

- **Granularité**

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulats [45]. Elle est déterminée par **tamissage** (avec une série de tamis, de dimensions d'ouvertures décroissantes) et exprime le pourcentage massique de granulats passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis.

La proportion de particules retenues par tamis s'appelle **‘le refus’**.

- **La forme**

La forme d'un granulats est définie par le coefficient d'aplatissement qui dépend des trois caractéristiques dimensionnelles principales [46] :

La longueur L : distance maximale de deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulats.

L'épaisseur E : distance minimale de deux plans parallèles tangents au granulats.

La grosseur G : dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulats.

Le coefficient d'aplatissement A d'un ensemble de granulats est le pourcentage pondéral des éléments qui vérifie la relation : $G/E > 1.58$

- **Module de finesse**

Les sables sont caractérisés par le module de finesse (**MF**). Le module de finesse d'un granulat est égal au 1/100^e de la somme des refus cumulés exprimés en pourcentages, sur différents tamis [47].

Le module de finesse, surtout utilisé pour les sables, permet de caractériser leur granularité par une seule valeur. Celle-ci dépend surtout de la teneur en grains fins du sable.

Plus le module de finesse est faible, plus le sable est fin. Un module de finesse élevée caractérise un sable grossier.

- **L'Angularité**

L'angularité est une qualité beaucoup plus fondamentale que la forme. En effet, les éléments qui présentent des faces se coupant avec les angles vifs, augmentent l'angle de frottement interne du matériau et diminuent sa maniabilité ce qui a deux effets opposés : le compactage est plus difficile, mais si on réussit celui-ci, la stabilité est plus élevée [48].

I.2.3.2 Caractéristiques physico-chimiques

- **La propreté**

Il s'agit de l'absence dans un granulat d'éléments fins indésirables [48]. Ce sont soit des fines plastiques naturelles (argile), soit des fines issues du concassage ou du broyage des roches, La présence d'argile autour des grains, généralement dans les sables, risque une fois humide, de leur faire perdre toute stabilité. La qualité de l'adhésivité du bitume sur le granulat dépend de la propreté de la surface de chaque granulat, une faible propreté diminue l'adhésivité du bitume.

- **La composition et la nature minéralogique**

La nature minéralogique des granulats influe essentiellement sur leur mode de rupture lors du concassage, leur forme ainsi que sur leur adhésivité avec le bitume. On distingue les granulats calcaires et siliceux. Les premiers étant le calcaire et le marbre, les seconds le granite et le quartzite. Les propriétés d'un granulat sont en grande partie déterminées par sa teneur en silice (SiO_2), les granulats qui possèdent des taux élevés de SiO_2 ne présentent pas une bonne adhésivité avec les bitumes. Par contre, il est reconnu que les granulats calcaires qui ont une faible teneur en SiO_2 , adhèrent bien au bitume [48].

I.2.3.3 Caractéristiques physiques et mécaniques

- **La résistance au choc**

L'objet de cet essai est la mesure de la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats. L'essai s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisé dans le domaine du bâtiment et des travaux publics [48].

- **La résistance à l'usure et à l'attrition**

L'objet de cet essai est la mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. Elle consiste à mesurer la masse m d'éléments inférieurs à 1.6 mm, produits par l'usure des roches. Cette résistance n'est pas la même à sec ou en présence d'eau, pour certaines roches [48].

- **La résistance au polissage**

Les couches de roulements de chaussées ne doivent pas être exécutées avec des matériaux trop friables, en égard au trafic auquel elles sont destinées et afin d'éviter que les chaussées ne deviennent glissantes [48].

1.3 Les enrobés bitumineux

On appelle enrobé tout mélange constitué de granulats agglomérés entre eux par un liant hydrocarboné ; ce mélange peut être enrichi pas des fines et éventuellement contenir des additifs en vue d'améliorer certaines propriétés.

Les enrobés sont classés en catégorie selon leurs usage. On parle soit de Béton Bitumineux (**BB**) pour les couches de surface, soit de Grave Bitume (**GB**) pour les couches d'assise (couche de base). Leurs formulations et dimensionnements sont réalisées par couche, entre autre sélectionnées selon le trafic prévu (nombre de cycle de sollicitations) [49].

1.3.1 Les différents types d'enrobés

1.3.1.1 Les enrobés à chaud

On obtient les enrobés à chaud à partir de granulats passés dans un tambour sécheur (pour le chauffage et la déshydratation). Pour cela, on utilise un bitume pur. On distingue deux types d'enrobés à chaud :

- **Béton bitumineux souple BBS**

Ces enrobés sont constitués le plus souvent à partir de sables roulés ou alluvionnaires semi concassés, et d'un bitume plutôt mou 70/100 plus rarement 50/70 et au dosage élevé afin d'obtenir un enrobé déformable qui soit adaptable au support.

Ces enrobés présentent une très faible résistance à l'orniérage. Leur domaine d'emploi est réservé aux chaussées souples qui sont circulées par des trafics réduits (≤ 1500 véhicules/jour en poids lourds) et à faible vitesse.

▪ **Béton bitumineux semi-grenu BBSG**

Les BBSG peuvent être utilisés en couche de roulement et de liaison, selon l'épaisseur de mise en œuvre de 5 à 7 cm ou de 6 à 9 cm. Ils sont de granularité 0/10 ou 0/14, généralement de type continu. Les épaisseurs minimales sont de 4 ou 5 cm. En général on utilise un bitume dur ou spécial.

▪ **Béton bitumineux mince BBM**

Les liants utilisés sont essentiellement des bitumes purs. Toutefois, pour améliorer le comportement sous fort trafic, des liants spéciaux ou modifiés sont aussi utilisés.

Les performances des BBM sont jugées pour l'ensemble des critères que sont : l'orniérage, l'adhérence, l'imperméabilisation. Cette technique est fréquemment utilisée sur route nationale. On distingue cinq types de bétons bitumineux minces en fonction de leur granulométrie :

- Béton bitumineux mince A 0/10 mm (BBM A 0/10) ;
- Béton bitumineux mince A 0/14 mm (BBM A 0/14) ;
- Béton bitumineux mince B 0/10 mm (BBM B 0/10) ;
- Béton bitumineux mince B 0/14 mm (BBM B 0/14) ;
- Béton bitumineux mince C 0/10 mm (BBM C 0/10).

Les types A se caractérisent par une courbe granulométrique discontinue entre 2mm et 6,3 mm. Les types B se caractérisent par une courbe granulométrique discontinue entre 4 mm et 6,3 mm. Le type C se caractérise par une courbe granulométrique continue.

Les bétons bitumineux minces sont principalement utilisables en voiries urbaines, ils sont parfaitement adaptés aux chargements des tapis vieillissés pour rétablir la rugosité de la chaussée et pour des contraintes de gabarit.

▪ **Béton bitumineux très mince BBTM**

Les BBTM sont des enrobés 0/10 ou 0/6 présentant une discontinuité bien marquée et un dosage en sable 0/2 assez faible (de 20 à 30 %). Le liant est généralement un bitume pur modifié dosé de 5,2 à 5,8 %. L'épaisseur moyenne est de 2,0 à 3,0 cm.

Les BBTM sont employés dans les routes à vitesse élevée pour l'entretien ou chaussée neuve. Ils ont pour objectifs essentiels de conférer à la surface de la chaussée des propriétés d'adhérence, de drainabilité mais également, si nécessaire, de propriétés acoustiques ou

photométriques.

La technique des BBTM tend à devenir la plus utilisée pour l'entretien des chaussées à trafic important et rapide.

On distingue deux types de bétons bitumineux très minces en fonction de leur granulométrie :

- Béton bitumineux très mince 0/6 mm (BBTM 0/6) ;
- Béton bitumineux très mince 0/10 mm (BBTM0/10).

▪ **Béton bitumineux ultra-minces BBUM**

Ce sont les derniers-nés de la famille des enrobés à chaud. Les formulations de granularité 0/10 ou 0/6 sont discontinues 2/6 ou 2/4 et comportent du bitume généralement modifié, avec un dosage en sable de 20 à 25%. Cette couche est appliquée en épaisseur de 1 à 1,5cm.

Le domaine d'emploi privilégié de BBUM 0/6 est celui des revêtements urbains et des BBUM 0/10 l'entretien des routes secondaires.

▪ **Béton bitumineux drainant BBDr**

Il s'agit d'un matériau utilisé dans les couches de roulement. Il est caractérisé par une teneur en vide comprise entre 20 et 25% ce qui le rend perméable. Cette perméabilité est obtenue par l'utilisation de granularité discontinue. Le rôle de cet enrobé est d'évacuer les eaux par temps de pluie et ainsi d'éviter les projections d'eau.

Pour les chaussées mouillées l'enrobé drainant présente les avantages suivants :

- Diminution de la réflexion de la lumière des phares sur chaussée mouillée, d'où une meilleure visibilité ;
- Amélioration de l'adhérence pour des vitesses supérieures à 90 km/h ;
- Réduction du bruit : un enrobé drainant en bon état réduit le niveau sonore ;
- Bonne résistance aux déformations permanentes [50].

▪ **Béton bitumineux à module élevé BBME**

Le Béton Bitumineux à Module Elevé (BBME) est un enrobé « structurant », utilisé en couche de liaison ou en couche de roulement soumise à de fortes sollicitations (chaussée à trafic important, rond-point) [50].

Pour obtenir cet enrobé, il est nécessaire d'utiliser un bitume très dur (20/30) voire hyper dur (10/20) afin d'augmenter le module de rigidité de l'enrobé, ce qui permettra de minimiser le problème de l'orniérage [51].

1.3.1.2 Les enrobés coulés à froid

Pour les enrobés à froid, le liant utilisé est un bitume fluidifié ou une émulsion de bitume. Les granulats utilisés ne sont pas chauffés, contrairement aux enrobés à chaud sont destinés le plus souvent en couche de base et pour l'entretien des routes. Pour la fabrication et contrairement à l'enrobé à chaud qui nécessite une température de 130 °C environ, l'enrobé à froid se met en œuvre à température ambiante (entre 10 et 20°C).

Certains enrobés sont fabriqués avec des granulats ayant déjà été enrobés : il s'agit alors d'un enrobé à froid à double enrobage. La technique de mise en œuvre nécessite un finisseur si l'enrobé à froid a été complété avec de la résine ou s'applique directement dans les trous.

Pour les réparations :

- Nettoyer le trou ou nid de poule : ôter les gravillons, déchets de végétaux, etc;
- Remplir le trou généreusement en faisant déborder de la surface initiale.

1.3.1.3 Les enrobés tièdes

On tente d'obtenir une diminution des températures de production de 30 à 50 °C ; L'enrobé tiède rencontre toutes les spécifications de l'enrobé à chaud, mais il est produit et mis en œuvre à une température inférieure de 30° à 60°C par rapport à l'enrobé à chaud ; il est produit en centrale d'enrobage, par moussage du bitume ou par ajout d'additif.

Il est recommandé de vérifier l'ajustement du régime thermique de la centrale lors de la production de l'enrobé tiède.

1.3.2 Domaines d'utilisation des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux sont utilisés en technique routière et en travaux hydrauliques.

1.3.2.1 Technique routière

En technique routière, l'enrobé bitumineux se trouve essentiellement dans la couche de roulement ou bien la couche de surface et dans les assises de chaussée.

Pour la conception des enrobés bitumineux destinés aux couches de roulement, l'enrobé doit offrir les performances suivantes :

- Offrir aux roulements de véhicule une surface convenable quant à la sécurité « Propriété antidérapante » et au confort;
- Résister aux sollicitations engendrées par le trafic pour que les qualités précédentes ne soient pas détruites ;

- Résister aux sollicitations engendrées par les agents externes, autre que le trafic : soleil, eau, gel, sel de déverglace et produit pétrolier ;
- Pour l'entretien par emplois partiels, ce recours en béton bitumineux n'est particulièrement pas possible, on utilise en général des enrobés à froid, semi-dense ou ouvert.

Pour les enrobés bitumineux utilisés en assises de chaussée, les données des problèmes sont plus simples : il s'agit essentiellement de concilier la résistance à l'orniérage et la résistance à la fatigue c'est dans cet esprit qu'a été mise au point la technique des graves-bitume.

1.3.2.2 Travaux hydrauliques

Les enrobés bitumineux sont également très utilisés dans les travaux hydrauliques (revêtement de canaux, digues barrages) pour constituer des écrans imperméables. On utilise à cet effet des bétons bitumineux nettement plus compacts que le béton bitumineux routier, ou bien pour constituer des couches drainantes ou filtrantes, on utilise des enrobés à chaud (ouverts ou semi-denses).

1.3.3 Les qualités exigées des enrobés bitumineux:

▪ La stabilité

C'est la résistance à la déformation permanente de la couche sous l'effet des charges statiques et dynamiques. Elle est liée à la nature du liant, au dosage en liant et en fillers et à la nature et la forme des granulats. L'enrobé est d'autant plus stable que l'angle de frottement interne des granulats ainsi que la dureté du liant sont élevés. L'insuffisance de la stabilité se traduit par un fluage avec formation d'ornières.

▪ La flexibilité

C'est l'aptitude de l'enrobé, à admettre sans fissuration les déformations d'ensemble qui peuvent être imposées par la déflection des couches. Donc la ductilité du liant doit demeurer suffisante aux basses températures pour éviter la fissuration du tapis qui risque de donner une insuffisance de flexibilité

▪ L'absence de sensibilité à l'eau

La sensibilité à l'eau dépend de l'adhésivité du liant aux granulats ; elle permet à l'enrobé de résister au désenrobage des granulats sous l'action de l'eau et l'absence d'éléments argileux.

La présence d'éléments argileux susceptibles de gonfler en présence d'eau risque de diminuer

cette stabilité.

▪ La durabilité

C'est la résistance à la fissuration par fatigue ; elle est liée directement au mastic (qualité, quantité et teneur en bitume) et au pourcentage de vide du mélange compacté.

L'enrobé utilisé en couches de surface doit en plus de toutes ces qualités avoir certaines propriétés à savoir :

- La résistance aux efforts tangentiels et au poinçonnement;
- Une bonne rugosité;
- L'imperméabilité à l'eau.

1.3.4 Modification des enrobés

La modification des enrobés consiste à améliorer ses performances. Cette modification peut être réalisée par deux procédés principaux, tel que l'incorporation directe de l'additif dans le bitume et on parle ici du procédé humide, ou bien l'incorporation dans le squelette granulaire et il s'agit du procédé à sec. Ces modifications sont faites par un mode opératoire bien déterminé.

1.4 Les polymères

Les matériaux polymères (polymères = plusieurs unités, en grec)(figure 1.3), appelés aussi matières plastiques ou simplement plastiques, sont des matériaux organiques composés essentiellement d'atome de carbone et d'hydrogène.

Ces produits sont nés de la recherche scientifique intensive du XXe siècle notamment. Dès le milieu des années 1920, les bases scientifiques nécessaires à leur développement ultérieur étaient fondées [52]. Les polymères présentent la famille d'agents chimiques la plus utilisée pour la modification des enrobés ; ils sont composés de trois catégories : les thermoplastiques élastomères, les plastomères et les polymères réactifs. Ils sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure et il est possible, à partir d'une structure moléculaire donnée, d'imaginer la morphologie qui en découle et les propriétés qui s'y rattachent.

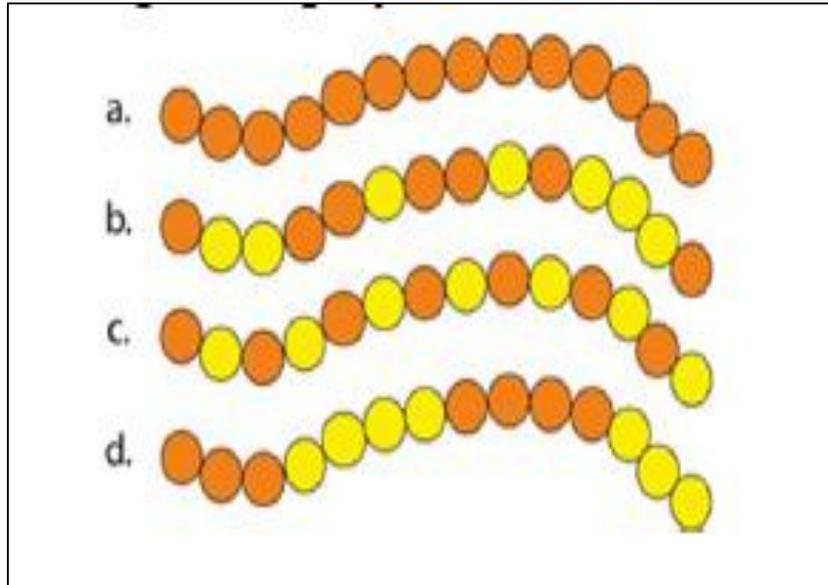


Figure 1.4. Polymère linéaire (a): homopolymère, (b): copolymère statistique, (c): copolymère alterné, (d): copolymère séquencé)

▪ Polymères ramifiés

Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation. Au-dessus de la température de transition vitreuse, ces matériaux présenteront un comportement visqueux plus marqué que les polymères linéaires (figure 1.5).

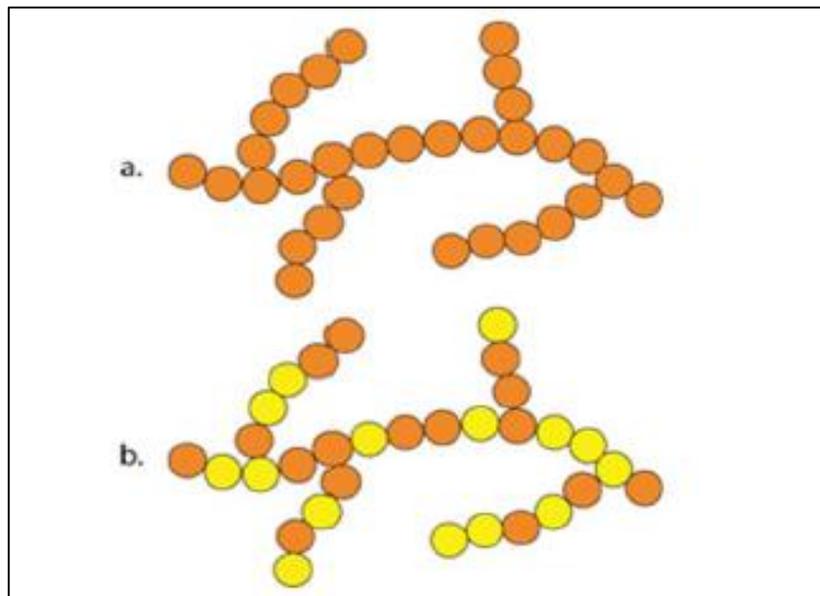


Figure 1.5 (a) : Homopolymère ramifié et (b) : copolymère ramifié

▪ Polymères réticulés

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, et qui conduit à la formation d'un réseau (figure 1.6).

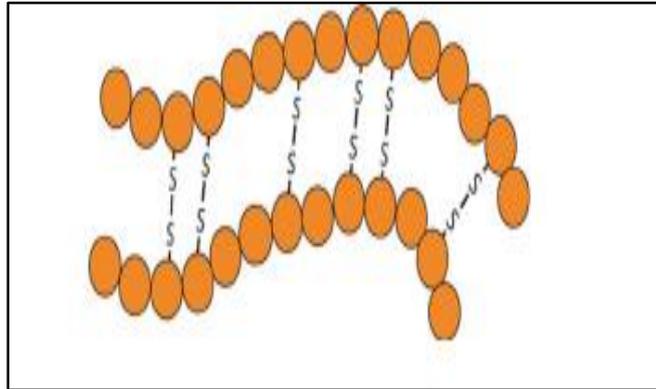


Figure 1.6. Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.

1.4.2 Poudrette de caoutchouc

Les déchets de caoutchouc représente un gisement valorisable important tant en volume qu'en poids, le gisement provient des déchets de fabrication de pneus, ou bien déchets de caoutchouc industriel (fabrication de chaussures, tuyau,).

1.4.2.1 Choix de la poudrette de caoutchouc

Le paramètre ayant le plus d'influence sur la modification des enrobés est la granulométrie de la poudrette de caoutchouc. En général, des granulométries plus épaisses ralentissent l'interaction bitume- caoutchouc et accentuent les problèmes de sédimentation dans le produit final ; des granulométries continues à des tailles maximales de 0.8 mm sont conseillées. La composition chimique du caoutchouc a aussi une influence sur les caractéristiques finales du bitume. Le paramètre de contrôle doit être le pourcentage de fraction élastométrique, ainsi que le contenu en caoutchouc naturel de celle-ci.

1.4.3 L'utilisation de la poudrette de caoutchouc dans les enrobés bitumineux

Le caoutchouc employé généralement comme additif provient en général de déchets industriels et des pneumatiques usagés réduits sous forme de poudrette .Introduit dans le bitume ou le mélange bitumineux chaud, il réagit et gonfle par absorption de fractions aromatiques du bitume.

La vulcanisation (traitement par du soufre ayant pour but l'amélioration des caractéristiques mécaniques du caoutchouc qui reste élastique à froid comme à chaud) fait que la poudrette de caoutchouc issu de pneus usagés ne se dissout pas bien dans le bitume chaud, ce qui donne des mélanges instables.

1.4.4. Les procédés d'utilisation

Les poudrettes de caoutchouc peuvent être utilisées soit comme poudres ajoutées au mélange – granulaire, on parle alors d'incorporation par voie « sèche », soit incorporées à chaud directement dans le liant on parle alors d'incorporation par voie « humide ».

1.4.5. Les avantages

L'introduction de caoutchouc dans le squelette granulaire permet d'améliorer les propriétés des enrobés, de donner une plus grande souplesse aux revêtements réalisés, d'améliorer leur résistance à la fatigue aux basses températures, et de diminuer les phénomènes de bruit et de réflexion de sources lumineuses.

1.5 Les Chaussées

Une chaussée est une structure composite qui se compose d'un empilement de couches de matériaux granulaires, liés ou non [53].

1.5.1 Différents types de chaussées

Du point de vue constructif, les chaussées peuvent être groupées en trois grandes catégories :

- Chaussées souples ;
- Chaussées semi - rigides ;
- Chaussées rigides.

1.5.1.1 Chaussées souples

Les chaussées souples sont constituées de couches superposées de matériaux non susceptibles, de résistance notable à la traction. Les couches supérieures sont généralement plus résistantes et moins déformables que les couches inférieures. Pour une assurance parfaite et un confort idéal, la chaussée exige, généralement, pour sa construction plusieurs couches exécutées en matériaux différents et d'épaisseurs déterminées, ayant chacune un rôle bien défini.

En principe, une chaussée peut avoir dans l'ordre les couches suivantes :

a. La couche de surface

Cette partie de la chaussée comporte :

- La couche de roulement qui est la couche supérieure de la structure routière sur laquelle s'exerce directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Elle attribue à la chaussée l'adhérence, la drainabilité, l'uni et le bruit de roulement [53] ;
- La couche de liaison qui est la couche intermédiaire entre la couche de roulement et la couche de base. Elle contribue à l'amélioration de l'uni de la chaussée et renforce la protection mécanique, thermique et hydraulique de l'assise par imperméabilisation. Elle supporte principalement les efforts tangentiels et assure un rôle primordial contre la formation d'ornières.

b. Les couches d'assise

Cette partie de la chaussée comporte :

- La couche de base qui est la couche située sous la couche de surface assurant une protection thermique de la plate-forme (couche de forme) et une capacité portante du revêtement. Elle est destinée à répartir les efforts dus aux charges verticales ;
- La couche de fondation qui est la couche située sous la couche de base, destinée à répartir les efforts dus aux charges verticales sur le sol de fondation et à former le support du revêtement. Elle assure avec la couche de base la protection thermique de la plate-forme ;
- L'accotement qui est la plate-forme contiguë à la chaussée, renforcée ou non pour permettre l'immobilisation des véhicules ;
- Le fossé qui présente une partie de la route formant une tranchée ouverte dans le terrain servant à la récolte et à l'évacuation des eaux de surface ;
- La couche de forme est constituée de matériaux sélectionnés, de matériaux rapportés (remblai) ou réalisée par un traitement spécial destiné à améliorer les caractéristiques du terrain. Elle assure la protection du sol support et contribue à l'homogénéisation des caractéristiques portantes ;
- Le sol support est l'ensemble des matériaux en place, existant avant les terrassements ou à défaut le déblai, qui est l'ensemble des matériaux en place obtenu après excavation [54].

1.5.1.2 Chaussées semi-rigides

Ce type de chaussées comporte une couche de base (quelques fois une couche de fondation) traitée au liant hydraulique (ciment, granulats,...). La couche de roulement est en enrobé hydrocarboné et repose quelque fois par l'intermédiaire d'une couche de liaison également en enrobé bitumineux. Ce type de chaussée n'existe à l'heure actuelle qu'à titre expérimental en Algérie. Les chaussées comportant une couche de base ou une couche de fondation en sable gypseux est très répandu dans le sud d'Algérie [55].

1.5.1.3 Chaussées rigides

Elles Comportent des dalles en béton (correspondant à la couche de surface de chaussée souple) qui fléchissent élastiquement sous les charges, transmettent les efforts à distance et les répartissent ainsi sur une couche de fondation qui peut être une grave stabilisée mécaniquement, une grave traitée aux liants hydrocarbonés ou aux liants hydrauliques. [29]

1.5.2 Les dégradations de chaussées

Sous l'action des charges de trafic, des conditions climatiques et du vieillissement des matériaux, les chaussées routières se dégradent. Ces dégradations peuvent être de différents ordres et sont la conséquence de problèmes d'origines diverses.

C'est pourquoi il est primordial de définir précisément les causes des dégradations pour définir la solution adéquate de maintenance et de renforcement. [54]

1.5.2.1 Influence de l'effet de trafic et du climat sur les chaussées

▪ Effet de trafic

L'agression mécanique des charges roulantes provoque des écrasements et des flexions dans la structure routière. Leur répétition est à l'origine des phénomènes (figure 1.7) :

- D'orniérage (causé par les compressions successives des matériaux bitumineux, mais aussi par les déformations des couches non liées éventuelles) ;
- De fatigue par l'accumulation de micro-dégradations créées par les tractions transversales répétées qui peuvent entraîner la ruine du matériau ;
- De fissurations qui peuvent apparaître et se propager dans la chaussée.

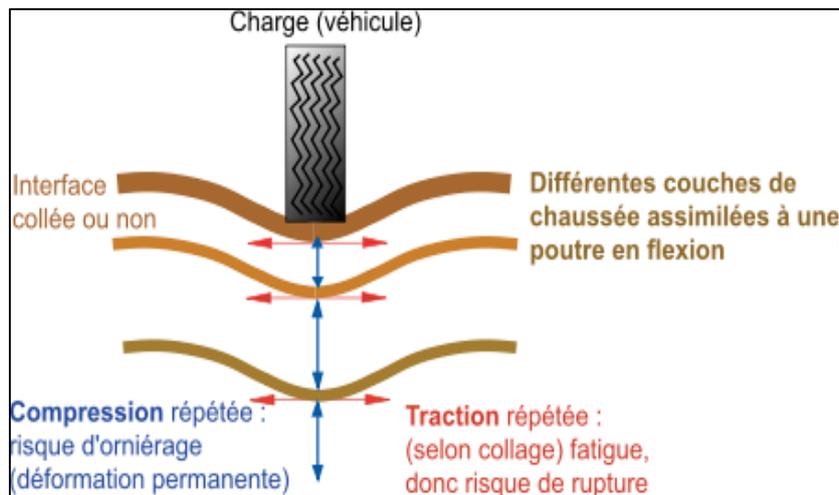


Figure 1.7 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic.

▪ **Effet de la température**

La température a deux effets mécaniques principaux outre le vieillissement du matériau (figure 1.8) :

- Changement de la rigidité (module) du matériau dû au caractère thermo susceptible du mélange bitumineux et plus particulièrement du liant hydrocarboné.
- Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations, contractions thermiques qui peuvent provoquer et faire se propager des fissures avec les cycles thermiques, surtout à basse température (les couches traitées aux liants hydrauliques sont sujettes quant à elles aux retraits thermique et de prise) [56] .

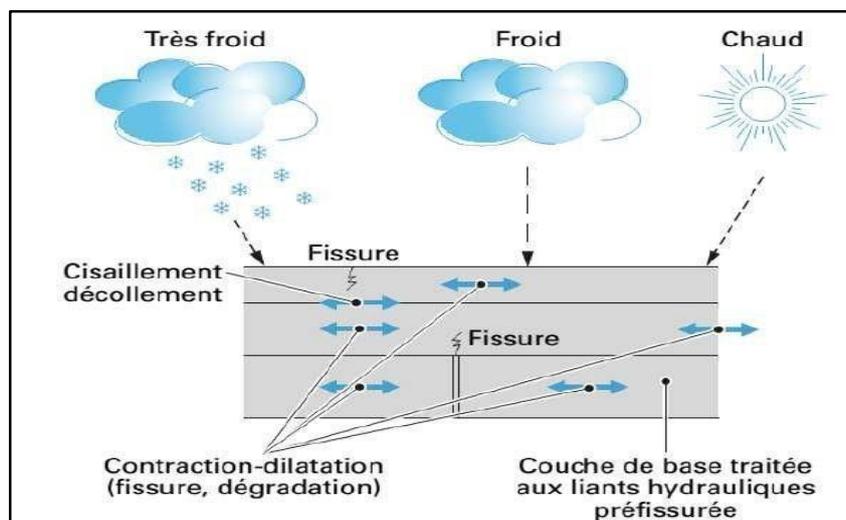


Figure 1.8 Sollicitations induites par la température.

1.5.2.2 Types de dégradations

- **Les Fissures**

Parmi les différents modes de détérioration des chaussées, la fissuration est une dégradation majeure qui touche l'ensemble des chaussées avec différentes origines et différents mécanismes de développement et on note : [53]

- **Fissures transversales**

C'est la rupture du revêtement relativement perpendiculaire à la direction de la route, généralement sur toute la largeur de la chaussée (figure 1.9). Elles sont dues au retrait thermique, Vieillissement et fragilisation du bitume, remontée de fissures après des travaux de resurfaçage, joint de construction mal exécuté (arrêt et reprise des travaux de pose d'enrobé) et diminution de la section du revêtement [54].



Figure1.9. Fissure transversale [54]

- **Fissures longitudinales**

C'est la rupture du revêtement parallèle à la direction de la route et située dans les pistes de routes (figure 1.10). Ce type de fissure provient de la fatigue du revêtement (trafic lourd), capacité structurale insuffisante de la chaussée et mauvais drainage des couches granulaires de la chaussée. [54]



Figure 1.10. Fissure longitudinale [54]

- **Fissures en carrelages**

C'est une rupture du revêtement sur des superficies plus ou moins étendues, formant un patron de fissuration à petites mailles polygonales dont la dimension moyenne est de l'ordre de 300 mm au maximum (figure 1.11). La présence de ces fissures revient à l'épaisseur de revêtement insuffisante, vieillissement de la chaussée et oxydation et fragilisation du bitume dans l'enrobé [54].



Figure 1.11. Fissures en carrelage [54]

- **L'orniérage**

A la suite d'un passage répété de véhicules lourds, une déformation plastique permanente de la chaussée de forme longitudinale peut être observée (figure 1.12). Ces déformations sont présentées sur des portions localisées de sections routières particulièrement sollicitées, tels que les arrêts de bus ou les carrefours (de type standard ou giratoire) [56].

Ce phénomène se provoque en présence d'un enrobé à stabilité réduite par temps chaud (ex. : bitume trop mou ou surdosage), enrobé trop faible pour bien résister au trafic lourd, compactage insuffisant de l'enrobé lors de la mise en place et le mauvais drainage des matériaux granulaires de la chaussée.



Figure 1.12. Ornière [56].

- **Ressuage**

C'est la remontée de bitume à la surface du revêtement, accentuée dans les pistes de routes[54]. Il est dû au surdosage du bitume, effet combiné de la température élevée du revêtement et des sollicitations du trafic, excès de liant d'accrochage et formulation d'enrobé inadaptée aux sollicitations (figure 1.13).



Figure 1.13. Ressuage [54]

- **Nid-de-poule**

Le nid de poule présente la désagrégation localisée du revêtement sur toute son épaisseur formant des trous de forme généralement arrondie, au contour bien défini, de taille et de profondeur variables (figure 1.14). Les trous peuvent être comblés par du rapiécage temporaire. Ce type de dégradation est dû généralement à la faiblesse ponctuelle de la fondation, épaisseur insuffisante du revêtement, chaussée fortement sollicitée par le trafic lourd.



Figure 1.14 Nid de-poule [53].

- **Désenrobage et arrachement**

C'est l'érosion du mastic et la perte des gros granulats en surface produisant une détérioration progressive du revêtement (figure 1.15). Cela est dû à l'usure par le trafic intense, sous-dosage du bitume ou mauvais enrobage, utilisation d'agrégats hydrophiles ou bitumophobes, compactage insuffisant, surchauffe ou vieillissement de l'enrobé (oxydation et fragilisation) et sollicitations accrues en zone de virage et de freinage (milieu urbain) [53].



Figure 1.15 Dése robe [53].

Conclusion

Après avoir donné des généralités sur les matériaux qui vont être utilisés dans notre étude, ainsi que les types de chaussées et les dégradations qui peuvent être rencontrés après la mise en service et les facteurs qui influent sur l'apparition de ces phénomènes, les spécialistes ont pensé à trouver des solutions convenables pour remédier à ces problèmes. Parmi ces solutions, on trouve la modification des enrobés par des polymères afin d'améliorer les performances qui peuvent faire face à ces problèmes. Dans le chapitre qui suit on va voir l'état de l'art des travaux qui ont fait l'objet de cette technique.

CHAPITRE 2 :

GÉNÉRALITÉS SUR LES ENROBÉS MODIFIÉS

2.1. Introduction

Afin d'améliorer les performances des mélanges bitumineux, plusieurs recherches ont été effectuées dans le monde jusqu'à ce jour, et cela par la modification des enrobés par des additifs de natures différentes, en utilisant deux procédés de modification à savoir : procédé à sec et procédé humide. Dans ce chapitre, nous allons consulter quelques travaux qui ont fait l'objet de ces techniques de modification.

2.2 Modification des enrobés par addition d'EVA par le procédé humide et à sec

Smail Haddadi et al [57], ont examiné les performances des enrobés bitumineux sous l'effet de l'addition de l'EVA par le procédé humide et le procédé à sec.

Trois pourcentages d'EVA en poids de la teneur optimale en bitume estimée à 6% sont considérés dans cette étude: 3%, 5% et 7%. Les résultats des essais effectués sur le bitume modifié à savoir, ramollissement, pénétration et température de rupture de Fraass, indiquent que les ajouts d'EVA entraînent une augmentation de la rigidité et de la résistance thermique. L'influence de l'additif sur la rigidité des mélanges bitumineux préparés par les deux procédés a été évaluée par l'étude des paramètres Marshall. Les résultats montrent que l'EVA améliore les propriétés du mélange de contrôle qui ne répond pas aux spécifications des autoroutes algériennes. La plus grande rigidité et la meilleure déformation permanente de HMAC ont été obtenues pour 5% de teneur en EVA pour les deux mélanges M1 et M2. Bien que l'amélioration est moins importante pour M2 que pour M1. Où M0 (mélange bitumineux témoin), M1 (le mélange bitumineux modifié par voie humide), M2 et (le mélange bitumineux modifié par voie sèche).

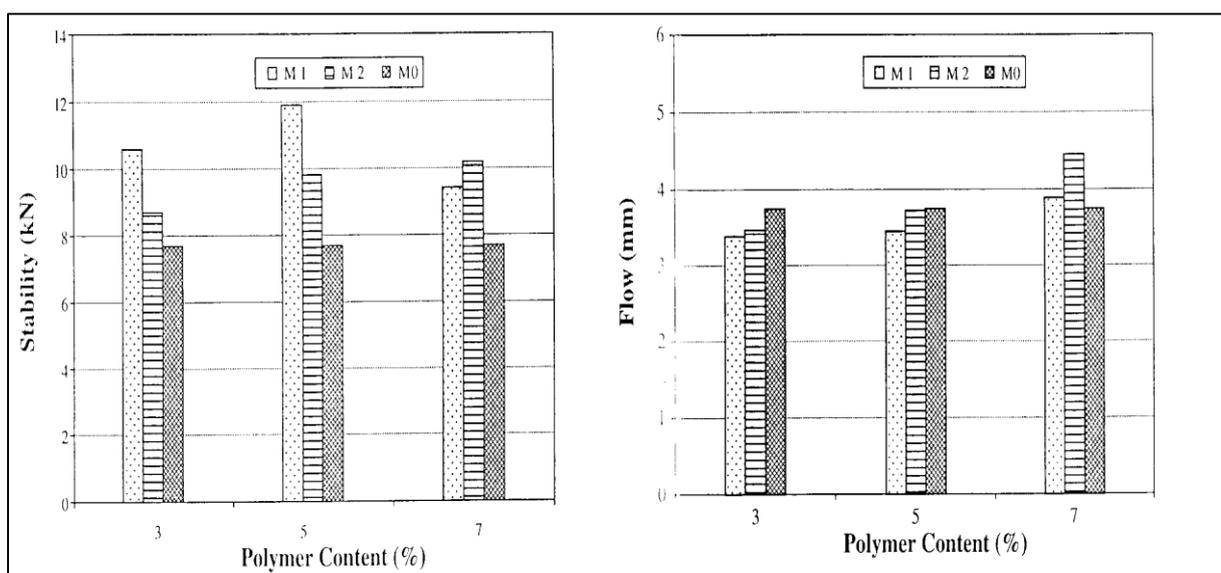


Figure 2.1. Stabilité Marshall en fonction d'EVA[57], **Figure 2.2.** Fluage en fonction d'EVA[57],

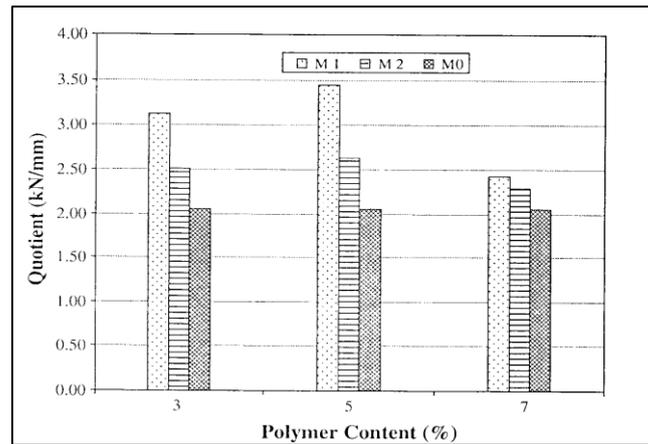


Figure 2.3. Quotient Marshall en fonction d'EVA [57],

2.3. Modification des enrobés par addition d'EVA, PEHD et de deux déchets industriels à base d'EVA notés DEVA et du copolymère (SBR) noté DSBR.

Saoula Samia et al [58] se sont intéressés à la valorisation des enrobés modifiés par deux polymères de synthèse, qui sont l'acétate de vinyle et d'éthylène (EVA) et le polyéthylène haute densité (PEHD), et de deux déchets industriels à base d'EVA noté DEVA et du copolymère statistique styrène-butadiène (SBR) noté DSBR.

▪ Modification par l'EVA

Les résultats de la modification de l'enrobé par l'EVA ont montré que la stabilité et le fluage des enrobés modifiés ont augmenté quelle que soit la teneur d'EVA. Une augmentation de la stabilité de l'ordre de 22 jusqu'à 32% par rapport à la formule de référence a été enregistrée. Une diminution du fluage a été observée (entre 18 et 31%) par rapport à l'enrobé témoin. L'évolution de ces performances a été confirmée par le calcul du quotient Marshall, où la résistance initiale est améliorée respectivement de 86, 65 et 61% par les formules à 5, 7 et 10% d'EVA.

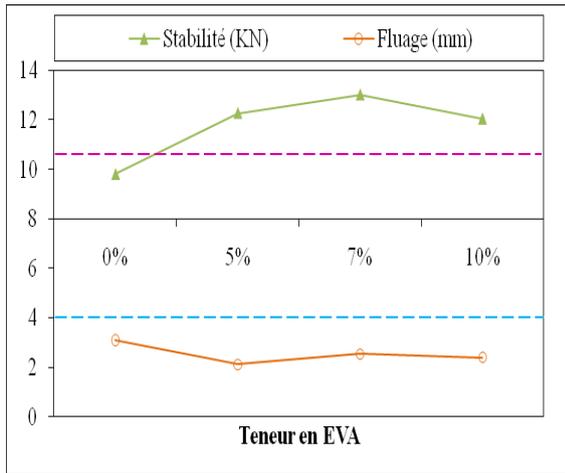


Figure 2.4. Stabilité et fluage Marshall [58]

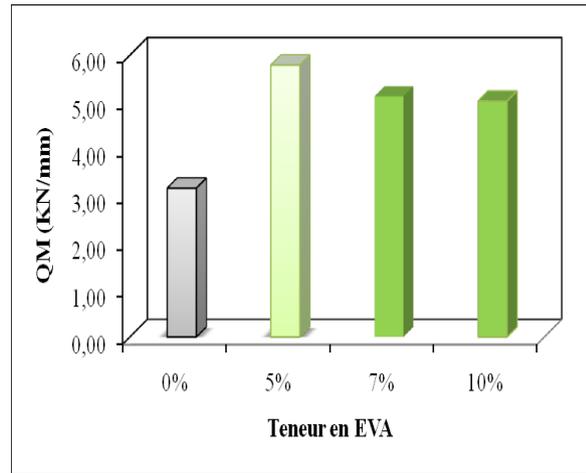


Figure 2.5. Quotient Marshall [58]

▪ **Modification par PEHD**

Il a été noté dans cette étude que la stabilité Marshall en fonction de la teneur en PEHD de l'enrobé modifié augmente pour toutes les formules ; le fluage quant à lui n'est amélioré que pour l'enrobé à 6% à raison de 1% par rapport à l'enrobé pur. La formule à 10% de PEHD présente un fluage médiocre augmentant de 97%. Donc pour l'ajout de PEHD, il a été montré qu'il y a une seule bonne formule (celle à 6%) qui a assuré une résistance meilleure que celle de l'enrobé témoin (à raison de 39%).

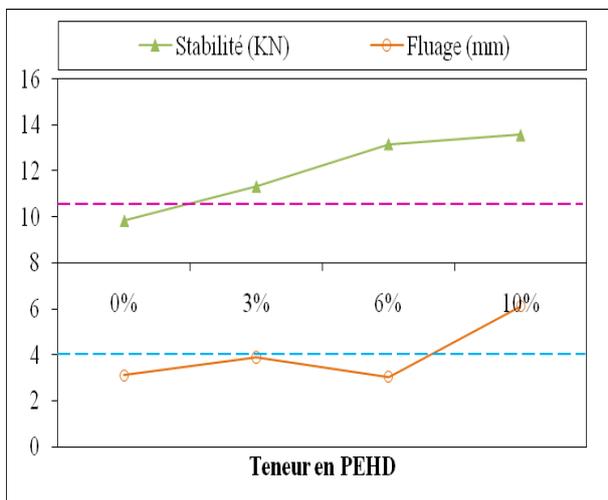


Figure 2.6. Stabilité et fluage Marshall (PEHD) [58]

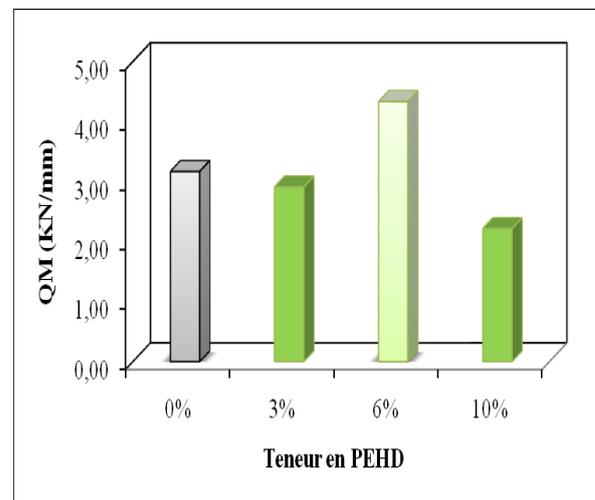


Figure 2.7. Quotient Marshall (PEHD) [58]

▪ **Modification par DEVA**

Les résultats obtenus par la modification de l'enrobé par le DEVA (teneurs : 3, 6 et 9%) ont montré que les stabilités des différentes formules sont améliorées. Par contre, le fluage ne diminue qu'à partir d'une teneur de 9%, et la résistance aux déformations permanentes, évaluée par le calcul du quotient Marshall est améliorée par les formules à 6 et 9% de DEVA respectivement de 15 et 50% par rapport à l'enrobé témoin.

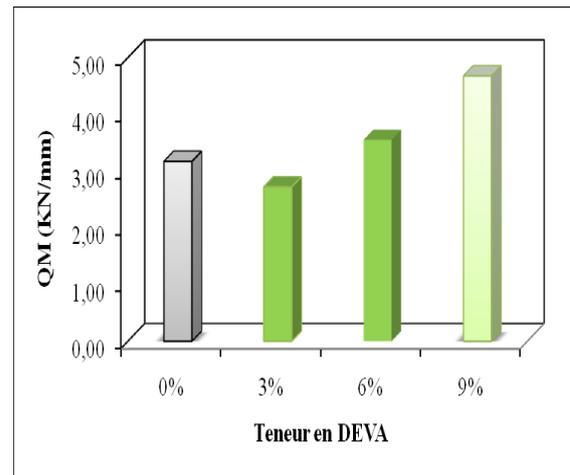
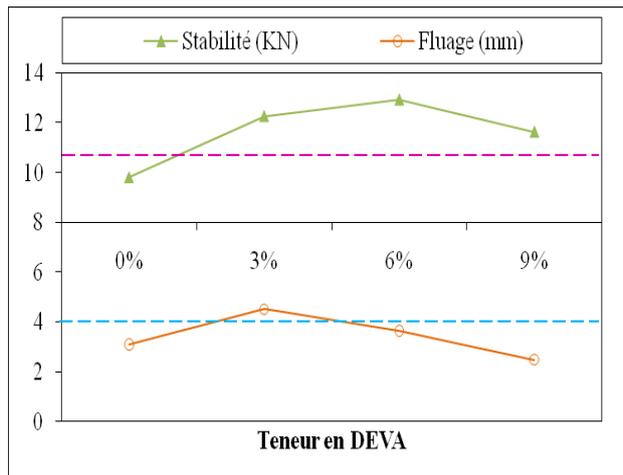


Figure 2.8.Stabilité et fluage Marshall (PEHD) [58] **Figure 2.9.**Quotient Marshall (PEHD) [58]

▪ **Modification par DSBR**

L'incorporation du DSBR dans l'enrobé bitumineux par son effet sur les caractéristiques Marshall des enrobés a été traduite par une augmentation de la stabilité de toutes les formules ainsi qu'une augmentation du fluage des enrobés modifiés par rapport à la formule témoin mais qui reste dans les limites des spécifications. Une amélioration de la résistance pour les formules à 6 et 9% du DSBR a été observée.

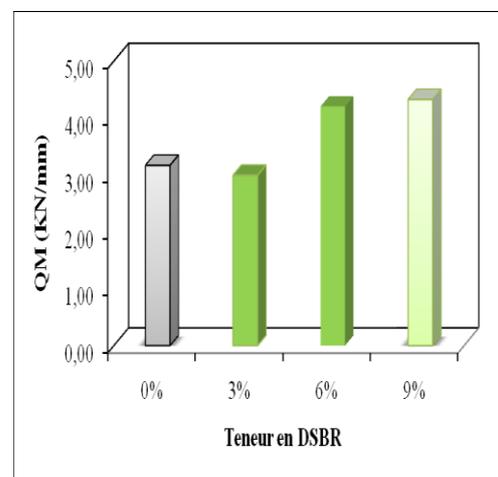
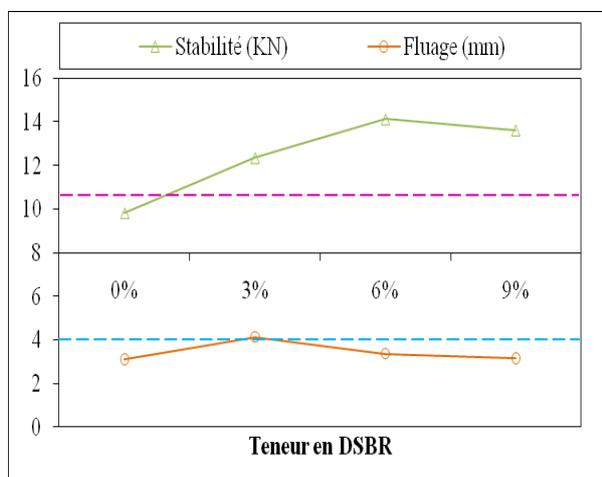


Figure 2.10.Stabilité et fluage Marshall (PEHD) [58] **Figure 2.11.** Quotient Marshall (PEHD) [58]

A partir des données et des résultats trouvés dans cette étude, on remarque que la teneur en polymère optée est importante (3-10%) pour les différents additifs ; ce choix n'a pas été justifié.

2.4. Modification des enrobés par addition d'EVA par procédé à sec

BAZZINE Rabia et al [59] ont étudié la valorisation des déchets usagés provenant de semelles de chaussures et tapis de voitures pour la fabrication de poudrette de caoutchoucs, il s'agit d'un plastomère de type EVA (Acétate de Vinyle et d'Ethylène) obtenu par broyage mécanique de ces dernières. Cette poudrette a été introduite directement dans le mélange lors de malaxage avec des pourcentages qui varient de 0 à 20% avec un pas de 5%.

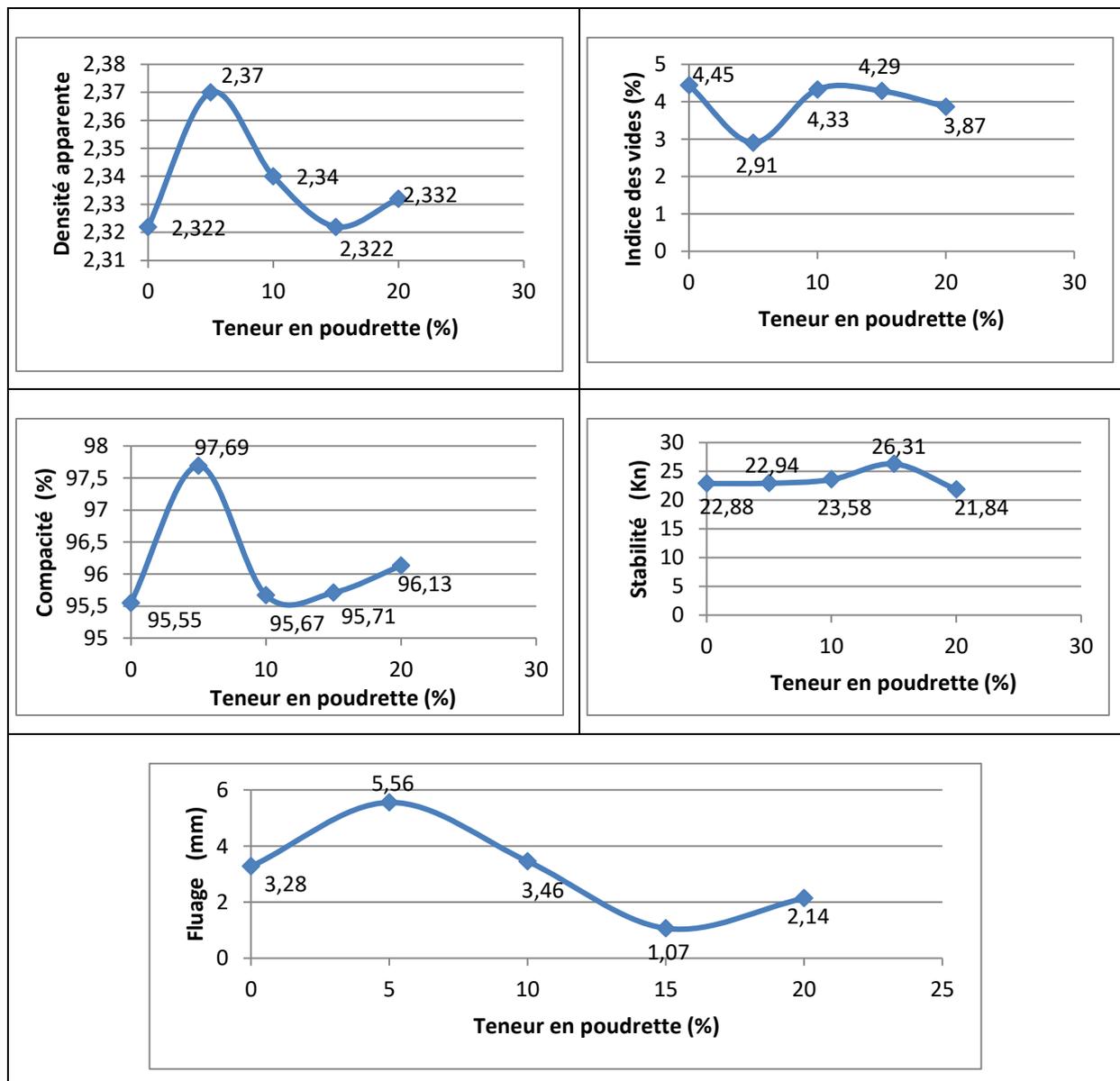


Figure 2.12. Variation des paramètres Marshall en fonction de la poudrette

Les résultats des différents paramètres de l'essai Marshall dans cette étude ont montré que: L'incorporation de la poudrette de caoutchouc dans le squelette granulaire d'un béton bitumineux a amélioré ces caractéristiques mécaniques, notamment ; sa résistance à la déformation (stabilité) qui a présenté à 15% une valeur optimale qui est de l'ordre de 26.31 KN, la compacité qui représente un paramètre à la résistance à l'orniérage est généralement acceptable (environ de 95.71 %).

A partir des données et des résultats trouvés dans cette étude, on remarque que la teneur en polymère optée est importante (0-20%); ce choix n'a pas été justifié.

2.5. Modification des enrobés par addition de poudrette de caoutchouc fine et grenue par voie humide.

KEBAÏLI Nabil et al [60] ont étudié l'effet de la poudrette de caoutchouc sur l'amélioration des performances des enrobés; ils ont opté pour la modification du liant (procédé humide). Cette poudrette provient du broyage des chutes de tapis de voitures et de semelles de chaussures. Deux variétés de poudrettes de caoutchouc ont été testées, il s'agit d'une poudrette fine (F) et d'une poudrette grenue (G). Une étude comparative de l'effet de ces deux poudrettes sur les performances d'un enrobé à base de deux types de bitume (NAF, TOT) a été faite. Les résultats montrent que les mélanges composés des bitumes modifiés présentent de meilleures performances par rapport aux mélanges avec un liant ordinaire, à savoir :

- Un gain important en terme de stabilité Marshall supérieur à 45% ;
- Une faible diminution presque constance en fluage ;
- Une diminution de la compacité de moins de 5%.

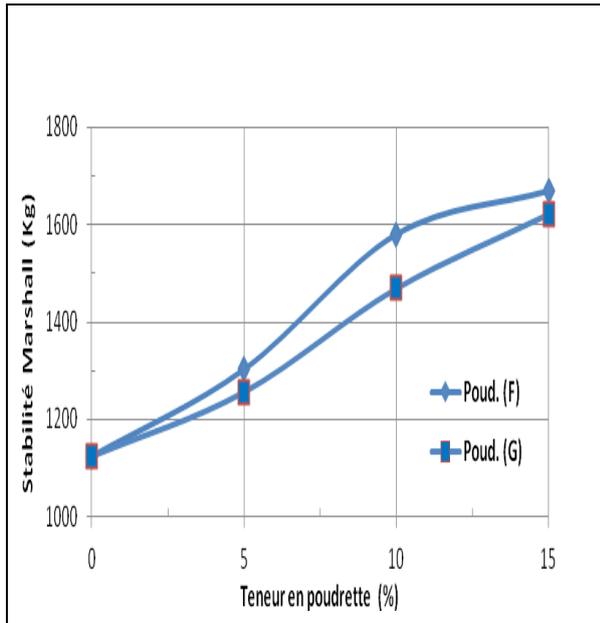


Figure 2.13.Effet des poudrettes (F) et (G) sur la stabilité Marshall (bitume TOT).

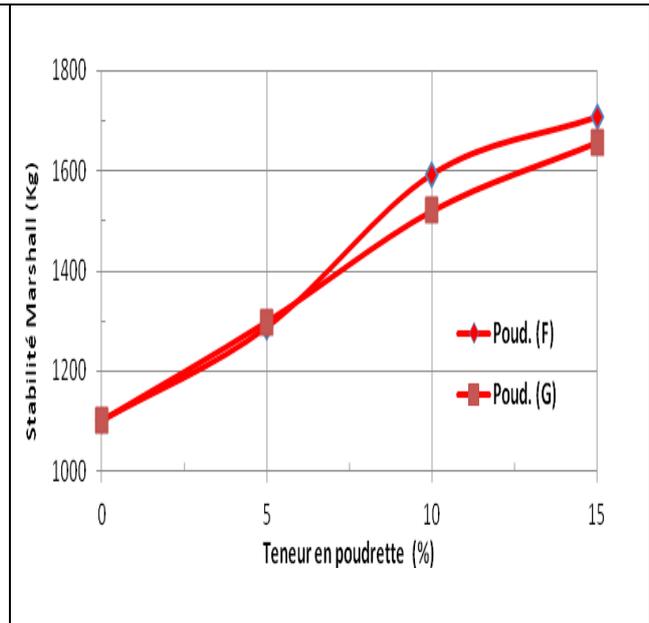


Figure 2.14.Effet des poudrettes (F) et (G) sur la stabilité Marshall (bitume NAF).

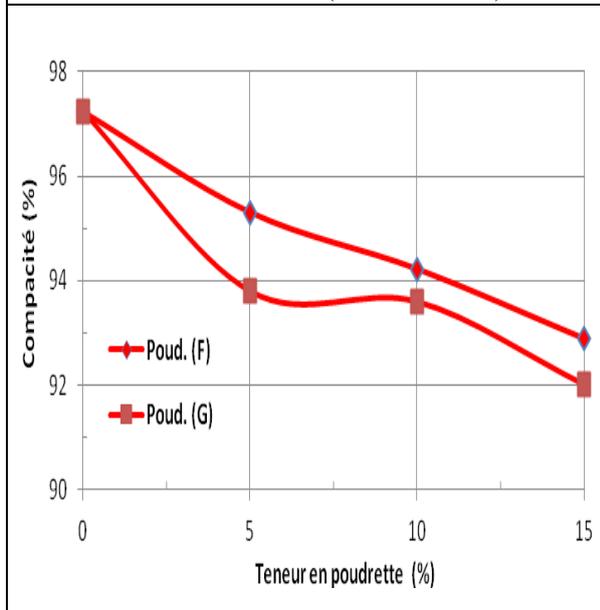


Figure 2.15.Effet des poudrettes (F) et (G) sur la compacité (bitume TOT).

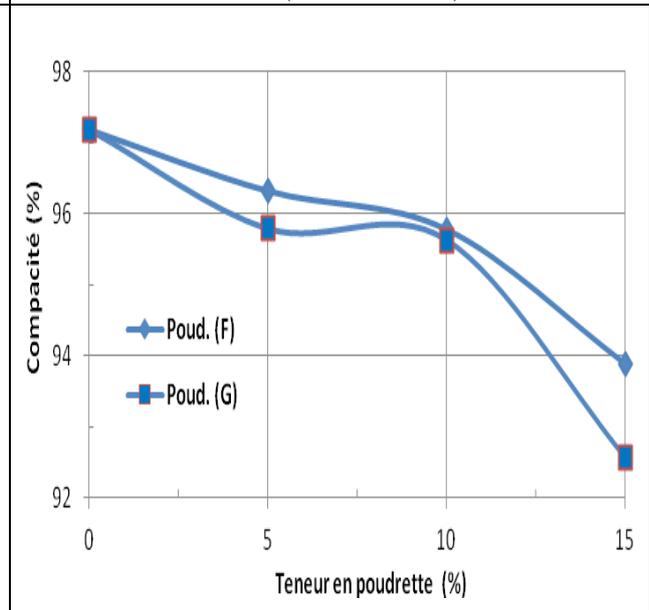
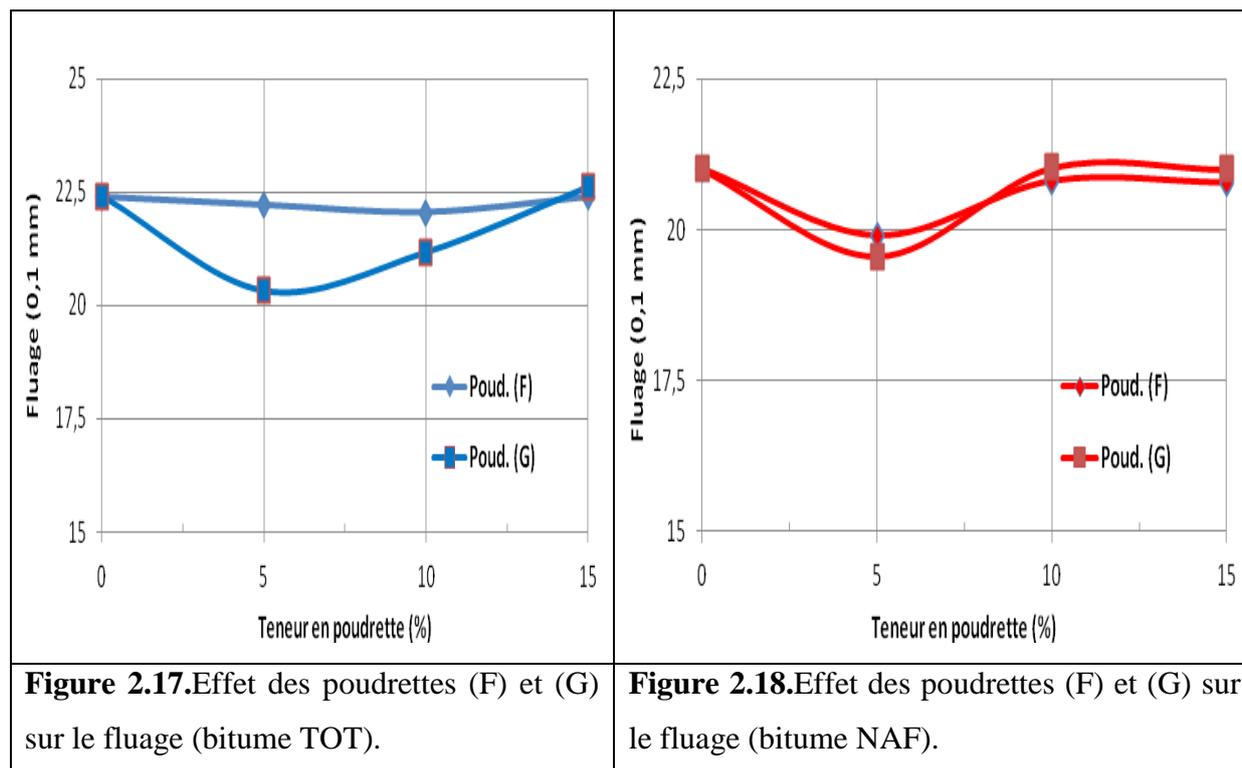


Figure 2.16.Effet des poudrettes (F) et (G) sur la compacité (bitume NAF).



D'après les figures 2.13 à 2.18, il apparaît clairement que les BB à base de bitumes modifiés à la poudrette ((F) ou (G) présentent de meilleures stabilités comparativement à l'enrobé de référence (0%) ou l'enrobé composé de bitume ordinaire. L'effet des deux poudrettes est semblable, avec une légère avance de la poudrette (F), les stabilités augmentent progressivement entre 0 et 15% de la valeur 1125 Kg jusqu'à environ 1700 Kg soit plus de 50%. En résumé, l'ajout de poudrette, quelle que soit sa granularité, fait augmenter considérablement les stabilités.

Les compacités enregistrées, moyennant les deux poudrettes, sont toutes inférieures à la compacité de l'enrobé de référence (0%) avec une tendance pseudo-linéaire. Ainsi les compacités des BB perdent environ 5% de leurs valeurs en passant de l'enrobé de référence à celui renfermant 15% de poudrette. La poudrette fine (F) possède une influence moins importante comparativement à la poudrette grossière (G). En résumé, l'ajout de poudrette quelle que soit sa granularité, contribue à la diminution des compacités.

L'incorporation progressive de poudrette n'a pas d'effet sensible sur les déformations. Une faible variation au niveau du fluage est enregistrée. Néanmoins, de bonnes caractéristiques vis-à-vis du fluage sont enregistrées pour des teneurs en poudrette inférieures à 5%.

2.6. Modification des enrobés par addition de poudre de caoutchouc par procédé à sec

J.L. Feiteira Dias et al [61] ont étudié l'évaluation des performances mécaniques d'un enrobé modifié par la poudre de caoutchouc en termes de rigidité, sur la base de la norme EN 12697-26, résistance à la fatigue, conformément à la norme EN 12697-24 et résistance à la déformation permanente (orniérage) en utilisant le suivi de roue équipements exploités sous la norme NLT-173. Pour cela, trois mélanges ont été préparés TB0 (mélange conventionnel), TB3 (mélange avec 1.5% de poudre de caoutchouc) et TA (mélange avec 1.9% de poudre de caoutchouc).

Pour évaluer le module de rigidité, fatigue et les déformations permanentes des différents mélanges, ils ont opté pour des modes opératoires fixés par les normes et cela à des températures et des fréquences bien déterminées.

Tableau 2.2. Module de rigidité (MPa) S_m et coefficient de variation CV (%) des mélanges à différentes fréquences [61].

Température (°C)	Mélanges	S_m (10Hz)	CV	S_m (5Hz)	CV	S_m (1Hz)	CV
20	TB0	2493	4.4	2333	6	1803	2.9
	TB3	2290	4.3	2235	6	1975	9.7
	TA	2532	4.6	2423	6	2000	3.4
30	TB0	1866	5.4	1802	5.1	1362	3.1
	TB3	1584	5.2	1196	3.3	1313	5.1
	TA	1672	7	1665	6.8	1565	4.7
40	TB0	780	12.6	699	8	667	8
	TB3	1223	4.2	1150	4.2	1078	4
	TA	855	6.3	767	3	934	3.7

Tableau 2.3. Paramètres de la fatigue ($\epsilon = a * N^b$) [61]

Température (°C)	Paramètres	TB0	TB3	TA
20	a	11563	8013.6	6475.8
	b	-0.302	-0.243	-0.198
	R ²	99.08	99.2	99.9
	ϵ_6 ($\mu\text{m/m}$)	178	296	421
30	a	11148	9430.3	7026.4
	b	-0.297	-0.247	-0.201
	R ²	99.9	83.7	99.9
	ϵ_6 ($\mu\text{m/m}$)	184	310	438

Tableau 2.4. Taux de profondeur ($R_{rd-105/120}$) et profondeur totale après 120 min (R_{rd-120}) [61]

Température (°C)	Mélanges	Charges (KPa)	$R_{rd-105/120}$ (mm/min)	R_{rd-120} (mm)
20	TB0	700	8.2	3.05
	TB3		1.8	0.87
	TA		4.9	1.62
30	TB0	900	29.3	10.83
	TB3		8.7	3.68
	TA		11.7	5.64

Les résultats ont montré que le module de rigidité des différents mélanges diminue en augmentant la température, et qu'à 20°C le mélange TA a présenté un module élevé pour les trois fréquences. Concernant les températures de 30 et 40°C, les résultats montrent que le module s'améliore pour les mélanges TB0 et TB3 respectivement. Le mélange TB0 présente le meilleur comportement vis-à-vis de la fatigue pour les trois températures. En ce qui concerne la résistance aux déformations permanentes, le mélange TB3 présente des meilleures performances pour les températures 50 et 60°C sous les charges 700 et 900 KPa respectivement.

2.7. Modification des enrobés par addition de poudrette de caoutchouc par voie sèche par rapport au temps de digestion.

Huynh Tan Tai Nguyen et al [62] ont étudié les effets de la poudrette issue des pneus de véhicules et du temps de digestion sur les propriétés mécaniques des enrobés modifiés, notamment la résistance à l'orniérage. Les résultats de ces travaux peuvent être appliqués pour améliorer la résistance à l'orniérage des chaussées soumises à des conditions climatiques chaudes. Les résultats indiquent que:

- La poudrette des pneus usagés contribue à l'amélioration significative de la stabilité Marshall et de l'orniérage du béton bitumineux. La teneur optimale en poudrette dans les mélanges est de 2% et 1,5% respectivement ;
- Le temps de stockage à haute température joue également un rôle clé dans l'amélioration des propriétés techniques du béton bitumineux. Dans la plage de 0-5h de temps de durcissement, la valeur optimale n'a pas pu être déterminée. Plus le mélange est maintenu à haute température, plus l'effet de la poudrette est important. La résistance à la traction indirecte des mélanges a également la même tendance comme la stabilité Marshall. Les valeurs du mélange de 2% de poudrette stockée pendant 5 heures augmentent plus que celles des autres pourcentages. Le mélange

avec 3% de poudre présente la plus faible résistance à la traction indirecte.

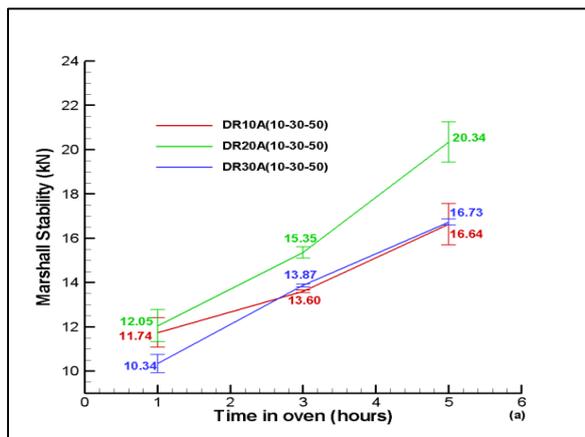


Figure 2.19. Stabilité Marshall [62]

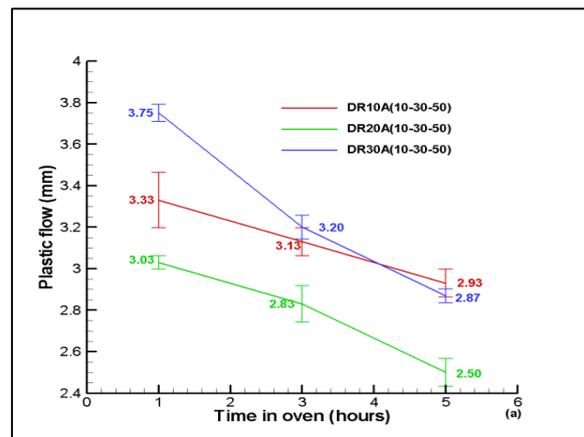


Figure 2.20. Fluage Marshall [62]

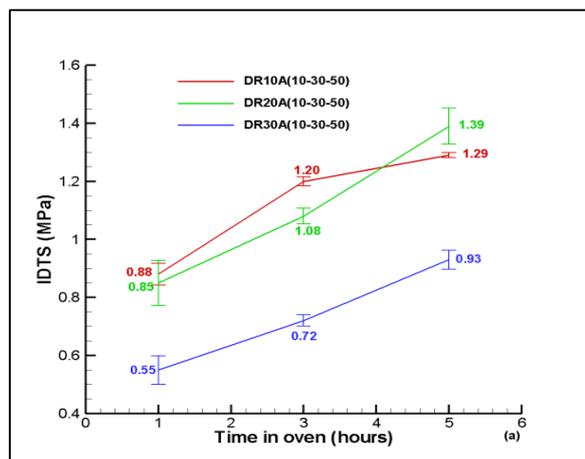


Figure 2.21. Traction indirecte [62]

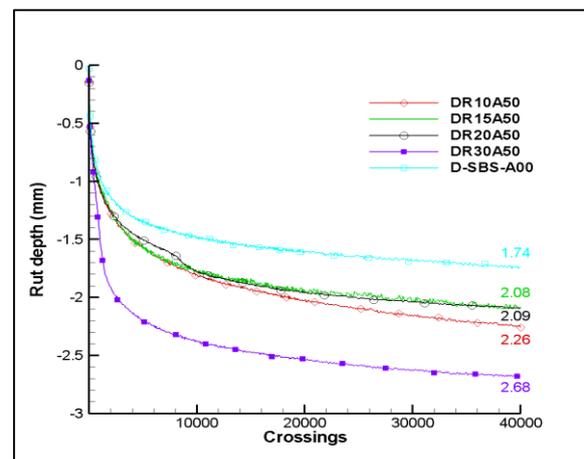


Figure 2.22. Profondeur d'ornièrre [62]

Tel que : au niveau de la légende DR(00,10,15,20,30) correspond à des pourcentages de poudre (0%,1%,2% et 3%) ainsi que le A(00,10,30,50) correspond au temps de digestion (0h, 1h, 3h et 5h).

2.8. Modification des enrobés par un liant modifié avec Zycosoil et addition de poudre de caoutchouc par procédé à sec.

Mahyar Arabani et al [63] ont étudié les performances des mélanges modifiés par la poudre de caoutchouc par le procédé à sec, et par modification du liant avec un nanomatériau, à savoir le Zycosoil. Pour atteindre cet objectif, des mélanges d'asphalte modifié avec Zycosoil à trois teneurs en poids de liant de 1%, 2,5% et 4%, et poudre de caoutchouc à trois teneurs en poids d'agrégats de 1%, 3% et 5% ont été étudiés.

Les effets sur les propriétés mécaniques des mélanges, y compris l'humidité, la susceptibilité,

la résistance à la traction indirecte, le module de rigidité, la résistance à l'orniérage et le comportement à la fatigue ont été évalués. Les résultats montrent que:

- L'utilisation de Zycosoil a entraîné une amélioration de l'adhérence entre les agrégats, la poudrette de caoutchouc et le liant bitumineux ; ce qui a conduit à l'amélioration de la traction indirecte. L'ajout de la poudrette a par contre diminué les valeurs de la résistance à la traction indirecte des mélanges. Les résistances des mélanges de (4% Zy + 1% CR), (2,5% Zy + 1% CR), (1% Zy + 1% CR) et (4% Zy + 3% CR) étaient supérieures à celle du mélange témoin ;
- Les résultats de la sensibilité à l'eau indiquent que les valeurs des mélanges avec (4% de Zy + 1% de CR), (2,5% de Zy + 1% de CR) et (4% de Zy + 3% de CR) étaient supérieures au mélange témoin. En outre, (1% Zy + 1% CR) et (2,5% Zy + 3% CR) et (4% ZY + 5% CR) avaient une tenue à l'eau acceptable.
- Les résultats du module de rigidité indiquent qu'en raison d'une augmentation de la rigidité du liant par addition de Zycosoil, le module de rigidité des mélanges peut être augmenté. Outre, l'addition de (1% et 3% de CR) améliorait le module de rigidité, alors que l'addition de 5% de CR réduit le module de rigidité du mélange. Cette réduction peut être compensée par modification du liant bitumineux avec 2,5% et 4% de Zycosoil.
- Avec l'augmentation du pourcentage de Zycosoil, la résistance des enrobés à la déformation permanente a été améliorée. En outre, les mélanges des enrobés avec (4% Zy + 3% CR), (2,5% Zy + 3% CR), (1% Zy + 3% CR), (4% Zy + 1% CR), (3% CR, 2,5% Zy) + (1% RC, 1% Zy) + (1% RC, 1% RC) ont eu de meilleures performances en comparaison avec les mélanges de contrôle. Egalement, la résistance à l'orniérage des mélanges de contrôle et Le mélange (4% Zy + 5% CR) était presque similaire ;
- L'ajout de Zycosoil améliorerait l'adhésion entre les granulats et le liant et fournir un mélange plus rigide ce qui a conduit à une amélioration de la résistance à la fatigue de l'enrobé. De plus, l'ajout de (3% et 5% de CR) a réduit la durée de vie en fatigue, ce qui était enrichi par un liant modifié au Zycosoil.

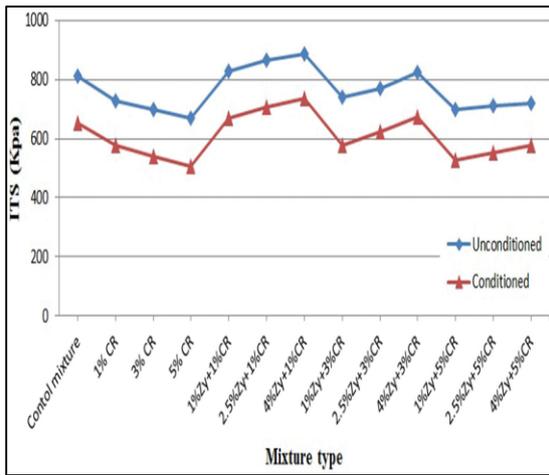


Figure 2.23. Traction indirecte conditionnée et inconditionnée ITS [63]

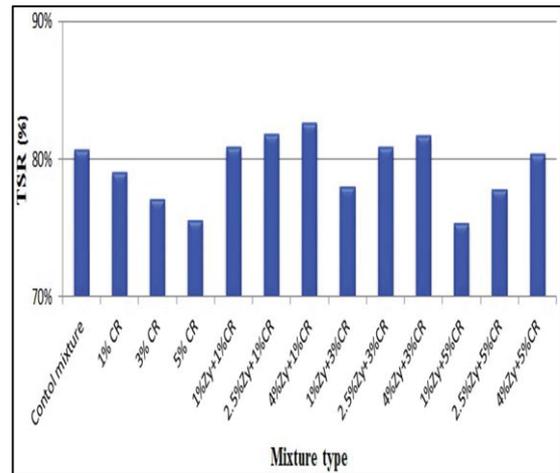


Figure 2.24. Tenue à l'eau TSR [63]

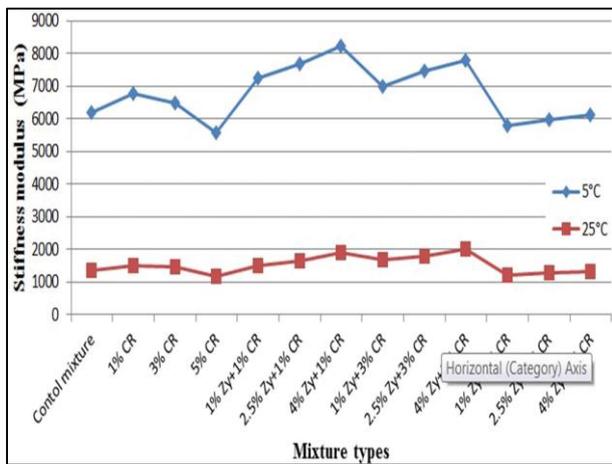


Figure 2.25. Module de rigidité ITSM [63]

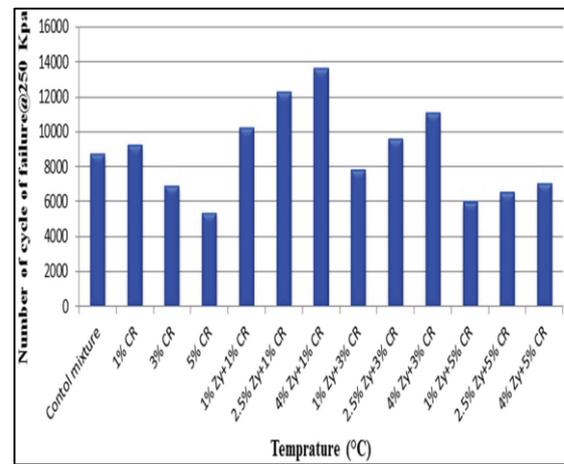


Figure 2.26. Comportement en fatigue à 20°C [63]

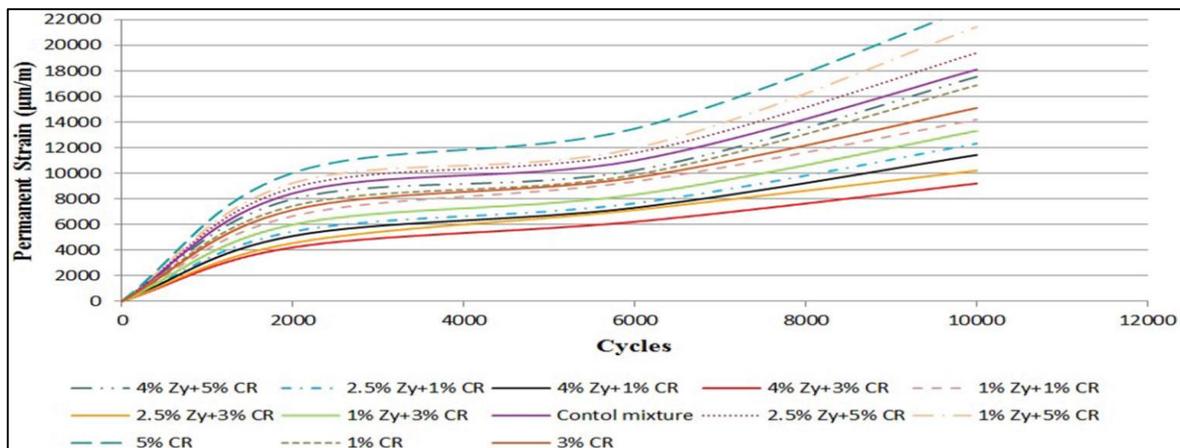
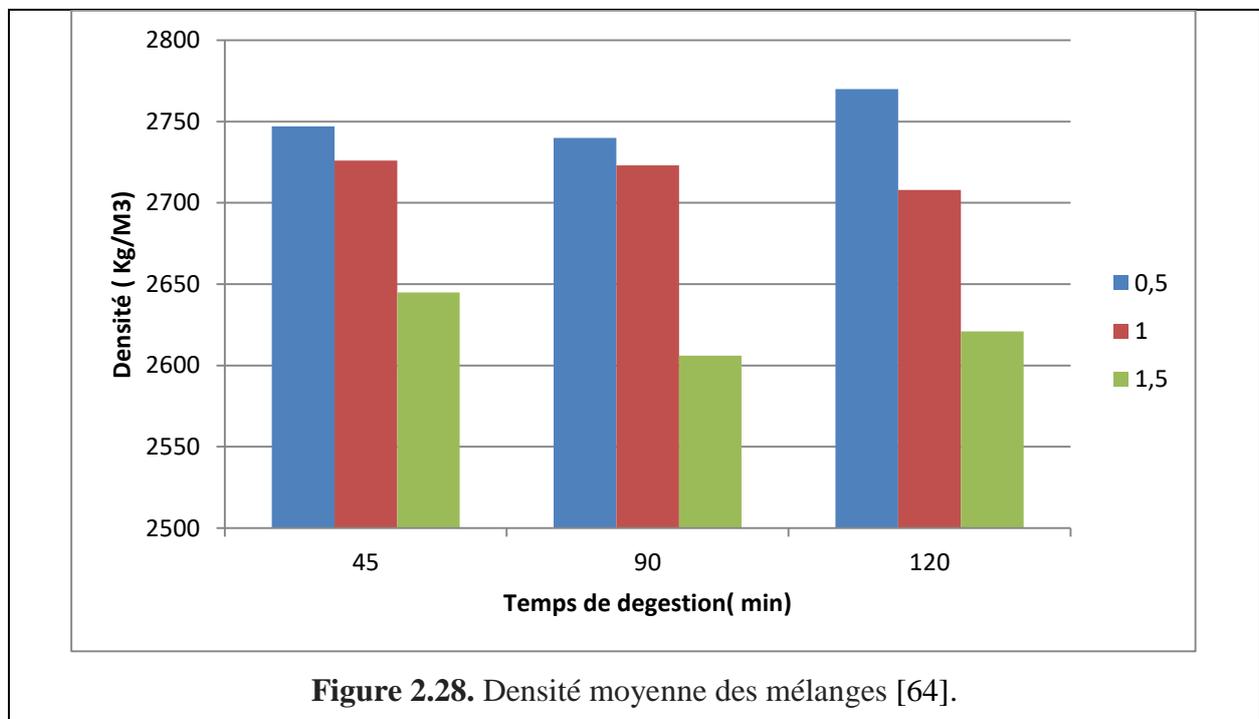


Figure 2.27. Variation de la déformation permanente [63]

2.9. Modification des enrobés par procédé à sec par addition de poudrette de caoutchouc en fonction du temps de digestion

F. Moreno et al [64] ont étudié l'effet de la poudrette de caoutchouc provenant des pneus usagers et le temps de digestion sur les performances des enrobés modifiés, et cela par le procédé à sec. Les mélanges avaient la même composition minérale, mais avec différents pourcentages de poudrette de caoutchouc (0,5%, 1% et 1,5% du poids total du mélange) ainsi que différents temps de digestion (45, 90 et 120 min). L'étude a montré qu'en ce qui concerne la sensibilité à l'eau et les déformations plastiques, les meilleures performances ont été obtenues avec un temps de digestion de 120 min et un pourcentage de caoutchouc granuleux de 0,5% et 1,0% du poids total du mélange.

Les résultats ont montré que le mélange de 1.5% de poudrette de caoutchouc a présenté une meilleure résistance aux déformations permanentes (l'orniérage).



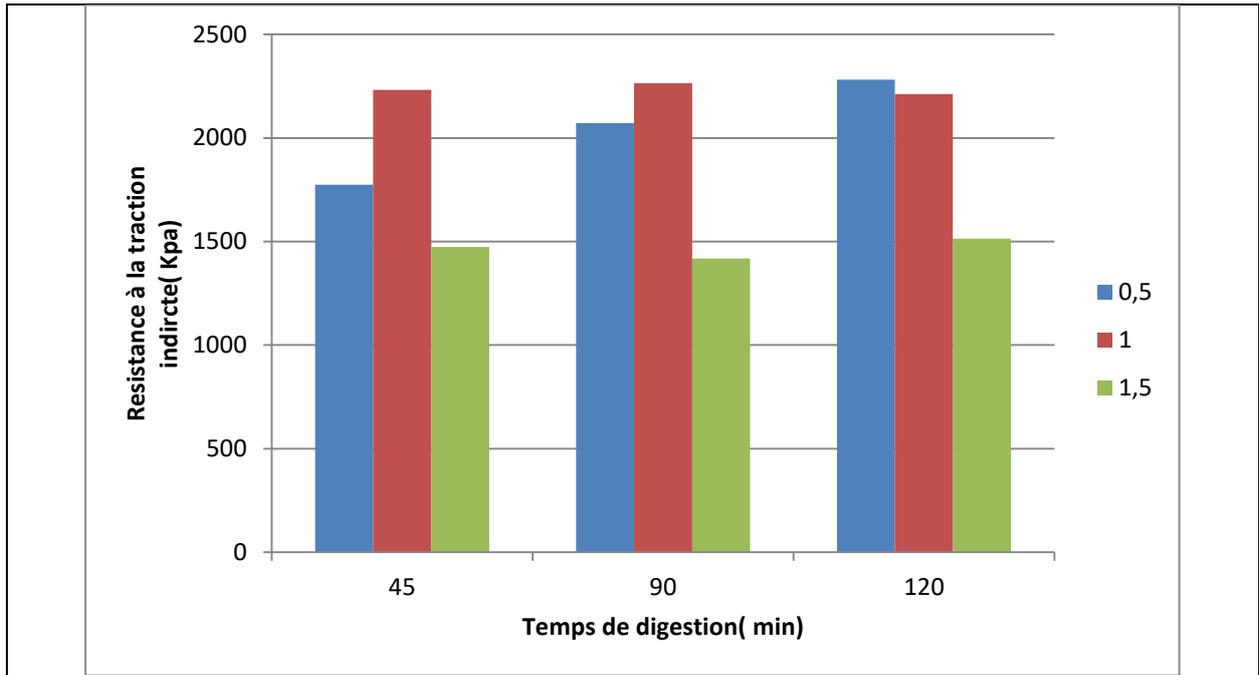


Figure 2.29. Résistance à la traction indirecte des mélanges [64].

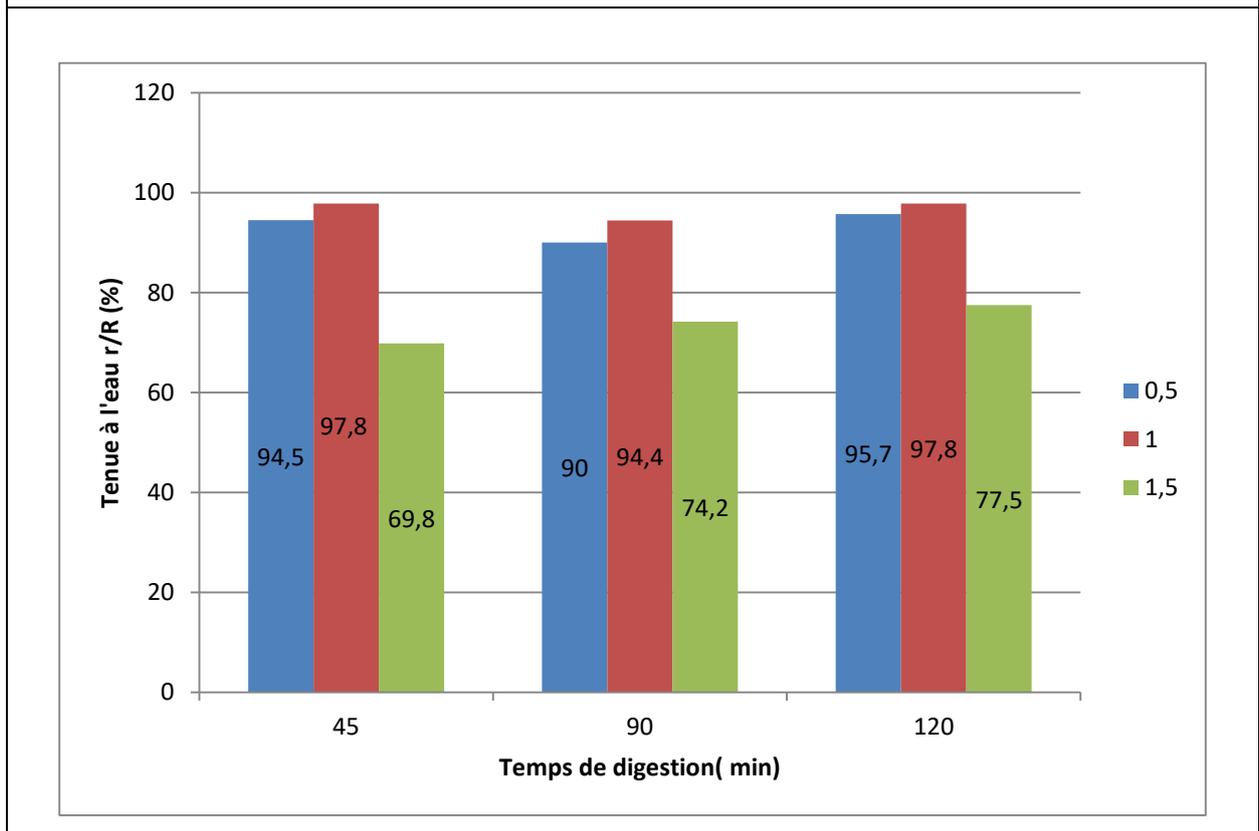
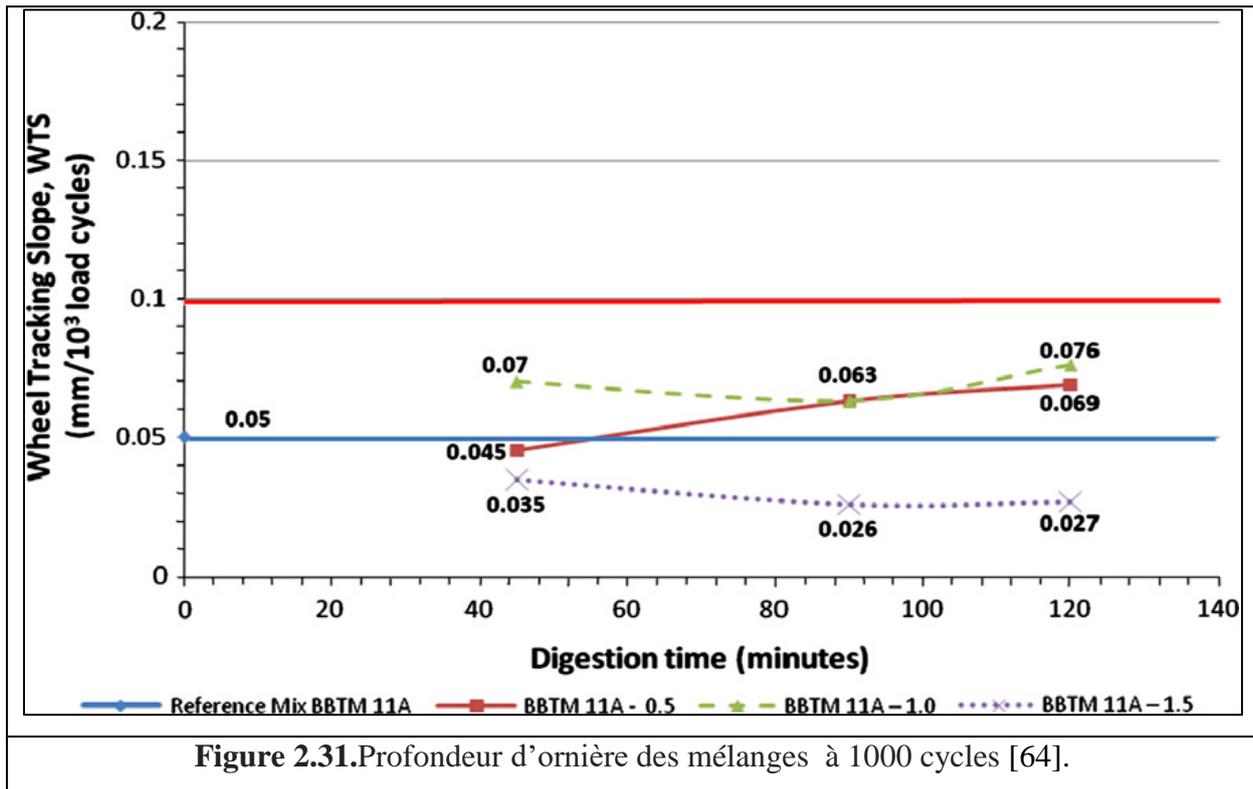


Figure 2.30. Tenue à l'eau des mélanges [64].



2.10. Modification des enrobés par addition de déchets de polyéthylène téréphtalate (PET) par voie sèche

Taher Baghaee Moghaddam et al [65] ont contribué à l'utilisation de déchets de polyéthylène téréphtalate (PET) comme modificateur des propriétés d'un mélange bitumineux. Des essais de densité spécifique, paramètres Marshall, module de rigidité et l'essai de la traction indirecte ont été réalisés sur des mélanges contenant différents pourcentages de PET (0.1 à 1% par pas de 0.1%), suivis par l'étude du comportement au fluage statique et dynamique de ces mélanges. Les résultats ont montré que l'utilisation du PET comme additif peut modifier les propriétés des mélanges bitumineux. Les mélanges modifiés au PET avaient des comportements complètement différents sous des chargements statiques et dynamiques. Il ne peut pas être considéré par conséquent comme un véritable additif pour les chaussées soumises à des charges statiques. Pour les mélanges soumis à des conditions de chargement dynamique, il faudrait un additif avec des performances plus améliorées.

2.11. Modification d'un enrobé de mastic de pierre par procédé à sec par un polymère SBS

Celaeddin E. Sengul et al [66] ont étudié les performances des chaussées en enrobé de mastic de pierre (SMA) modifié au polymère SBS. La teneur en bitume des mélanges SBS, SMA a été évaluée par la méthode du quotient de Marshall (MQ), du test de fluage répété (ECR), et de la traction indirecte (ITST).

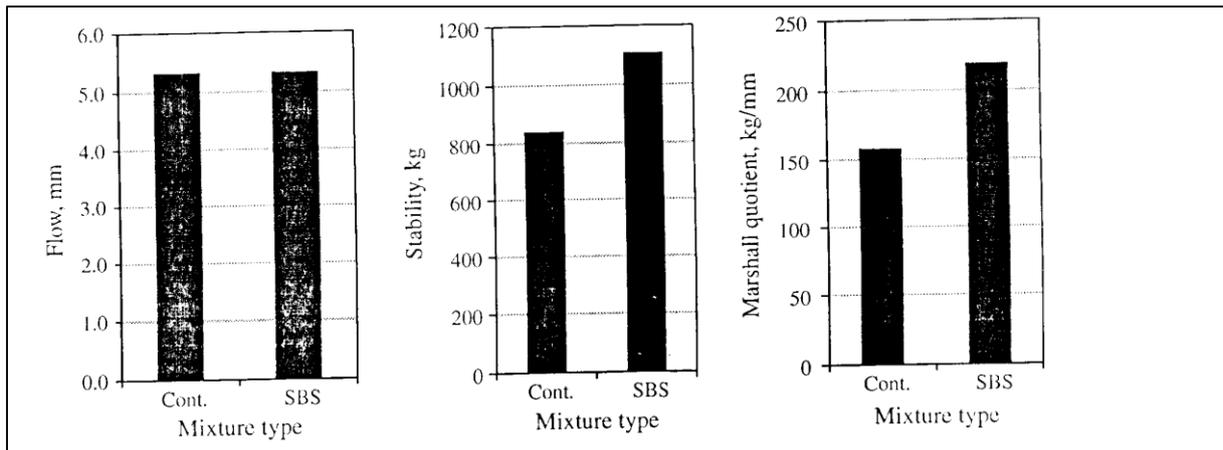


Figure 2.32. Paramètres Marshall du mélange conventionnel et modifié [66].

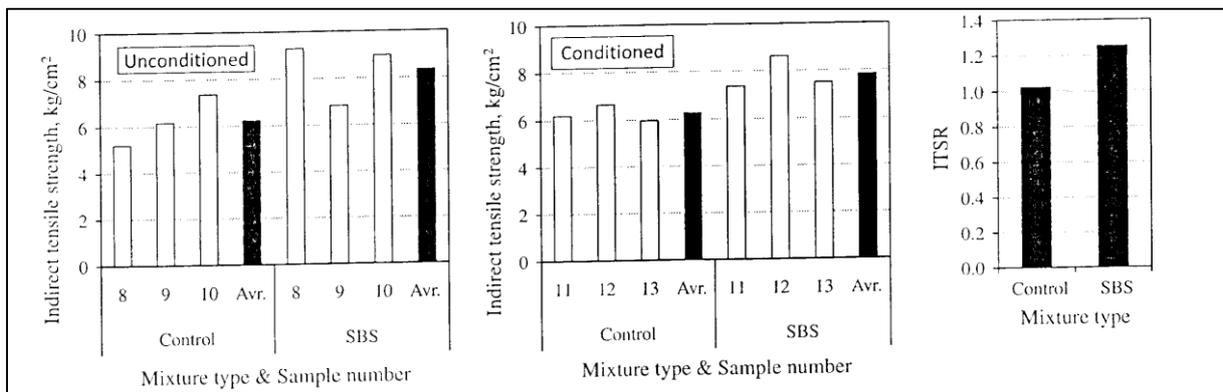


Figure 2.33. Résistance à la traction indirecte et tenue à l'eau à 25°C [66].

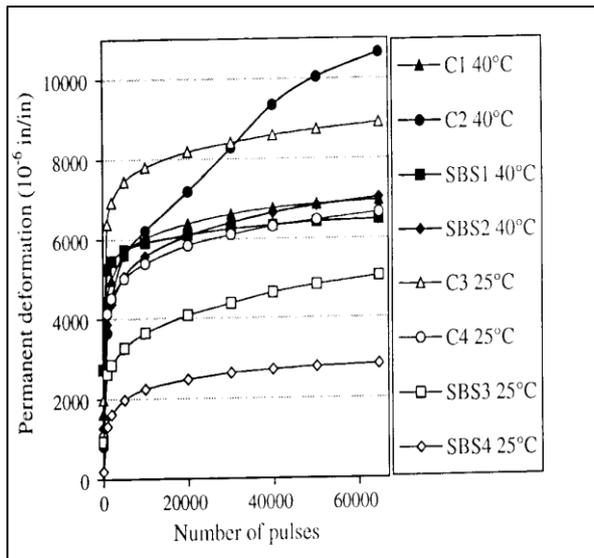


Figure 2.34. déformantion permanente des échantillons à 25 et 40°C [66].

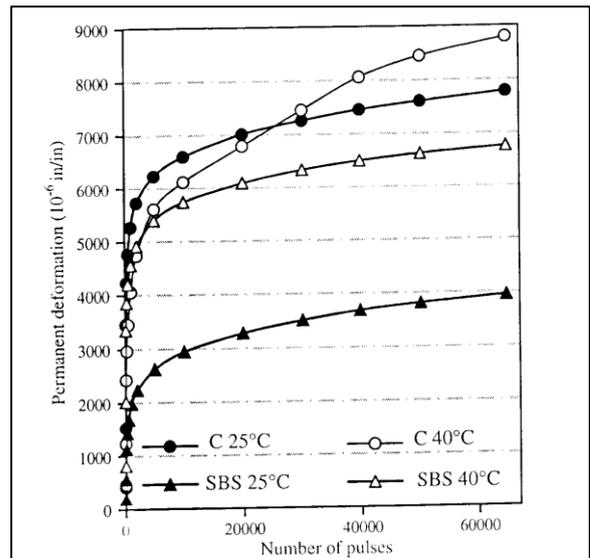


Figure 2.35. déformantion permanente moyenne à 25 et 40°C [66].

Les résultats trouvés montrent que :

- Les valeurs de la stabilité et du quotient Marshall sont plus élevées pour les mélanges de SBS par rapport au mélange témoin ;
- Les mélanges modifiés par SBS ont une capacité de charge plus élevée. Ce résultat conduit à une résistance à l'orniérage plus élevée ;
- En ce qui concerne les valeurs ITSR, les mélanges modifiés par SBS ont une plus grande résistance aux dommages causés par l'humidité par rapport au témoin.
- En termes de résultats, le polymère est un additif d'asphalte aux performances exceptionnelles pour la résistance à l'orniérage ;
- À température modérée (25 ° C), le mélange modifié par SBS présente la meilleure performance de fatigue ;
- Les mélanges bitumineux modifiés au polymère SBS donnent au moins le double de la résistance à l'orniérage pour 50 000 cycles.

Conclusion

Nous avons passé en revue les différents travaux de recherches effectués par voie sèche et humide de la modification de l'enrobé avec différents ajouts et à différentes plages de pourcentages.

Dans notre étude, nous allons fixer pour nos investigations la plage de variation de pourcentages de poudrettes en utilisant le critère de maniabilité (mise en œuvre) qui est obtenu par l'essai de presse de cisaillement giratoire (PCG) .

PARTIE II

ETUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE 3 :

PRINCIPAUX ESSAIS SUR ENROBÉS

Introduction

Ce chapitre consiste à recenser les différents essais, relatifs aux investigations réalisées aux laboratoires pour formuler et caractériser un enrobé hydrocarboné à savoir ;

- Essais d'identification des matériaux utilisés ;
- Méthode de formulation d'un enrobé bitumineux ;
- Essai de maniabilité à la presse de cisaillement giratoire PCG ;
- Essai Marshall ;
- Essai Duriez ;
- Essai de traction indirecte (Module de rigidité) ;
- Essai d'orniérage ;
- Fluage statique ;
- Méthode de mesure de champs de déformation par corrélation d'images numériques.

Les différents essais ont été réalisés au sein des laboratoires suivants : Laboratoire matériaux de génie civil et environnement ENP (LMGCE), laboratoire de route (USTHB), laboratoire de Mitidja Travaux Publics et Bâtiment (LMTPB), le Laboratoire central des Travaux Publics (LCTP), Entreprise Publique des Travaux Routiers du Centre (EPTRC) et le laboratoire de la société Nationale des Travaux Publics (SNTP), Université Paul Sabatier (Toulouse France).

3.1 Essais d'identification des matériaux

3.1.1. Essais de caractérisation de bitume

Les gammes approximatives des températures d'exposition des bitumes ainsi que les essais considérés comme pertinents pour apprécier les propriétés significatives correspondantes sont résumés ci-dessous.

Les bitumes sont classés selon leur consistance. Compte tenu de l'étendue de la plage de variation de la consistance des bitumes dans leur domaine d'application et d'usage (de -40°C à 200°C), chaque essai de laboratoire n'est réalisé que sur une partie du domaine.

Les principaux indicateurs de consistance sont selon les plages de température d'utilisation mentionnées ci-dessus :

- La pénétrabilité à 25°C NF EN 1426 janvier 2018 ;
- La température bille anneau (TBA) NF EN 1427 juin 2007;
- La température de fragilité FRAASS NF EN 125 à 39 août 2015;
- Le vieillissement à la mise en œuvre.

▪ Essai de pénétrabilité à l'aiguille

L'essai consiste à mesurer en 10^{ème} de mm, l'enfoncement dans un échantillon de bitume à température donnée, d'une aiguille standard dont le poids avec son support est de 100g, au bout d'un temps de 5s (Figure 3.1). C'est donc une mesure de la consistance du bitume [67]. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C. Dans ces conditions, plus un bitume est dur, plus sa pénétrabilité est faible.

A titre d'exemple, on distingue les classes :

10/20 et 35/50 => bitumes durs

50/70 et 70/100 => bitumes semi-durs

180/220 => bitumes mous

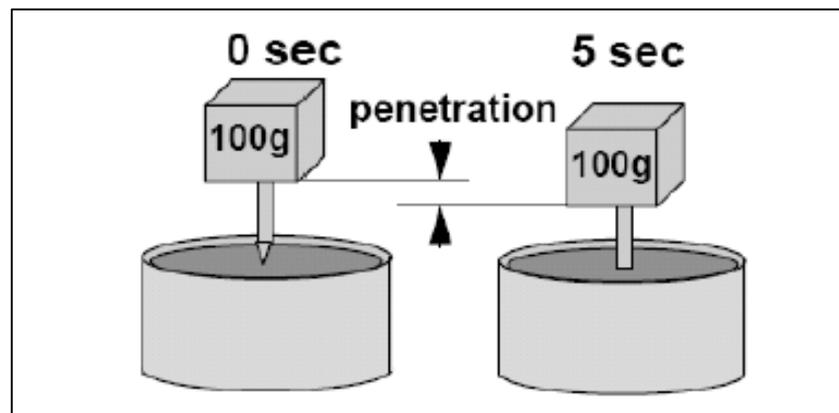


Figure 3.1. Essai de pénétrabilité pour le bitume [67]

Dans le cas d'un produit bitumeux, l'échantillon à tester est porté à une température de 25 °C. Les échantillons sont placés dans un bain-marie à température constante (25°C) ; L'aiguille est abaissée lentement jusqu'à ce que sa pointe coïncide avec son image réfléchie par la surface de l'échantillon, puis le porte-aiguille est libéré pendant le laps de temps prescrit et descend par gravité. L'aiguille s'enfonce alors dans l'échantillon de bitume. On mesure la profondeur d'enfoncement à l'issue du temps prescrit.

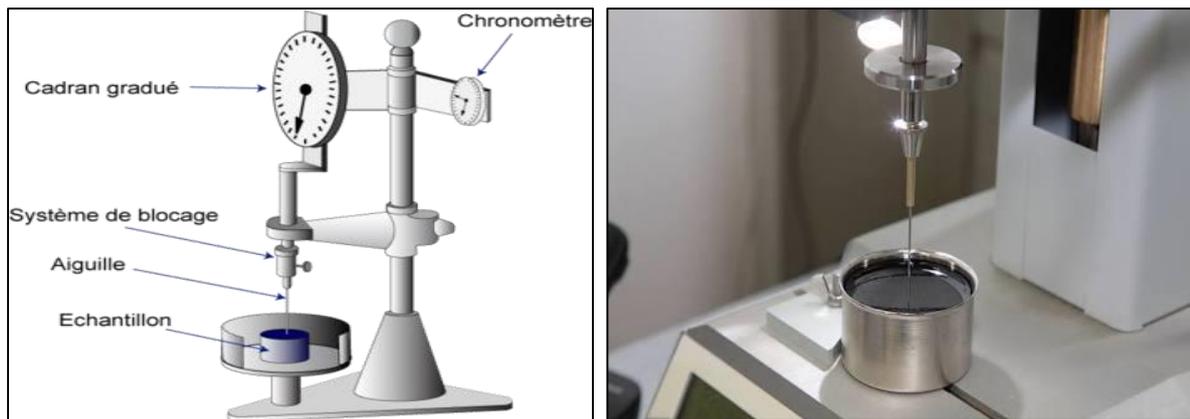


Figure 3.2.L'appareil de pénétrabilité à l'aiguille [67]

▪ **Point de ramollissement - méthode bille et anneau**

L'essai consiste à déterminer la température à laquelle un bitume subit une déformation irréversible dans des conditions de contraintes définies [68]. Ce test donne une indication sur la tendance du matériau à s'écouler à haute température. Dans des températures qui varient entre (30 et 157 °C), un anneau rempli de bitume est chauffé jusqu'à ce que le bitume se déforme sous le poids d'une bille d'acier. Cet essai est utile dans la classification des bitumes, comme un élément pour établir l'uniformité des expéditions ou des sources d'approvisionnement [69].

Pour réaliser cet essai il faut : un béccher, un système bille-anneau, de l'eau, un agitateur magnétique chauffant, un chronomètre, un thermomètre.

Une fois le système bille-anneau plongé dans l'eau (Figure 3.3), on augmente la température de celle-ci de 5°C toutes les minutes. On chronomètre le temps nécessaire pour que la bille atteigne le fond du support. La hauteur de descente est de 25mm.

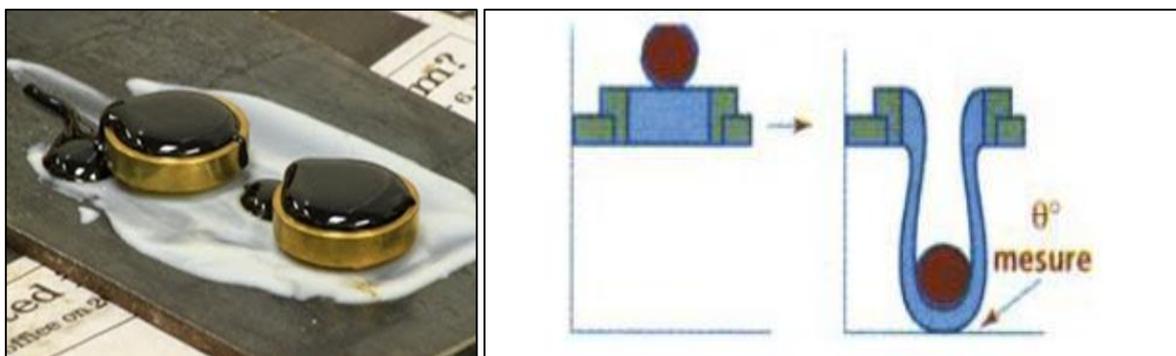


Figure 3.3. Détermination du point de ramollissement [68]

Cet essai est réalisé comme suit (Figure 3.4) :

- On remplit les anneaux en cuivre par du bitume ;
- On place une bille en acier au-dessus de anneaux ;
- L'eau est portée à une température inférieure à 5°C ;
- On plonge le système bille-anneau dans l'eau à 5°C et on démarre le chronomètre ;
- On élève la température de 5°C par minute ;
- Lorsque la première bille enrobée de bitume touche le fond du support, on enregistre la température ;
- On enregistre la température lorsque la seconde bille touche le fond du support ;
- On fait la moyenne de deux températures pour déterminer le point de ramollissement.

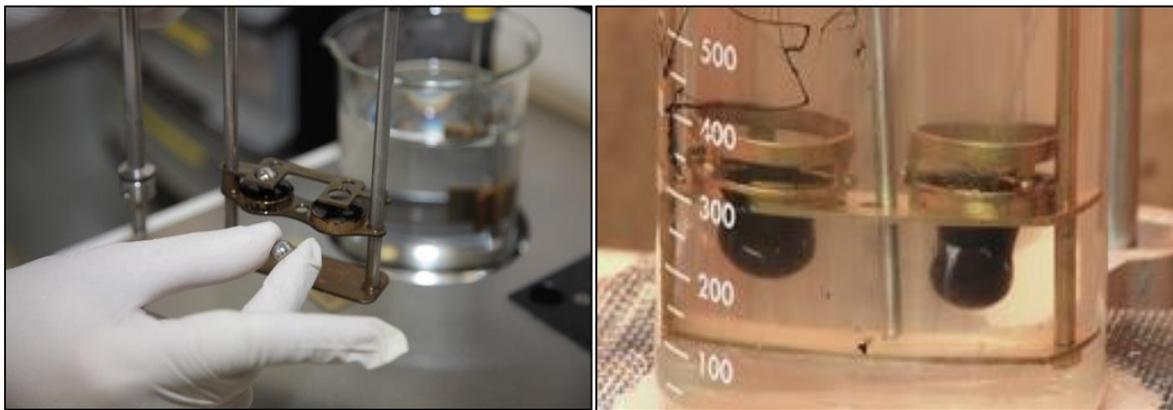


Figure 3.4. L'essai de Bille Anneau réalisé [68]

▪ Essai de Ductilité NA 5223

Le but de cet essai est de déterminer l'aptitude d'un liant bitumineux à résister à la traction, à savoir à évaluer sa cohésivité [70].

La ductilité d'un bitume est une caractéristique complexe qui tient à la fois compte de la viscosité et de la cohésion. Un bitume est ductile, à une certaine vitesse, lorsqu'il peut être étiré à cette vitesse, et à une certaine température, sans se rompre. On mesure la ductilité des bitumes au moyen d'un ductilimètre standard (Figure 3.5) à la température de 25°C et à la vitesse d'allongement de 5 cm par minute. L'essai se fait dans de l'eau pour éliminer en majeure partie l'effet de pesanteur.

On effectue les mesures sur des éprouvettes en forme de 8, moulées dans des conditions et dimensions normalisées. L'éprouvette est ensuite amenée à la température normalisée de

l'essai, et étirée selon un taux de vitesse déterminé jusqu'à ce que le fil reliant les deux bouts se coupe. L'allongement en centimètres, au moment où le fil du matériau se rompt, est désigné comme étant la ductilité. Pour un même bitume, la ductilité croît quand la température s'élève. Pour des bitumes de même nature, la ductilité croît quand la pénétration croît; c'est-à-dire quand la viscosité diminue.

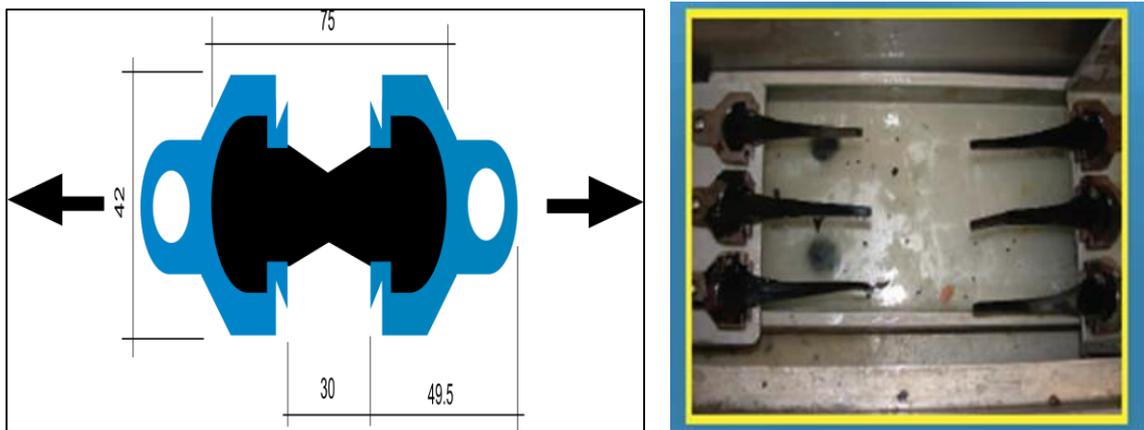


Figure 3.5. L'essai de ductilité [70]

- **Essai point d'éclair et de flamme EN ISO 2592**

Cette méthode s'applique à la détermination du point d'éclair d'une huile usée, d'un liquide ou d'un liquide contenant des solides en suspension ou en solution.

Le domaine d'application se situe entre 25 °C et 80 °C. Un point d'éclair peut être mesuré à plus basse température, en abaissant la température de l'échantillon en le mettant au congélateur avant de procéder à l'analyse [71].

L'essai du point d'éclair consiste à chauffer doucement un échantillon à un rythme constant d'élévation de température et avec une agitation continue. À chaque degré d'augmentation de température, une flamme est introduite dans la vapeur produite au-dessus de l'échantillon. La plus basse température à laquelle les vapeurs s'enflamment est le point d'éclair.

▪ Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test"

Cet essai est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes à l'enrobage [72]. En effet, lors de la fabrication d'un enrobé, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat ; ce contact induit un vieillissement du liant. Pour l'essai RTFOT (Figure 3.6), dans des conditions d'essai précises, le bitume placé en film mince, est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après RTFOT, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé, que celles obtenues sur le bitume d'origine.

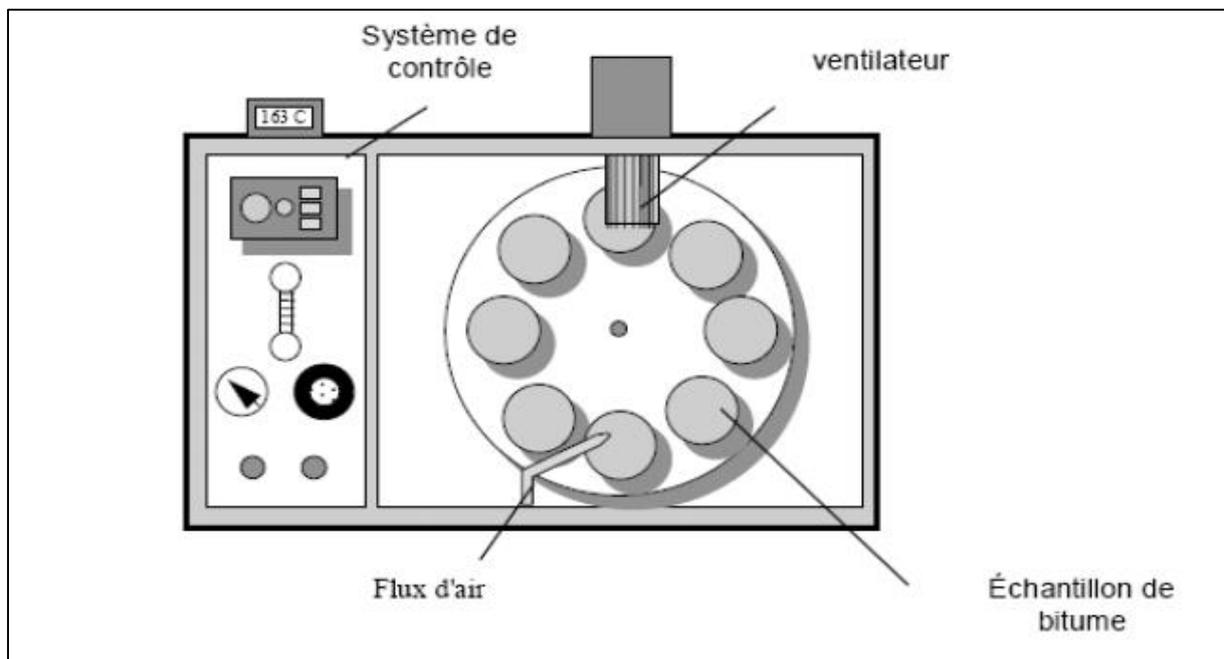


Figure 3.6. L'essai RTFOT [72]

▪ Essai de fragilité FRAASS

La température de fragilité FRAASS correspond à la température à laquelle un film mince de bitume rompt sous l'effet d'une flexion, dans des conditions opératoires de fabrication et d'essai bien définies. Cet essai empirique donne une indication sur les propriétés à froid d'un bitume. Ramond et Such (1990) précisent que, par expérience, on sait que la zone critique où se présentent les phénomènes de fissuration correspond à des liants bitumineux dont :

- La pénétration est inférieure à 1/10 mm,
- La température de ramollissement est supérieure à 70°C,

- La température de fragilité FRAASS est supérieure à 0°C

- **Densité relative - méthode au pycnomètre –**

Cet essai consiste à déterminer la densité et gravité spécifique dans les bitumes et liants bitumineux semi solides, à l'aide d'un pycnomètre.

On pèse un pycnomètre de 24 à 30 ml rempli d'eau distillée à 25°C et maintenu dans un bain d'eau à cette température.

On remplit ensuite le pycnomètre de bitume à 25°C et on calcule le rapport de sa masse à celle de l'eau.

3.1.2. Essais d'identification des agrégats

3.1.2.1. Essais de Fabrication

Les caractéristiques de fabrication sont des propriétés liées aux conditions d'exploitation et au processus d'élaboration des matériaux telles que la granulométrie, la forme et l'angularité des particules. Elles doivent faire l'objet d'un contrôle rigoureux car elles influent directement sur les performances de l'enrobé.

Une des principales caractéristiques de fabrication des granulats reste leur forme. Elle est évaluée selon la méthode d'essai « Détermination du pourcentage de particules plates et de particules allongées ». Les granulats résistent très bien aux contraintes de compression mais beaucoup plus difficilement aux contraintes de flexion engendrées lors du malaxage en centrale, lors du compactage sur chantier et finalement par le trafic pendant toute la durée de vie de l'enrobé. A cet effet, on limite au maximum la quantité de particules plates. Par contre, un contenu élevé en granulats cubiques, fracturés et avec une texture de surface rugueuse offre un meilleur support que des granulats arrondis et lisses [73].

La stabilité des enrobés exige que les granulats soient propres. En effet, la présence de particules fines adhérant aux gros granulats entraîne un lien bitume-granulats déficient, ce qui peut entraîner à un désenrobage des granulats. Pour les gros granulats, l'essai dit de propreté superficielle est utilisé pour mesurer le pourcentage d'éléments fins subsistant après lavage. Pour les sables, l'essai d'équivalent de sable renseignant sur la qualité du sable (propre, argileux, légèrement argileux) [74].

Chaque granulats est défini selon sa plus petite dimension d , sa plus grande dimension D et selon une distribution précise entre ces deux limites.

Selon l'efficacité des installations de concassage, l'homogénéité des produits, cette norme introduit cinq dimensions de tamis: $1,6D$ (deux tamis au-dessus de la plus grande dimension D), D (la plus grande dimension de la classe), $(d+D)/2$ (le tamis intermédiaire entre celui de d et celui de D), d (la plus petite dimension), et $0,6d$ (deux tamis au-dessous de la plus petite dimension d) [75].

▪ Echantillonnage des granulats

L'échantillonnage des granulats consiste à sélectionner une quantité réduite de matériau, censée représenter l'ensemble du matériau de façon aussi fiable que possible [76].

Lorsqu'on n'applique pas les méthodes d'échantillonnage, les caractéristiques des granulats utilisés dans la formulation des enrobés bitumineux s'écartent nécessairement de celles représentatives du lot de production, quantité de matière fabriquée selon les conditions uniformes. En effet, ces produits granulaires non liés sont très sensibles à la ségrégation.



Figure 3. 8. Echantillonneur granulats [76]

▪ Analyse granulométrique

Les courbes granulométriques des différents granulats peuvent être déterminées par l'essai de l'analyse granulométrique (NF EN ISO 17892-4) [77]. L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas (Figure 3.9). Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamis sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.



Figure 3.9 : Matériel de l'essai granulométrique [77]

▪ **Propreté des granulats NFP 18-591**

La norme prohibe les impuretés telles que le charbon, les scories, les déchets de bois, brindilles, feuilles mortes, débris végétaux ...etc. dont le pourcentage doit être inférieur à 2%. De même les granulats ne doivent pas contenir d'hydrocarbures, d'huiles végétales ou de matières organiques.

Pour la propreté des granulats, il convient d'éviter surtout la présence de la gangue argileuse ou des poussières qui risque de compromettre l'adhérence du liant sur les graviers.

Dans le cas de cailloux et de gravillons, la propreté est mise en valeur par le pourcentage de passant au tamis de 0.5 mm (tamisage effectué sous l'eau) [78].

Dans la cas des granulats concassés, lorsque la valeur du passant à 0.5mm est supérieure à 2%, il est nécessaire d'effectuer un essai complémentaire, appelé essai au bleu de méthylène.

On prend dans un récipient, une quantité de gravier, on la dessèche et on la pèse soit P_1 , puis on lave à grande eau, et on dessèche à nouveau, et on pèse soit P_2

La masse des impuretés est donc : $P = P_1 - P_2$

Soit un pourcentage de $P = \frac{P_1 - P_2}{P_1}$

▪ Equivalent de sable

L'essai d'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100 de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse sédimentée.

L'essai consiste à faire flocculer les éléments fins d'un sable mis en suspension dans une solution lavant puis, après un temps de mise au repos donné, à mesurer la hauteur des éléments sédimentés. Il est effectué sur la fraction du sable passant au tamis à mailles carrées de 5mm [79].

Procédure de l'essai

La procédure d'essai est la suivante :

- La solution lavante ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère, verse soigneusement le sable à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement.
- Frapper fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon ;
- Laisser reposer dix minutes ; boucher l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis la fixer sur la machine d'agitation ; lui faire subir 90 cycles \pm 1 cycle en 30 s \pm 1 s ; remettre l'éprouvette en position verticale sur la table d'essais ; ôter le bouchon de caoutchouc et le rincer avec la solution lavant ; laisser reposer pendant 20 min \pm 10 s ; mesurer la hauteur h_1 du sable sédimenté au fond de l'éprouvette ; mesurer également la hauteur totale h_2 (sable sédimenté + floculat).

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est de $ES = \frac{h_1}{h_2} 100$

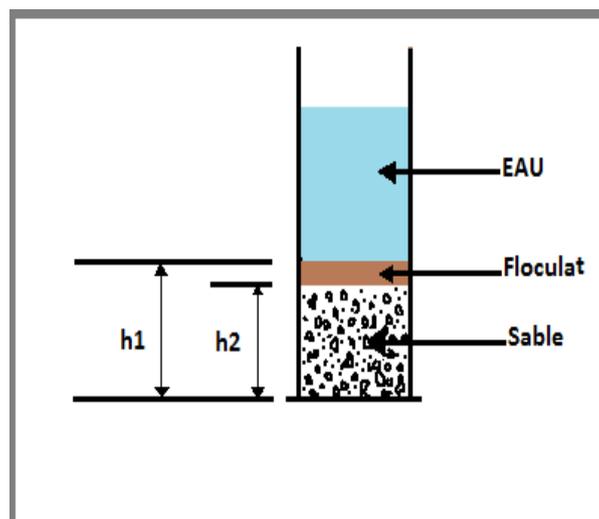


Figure 3. 10. Schéma de principe de l'équivalent de sable [79].

Tableau 3.1. Spécifications d'équivalent de sable [79].

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
$ES < 65\%$	$ES < 60\%$	Sable argileux
$65\% < ES < 75\%$	$60\% < ES < 70\%$	Sable légèrement argileux
$75\% < ES < 85\%$	$70\% < ES < 80\%$	Sable propre à faible proportion de fines argileuses
$ES < 85\%$	$ES < 80\%$	Sable très propre. L'absence totale de fines argileuses

- **Coefficient d'aplatissement**

La réalisation des corps de chaussées et des couches de roulement, nécessite de n'utiliser que des granulats ayant une forme assez ramassée, à l'exclusion des granulats plats. En effet, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes [80].

Procédure de l'essai

L'essai consiste en un double tamisage :

Peser et éliminer tous les grains de la fraction inférieure à 4 mm et supérieure à 80 mm;

Peser et retenir séparément tous les grains de fraction d_i/D_i comprise entre 4 mm et 80 mm ;

Tamiser chaque classe granulaires d_i/D_i à l'aide d'une grille à fentes parallèles d'écartement

$E = D_i/24$. Peser les passants à travers chaque fente (Figure 3.11).



Figure 3.11. Grille à Fonte [80].

Pour une classe granulaire d_i/D_i donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel

comme suit :
$$CA_i = \frac{100 m_i}{M_i}$$

Avec : $M_i = \sum R_i$ = somme des masses des classes granulaires d_i/D_i

m_i = masse passant à travers le tamis à fente d'écartement $E = D_i/2$

Le coefficient d'aplatissement global **CA** s'exprime en intégrant les valeurs partielles déterminées sur chaque classe granulaire :

$$CA = 100 \times \sum m_i / \sum M_i$$

- **Essai au bleu de méthylène (EN 933-9)**

L'essai au bleu de méthylène, ou « essai au bleu » est utilisé pour déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol.

L'essai consiste à déterminer la quantité de particules argileuses présentes dans l'échantillon.

Pour cela, on utilise du bleu de méthylène, substance adsorbée de préférence par les argiles.

L'essai consiste à mesurer la quantité de bleu de méthylène fixée par 100 g de la fraction granulaire de sol analysé.



Figure 3.12. Appareil au bleu de méthylène

Procédure d'essai

Tamiser l'échantillon à étudier au tamis 0.5 mm.

Prélever une masse de 30 gr.

Calculer la teneur en eau W de la prise d'essai.

Déduire la masse humide de l'échantillon par **[Masse Humide] = [Masse sèche] x (1 + [Teneur en eau])**

Verser un échantillon de 30 gr de sol sec dans le Bécher et ajouter avec de l'eau distillée jusqu'au trait de jauge de 200 ml. Agiter sans arrêt le mélange à l'aide d'un agitateur.

Ajouter 5 cm³ de bleu de méthylène dans le Bécher.

Prélever une goutte de mélange et la placer sur papier filtre.

Si la tache centrale est entourée d'une auréole bleu turquoise, le test est positif. Dans ce cas l'essai est terminé, les particules argileuses sont alors saturées en Bleu de Méthylène. On recommence l'essai à l'identique, cinq fois à un intervalle d'une minute pour le confirmer.

Si la tâche est entourée d'une auréole humide incolore, le test est négatif. Dans ce cas, on ajoute du bleu de méthylène par prises de 5cm³ jusqu'à ce que le teste soit positif. On répète l'essai à l'identique, cinq fois à un intervalle d'une minute pour le confirmer.

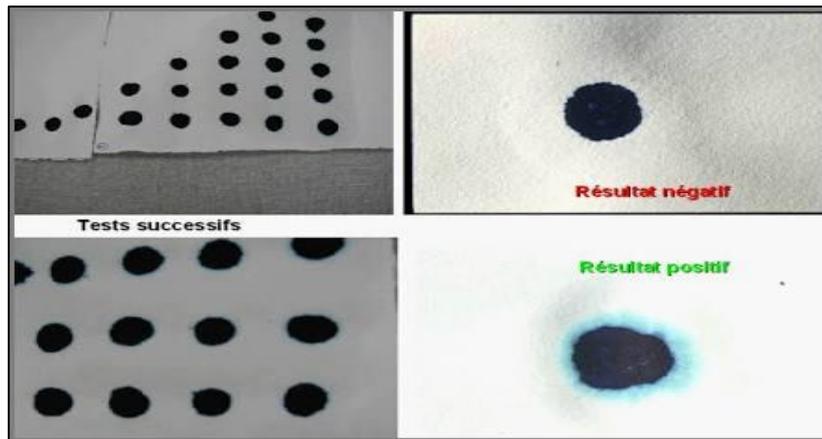


Figure 3.11. Essai de bleu méthylène

Calculer la valeur au bleu du sol (VBS) en appliquant la formule suivante :

$$VBS = \frac{B}{m_s} \times C \times 100$$

B : Masse de bleu introduite dans le bêcher (en gr)

M_s : Masse sèche de la prise d'essai (en gr)

C : Proportion de 0/5 mm soumis à l'essai dans la fraction 0/50 du matériau sec.

3.1.2.2. Essais Intrinsèques

▪ Essais de dureté Los Angeles

Le but de cet essai est de déterminer la résistance à l'abrasion (fragmentation par chocs plus usure par frottements réciproques) des granulats [81].

Principe

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles (Figure 3.12). La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.



Figure 3.13. La machine de l'essai Los Angeles [81].

Procédure d'essai

- Mise en place de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie suivant le tableau 3.2 :

Tableau 3.2 : Charge de boulets relatifs à la classe granulaire [81].

Classes granulaires (mm)	Fractions	Nombre de boulets	Poids totale de la charge (g)	Poids des fractions (g)
4 – 6.3		7	3080 ± 20	5000 ± 2
6.3 – 10		9	3960 ± 25	5000 ± 2
10 – 14		11	4840 ± 25	5000 ± 2
10 – 25	10 – 16	11	4840 ± 25	3000
	16 – 25	11	4840 ± 25	2000
16 – 31.5	16 – 25	12	5280 ± 25	2000
	25 – 31.5	12	5280 ± 25	3000
25 – 50	25 – 40	12	5280 ± 25	3000
	40 – 50	12	5280 ± 25	2000

- Remplacer le couvercle et serrer les boulons de fixation.
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 500 rotations à une vitesse régulière comprise entre 30 et 35 tr/mn pour toutes les classes à l'exception de la classe 25–50 mm où le nombre de rotations est de 1000.
- Enlever le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat.

- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm ;le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- Laver le refus à 1,6 mm dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle.
- Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant.
- Peser ce refus une fois séché, soit **P'** le résultat de la pesée.

$$p = P - P'$$

$$CLA = \frac{5000 - P'}{5000} \times 100$$

▪ Essais de l'usure (Micro Deval)

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat [82].

Le matériau évolue pendant l'essai par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive) à sec ou en présence d'eau.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi les classes granulaires suivantes: 4- 6.3mm; 6.3-10 mm; 10-14 mm; 25-50 mm (doivent contenir 60% de 25-40 mm).

Pour les essais effectués sur les gravillons entre 4 et 14 mm, une charge abrasive est utilisée.

Procédure d'essai

- Laver l'échantillon et le sécher à l'étuve à 105 °c jusqu'à poids constant (5 heures au minimum).

La prise d'essai sera de 500 ± 2 g pour les 4-14 mm et de 10kg ± 20 g pour les 25-50 mm.

- Mise en place de l'échantillon dans la machine ainsi que la charge de boulets relatifs à la classe granulaire choisie selon le tableau ci-dessous.

Tableau 3.3.Charge de boulets suivant le type de classe granulaire [82].

Classes granulaires (mm)	Poids échantillon (g)	Poids de la charge (g)
4 – 6.3	500 ± 2	2000 ± 5
6.3 – 10	500 ± 2	4000 ± 5
10 – 14	500 ± 2	5000 ± 5

- Remplacer le couvercle et serrer les boulons de fixation. S'assurer que les cylindres sont étanches pendant leur rotation.
- Mise en route de l'essai en faisant effectuer à la machine 12.000 rotations à une vitesse régulière de (100 tr/min) pour toutes les classes.

- Enlever le granulat après l'essai. Recueillir le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de granulat.
- Tamiser le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6mm ; le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- Laver le refus à 1,6 mm dans un bac, bien remuer à l'aide d'une truelle. Puis verser dans le bac perforé, égoutter et sécher à l'étuve jusqu'à poids constant.
- Peser ce refus une fois séché, soit m' le résultat de la pesée.

Le coefficient Micro-Deval est par définition égal au rapport : $m = M - m'$

$$CMD = \frac{m}{M} \times 100$$

M : masse de l'échantillon 500 ou 10.000 g selon la classe choisie,

m : masse du tamisât au tamis de 1,6 mm



Figure 3.14. Machine Micro Deval [82].

3.1.3. Essai de traction des polymères

L'essai de traction des polymères se fait par la machine de type Zwick/Roell [83], c'est une machine universelle récente d'utilisation facile et flexible. Grâce à sa compacité (longueur 1073 mm) et à son poids (moins de 40 Kg), on peut l'installer sur n'importe quelle table. La Zwick n'est pas seulement une machine universelle, c'est aussi un système d'essai modulaire. Elle contient une cellule de déplacement et une cellule de force, celle-ci est montée avec les amarrages supérieurs sur la traverse mobile (en forme de col de cygne) qui se déplace selon un guidage sans jeu.

Avec un extensomètre à grande course mécanique, elle permet de mesurer des déformations importantes sur les plastiques, caoutchoucs et élastomères, mousses, films et feuilles fines, dont la résistance est supérieure à 20 N. Le système robuste et insensible, est particulièrement adapté aux éprouvettes caoutchoucs et élastomère, susceptibles de s'enrouler autour des bras du palpeur après la rupture de l'éprouvette, leurs avantages sont :

- Robustesse et simplicité d'utilisation, spécialement développé pour les caoutchoucs et élastomères ;
- Mesure de la déformation jusqu'à rupture, reconnaissance automatique par prise intelligente ;
- Bras de palpeur interchangeable, mesures en enceintes thermiques et climatiques.

L'appareil Zwick peut être commandée manuellement grâce au perpète de commande manuelle ou par ordinateur (utilisation du logiciel TestXpert). Le Pc et le logiciel correspondant assurent le traitement des valeurs mesurées et le contrôle du déroulement des essais [16].

Etapes de l'essai

La méthode de traction nécessite les étapes suivantes qui sont:

- Il faut d'abord introduire les données relatives de l'éprouvette à tester dont ;
- Placer l'éprouvette dans la machine d'essai après avoir mesuré sa longueur L_0 ;
- Introduire les conditions de l'expérience (la vitesse de déformation ou la température d'essai) ;
- Démarrer la machine et la courbe s'affiche progressivement sur l'écran.



Figure 3.15. Eprouvette en position d'essai [83].

3.2. Formulation de l'enrobé

3.2.1 Méthodologie de formulation d'un enrobé

Le Principe de la formulation d'un enrobé bitumineux est basé sur :

- Le choix et l'appréciation de la qualité et la nature des constituants de l'enrobé (granulats, liants). Ce choix est fait d'après les conditions climatiques et la nature de la couche de chaussée ;
- Les pourcentages des granulats conformément aux spécifications granulométriques qui sont généralement des fuseaux de référence qui servent à fixer les proportions de granulats conduisant à une compacité maximale tout en conservant une proportion suffisante de vide dans l'enrobé pour permettre l'incorporation du liant ;
- Le choix de la teneur optimale en liant.

3.2.2. Méthode du L.C.P.C

La méthode utilisée consiste à partir d'un granulats entrant dans le fuseau recommandé, à choisir une teneur en liant fonction de la surface spécifique calculée du granulats, et à soumettre le mélange compacté à l'essai de compression simple, puis vérifier si le pourcentage des vides est convenable [84].

Il est important de réaliser des mélanges avec plusieurs teneurs en liant voisins de la teneur théorique choisie à partir de la surface spécifique.

- **Calcul de la surface spécifique du granulats:**

La surface spécifique du squelette minéral Σ est calculée conventionnellement par la formule:

$$\Sigma = (0,25G + 2,30 S_1 + 12 S_2 + 135f)/100$$

Il s'agit de la surface totale de tous les grains des matériaux y compris le filler d'apport contenu dans l'unité du poids, qu'il s'agit d'enrober.

G : Proportion en poids d'éléments supérieurs à 6 mm

S₁ : Proportion en poids d'éléments compris entre 0,315 et 6 mm

S₂: Proportion en poids d'éléments compris entre 0,08 et 0.315 mm

Σ : Surface spécifique du squelette granulaire en m² / kg

f : Proportion en poids d'éléments inférieurs à 0,08 mm (fillers)

▪ Teneur en liant hydrocarboné

Les teneurs en liant à partir desquelles s'effectueront les différents essais en laboratoire sont déterminées à partir de la formule suivante :

$$p = k \times \alpha \times \sqrt[5]{\Sigma}$$

Dans laquelle :

- P : représente en (%) la teneur en liant.
- K : est le module de richesse
- α : le coefficient correcteur $\alpha=2,65/\text{masse volumique du granulat}$.

Les valeurs de K généralement adoptées sont données dans le tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Valeurs du module de richesse [84].

Module de richesse	Béton bitumineux (BB)	Grave bitume (GB)
K₁	3,45	2,15
K₂	3,60	2,30
K₃	3,75	2,45
K₄	3.90	2.60

Son choix a une grande importance. Un module trop faible donne un enrobé friable, cassant et perméable. Ainsi qu'un module trop fort donne un excès de liant entraînant une chute importante du frottement interne, donc de la stabilité mécanique, ainsi qu'un ressuage.

3.4. Essais sur enrobés bitumineux

Les formulations de bétons bitumineux sont déterminées au moyen d'essais dans le laboratoire permettant d'évaluer le comportement des matériaux au compactage (Presse à cisaillement Giratoire PCG), d'apprécier leurs caractéristiques mécaniques (Presse à cisaillement giratoire, essais MARSHALL, essais LCPC –DURIEZ, essai de traction indirecte, essais de fatigue) et d'estimer leurs risques de déformations permanentes (essais d'orniérage, fluage statique) .

3.4.1. Essai Marshall (fluage et stabilité)

Le but de l'essai est la détermination de la teneur en vides, la stabilité et le fluage Marshall.

L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus définie, puis à les soumettre à un essai de compression simple [85].

▪ Préparation des éprouvettes

On doit disposer d'au moins 3 moules (101.1mm de diamètre et 63.5mm de hauteur) de compactage comportant chacun une base, un corps de moule, une hausse, deux pistons extracteurs, un bain thermostatique, une presse équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de l'essai.

La température de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur est de 160°C. Les moules sont portés à la température de préparation des éprouvettes.

La masse de prélèvement est de 1200g par moule.

Après avoir placé un disque de papier au fond de moule et mis en place la hausse, on introduit le mélange en une seule fois dans le moule.

Un disque est mis en place à la surface du mélange hydrocarboné.

La dame est maintenue perpendiculairement au moule. Le mélange est compacté en appliquant 50 à 75 coups de marteau de la dame (selon la norme). La durée de compactage ne doit pas excéder 3 minutes, Le moule est conservé 1h au moins à la température ambiante avant démoulage.

Le démoulage est effectué en faisant passer l'éprouvette du moule dans la hausse à l'aide d'un piston extracteur.

Après démoulage les éprouvettes sont numérotées puis pesées.

Les dimensions de l'éprouvette sont mesurées en 6 zones différentes pour la hauteur et 3 zones pour le diamètre.

▪ Ecrasement et expression des résultats

Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont d'abord immergées dans le bain à 60°C pendant 30 min, ensuite les éprouvettes seront placées dans les mâchoires d'écrasement. L'ensemble est porté entre les plateaux et soumis à l'essai de compression à l'aide d'une presse à vitesse de déformation constante de 50mm/min hors période transitoire (Figure 3.15), équipée d'un dispositif permettant de mesurer les paramètres suivants :

- Mesure de la stabilité Marshall : résistance maximale de l'éprouvette à la déformation (KN) ;
- Mesure du fluage Marshall : valeur de l'affaissement de l'éprouvette selon son

diamètre vertical au moment de la rupture (mm) ;

- Calcul du quotient Marshall : rapport S/F entre la stabilité S et le fluage F.



Figure 3.15 : Damme et presse Marshall [85].

3.4.2. Essai de la Presse à cisaillement Giratoire (PCG)

L'essai à la presse de cisaillement giratoire (PCG) est un essai de formulation [86].

La particularité de l'appareil réside dans le fait que l'échantillon n'est pas densifié par impact comme le cas de la méthode Marshall, mais plutôt sous l'action combinée d'un piston exerçant une pression fixée à 600 KPa et d'un moule cylindrique de 100 mm de diamètre incliné de 1.25 degré et décrivant un mouvement giratoire de 30 tr/min (Figures 3.16 et 3.17).

Le compactage est obtenu en effectuant le nombre de girations désiré.

La température de l'échantillon est ajustée en fonction du bitume utilisé.

Ce mode de compactage traduit la relation linéaire qui existe entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur de chantier et le nombre de girations.

Cette méthode peut être utilisée pour :

- La vérification de la maniabilité des enrobés ;
- La détermination du pourcentage de vides d'une éprouvette pour un nombre de girations donné ;
- La détermination d'une courbe de la masse volumique par rapport au nombre de girations ;

- La confection d'éprouvettes d'une hauteur donnée à une masse volumique prédéterminée, pour réaliser par la suite des essais de propriétés mécaniques.



Figure 3.16. Presse à cisaillement Giratoire (PCG) [86].

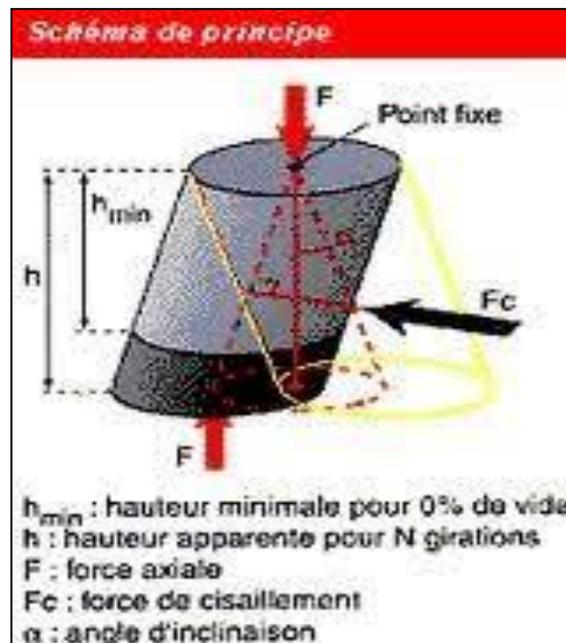


Figure 3.17 : Schéma représentant le principe de compactage à la PCG [86].

La compacité de PCG d'une formule de béton bitumineux est jugée satisfaisante si :

- La compacité à 10 girations est inférieure à 89%

- La compacité à 60 girations est comprise entre 92% et 96%

Le pourcentage de vides (%) en fonction du nombre de girations est calculé selon la formule :

$$(V\%)=100\left(\frac{h(ng)-h_{min}}{h(ng)}\right)$$

Avec :

(v%) : le pourcentage de vides.

$h(ng)$: la hauteur des éprouvettes après un nombre de giration (ng) en mm.

h_{min} la hauteur minimal de l'éprouvette compactée correspondent à un pourcentage de vides

3.4.3. Essai Duriez (Essai de compression simple type LCPC)

Cet essai a pour but de déterminer, pour un compactage donné, la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé de poids et de section déterminés. Il permet également de définir la tenue à l'eau de l'enrobé par le rapport des résistances à la compression après et avant immersion de l'éprouvette dans un bain d'eau thermostatique. L'essai peut être effectué aussi bien sur des enrobés fabriqués à froid par enrobage à l'émulsion de bitume, que sur des enrobés fabriqués à chaud ; les indications nécessaires à l'essai dans les deux cas sont données en parallèle [87].

Principe

Le mélange hydrocarboné est compacté dans un moule cylindrique par une pression statique à double effet. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à température (18 °C) et hygrométrie contrôlées, l'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression simple.

Préparation des éprouvettes

Le mélange hydrocarboné doit être fabriqué en une seule fois selon la norme EN 12697-12.

Les températures de référence de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur sont définies comme suit:

- Bitume 70/100: 140 °C ± 5°C
- Bitume 50/70: 150 °C ± 5°C
- Bitume 40/50: 160 °C ± 5°C
- Bitume 20/30: 180 °C ± 5°C

Remplissage des moules

Les prélèvements ont les masses suivantes:

1000g dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$

3500g dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D > 14\text{mm}$

Un piston est placé à la partie inférieure du moule

Le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule très légèrement enduit d'oléate de soude glycéro.

Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve dont la température à proximité est à la température de référence ; ils doivent y séjourner entre 1/2h et 2h.

Compactage des éprouvettes

Un piston est placé à la partie supérieure du moule.

Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet

Charges appliquées:

Pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14\text{mm}$: 60KN.

Pour les mélanges hydrocarbonés de $D > 14\text{mm}$: 180KN.

La charge doit être atteinte entre 5s et 60s maximum.

Les éprouvettes sont conservées dans leur moule au minimum 4h jusqu'à retour à la température ambiante, puis elles sont démoulées.



Figure 3.18 : Dispositif de l'essai Duriez [87].

3.4.4. Essai du module de rigidité

Cet essai est destiné à la caractérisation du comportement mécanique de l'enrobé. Il permet en particulier de déterminer un module de rigidité en traction indirecte et d'avoir une estimation de la durée de vie en fatigue [88]. La méthode est applicable aux éprouvettes cylindriques fabriquées en laboratoire ou prélevées dans une couche de chaussée de divers diamètres et épaisseurs.

Il consiste à soumettre des éprouvettes cylindriques d'enrobé d'épaisseur comprise entre 30 mm et 75 mm et un diamètre nominal de 80 mm, 100 mm, 120 mm, 150 mm ou 200 mm, à une contrainte de traction indirecte pour différents niveaux de déformation et différents temps de chargement dans une gamme de températures allant de -10 à +30° C.

Le module de rigidité est calculé suivant la Formule :

$$ITSM = \frac{F(v+0.27)}{z.h}$$

ITSM : Module de rigidité en traction indirecte

F : Valeur maximale de la charge verticale appliquée en Newton (N)

v : Coefficient de poisson.

z : Amplitude de la déformation horizontale au cours de cycle de charge (mm).

h : Hauteur moyenne de l'éprouvette cylindrique (mm)

L'éprouvette doit être placée dans un environnement à température contrôlée et suivie jusqu'à ce qu'elle atteigne la température d'essai. La température de l'éprouvette doit être déterminée en plaçant une éprouvette factice, équipée de thermocouples ou de capteurs avec résistance en platine à la surface et au centre, à proximité de l'éprouvette. La température de l'éprouvette factice doit être surveillée jusqu'à ce que les mesures indiquent que l'éprouvette a atteint la température d'essai et l'écart de température entre l'extérieur et le centre ne dépasse pas 0,4 °C.

La moyenne de ces températures doit être notée en tant que température réelle de l'éprouvette. L'éprouvette est ensuite placée au point d'essai, et l'essai est effectué. Pour s'assurer que la température est correcte au point d'essai, une seconde éprouvette factice, nominalement identique à celle décrite ci-dessus, doit être maintenue à proximité du point d'essai. Les

températures de chaque thermocouple ou capteur avec résistance en platine doivent être enregistrées avec une exactitude de 0,1 °C.



Figure 3.19. Dispositif d'essai (Nottingham University) [88].

3.4.5 Essai d'orniérage

La présente norme [89] décrit les procédures à suivre pour déterminer le comportement en déformation des matériaux bitumineux soumis à des charges roulantes. Cet essai s'applique aux mélanges dont les plus grandes dimensions granulaires sont inférieures ou égales à 32 mm. Ces procédures peuvent être effectuées sur des éprouvettes qui ont été fabriquées en laboratoire ou prélevées sur une chaussée ; les éprouvettes sont placées dans un moule, leur surface affleurant la partie supérieure du moule.

Cet essai est très important pour les routes fréquentées et avec un pourcentage de poids lourds assez élevé, il permettra de simuler au laboratoire la résistance de l'enrobé à l'orniérage.

L'essai consiste à confectionner une plaque de 5 ou 10 cm d'épaisseur, 50 cm de longueur et 18 cm de largeur, qu'on soumet à une énergie de compactage normalisée 0.6 MPa à 60°C, Pour compacter la plaque, plusieurs cycles sont appliqués (1000, 3000, 10 000, 30 000, 100 000 cycles).



Figure 3.20. Essai d'orniérage [89]

3.4.6 Fluage statique

L'essai de fluage statique uni axial est adopté et mis en pratique dans plusieurs entreprises et laboratoires dans le monde. Cet essai simple est utilisé pour la vérification des résultats de l'essai Marshall. Cette vérification est nécessaire pour évaluer la résistance d'un béton bitumineux à la déformation viscoplastique car cette méthode s'est révélée insuffisante.

La déformation permanente est considérée comme étant la première cause générant des dégâts aux enrobés bitumineux à chaud.

Compte tenu de leurs caractéristiques dues à la nature thermoplastique du liant, le comportement des mélanges hydrocarbonés est influencé par les conditions d'environnement : régime de pluies, température. Notons que les mélanges Bitumineux sont des corps noirs qui absorbent de la chaleur.

▪ Définition

Le fluage est la variation de la déformation d'un matériau statiquement sollicité en fonction du temps. Il comprend des déformations visqueuses, des déformations élastique retardées et des déformations plastiques

L'étude du fluage consiste donc à établir la fonction usuelle $\varepsilon = f(t)$ qui décrit la courbe expérimentale du fluage.

▪ Description de l'appareil de fluage

L'essai se passe très souvent dans le milieu fermé avec régulation de la température et de l'humidité. Les contraintes pour l'essai de fluage peuvent être 20, 25, 50, 60 et 80% de la force de rupture de l'échantillon. La mesure de la déformation se fait après 2h (1h de chargement, et une autre de déchargement).

Cet appareil permet de mesurer la déformation de fluage statique sous une contrainte et température constantes qui été réalisé en 2001 par METICHE Maitre de Conférence à l'Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENE.

Nous disposons d'un bac a eau fabriqué en métal galvaniser fixé sur le plateau inférieur de cet appareil, ce dernier est relié grâce à une tuyauterie spéciale, à un bain marie muni d'une pompe hydraulique haute pression .le bain marie, la pompe hydraulique et le bac à eau forment tous les trois un circuit fermé pour l'eau qui conserve une hauteur et une température constante dans le bac pendant l'essai.

L'éprouvette est chargée au moyen d'un système de leviers .La charge se transmet à l'éprouvette grâce à un vérin à vis incorporé au portique de chargement.

L'une des extrémités de ce vérin a la forme d'une demi sphère destinée à épouser un évidement à la surface d'un disque posé sur une plaque métallique perforée au-dessus de l'éprouvette .

L'autre extrémité actionne la tige d'un comparateur et permet la mise à zéro de ce dernier.



Figure 3.21. Dispositif d'essai de fluage statique.

Pour éviter que l'échantillon ne bouge pendant que les poids sont mis en place, un autre vérin à vis est incorporé à la base de la machine pour supporter temporairement le levier. Un dispositif spécial de mise en charge permet de bien fixer le début de l'expérience.

Deux plaques métalliques perforées et rainurées assurent la répartition de la charge appliquée sur toute la surface de l'éprouvette, et le passage de l'eau thermo statée vers les surfaces chargées.

Le déplacement relatif des deux plaques en cours de l'essai est indiqué par un comparateur situé dans l'axe de l'éprouvette.

La relation qui permet de déterminer la contrainte appliquée sur l'éprouvette en fonction de la masse utilisée et la surface chargée de l'éprouvette est :

$$\sigma = \frac{113.33 M}{S}$$

Avec :

σ : contrainte de compression appliquée sur l'éprouvette.

M : masse utilisée.

S : surface chargée de l'éprouvette.

Cette machine est reliée à un ordinateur équipé d'un logiciel qui relève les valeurs transmises par le comparateur dans un fichier Excel.

▪ **Recommandations de l'essai de fluage**

- Avoir des faces planes et parallèles.
- Mesurer l'épaisseur de l'éprouvette au début de l'essai.
- S'assurer que la force appliquée est répartie de façon homogène sur toute la surface de contact.
- L'écart maximum d'épaisseur, suivant plusieurs génératrices, doit être de l'ordre de 0.1 mm.
- Les éprouvettes doivent être cylindriques avec un diamètre compris entre 100 mm et 200 mm.
- La dispersion des résultats est moindre avec des éprouvettes cylindriques qu'avec des éprouvettes ayant d'autres formes.
- Les dimensions de l'éprouvette doivent être choisies en fonction de la taille des granulats.

▪ Conditions particulières de l'essai

Les conditions particulières de l'essai sont établies selon la norme anglaise BS 598 Part 111 : 1995(BSI1995),

L'enregistrement de la déformation initiale après 15s de chargement avait été choisi arbitrairement.

Mélange testé : béton bitumineux 0/14

Température de l'essai 20°C et 60°C

Contrainte de compression appliquée : 0.14MPa

Type d'éprouvettes utilisées : éprouvettes Marshall compactées à 50 coups par face

Ecart maximum d'épaisseur toléré suivant plusieurs génératrices : 0.1 mm

Temps de conditionnement des éprouvettes : 4heures

Intervalles des lectures : chaque 15 secondes pendant la première minute, puis chaque minute pendant les 10 minutes, puis chaque 10 minute jusqu'à 1 heure.

Temps de chargement ; 1h

Temps de déchargement : 1 h

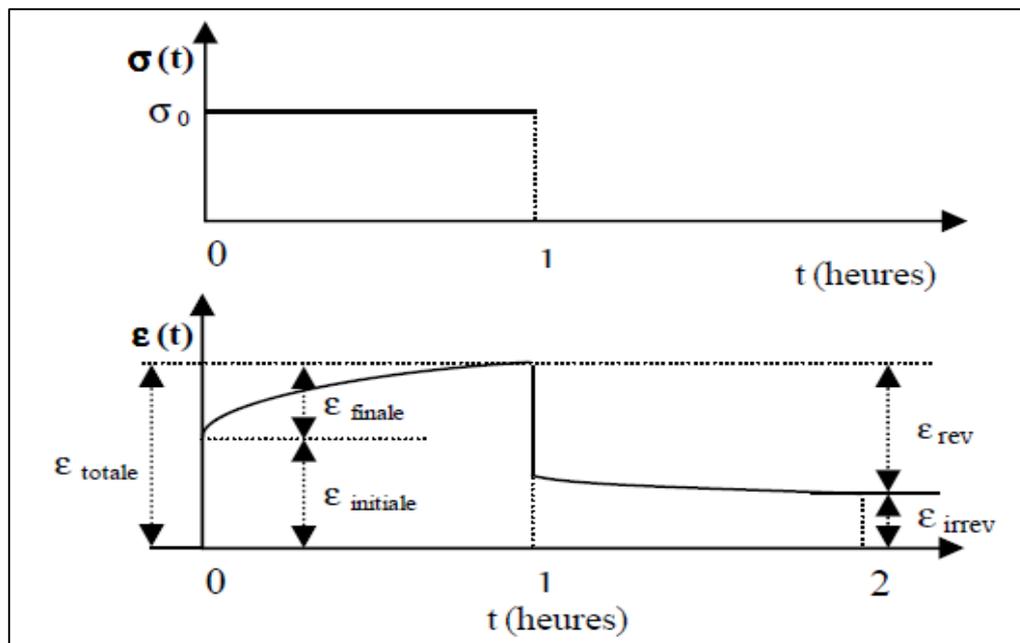


Figure 3.22. Contrainte appliquée et les Déformations mesurées.

Après avoir conservé les échantillons à la température d'essai, on place l'éprouvette entre les deux plaques métalliques dans le bain-marie [90] porté préalablement à la même température, et on fait de telle sorte qu'elle soit totalement immergée. On applique une

contrainte de compression σ_0 pendant 1h de chargement et on mesure la déformation axiale. On décharge ensuite l'éprouvette tout en mesurant le retour des déformations.

- **Différentes déformations mesurées durant l'essai**

La contrainte appliquée, ainsi que les composantes de la déformation mesurées durant l'essai sont représentées par la figure 3.22 :

ϵ_{total} : Déformation totale enregistrée après 1h de chargement.

$\epsilon_{initial}$: Déformation initiale enregistrée après 15s de chargement.

ϵ_{final} : Déformation finale complémentaire.

ϵ_{irre} : Déformation irréversible ou permanente.

ϵ_{rev} : Déformation réversible.

σ_0 : Contrainte de compression appliquée sur l'éprouvette.

- Les déformations durant l'essai sont calculées par

$$\epsilon(t, T) = \frac{\Delta h}{H_0} * 1000(\%)$$

Avec :

$\epsilon(t, T)$: Déformation axiale de l'éprouvette durant le temps de chargement (t) en secondes à la température (T) en °C

H_0 : Hauteur initiale de l'éprouvette

Δh : Déformation axiale (changement de distance entre les surfaces chargées)

- Le module de rigidité en fluage statique est calculé par :

$$S_M = \frac{\sigma_0}{\epsilon(t, T)} (MPa)$$

Avec :

$S_M(t, T)$: Module de rigidité du mélange sous charge statique durant le temps de chargement (t) en secondes à la température (T) en °C

σ_0 : contrainte de compression appliquée

- Pour distinguer une différence entre les mélanges, le quotient de la déformation réversible après 1h de déchargement [90] (valeur de recouvrement visco-élastique) a été calculé :

$$RVE = \frac{\varepsilon_{rev} \text{ après 1h de déchargement}}{\varepsilon_{tot} \text{ après 1h de chargement}} \times 100 \text{ [%]}$$

RVE : Recouvrement visco-elastique

- Le sens de la déformation initiale et de la déformation finale pour la résistance aux déformations permanentes peut être clairement apprécié si ces deux déformations sont comparées à la déformation totale.

3.4.7. Mesure de déformations par corrélation d'images

- **Principe de la corrélation d'images numériques**

Parmi les techniques de mesure de déplacements ou de déformations actuelles, celles basées sur l'analyse d'images numériques font partie des plus intéressantes méthodes à mettre en œuvre [91-92]. Contrairement à d'autres méthodes qui nécessitent une préparation spécifique et qui sont quelques fois minutieuses (les jauges de déformations), celle-ci a uniquement besoin d'une caméra de très bonne résolution, reliée à un ordinateur afin de pouvoir acquérir et traiter les prises de vues réalisées. En outre, elle permet de visualiser non seulement des champs de déplacement, mais aussi, par extrapolation, des champs de vitesse et par dérivation numérique le champ de déformation.

- **Le dispositif de mesure**

Le dispositif expérimental est constitué d'un appareil photo numérique pointant sur la zone à observer, avec une résolution suffisante pour une utilisation standard. Le fait d'utiliser une caméra munie d'un objectif permet de s'adapter aussi bien à des études à l'échelle microscopique qu'à l'échelle macroscopique.

Il faut bien évidemment un éclairage, artificiel ou non, réglé de façon à ce que la caméra ait la meilleure image possible. Sous cette réserve, les deux seules limitations actuelles sont :

- L'obligation d'observer des surfaces planes (ou presque planes),
- Et l'impossibilité d'avoir des informations sur les déformations sous la surface, et donc

au cœur de la matière.

▪ **Description de la méthode**

Nous pouvons remarquer que la texture de la surface des éprouvettes n'est pas uniforme. Cette texture est à la base du fonctionnement de cette méthode de corrélation d'images ; plus cette texture est aléatoire, plus la méthode est performante. Afin d'obtenir cet état, il faut quelquefois pulvériser un mouchetis de peinture sur la surface de l'éprouvette ; cependant, la texture réelle de la surface observée peut être suffisante.

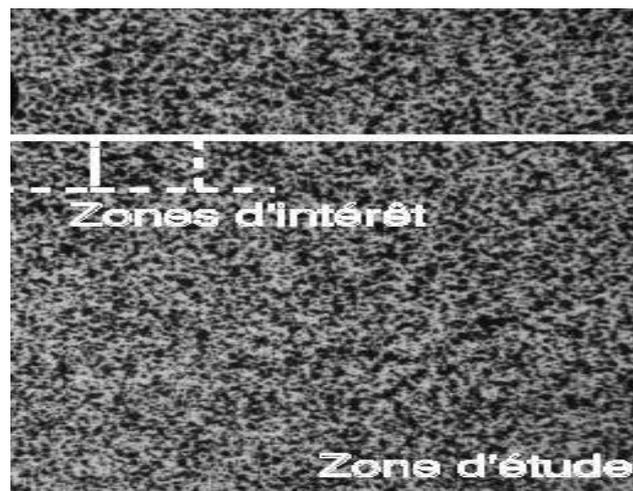


Figure 3.23. Type de mouchetis aléatoire illustré au niveau de la zone d'étude

La surface de l'éprouvette observée par la caméra est rectangulaire ; ses dimensions sont maintenant comptées en pixels. La caméra effectue deux prises de vue, une première considérée comme image de référence, une seconde considérée comme image déformée. La détermination du champ de déplacement est effectuée en trois étapes :

1. Définir la zone d'étude qui n'est pas nécessairement toute l'image acquise ;
2. Découper la zone d'étude en "zones d'intérêt" (ou imageries) plus petites,
3. Corréler les imageries.

Pour la troisième étape, la méthode tente de retrouver la position du motif qui ressemble le plus à chaque imagerie de référence sur l'image déformée. Cette étape est la plus délicate à traiter. Pour obtenir de bons résultats, il faut que la surface soit le moins uniforme possible, et que les déformations restent petites.

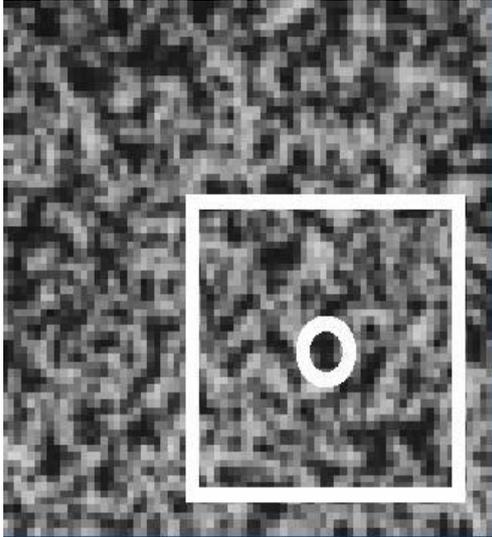


Figure 3.24. Image de référence

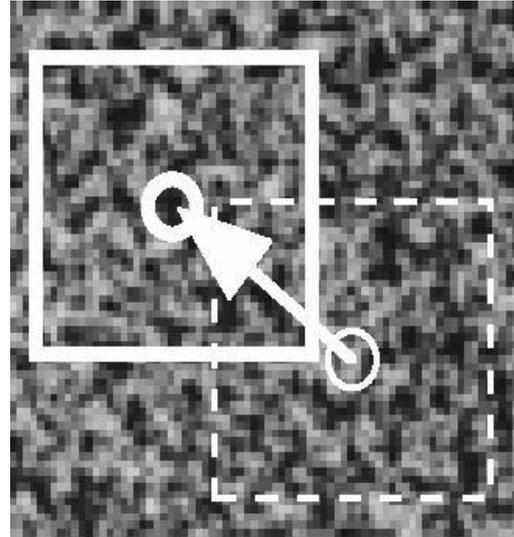


Figure 3.25. Image déformée

La technique mathématique utilisée pour identifier le déplacement de chaque imagerie s'appelle la corrélation ; son fonctionnement peut être consulté sur la ressource « algorithme de calcul de corrélation de deux images ». A l'issue de cette étape, on obtient un champ de déplacement en surface de l'éprouvette. Chaque vecteur déplacement correspond au résultat de corrélation d'une zone d'intérêt.

Conclusion :

Après avoir donné les différents essais à réaliser pour optimiser la quantité de chaque composant entrant dans la formulation d'un enrobé bitumineux et les caractéristiques obtenues par chaque essai ainsi que les valeurs limites, nous allons passer à la partie de caractérisation des matériaux utilisés dans cette étude.

CHAPITRE 4 :

CARACTÉRISTIQUES DES MATÉRIAUX

Ce chapitre comporte les différents essais d'identification des matériaux entrant dans la composition de l'enrobé à savoir : le bitume, le sable, le gravier et la poudrette de caoutchouc. Il comporte aussi la méthode de formulation pour le choix du mélange optimal.

4.1 Bitume

Le bitume utilisé dans notre étude provient de la centrale d'enrobage de l'EVSM à Réghaia.

Les analyses que nous avons effectuées sur ce bitume sont :

- Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C ;
- Point de ramollissement billes et anneaux ;
- Ductilité;
- Détermination des points d'éclair et de feu;
- Détermination de la densité relative des produits bitumineux;
- Détermination des pertes de masse au chauffage.

4.1.1 Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C

L'essai de pénétrabilité est une mesure empirique de la consistance de bitume, elle sert à le classer (figure.4.1).



Figure.4.1. Essai de pénétrabilité.

4.1.2 Point de ramollissement billes et anneaux

Le point de ramollissement représente la température à laquelle le bitume commence à devenir fluide (figure.4.2).



Figure .4.2. Essai Bille-Anneau

4.1.3 Essai de ductilité

L'essai de ductilité donne une idée sur les propriétés de traction des matériaux bitumineux.

4.1.4 Points d'éclair et de feu

Le point d'éclair de bitume indique la température à laquelle le matériau peut être chauffé en toute sécurité (figure.4.4).



Figure 4.3. Essai de ductilité



Figure 4.4. Point d'éclair et point de flamme

4.1.5 Perte de masse au chauffage



Figure 4.5. Perte de masse au chauffage

Après avoir effectué les essais disponibles aux laboratoires, les caractéristiques du bitume utilisé dans notre étude sont présentées dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Caractéristiques du bitume utilisé

Propriétés	Normes	Résultats	Spécifications
Pénétrabilité (25°C, 0.1mm)	NF EN 1426	43.66	40-50
Température bille et anneau(C°)	NF EN 1427	53.25	50-58
Ductilité (cm)	NA 5223	> 100	> 100
La densité(25°C)	NF EN 12591	1.039	1.00 à 1.10
Point d'éclair (C) °	EN ISO 2592	300	> 250 C°
Point de flamme(C) °	EN ISO 2592	320	> 250 C °
Perte de masse au chauffage (%)	NF EN 13303	0.041	< 0.5
Viellissement (IP)	EN 12607-1	-0.73	[-1,+1]

D'après les résultats obtenus, on peut conclure que le bitume utilisé dans notre étude est bien de classe 40/50 et répond aux spécifications exigées par les normes en vigueur.

4.2 Granulats

Les trois fractions utilisées dans notre étude sont le sable 0/3, le gravier de classe 3/8 et 8/15 provenant de la carrière de Kaddara wilaya de Boumerdes (figure.4.6).



Figure 4.6. Les différentes fractions de granulats

4.2.1 Caractérisation des granulats

4.2.1.1 Caractéristiques de fabrication des granulats

Pour identifier les caractéristiques de fabrication des granulats (provient de carrière de Kadara Wilya de Boumerdes), les essais cités ci-après ont été réalisés à savoir :

- Analyse granulométrique;
- Essai d'aplatissement;
- La propreté des granulats;
- Equivalent de sable;

a) Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle y compris aux granulats légers allant jusqu'à la dimension 63 mm à l'exclusion des fillers.

Les courbes granulométriques des trois fractions sont présentées dans la figure 4.7.

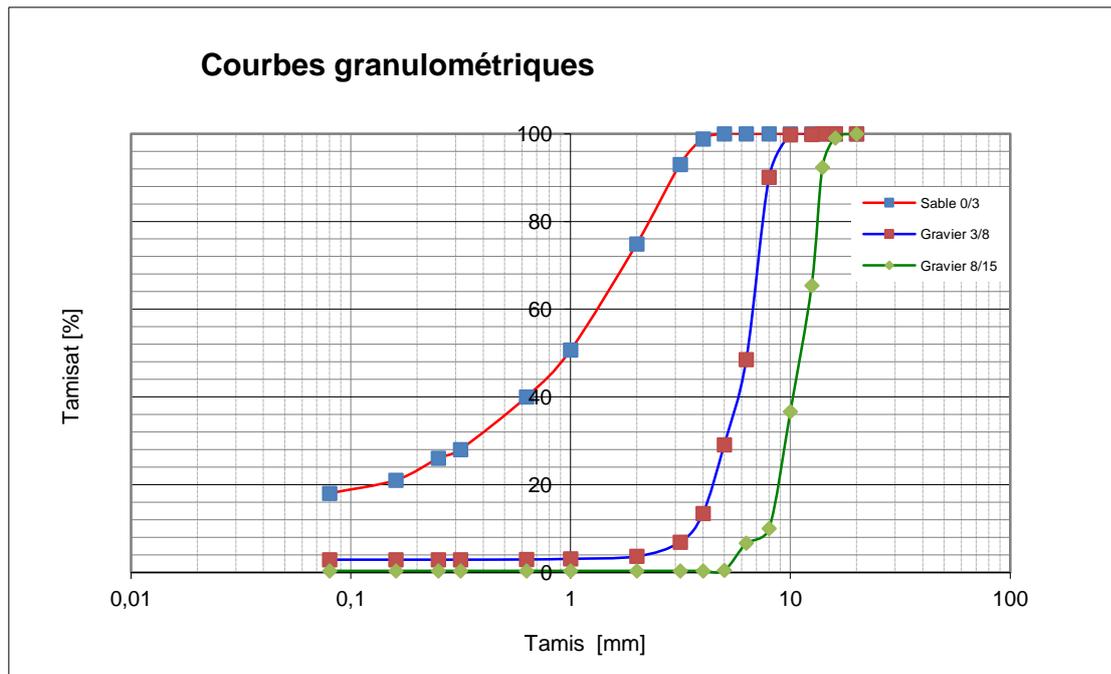


Figure 4.7. Courbes granulométriques des fractions granulaires.

D'après les résultats présentés sur la figure 4.7, on remarque que la fraction 0/3 présente un pourcentage en éléments fins de l'ordre de 18%. Ce pourcentage est acceptable pour avoir une courbe de mélange qui répond aux spécifications.

Coefficient d'aplatissement

Le but de l'essai est la détermination du taux d'éléments plats des fractions comprises entre 4 et 40mm. Avec un coefficient d'aplatissement dépassant les 30 % le matériau peut s'avérer peu adhérent lors de son utilisation en couche de roulement. Les résultats sont présentés dans le Tableau 4.2.

Tableau.4.2. Coefficients d'aplatissement des granulats

Fraction	Classe référentielle	Coefficient d'aplatissement (%)	Spécifications (%)
3/8	4-6.3	1.622	< 25
8/15	10-14	2.210	

Les résultats obtenus montrent que les granulats utilisés répondent aux spécifications exigées par la norme.

b) Propreté des granulats

A l'instar de ce qui se pratique pour les sables, les graviers doivent être propres avant leur utilisation dans la fabrication des bétons bitumineux. Vu ces classes granulaires qui sont relativement grossières, le principe de séparation des agrégats des éléments fins ne se fera pas par sédimentation mais par lavage. Le tableau 4.3 résume les résultats de cet essai.

Tableau.4.3. Résultat de l'essai de la propreté du gravier

Fraction	Valeurs	Spécification
3/8	2.96	$P \leq 2\%$ $PL > 150$
8/15	0.91	$P \leq 3\%$ $PL < 150$

D'après ces résultats, on peut dire que le gravier utilisé dans cette étude est propre.

c) Equivalent de sable

Cet essai consiste à déterminer le pourcentage des particules fines dans les éléments sableux.

Il est effectué sur la fraction du sable passant au tamis à mailles carrées de 5 mm.



Figure.4.8. Agitateur de l'équivalent de sable.



Figure.4.9. Essai de l'équivalent de sable.

Les résultats de cet essai sont présentés dans le tableau 4.4 :

Tableau.4.4. Résultats de l'essai d'équivalent de sable

Résultat (%)	Spécifications	
	PS	Nature et qualité du sable
56.95	ES < 60	Sable argileux
	$60 \leq ES \leq 70$	Sable légèrement argileux
	$70 \leq ES \leq 80$	Sable propre
	ES > 80	Sable très propre

Les résultats présentés sur le tableau 4.4, montre que le sable utilisé dans cette étude est argileux.

4.2.1.2 Caractéristiques intrinsèques des granulats

Les essais liés aux caractéristiques intrinsèques des granulats sont les suivants :

- La masse volumique réelle;
- La résistance à l'usure en présence d'eau : Essai micro-Deval;
- La résistance aux chocs : Essai LOS ANGELES.

a) La masse volumique réelle

Cet essai vise à déterminer la masse et le volume de la prise d'essai et à calculer sa masse volumique réelle (rapport masse/volume). Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 4.5.



Figure.4.10. Dispositif de la masse volumique

Tableau.4.5. Masse volumique réelle de différentes fractions granulaires.

Fraction	Masse volumique apparente (t/m^3)
0/3	2.65
3/8	2.68
8/15	2.7

b) L'essai d'usure Micro-Deval Humide

L'essai permet de déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Le matériau évolue pendant l'essai par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive) à sec ou en présence d'eau. Le tableau 4.6 résume les résultats obtenus par cet essai.



Figure.4.11. Dispositif de l'essai MDE

Tableau 4.6. Résultats d'essai Micro-Deval.

Fraction	Classe référentielle	Résultats	Spécifications	
			MDE < 13	Très bon
3/8	4/6.3	21.2	13 < MDE < 20	Bon à moyen
			20 < MDE < 25	Moyen à faible
8/15	6.3/10	16.6	MDE > 25	Médiocre

Les résultats de l'essai de MDE ont montré que la qualité pour l'attrition des fractions 3/8 est moyenne à faible par contre celle de la fraction 8/15 est bonne à moyenne.

c) Résistance aux chocs -Essai LOS ANGELES-

Cet essai permet d'estimer l'évolution de la granularité due à la fragmentation des éléments des granulats sous le choc des boulets métalliques dans la machine LOS ANGELES. Les résultats de cet essai sont présentés dans le tableau 4.7.

**Figure.4.12.** Dispositif de l'Essai Los Angeles.**Tableau 4.7.** Résultats d'essai LOS ANGELES.

Fraction	Classe	Résultats	Spécifications	
			LA < 15	Très bon
8/15	10/14	25.38	15 < LA < 20	Bon à moyen
			20 < LA < 30	Moyen à faible
			LA > 30	Médiocre

D'après les résultats obtenus, on remarque que la qualité pour la dureté de la fraction 8/15 est de « moyen à faible ».

4.2.1.3 Composition chimique de la roche

Pour identifier la nature des granulats utilisés dans notre étude, une analyse chimique sommaire a été effectuée. Les résultats obtenus par cet essai sont présentés dans le tableau 4.8.



Figure.4.13. Essais chimiques.

Tableau 4.8. Résultats de l'analyse chimique.

Fractions	0/3	3/8	8/15
SO4 (%)	0.6916	0.3343	0.5742
PH	7.71	7.90	8.09
Cl (%)	0.0017	0.0020	0.0031
Carbonate CaCO ₃ (%)	85	75	84

L'analyse chimique montre que la nature minéralogique des granulats utilisés est calcaire ; cela est dû au pourcentage élevé du carbonate **CaCO₃**. Par sa nature calcaire, il devrait présenter une bonne adhésivité avec le liant (bitume).

4.3 Polymère

Le polymère utilisé comme additif dans notre étude est une poudrette de caoutchouc issue du broyage des semelles de chaussures et tapis de véhicules fournie par la société Algérienne des élastomères SAEL d'Oued Smar. L'additif proposé, se présente sous forme de poudre et de filament de petite dimension (0,1 à 2mm).

4.3.1 Caractéristiques de l'additif

Afin de caractériser l'additif utilisé dans notre étude, plusieurs essais ont été faits à savoir :

- Une analyse des composants chimiques par la Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (FTIR) en utilisant Perkin-Elmer Spectrum One, 4000-400

cm⁻¹, résolution 2 cm⁻¹, 32 scanning ;

- Un microscope électronique à balayage (MEB) afin de déterminer la microstructure de la poudrette en utilisant JEOL JSM-6360 LV ;
- Au MEB équipé pour l'acquisition de spectres d'énergie dispersive (EDS : Energy Dispersive Spectroscopy) permettant la détermination de la composition chimique de La poudrette ;
- Essai de traction pour déterminer la raideur de la poudrette en utilisant l'appareil Zwick/Roell ;
- L'analyse thermique simultanée (TGA / DSC) afin de mesurer la variation de poids et de flux thermique ;

a) La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

L'analyse est effectuée en utilisant un spectromètre de marque Perkin-Elmer Spectrum One, avec une résolution de 2 cm⁻¹ et un balayage entre 400- 4000cm⁻¹.

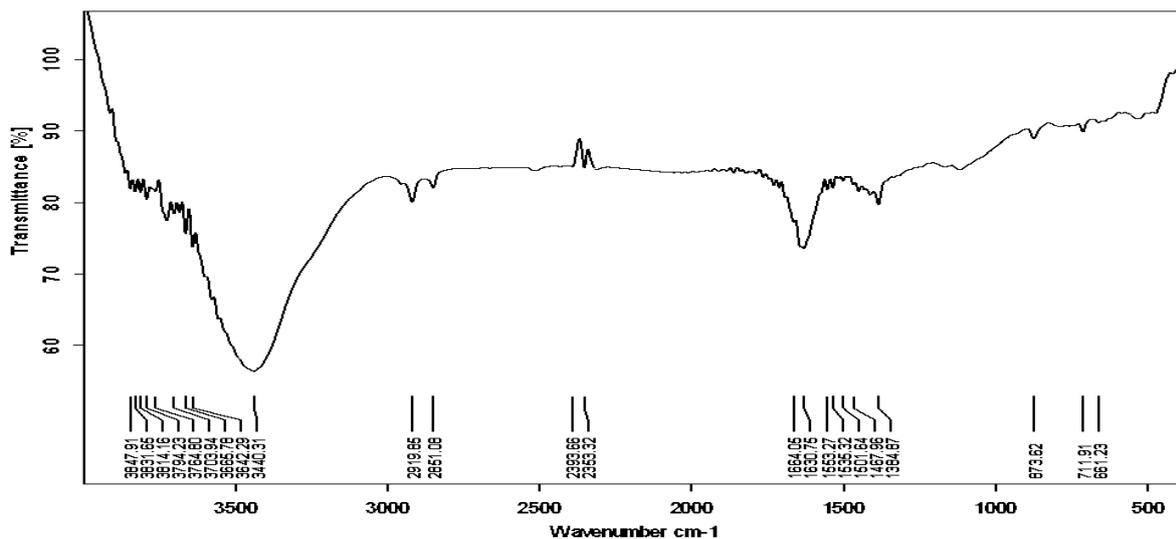


Figure.4.14. Spectre FTIR de la poudrette

L'analyse de la poudrette par le spectre FTIR montre des bandes d'absorption typiques du poly-butadiène (étirement du C-H à 2919 et 2852 cm⁻¹, torsion du -CH₂ à 1384 cm⁻¹ et une déformation plane à CH 867 cm⁻¹) et du polystyrène (étirement C-H aromatique à 3014 cm⁻¹, étirement C-C aromatique à 1631 cm⁻¹). Il existe également une absorption de flexion C-O-C à 1122 cm⁻¹ et enfin la bande détectée à 539 cm⁻¹ correspond au mode d'étirement de la liaison simple Z_n-O. Ces résultats confirment que l'échantillon analysé par FTIR est constitué de caoutchouc styrène-butadiène-styrène (SBS) compacté à l'oxyde de zinc.

b) Microstructure de la poudrette

Afin d'identifier la morphologie de la poudrette, une analyse de sa microstructure a été réalisée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB). Elle est représentée sur la figure 4.15.

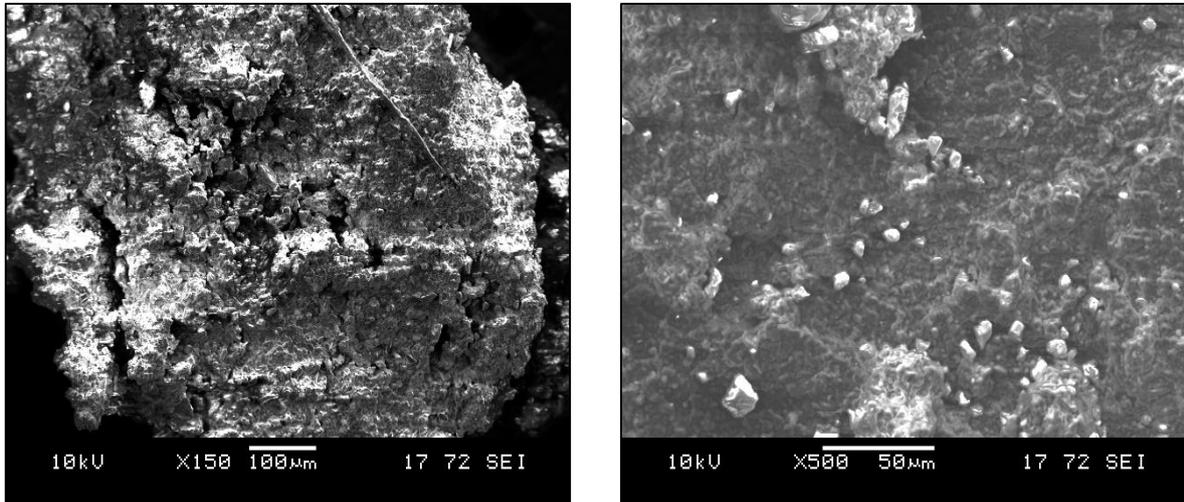


Figure.4.15. Microstructure de la poudrette (MEB)

Les résultats de cet essai montrent que ce matériau présente une structure hétérogène, la distribution des différents composants n'est pas uniforme et on remarque aussi une couleur grise reconnue pour les chaînes polymères de caoutchouc et une couleur blanche attribuée aux grains de Zinc.

c) Microanalyse de la poudrette

Afin d'identifier la composition chimique de la poudrette, une microanalyse a été effectuée. En effet l'analyse ponctuelle par EDS mesure la composition relative de la matière organique et des minéraux.

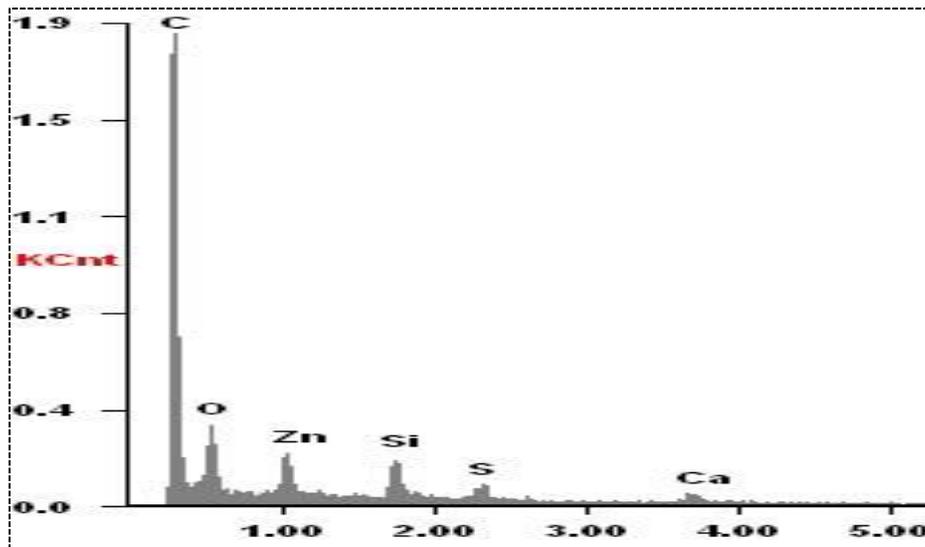


Figure.4.16. Microanalyse de de la poudre de carbone

Les résultats présentés dans la figure.4.16 montrent que la poudre est composée essentiellement de carbone et d'oxygène. D'autres éléments sont présents comme le silicium (Si), le sodium (Na) et le calcium (Ca) à de faibles teneurs.

d) Essai de traction

Pour déterminer la raideur du matériau, un essai de traction sur une éprouvette normalisée a été effectué à l'aide d'un appareillage de type Zwick/Roell sur six éprouvettes. Les résultats sont présentés sur la figure 4.17.

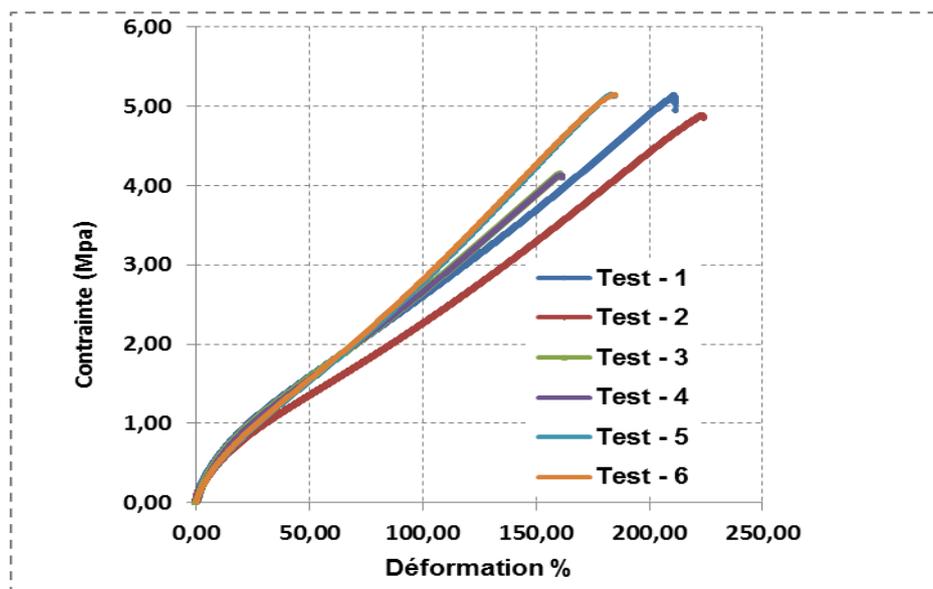


Figure.4.17: Essai de traction

On observe sur la figure 4.17 l'évolution de la contrainte de traction en fonction de la déformation pour différents essais réalisés sur le matériau. Il est clair qu'au début du chargement, un comportement non linéaire se manifeste par la suite un comportement linéaire s'installe. Ce dernier se caractérise par un module moyen de l'ordre de 2.85 Mpas. Les différents essais montrent la présence d'une variabilité dans l'essai de traction qui n'est pas négligeable. Cette dernière a un impact sur le module et peut être quantifiée par un écart type de l'ordre de 0.41 Mpa.

e) Analyse thermique TGA

Le résultat de l'essai de TGA réalisé sur la poudre utilisée dans le but dans le but d'améliorer les performances de l'enrobé est illustré sur la figure 4.18. Il est clair que lorsque la température de sollicitation est inférieure à 100°C la masse du matériau reste constante. Cependant, pour des températures comprises entre 100°C - et 250 °C une variation de l'ordre de 5 % est notée. Cela peut certainement s'expliquer par le phénomène de déshumidification de l'eau qui peut être emprisonnée dans la poudre. Egalement, un début de dégradation de la matière est observé par une chute brusque de la masse lorsque la température est supérieure à 250 °C. D'après ces résultats on peut conclure que la poudre utilisée présente un bon comportement vis-à-vis la température de service (160°C).

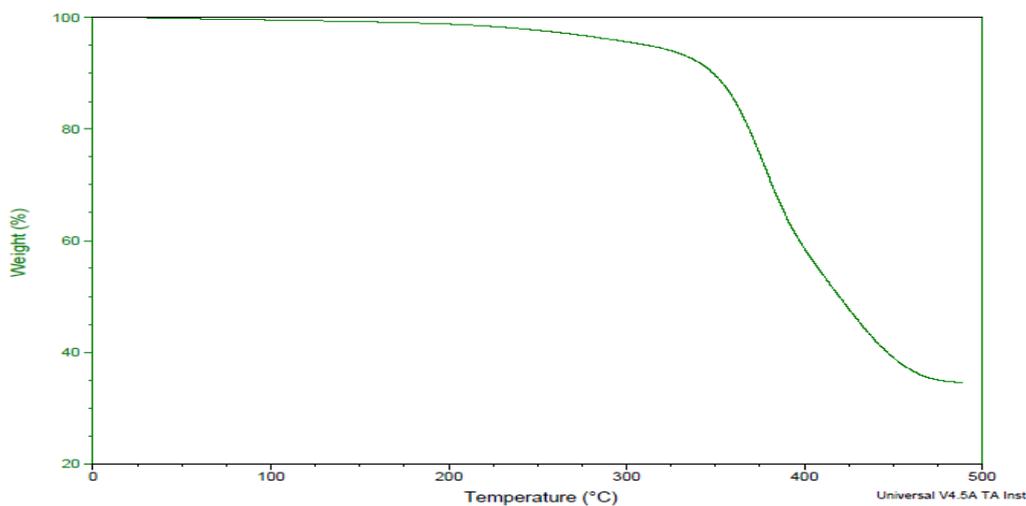


Figure 4.18. Evolution de la masse de la poudre en fonction de la température

Conclusion

Après avoir caractérisé l'ensemble des matériaux rentrant dans la composition de l'enrobé bitumineux, on procède au choix du mélange optimal ainsi que la détermination des performances mécaniques des enrobés modifiés.

CHAPITRE 5 :

ETUDE DE L'ENROBÉ MODIFIÉ

5.2.2 Détermination des teneurs en bitume

La détermination des teneurs en liant se fait conformément aux lois prescrites dans le chapitre 3. Les résultats obtenus sont présentés sur les tableaux 5.1 et 5.2.

Tableau 5.1. Surface spécifique du mélange.

G+S+s+f	$\sqrt[5]{\Sigma}$	α	$\Sigma(m^2/kg)$
100	1.61	0.990	11.08

Tableau 5.2. Les teneurs en liant

Module de richesse (k)	3.40	3.5	3.6
La teneur en liant (%)	5.45	5.76	5.93

5.2.3 Préparation du mélange et détermination de la teneur optimale en liant

Pour la préparation du mélange, les agrégats ont été chauffés à 160 °C puis placés dans un récipient et mélangés soigneusement ; le bitume de classe 40/50 chauffé à 160°C a été ajouté aux agrégats mélangés. L'ensemble sera mélangé jusqu'à ce que tous les agrégats soient recouverts, après il sera compacté selon la méthode d'essai utilisée.

La teneur en liant optimale est déterminée par la vérification de la maniabilité du mélange en utilisant l'essai à la presse de cisaillement giratoire (PCG), et la stabilité du mélange en vérifiant les propriétés Marshall. Les résultats de ces essais sont présentés dans la figure 5.2 et le tableau 5.3.

5.2.3.1 Essai à la presse de cisaillement giratoire PCG

Les résultats de la maniabilité des mélanges des trois teneurs en liant sont présentés sur la figure 5.2.

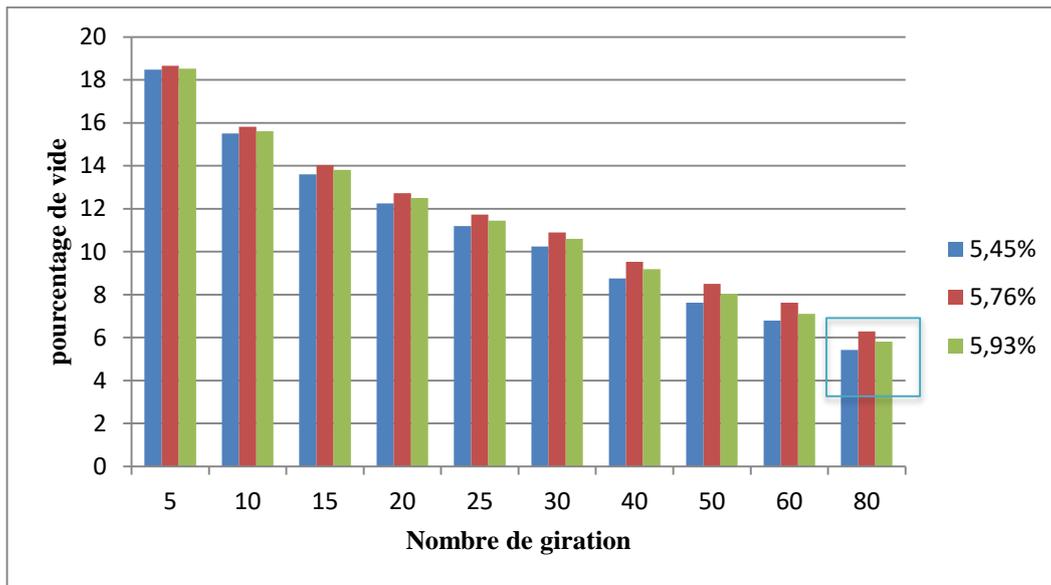


Figure 5.2. Pourcentage de vide pour chaque giration.

D'après les résultats présentés sur le graphe on remarque que les trois teneurs en liant répondent aux spécifications exigées par la norme telle que l'indice de vide est dans l'intervalle [4-9] à 80 girations.

5.2.3.2 Essai Marshall

Les propriétés Marshall obtenues par cet essai pour les trois teneurs en liant sont présentées sur le tableau 5.3.

Tableau 5.3. Résultats des Propriétés Marshall en fonction de la teneur en bitume

Teneur en bitume (%)	5.45	5.76	5.93
Densité apparente	2.30	2.35	2.38
Compacité (%)	93,11	95.52	97,14
Indice de vide	6.89	4.48	2.86
Marshall SM (KN)	13.76	11.33	10.2
Fluage FM (mm)	3.51	3.92	4.25
Quotient Marshall	3.92	2.89	2.4

D'après les résultats présentés dans le tableau ci-dessus, on remarque que la teneur en liant correspondant au module de richesse $K=3.4$ soit une teneur en liant $TL = 5.45\%$ donne les

meilleures performances (fluage plus petit, stabilité Marshall plus importante). Pour cela nous garderons cette teneur en liant tout au long de notre étude.

5.3 Enrobé modifié

5.3.1 Préparation du mélange modifié

Pour la préparation du mélange modifié, nous avons suivi les mêmes étapes que la méthode prescrite dans le paragraphe (5.2.3), seulement l'incorporation de la poudrette dans le mélange se fait lors du malaxage. Le mélange reste à l'intérieur de l'étuve à 160°C pendant 120 minutes ; après il sera compacté selon la méthode d'essai utilisé. La durée de 120 minutes représente le temps de digestion nécessaire entre la poudrette et le bitume. [94,95]. Le choix de pourcentages de la poudrette n'était pas arbitraire mais il est basé sur un paramètre important qui est la maniabilité du mélange. Au début, on a opté pour les pourcentages 0.25%, 0.5% ,0.75% et 1% du poids du mélange.

5.3.2 Résultats des essais

Cette section comporte les investigations au laboratoire effectuées sur les enrobés modifiés afin d'identifier ses caractéristiques à savoir :

- Essai à la presse de cisaillement giratoire (PCG) pour déterminer la maniabilité des mélanges modifiés d'une part et de fixer le seuil à ne pas dépasser du pourcentage de la poudrette d'autre part ;
- Essais d'évolution des performances mécaniques (stabilité, tenue à l'eau, fluage statique, orniérage, rigidité).

5.3.2.1 Résultats de l'essai PCG

Les résultats de l'essai PCG pour la vérification des enrobés modifiés par les différents pourcentages de poudrette sont présentés sur les figures 5.3 et 5.4.

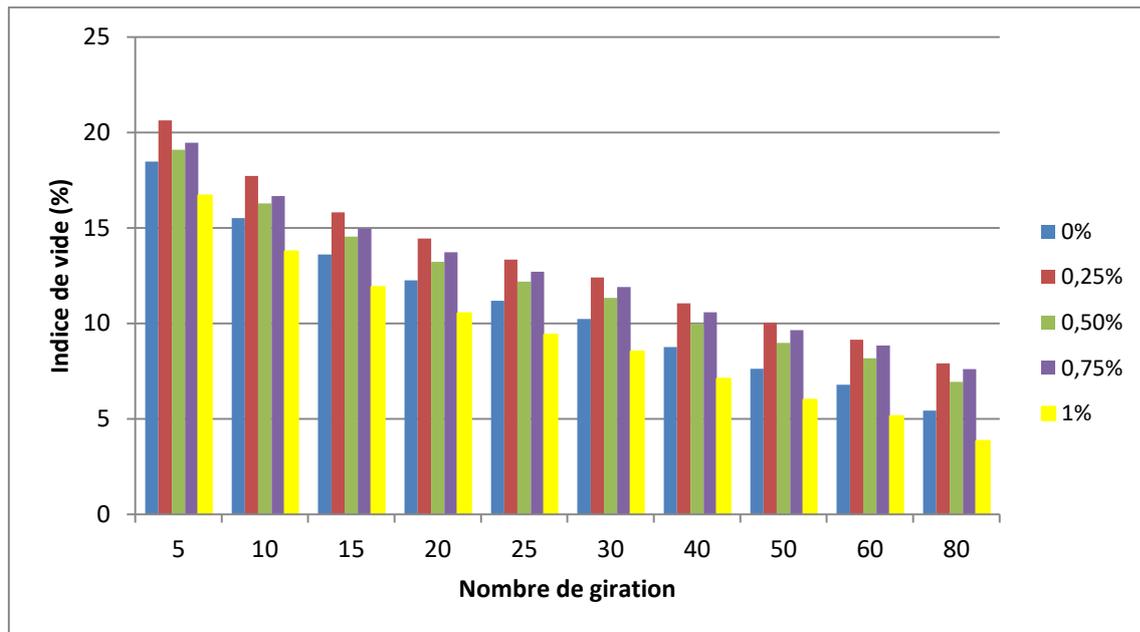


Figure 5.3. Indice de vide en fonction des girations pour différentes teneurs en poudrette



(a) 0.25 % de poudrette (b) 0.5 % de poudrette (c) 0.75 % de poudrette (d) 1 % de poudrette

Figure 5.4. Etat des éprouvettes après démoulage

Les résultats présentés sur la figure 5.3 et la figure 5.4 montrent que l'incorporation des différents pourcentages de poudrette dans le mélange donne un mélange maniable qui répond aux spécifications exigées par la norme à 80 girations ($4 < \text{indice de vide} < 9$). Par contre sur la figure 5.4 (d) où le mélange contient 1% de poudrette, on observe une distorsion et quelques fractures au niveau de l'éprouvette après le démoulage. La formulation de 1 % de poudrette ne donne pas un mélange maniable. Ce phénomène serait dû à la quantité de poudrette qui a réduit le pourcentage de vide.

Dans la pratique, le nombre de girations correspond au nombre de passage d'un rouleau compacteur sur site et comme la mise en service de la route est juste après le dernier passage du compacteur, donc le pourcentage de 1% de poudrette est déconseillé.

Pour cela, le pourcentage de la poudrette sera limité à 0.75% pour notre étude.

5.3.2.2 Résultats des propriétés Marshall

Les propriétés Marshall à savoir stabilité Marshall, fluage, indice de vide, Quotient Marshall densité apparente et compacité de l'enrobé témoin et modifié sont présentés sur les figures 5.5 à 5.10.

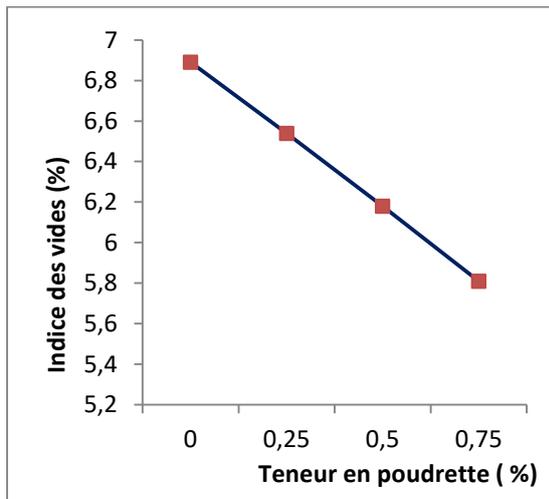


Figure 5.5. Indice des vides du mélange.

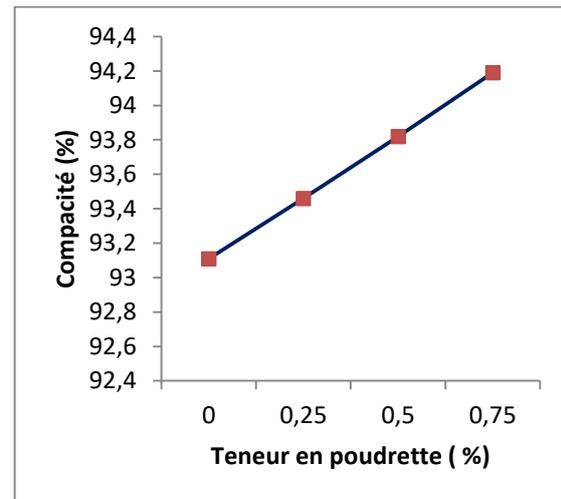


Figure 5.6. Compacité du mélange.

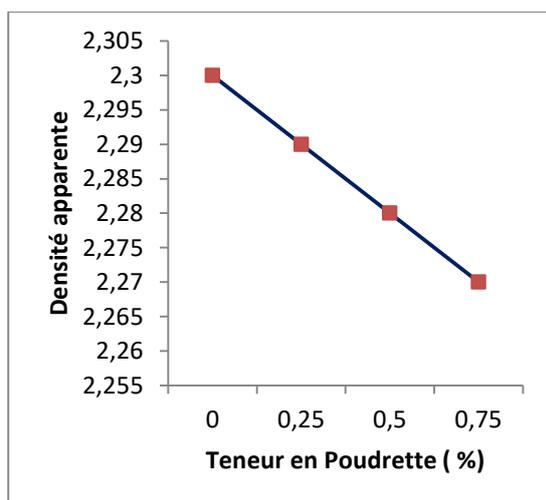


Figure 5.7. Densité apparente du mélange.

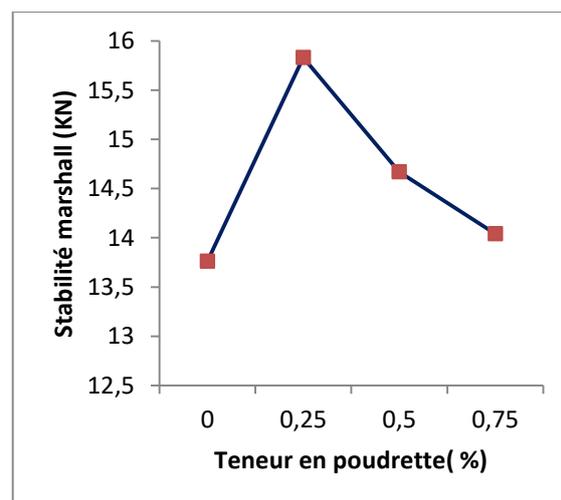


Figure 5.8. Stabilité du mélange.

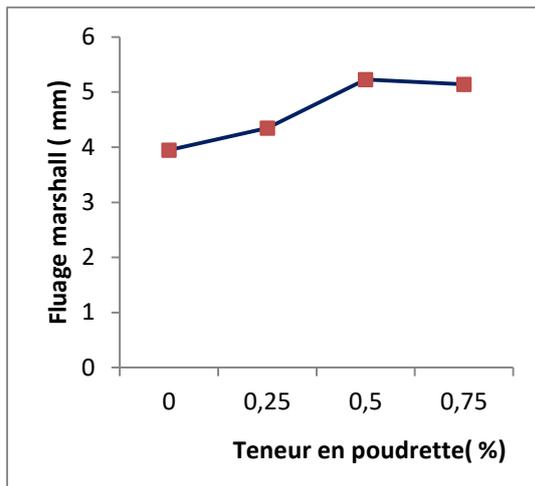


Figure 5.9. Fluage Marshall du mélange.

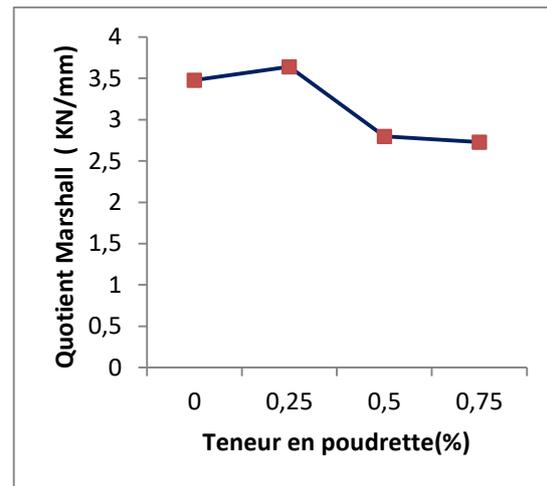


Figure 5.10. Quotient Marshall du mélange.

Les résultats de la figure 5.5 montrent que la valeur de l'indice des vides diminue en augmentant le pourcentage de la poudre. La diminution des vides dans le mélange peut être attribuée à l'amélioration de la liaison obtenue grâce à la modification de la surface de l'enrobé et à l'effet raidissant.

Regardant la compacité sur la figure 5.6, on peut constater une légère augmentation en fonction de la teneur en poudre, cela explique que l'incorporation des divers pourcentages de poudre dans le mélange favorise le remplissage de vide contenu dans le mélange. Ceci est attendu car la poudre confère moins de vide dans le mélange total. Donc elle peut être utilisée comme agent de remplissage (correcteur granulométrique) rentable dans le mélange bitumineux.

Concernant la densité apparente présentée sur la figure 5.7, sa valeur diminue en augmentant le pourcentage de poudre (la poudre étant plus légère).

Sur la figure 5.8, on peut noter que la stabilité augmente avec l'augmentation du pourcentage de poudre et présente un optimum de l'ordre de 15,83KN à 0,25% de poudre puis diminue. Une stabilité élevée de Marshall est liée à une résistance de la traction élevée.

On peut observer que le fluage Marshall croît avec l'augmentation du pourcentage de poudre et ensuite tend à se stabiliser à partir de 0,5%. Il convient de noter que la valeur de fluage ne reflète pas la résistance à la déformation permanente des enrobés bitumineux.

Sur la figure 5.10, on remarque que la valeur du Quotient Marshall augmente avec l'augmentation du pourcentage de la poudre et présente un optimum à 0,25 % puis diminue.

Une valeur plus élevée de QM indique que le mélange est plus rigide et résistant [95-96].

L'amélioration de ces paramètres par l'ajout de la poudrette serait due à l'oxyde de zinc qui est un agent agglomérant des particules d'une part, et que la poudrette joue le rôle d'un dopant qui renforce la liaison entre les composants du mélange d'autre part. Par contre, pour la diminution des valeurs pour les pourcentages différents de 0.25%, ceci serait dû aux particules de poudrette non absorbées qui interrompent la continuité dans le liant et la liaison entre les composants du mélange.

5.3.2.3 Résultats de l'essai Duriez (sensibilité à l'eau)

Le comportement des enrobés vis-à-vis du phénomène de désenrobage, se vérifie par l'essai de la tenue à l'eau à l'aide de l'essai duriez. Les résultats obtenus par cet essai sont présentés sur le tableau 5.4 et la figure 5.11.

Tableau 5.4. Résultats de compression simple.

Teneur en poudrette (%)	0	0.25	0.5	0.75
RC à l'air R (Mpa)	12,43	10,56	9,85	10,96
RC après immersion r (Mpa)	9,84	10,43	9,67	7,96
Rapport (r/R)	0,79	0,99	0,98	0,72

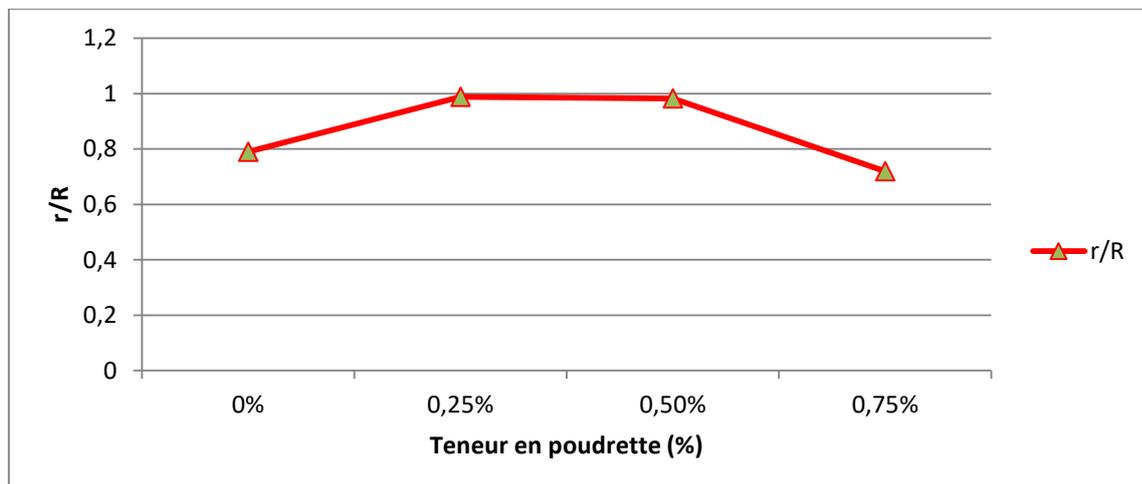


Figure 5.11. Tenue à l'eau en fonction du pourcentage de la poudrette.

Les résultats présentés sur la figure 5.11 montrent que la sensibilité à l'eau présente un optimum à 0.25 % qui est de l'ordre de 0.988, qui se stabilise jusqu'à 0.5% puis une chute remarquable à 0.75 % qui est de l'ordre de 0.72 ; ce dernier est inférieur aux spécifications

(0.75). Lorsque le rapport de r/R est proche de 1 on peut dire que notre ajout joue un rôle de dopant (dope d'adhésivité).

5.3.2.4 Résultats de Module de rigidité

Pour déterminer la rigidité d'un mélange bitumineux, un essai du module de rigidité en traction indirecte a été effectué avec un appareil NU (**Nottingham University**).

Dans la présente étude, des tests du module de rigidité en traction indirecte ont été réalisés à trois températures (5°C, 15°C et 25°C) sur des éprouvettes confectionnées suivant la méthode Marshall. Après la conservation des échantillons dans une enceinte climatique pendant 24 heures, les résultats des écrasements sont présentés dans le tableau 5.5.

Tableau 5.5. Variation de module de rigidité en fonction du pourcentage de la poudrette

Pourcentage de poudrette	Valeurs du module de rigidité (Mpa)		
	T= 5°C	T= 15°C	T= 25°C
0%	10727	7917	3292
0.25 %	12800	8918	3824
0.50 %	8581	6106	2330
0.75 %	9940	7617	2502

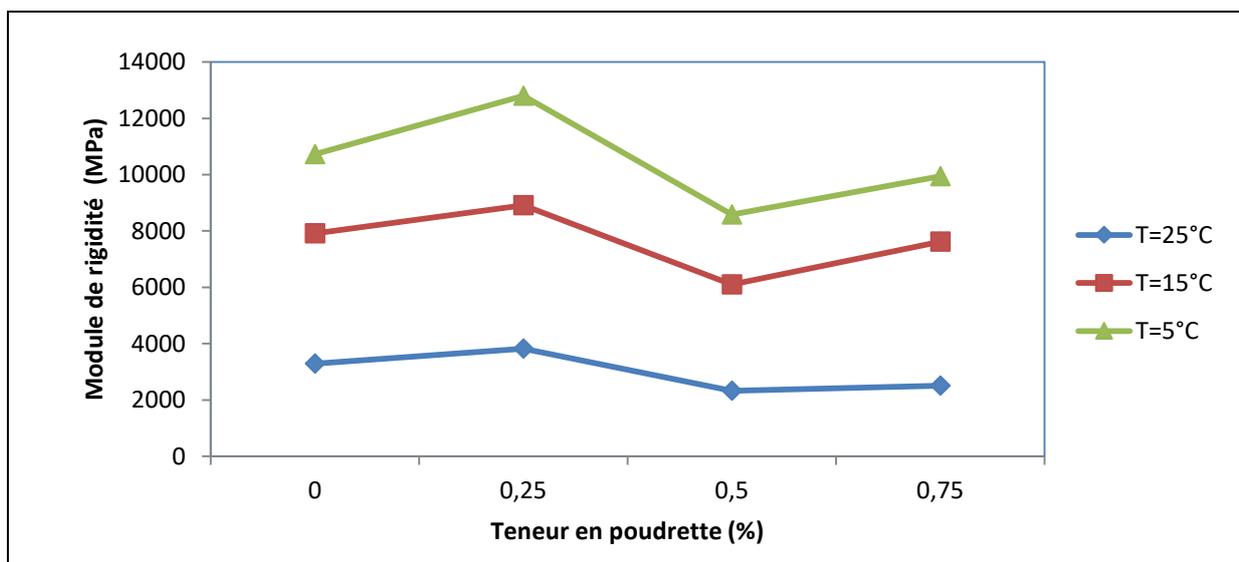


Figure 5.12. Variation de module de rigidité en fonction du taux de la poudrette à différentes températures.

À une température de 5 ° C, les résultats montrent que la valeur du module de rigidité augmente jusqu'à 12 800 MPa pour un pourcentage de 0,25% de poudre de SBS. Cela montre qu'un gain d'environ 16% a été obtenu par rapport au mélange témoin. Ensuite, une diminution de sa valeur a été constatée pour le reste des pourcentages de caoutchouc.

En regardant les résultats obtenus pour une température de 15 ° C, on remarque que la valeur du module augmente à 8 918 MPa pour 0,25% de caoutchouc. Dans ce cas, un gain d'environ 11% a été obtenu par rapport au mélange témoin. Ensuite, une diminution de la valeur du module a été observée pour le reste des pourcentages de caoutchouc incorporé.

Les résultats obtenus à 25°C montrent que la valeur du module augmente à 3 824 MPa pour un pourcentage de 0,25% de caoutchouc. Cela représente un gain d'environ 14% par rapport au mélange témoin. Ensuite, une diminution de la valeur a été constatée pour le reste des pourcentages de caoutchouc. L'absence de forte adhérence entre le liant bitumineux et les particules de caoutchouc peut être la cause de la réduction du module de rigidité des enrobés à forte teneur en poudre. Il est à noter que pour les différents pourcentages de caoutchouc, la valeur du module de rigidité diminue avec l'augmentation de la température et présente un optimum à 0.25% de poudre. Ce comportement est dû à la grande sensibilité du liant bitumineux à la température, car la rigidité et la viscosité du liant diminuent avec l'augmentation de la température

5.3.2.5 Résultats de l'essai d'orniérage

Les résultats de l'orniérage des mélanges sont présentés dans le tableau 5.6 et la variation de la profondeur d'orniérage en fonction de la teneur en poudre dans la figure 5.13.

Tableau 5.6. Variation de la profondeur d'orniérage en fonction de la teneur en poudre.

Cycle	Teneur en poudre (%)							
	0		0,25		0,50		0,75	
30	1.28	1.30	1.15	1.14	0.99	0.98	0.72	0,73
100	1.80	1.81	1.68	1.68	1.55	1.53	1.31	1,37
300	2.29	2.35	2.24	2.27	2.07	2.04	1.83	1.91
1000	2.76	2.96	2.70	2.73	2.56	2.54	2.16	2.43
3000	3.37	3.62	3.27	3.30	2.98	2.96	2.46	2.80
10000	4.02	4.22	3.87	3.91	3.46	3.42	2.90	3.20
30000	4.70	4.73	4.17	4.20	3.85	3.81	3.39	3.42
Moyenne (mm)	4.715		4.185		3.830		3.405	

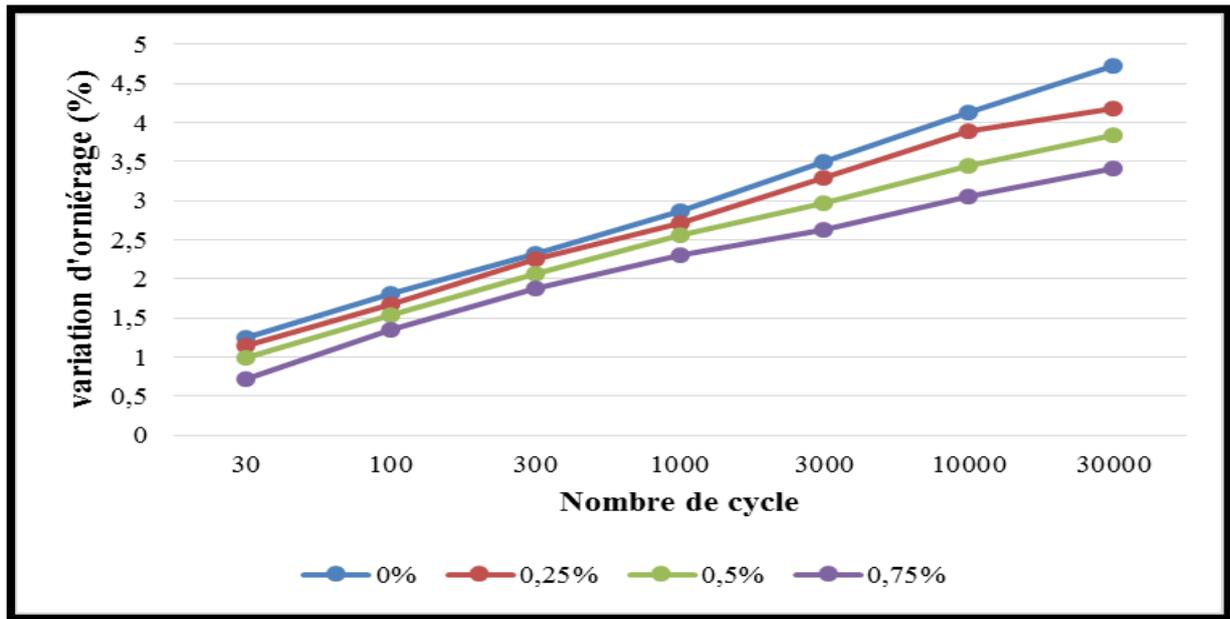


Figure 5.13 .Variation de la profondeur d'ornièrage pour les différents teneurs en poudrette.

Les résultats présentés sur la figure 5.13 montrent que la profondeur d'ornièrage diminue en augmentant le pourcentage de poudrette de caoutchouc et on remarque aussi que les valeurs de déformation restent toujours inférieures au seuil fixé par la norme ($< 5\%$), ce qui conduit à une amélioration des performances mécaniques de l'enrobé et au comportement des déformations permanentes. Cela est dû à la nature élastique de la poudrette qui peut facilement conduire à une augmentation de l'élasticité du mélange bitumineux. Il en résulte une résistance appropriée du mélange aux charges et une amélioration de la résistance des mélanges modifiés aux déformations permanentes.

5.3.2.6 Résultats de Fluage Statique

Afin de mettre en évidence l'influence de caoutchouc sur le comportement des bétons bitumineux en fluage statique, nous avons confectionné des éprouvettes du type MARSHALL avec un mélange hydrocarboné 0/14. Le but de cet essai est de mesurer la déformation des éprouvettes Marshall on appliquant des contraintes de 0.14 MPa à deux températures différentes (20°C et 60°C) pendant 1 heure de chargement, après on décharge et on prend les lectures de déformation suivant le mode opératoire détaillé au chapitre 3.

Les variations des différentes déformations obtenues par cet essai, sont tirées à partir des courbes de fluage – recouvrance enregistrées durant les périodes de chargements et déchargements dans l'essai de fluage statique aux températures d'essai avec les différentes

teneurs en poudre. Ces courbes sont présentées sur les figures 5.14- 5.15.

▪ **Présentation des résultats :**

Les résultats des essais de fluage sur les différents mélanges bitumineux (0%, 0.25%,0.5% et 0.75%) à des températures de 20 et 60°C sont présentés sur les figures 5.14- 5.15

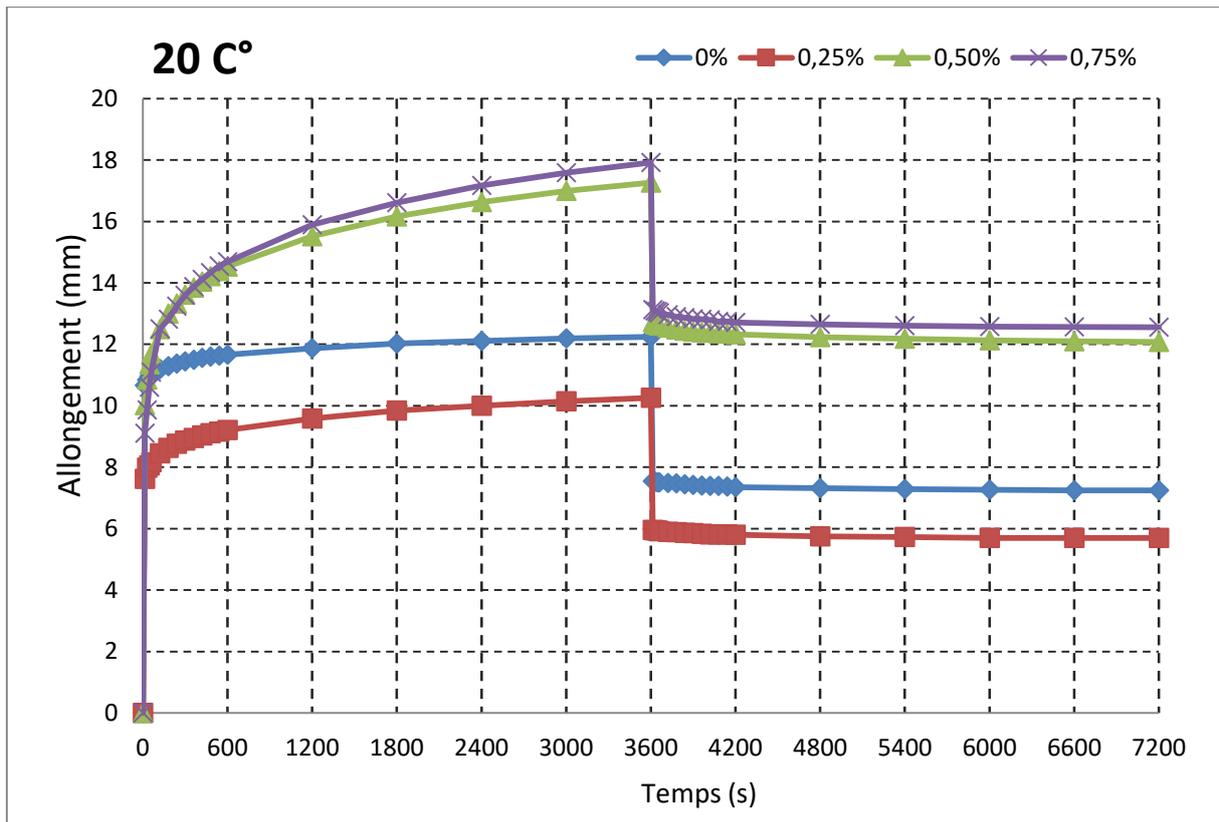


Figure 5.14. Courbe de fluage – recouvrance de BB 0/14 à 20°C.

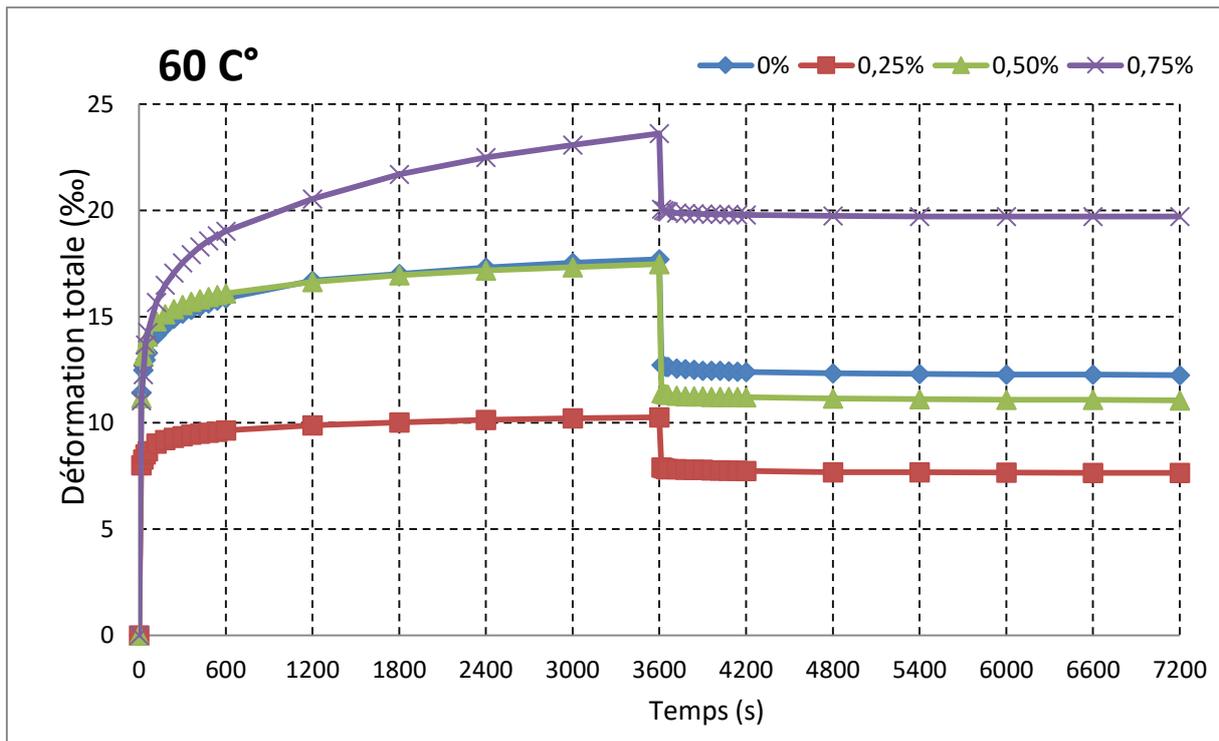


Figure 5.15. Courbe de fluage – recouvrance de BB 0/14 à 60°C

Les différents paramètres tirés de ces courbes sont présentés comme suit:

▪ **Variation de la déformation totale :**

Les variations de la déformation totale après une heure de chargement en fonction de pourcentage de poudre à 20°C et 60°C sont présentées en figure 5.16

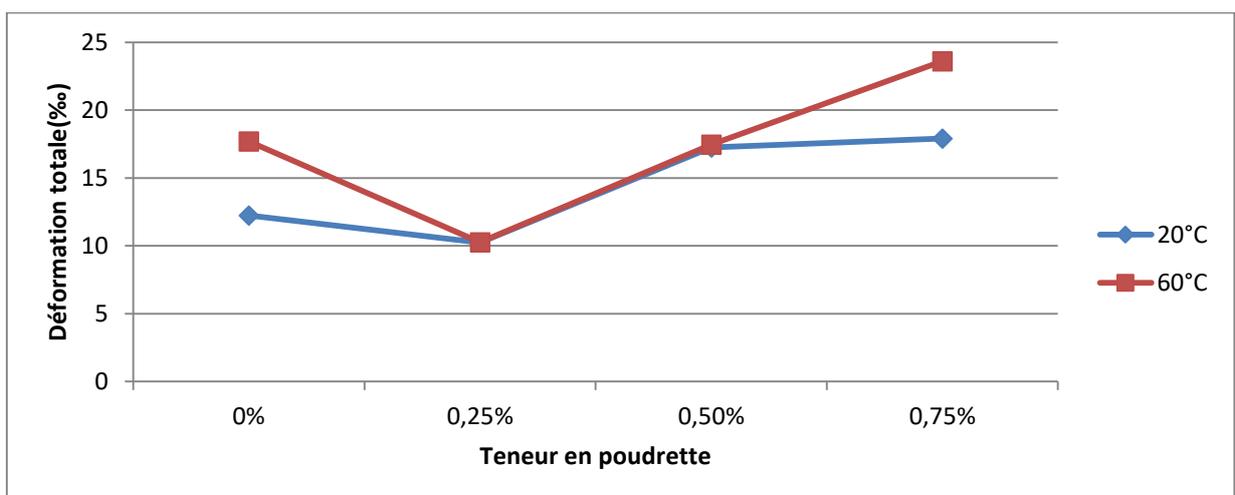


Figure 5.16. La déformation totale après 1 heure de chargement à 20°C et 60°C en fonction de pourcentage de poudre.

Les résultats présentés sur la figure 5.16 montrent que, la déformation totale présente un minimum à 0.25% d'ajout qui correspond à 10.24 % pour une température de 20°C et 10.26 % pour une température de 60°C, puis augmente progressivement pour le reste de pourcentages de poudrette aux deux températures. On remarque aussi que la déformation totale est plus importante avec l'augmentation de température de l'essai pour l'ensemble des teneurs en poudrette.

▪ Module de rigidité en fluage statique après 1 heure de chargement

Les variations de module de rigidité en fluage statique, en fonction de pourcentage de poudrette, aux températures d'essai sont présentées en figure 5.17.

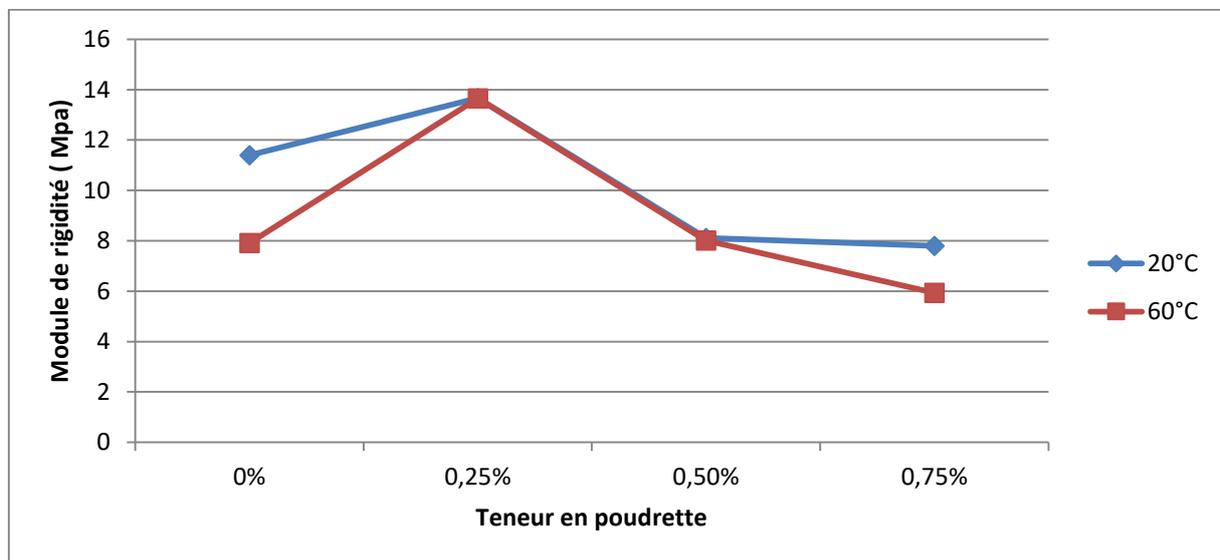


Figure 5.17. Module de rigidité en fluage statique après 1 heure de chargement à 20°C et 60°C en fonction de pourcentage de poudrette.

Les résultats présentés sur la figure 5.17, montrent que la variation du module de rigidité a une allure ascendante puis descendante et présente un optimum à 0.25% de poudrette qui est de l'ordre de 13.67MPa à 20°C et 13.64 MPa à 60°C suivie par une diminution progressive jusqu'à 0.75% d'ajout.

On remarque que la déformation totale des mélanges bitumineux testés aux différentes températures d'essais, est inversement proportionnelle à leur module de rigidité en fluage statique.

▪ Variation de la déformation initiale

La variation de la déformation initiale en fonction de pourcentage de poudrette aux différents niveaux de température est présentée ci-dessous :

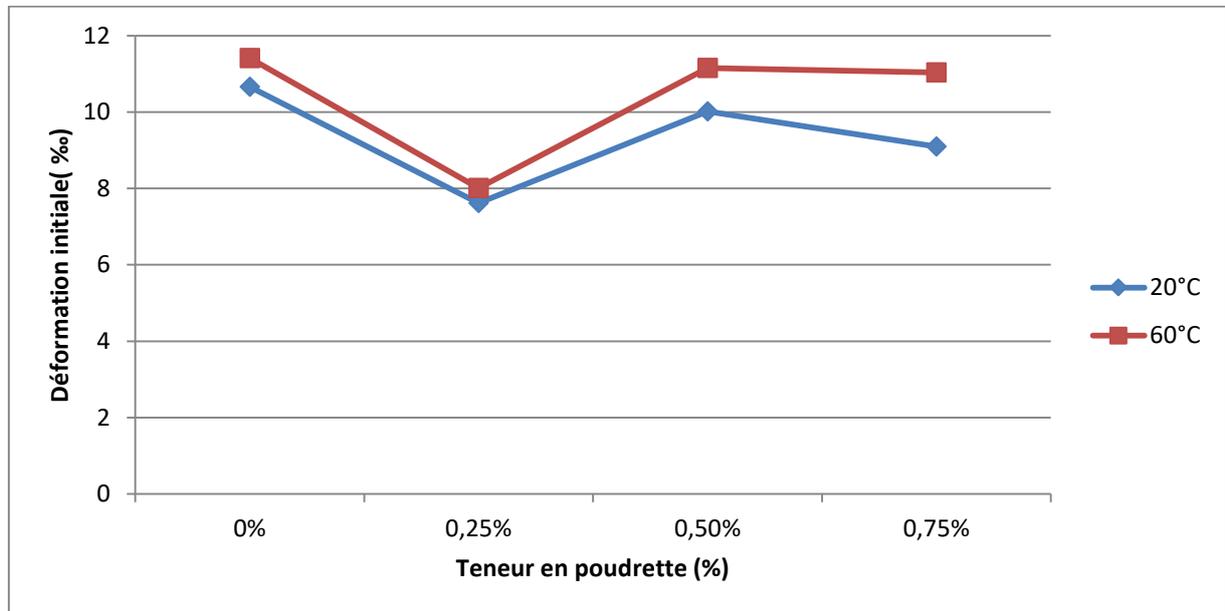


Figure 5.18. Déformation initiale après 15secondes de chargement à 20°C et 60°C en fonction de pourcentage de poudrette.

Les résultats présentés sur la figure 5.18 montrent que la déformation initiale présente un minimum de 7.62‰ à 20°C et 8.01‰ à 60°C pour une teneur de poudrette de 0.25%, suivie par une variation variable pour les autres pourcentages de poudrettes. Ces variations sont toujours supérieures à celles obtenues pour 0.25%. On note aussi que la déformation initiale croît avec l'augmentation de la température quel que soit la teneur de poudrette.

▪ **Module de rigidité en fluage statique après 15 secondes de chargement**

Les variations de module de rigidité en fluage statique, après 15 secondes de chargement en fonction de pourcentage de poudrette, aux températures d'essai sont présentées en figure 5.19.

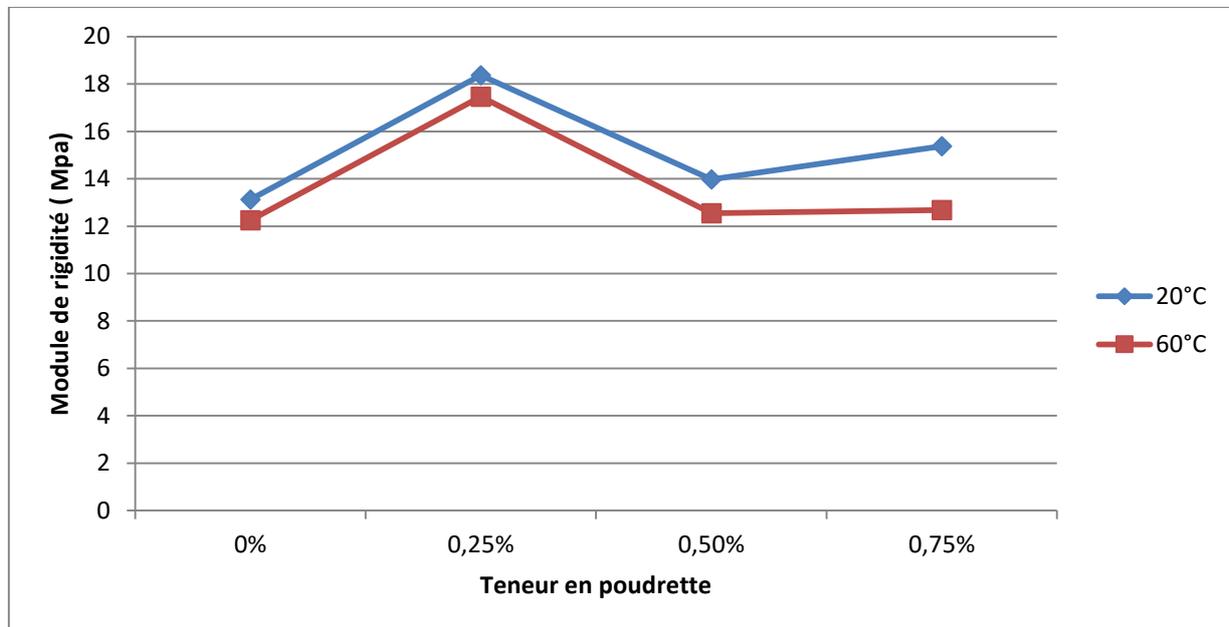


Figure 5.19. Le module de rigidité en fluage statique après 15 secondes de chargement à 20° C et 60°C en fonction de pourcentage de poudrette

Selon la figure 5.19, on remarque que le module de rigidité en fluage statique augmente en fonction du pourcentage de poudrette et présente un optimum (18.38Mpa et 17.48Mpa) à 0.25% d'ajout pour les deux températures (20°C et 60°C) successivement.

La déformation initiale des mélanges bitumineux aux différentes teneurs en poudrette est inversement proportionnelle à leurs modules de rigidité en fluage statique quelle que soit la température de l'essai.

▪ **Variation de la déformation finale**

Les variations de la déformation finale en fonction des pourcentages de poudrette aux différents niveaux de température sont présentées sur la figure 5.20.

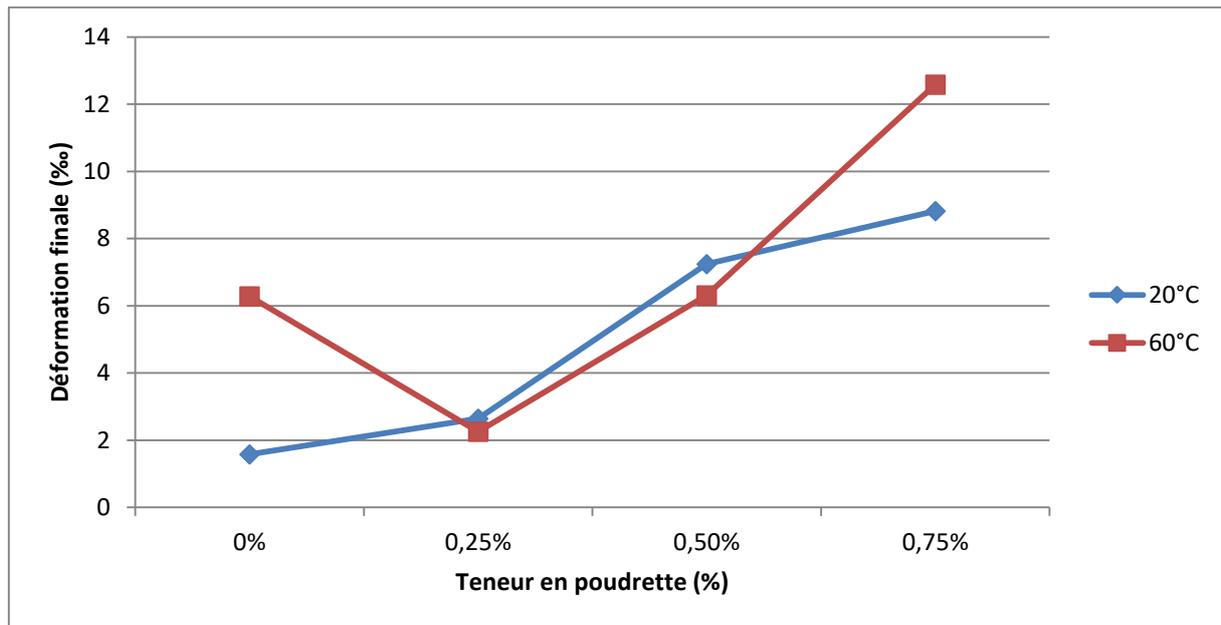


Figure 5.20. La déformation finale en fonction de pourcentage de poudrette à 20°C et 60°C

Sur le graphe de la variation de la déformation finale en fonction de la teneur en poudrette on remarque qu'à 60°C la déformation finale présente un minimum à 0.25% d'ajout qui correspond à 2.25 % puis augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale à 0.75%. Par contre à une température de 20°C on remarque que la variation de cette déformation prend une allure ascendante de 0% jusqu'à 0.75%.

▪ **Variation de la déformation initiale et de la déformation finale comme pourcentages de la déformation totale**

Le sens de la déformation initiale et de la déformation finale pour la résistance au fluage des enrobés modifiés peut être clairement apprécié si ces deux déformations sont comparées à la déformation totale.

La variation de la déformation initiale et de la déformation finale comme pourcentage de la déformation totale en fonction de pourcentage de poudrette aux différentes températures est présentée sur le tableau 5.7.

Tableau.5.7. Variation de la déformation initiale et finale comme pourcentage de la déformation totale.

Poudrette \ Température	0%		0.25%		0.5%		0.75%	
	ϵ_{init}	ϵ_{final}	ϵ_{init}	ϵ_{final}	ϵ_{init}	ϵ_{final}	ϵ_{init}	ϵ_{final}
20°C	78.96	21.04	74.41	25.59	58.05	41.95	50.78	49.22
60°C	64.52	35.48	78.07	22.93	63.88	36.12	47.83	52.17

Les résultats présentés sur le tableau 5.7, montrent qu'à 0%, 0.25% et 0.5% d'ajout, la déformation a lieu principalement dans la phase initiale de chargement. Après, on remarque une faible augmentation bien que le temps de chargement soit à peu près 1 heure, pour les deux températures d'essai.

▪ **Variation de la déformation réversible**

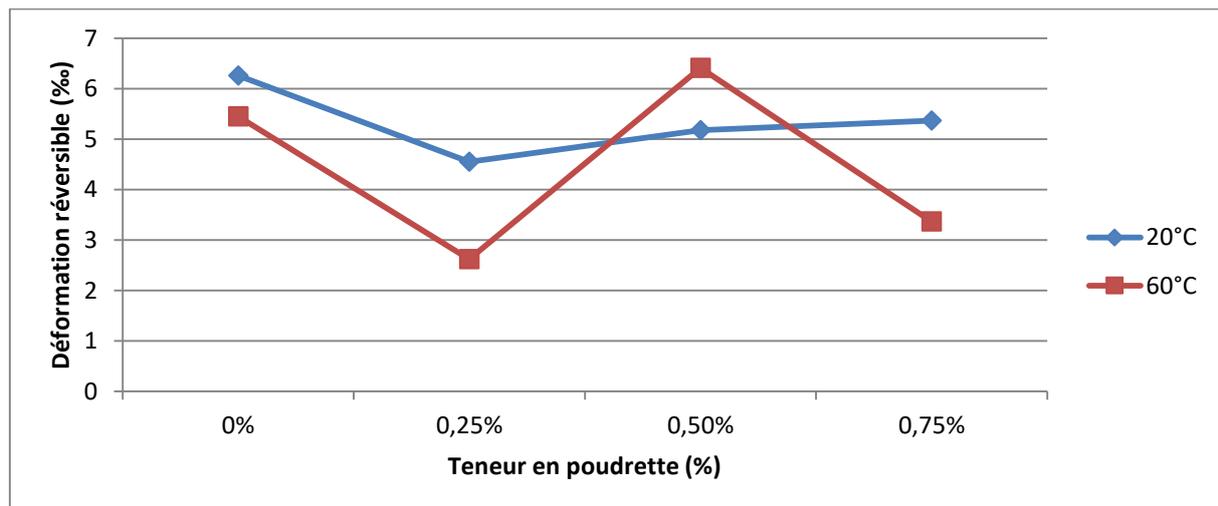


Figure 5.21. La déformation réversible en fonction de pourcentage de poudrette à 20°C et 60°C.

D'après les résultats présentés sur la figure 5.21, on remarque qu'à 20 °C la valeur de la déformation réversible diminue en augmentant le pourcentage de poudrette et présente un minimum à 0.25% de poudrette, suivi par une faible augmentation jusqu'à sa valeur maximale à 0.75%. Cela est valable pour une température de 60°C à l'exception que la valeur maximale est présentée à 0.5%.

▪ Variation du recouvrement visco-élastique

Pour distinguer une différence entre les mélanges, le quotient de la déformation réversible après 1 heure de déchargement (relaxation) et la déformation totale après 1 heure de chargement (Recouvrement visco – élastique) a été calculé selon la formule :

$$RVE = \frac{\varepsilon_{\text{réversible après 1h de déchargement}}}{\varepsilon_{\text{total après 1h de chargement}}} * 100\%$$

La variation des valeurs du RVE en fonction de pourcentage de poudrette aux différentes températures d'essai est présentée comme suit :

Tableau 5.8. Variation des valeurs du RVE en (%) en fonction de teneur de poudrette à 20°C et 60°C.

Température	Teneur en poudrette			
	0%	0.25%	0.5%	0.75%
20°C	40.85 %	44.44 %	30.01 %	30.01 %
60°C	30.79 %	25.54 %	36.58 %	14.6%

Les résultats présentés sur le tableau ci-dessus montrent que le plus grand pourcentage de la déformation réversible par rapport à la déformation totale est celui qui correspond à 0.25% de poudrette et cela pour une température de 20°C.

On remarque qu'à 60°C, le plus grand pourcentage est celui de 0.5% de poudrette.

▪ Variation de la déformation permanente

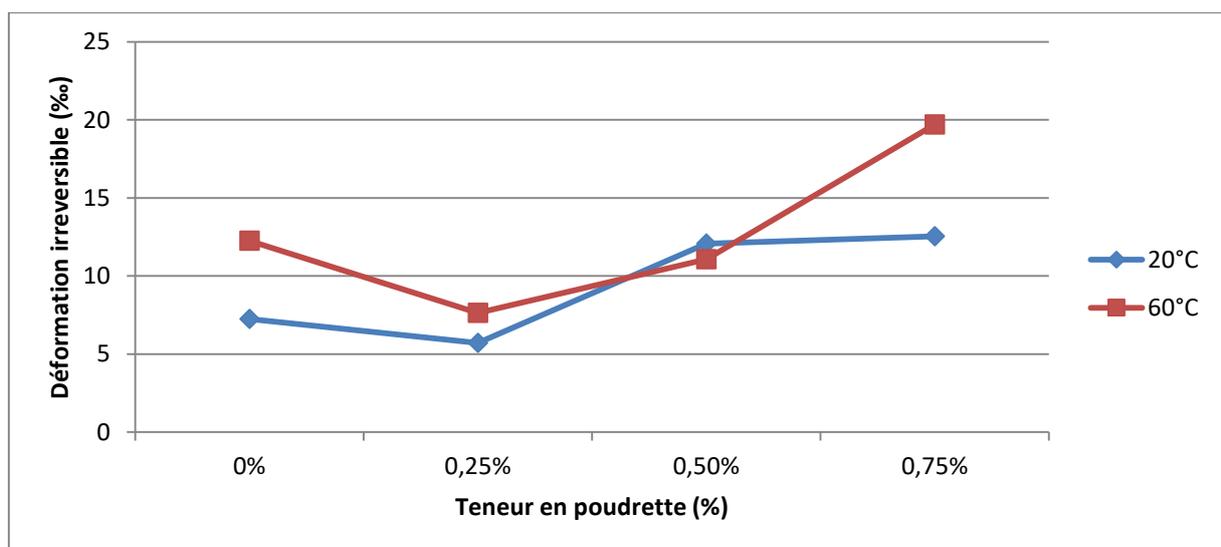


Figure 5.22. La déformation permanente en fonction de pourcentage de poudrette à 20°C et 60°C.

Les résultats présentés sur la figure 5.22 montrent que pour les deux températures, la déformation permanente présente un minimum à 0.25%, puis augmente progressivement pour les autres pourcentages de poudrette.

5.3.2.7 Mesure des déformations locales par corrélation d'images

▪ Description de l'essai de corrélation d'images

Pour l'analyse des mécanismes de rupture des éprouvettes à base de mélanges bitumineux et de leur comportement mécanique en compression à partir de la distribution des champs de déformations en surface la corrélation d'images numériques (DIC) est effectuée. Pour cela, l'essai « Duriez » est réalisé et l'éprouvette est instrumentée en surface par mouchetis à base de peintures noire et blanche (figure 5.23). En effet, les éprouvettes sont peintes par une couleur noire et blanche dans le but de faire apparaître des points de couleur blanche de taille millimétrique (1 à 5 mm). Egalement, pendant le chargement sur la machine de compression, des images numériques sont enregistrées par caméra numérique de type « Canon » dans le but de faire la corrélation d'images numériques (figure 5.24). La technique de corrélation d'images numérique (DIC) est basée sur la mesure du champ de déplacement cinématique. Pour cela, nous avons utilisé un logiciel commercial VIC 2D.

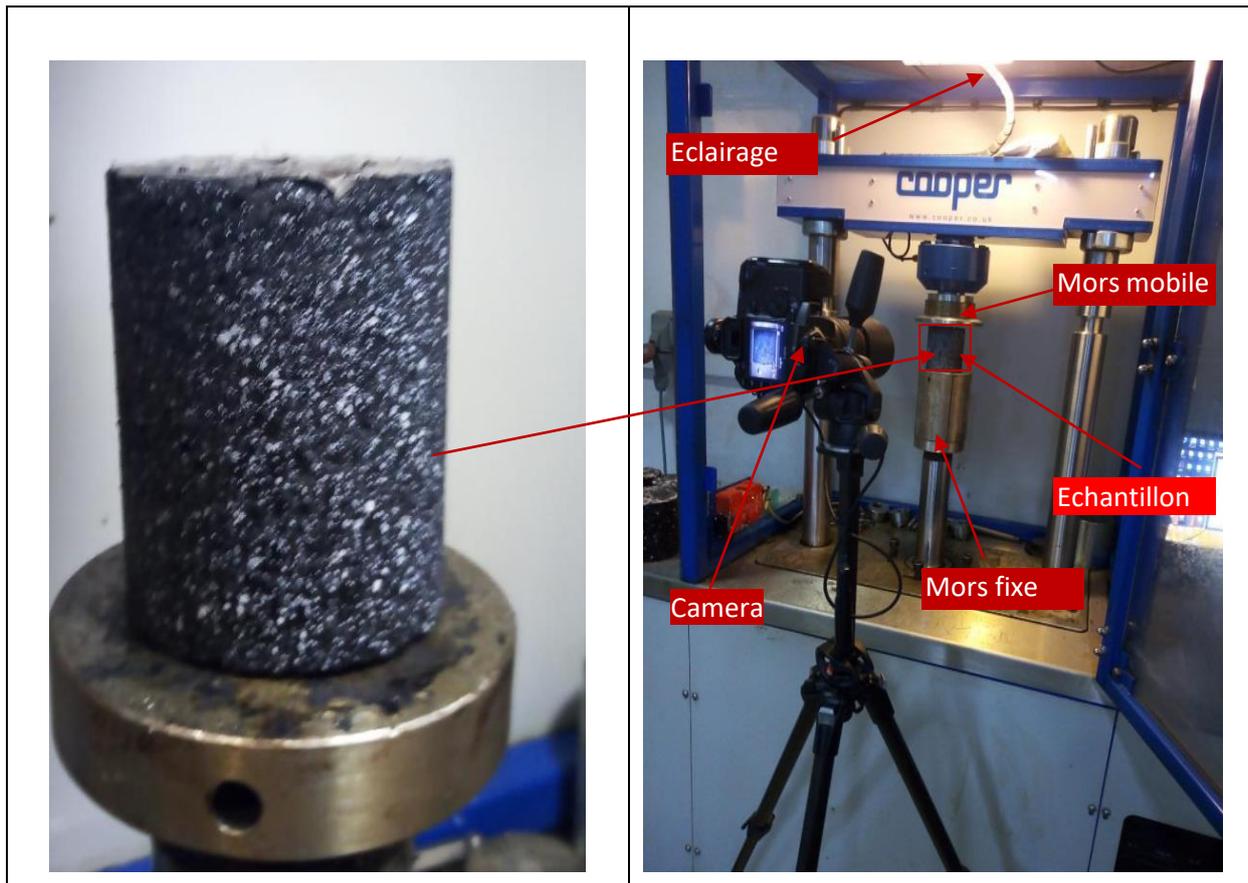


Figure 5.23. Dispositif expérimental pour l'essai de compression (Duriez) avec l'instrumentation associée pour la corrélation d'images numériques. (a) vue globale du montage et (b) zoom de la zone entourée sur la vue globale.

- **Analyse des résultats**

a) Modes de rupture des éprouvettes

D'après les travaux de H. Xu, W. Guo, and Y. Tan [97], il a été clairement mentionné que, la propagation de fissures dans les enrobés est fortement influencée par la distribution des granulats et du liant conduisant ainsi à une complexité significative dans leur analyse. Il a été observé aussi que l'initiation et de la propagation de fissures dans des enrobés bitumineux indique que les fissures peuvent s'initier sous forme de microfissures qui se propagent et qui fusionnent pour former des macrofissures. La complexité de l'observation de l'initiation et la propagation de fissures dans les enrobes bitumineux a toujours été un obstacle pour la détermination de lois de dommages appropriées.

Dans le cadre de notre étude l'observation des modes de ruptures a été faite par une analyse des images numérique obtenues par la caméra sous la charge de début d'endommagement et

la charge de rupture, pour les différents mélanges.

Les différents modes de rupture ainsi que le début d'endommagement observés durant les essais de compression sous des charges bien déterminées (tableau 5.9.), effectués sur les éprouvettes fabriquées à partir des mélanges 0%, 0.25%, 0.5% et 0.75% grâce à l'analyse des images obtenues par la caméra sont présentés sur les figures 5.24 à 5.27.

On note que dans le cas de mélange témoin (0 %), le premier dommage se manifeste par la présence d'une fissure orientée à 45° par rapport à l'axe de chargement. Ce dommage a été observé lorsque la charge de compression atteint les 42 KN. Il a été noté aussi que l'augmentation de la charge, conduit à une propagation progressive de la fissure jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette sous une charge de l'ordre de 57 KN.

En présence de la poudrette de caoutchouc dans les mélanges à différents pourcentages, d'autres modes de rupture ont été observés. En effet, dans le cas du pourcentage de 0.25%, le premier dommage observé se caractérise par une fissure parallèle à l'axe de chargement (avec une charge de l'ordre de 35 KN). Egalement, avec l'augmentation de la charge de compression une propagation de cette fissure dans la direction de compression est notée jusqu'à la rupture finale (avec charge de compression de l'ordre de 61.5 KN). Il est à noter que le mode de rupture des éprouvettes avec 0.5 % et 0.75% de poudrette est similaire à celui de 0.25%. Cependant, pour les éprouvettes avec 0.5%, le dommage s'est produit au niveau de la partie inférieure avec l'apparition de d'autres fissures à la rupture, sous une charge de l'ordre de 57.6 KN, tandis que celui de 0.75%, le premier dommage a été observé au niveau de la partie supérieure de l'éprouvette sous une charge de l'ordre 50.4 KN. Aussi avec l'augmentation de la charge à 55.82 KN, nous avons noté une rupture avec élargissement des fissures existantes.

Tableau 5.9. Charges de début d'endommagement et rupture des éprouvettes.

Mélange	Charge de début d'endommagement (KN)	Charge de rupture (KN)
0%	42.32	57.2
0.25%	35.22	61.53
0.5%	47.58	57.62
0.75%	50.42	55.82

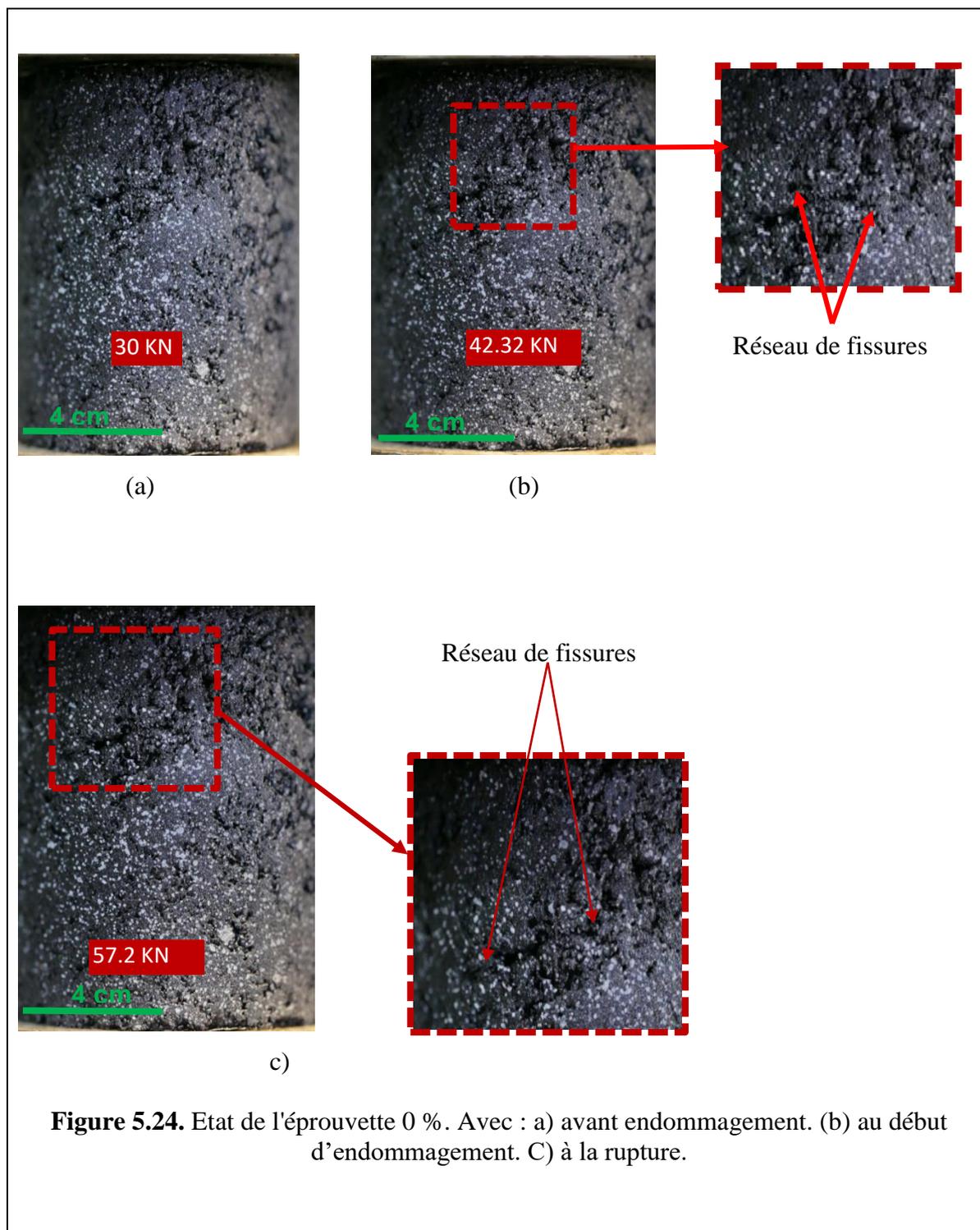
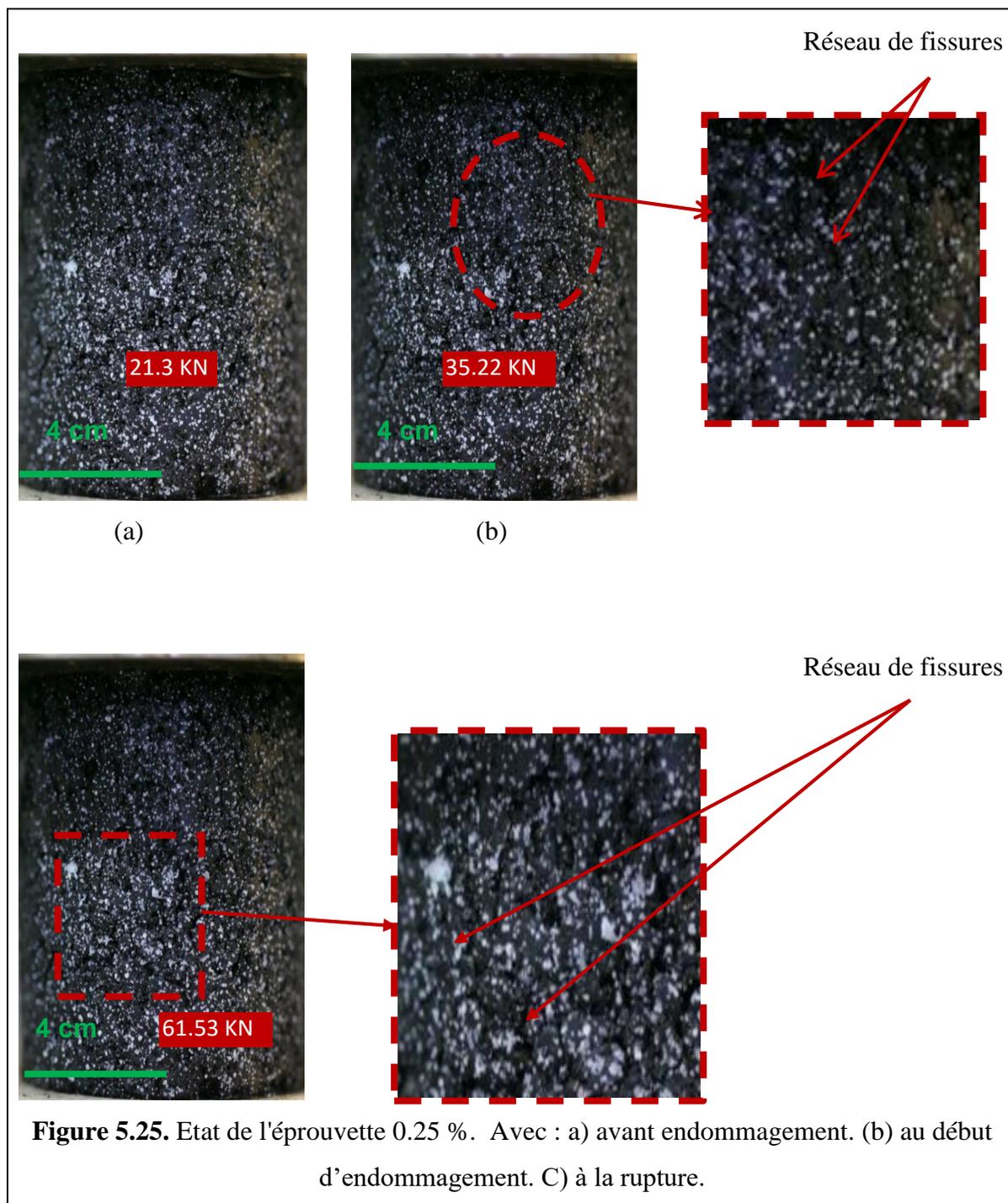
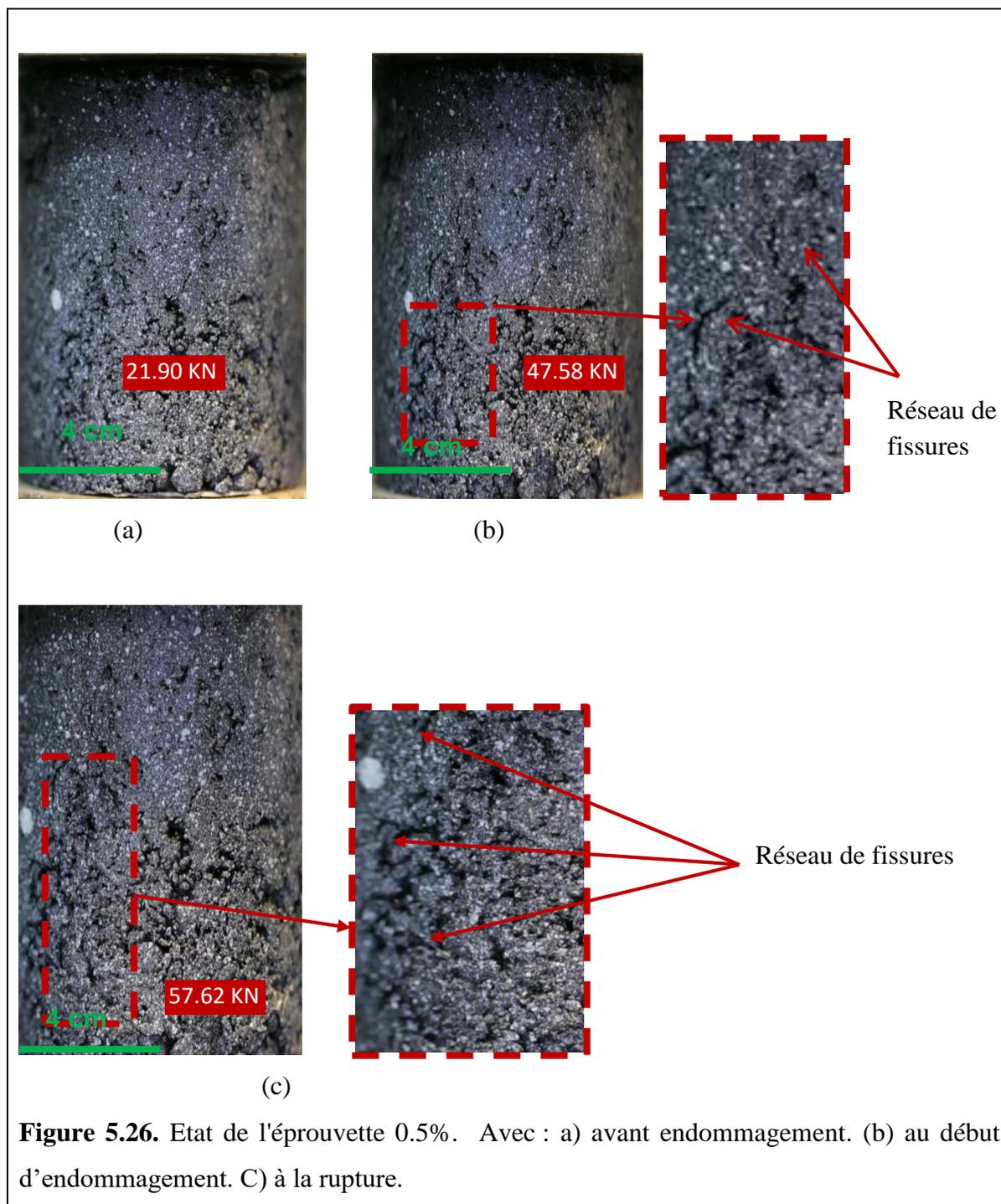
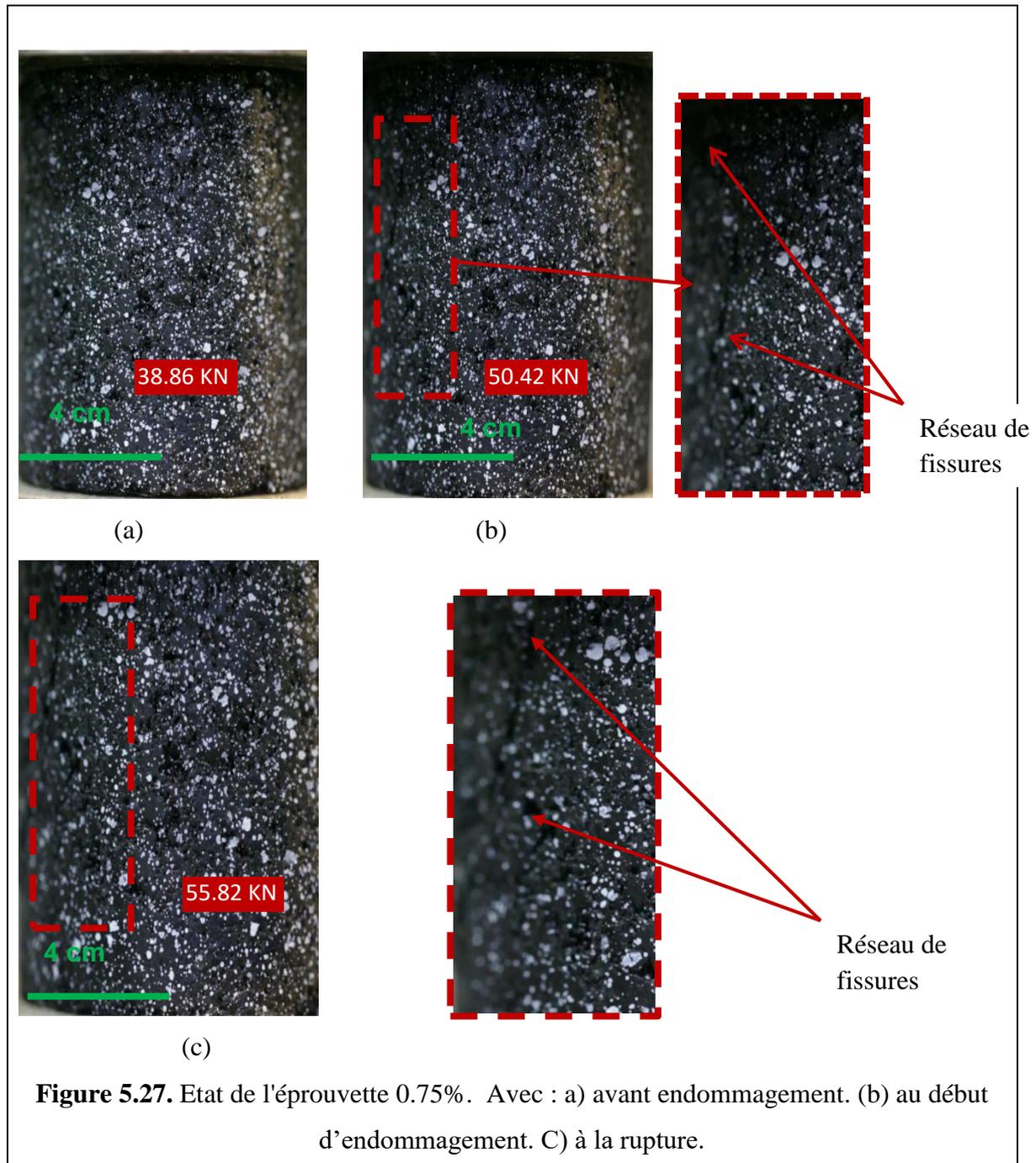


Figure 5.24. Etat de l'éprouvette 0 %. Avec : a) avant endommagement. (b) au début d'endommagement. C) à la rupture.







b) Mesure des champs de déplacements et de déformations

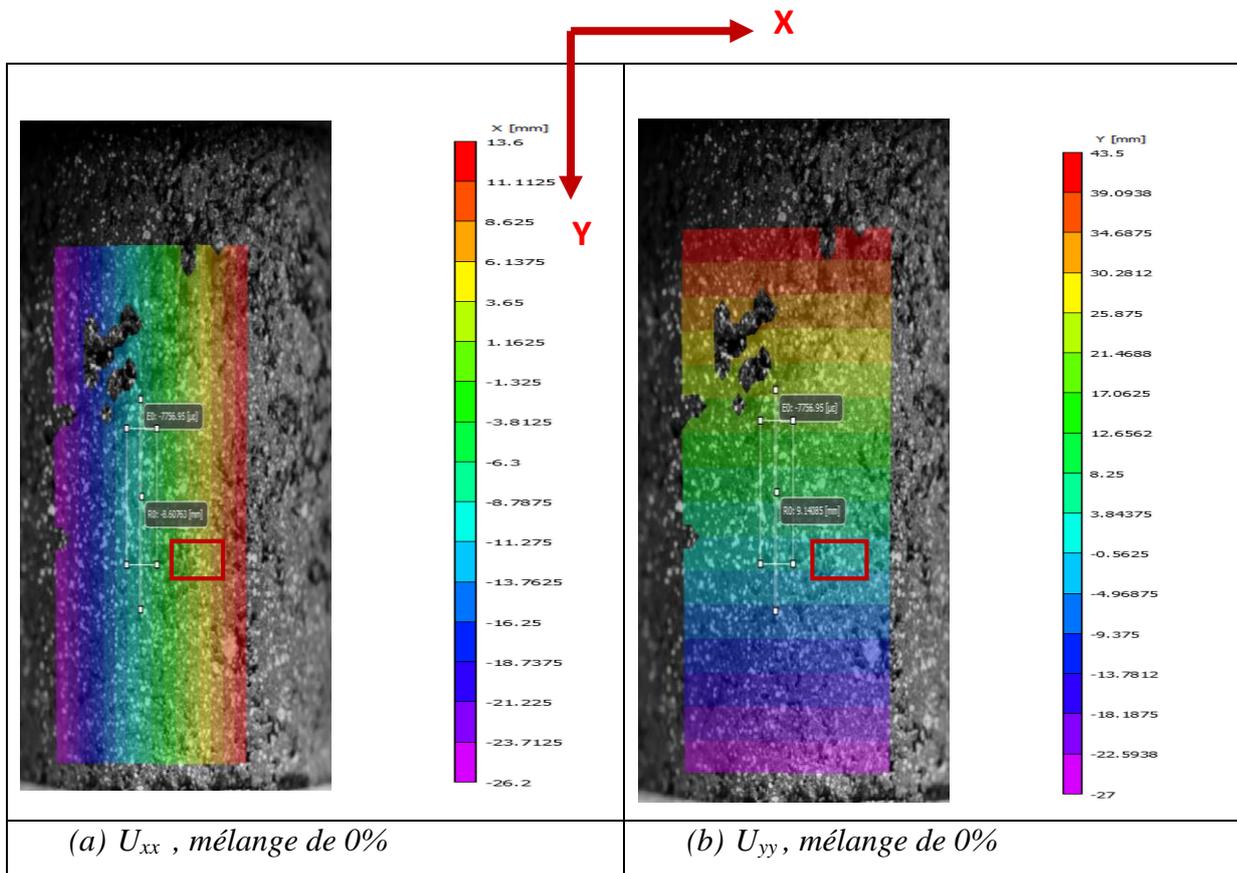
▪ Cartographies de déplacements

Les cartographies de déplacements obtenues avec la méthode de corrélation des images sur les différentes éprouvettes au niveau de la phase finale de chargement sont présentées sur la figure.5.28 ; ces cartes sont superposées sur la microstructure des éprouvettes bitumineuses. Pour les trois éprouvettes testées, la même tendance est observée. En effet, le déplacement

vertical augmente du bas vers le haut de l'échantillon, ce qui est en accord avec le fait qu'un essai de compression est effectué avec le mors du haut mobile. Le déplacement horizontal est positif sur le côté droit et négatif sur le côté gauche, ce qui reflète l'expansion globale de l'échantillon le long de la direction x (effet poisson).

On remarque dans les zones encadrées en rouge pour les éprouvettes de 0% , 0.25% et 0.75% de poudrette, une légère variation du déplacement le long des directions horizontale et verticale a été notée. Ce phénomène est dû probablement que les granulats correspondants à ces zones ont subi une rotation. On remarque aussi que pour l'ensemble des éprouvettes, les isovalues des déplacements sont verticales ou bien horizontales.

Pour les éprouvettes de 0.5% de poudrette, on n'a pas pu faire la corrélation, à cause de présence de vibrations qui sont engendrées lors de l'essai de compression.



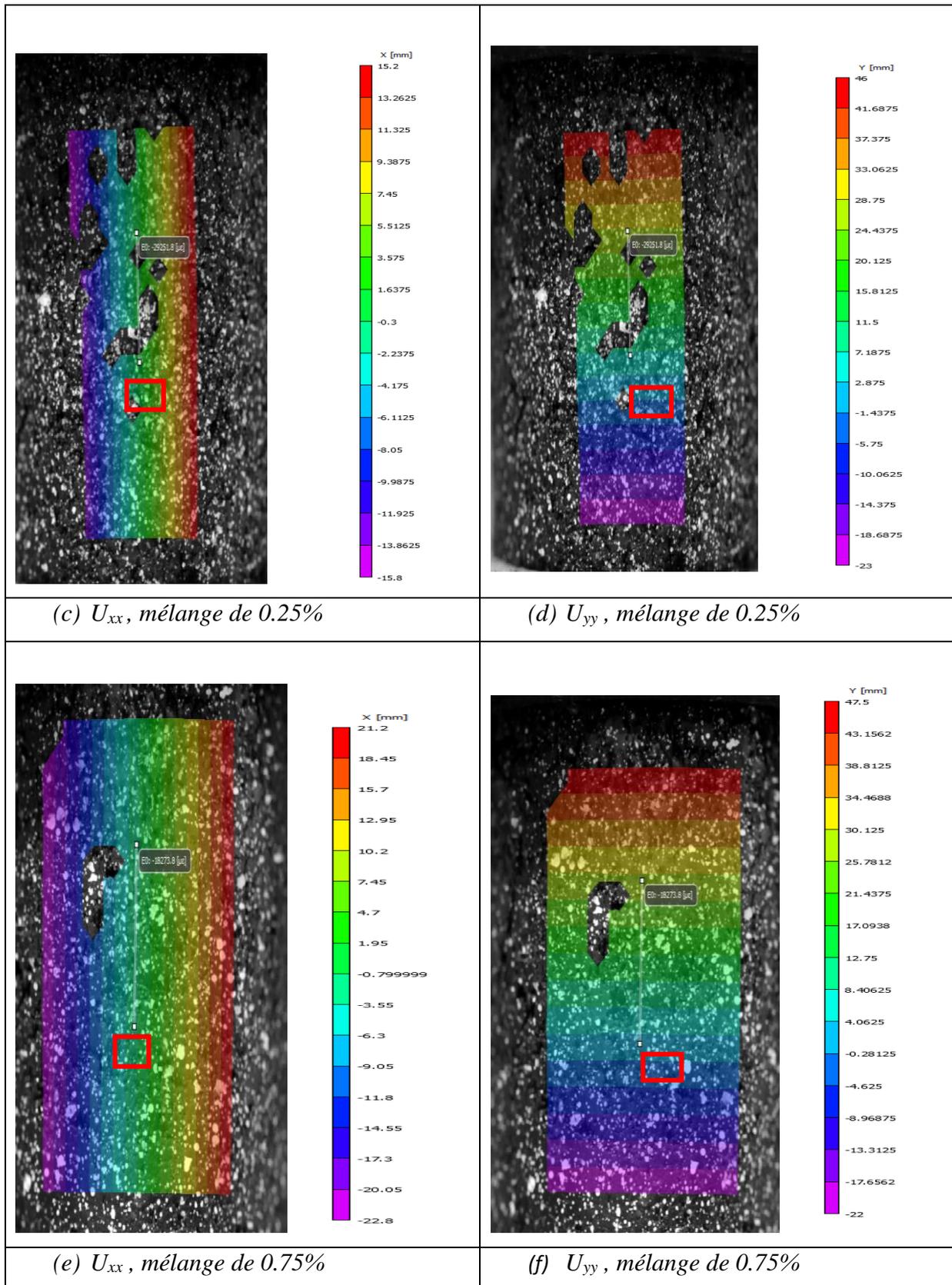


Figure 5.28. Champs de déplacement à la microstructure des échantillons à charge maximale.

▪ Cartographies de déformation

La déformation dans un enrobé est principalement gouvernée par l'interaction entre le liant (souple) et les granulats (rigides). Le comportement de l'enrobé se caractérise par un fort gradient de déformation qui est principalement concentré dans les bandes étroites de liant entre les granulats [98]. Ainsi la mesure des déformations dans l'enrobé constitue un vrai challenge, parce que la méthode de mesure doit présenter une résolution spatiale élevée.

Par ailleurs, une mesure précise de la répartition des déformations dans les mélanges bitumineux est essentielle pour révéler des informations importantes sur l'influence des propriétés de la microstructure sur le comportement macroscopique de l'enrobé. L'identification des zones de concentration de déformations fournit des informations sur l'emplacement probable de fissures. La revue bibliographique a mis en évidence que très peu d'études ont porté sur l'évaluation de l'amplitude des déformations au sein de la microstructure des mélanges bitumineux [99].

Les cartographies de déformations (ε_{xx} , ε_{yy}) obtenues avec la méthode de corrélation d'images pour différents niveaux de chargement et pour les trois mélanges sont présentées sur les figures 5.29. à 5.34.

Les résultats des cartographies de déformations présentés sur ces figures montrent que, les déformations verticales (ε_{yy}) se caractérisent par un signe négatif suivant la direction y, tandis que les déformations horizontales (ε_{xx}) montrent une expansion de l'échantillon le long de la direction x (signe positif).

On note aussi que la distribution des déformations est liée à la répartition des granulats et du liant ainsi que celle la poudrette de caoutchouc.

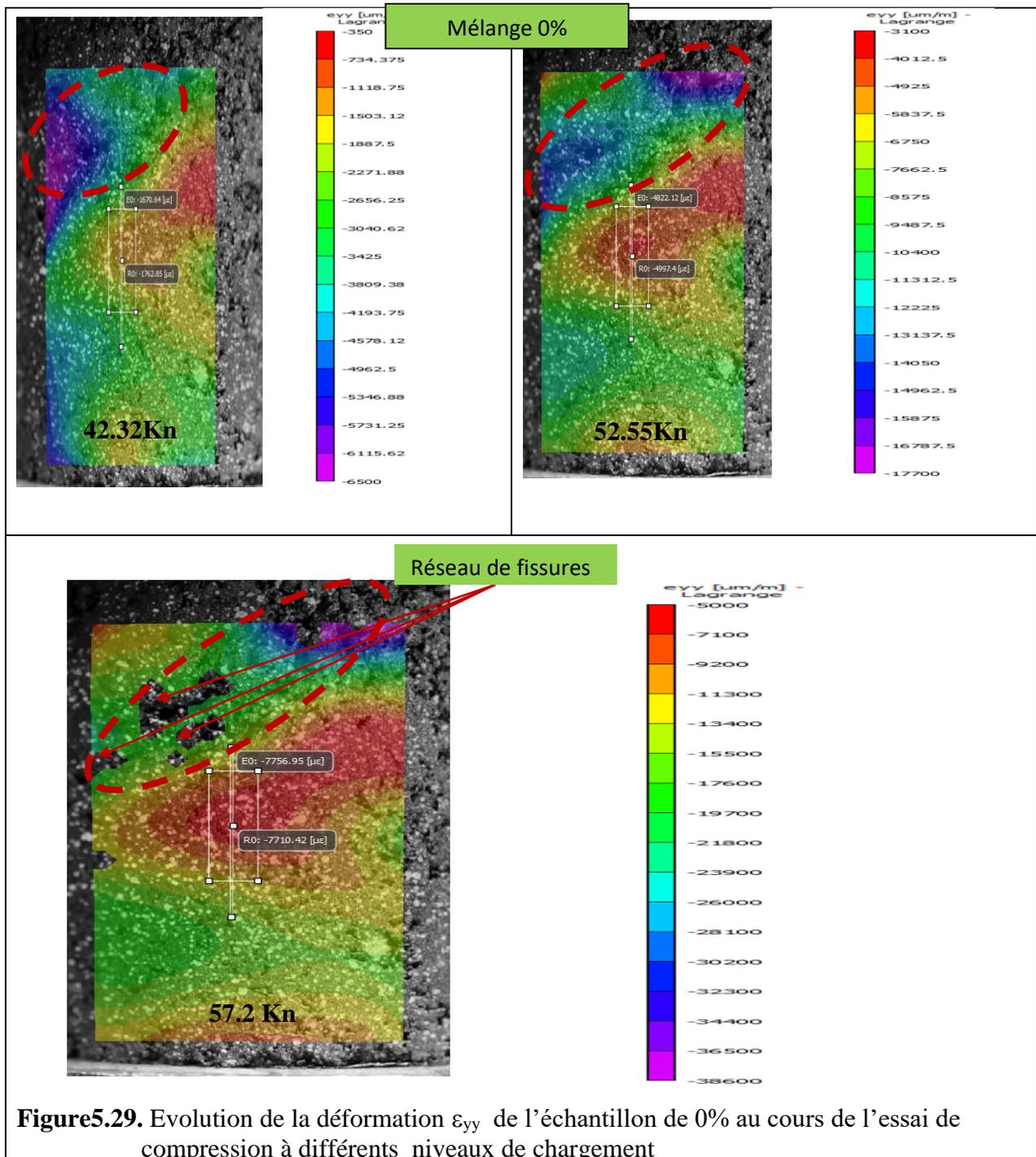
On remarque aussi dans les cartographies de déformations suivant les deux directions, la présence de zones où la déformation est presque nulle. Cela serait dû à la présence d'une certaine rigidité, donc des zones correspondant aux granulats. Cela signifie que toute la déformation est supportée pratiquement par les zones souples (liant + poudrette). Ces constatations confirment la différence qui se trouve entre les granulats et les liants bitumineux ainsi la poudrette de caoutchouc qui possède une certaine souplesse.

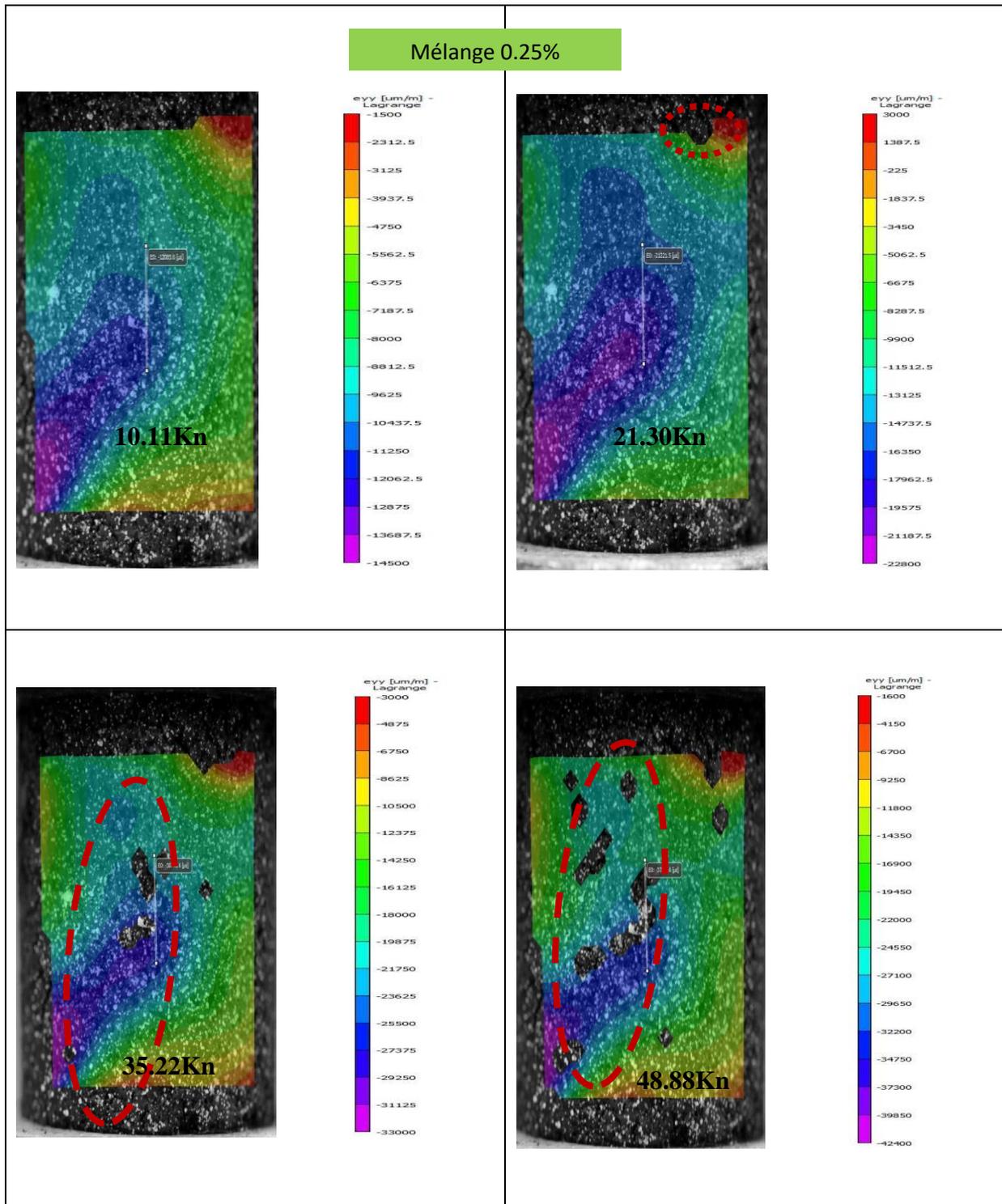
Les résultats montrent aussi que la distribution des déformations dans les deux directions pour le mélange témoin (0%) est principalement concentrée au niveau de la partie supérieure de l'échantillon (zones entourées en rouge). Ces concentrations peuvent éventuellement engendrer des fissurations à l'interface de ces zones.

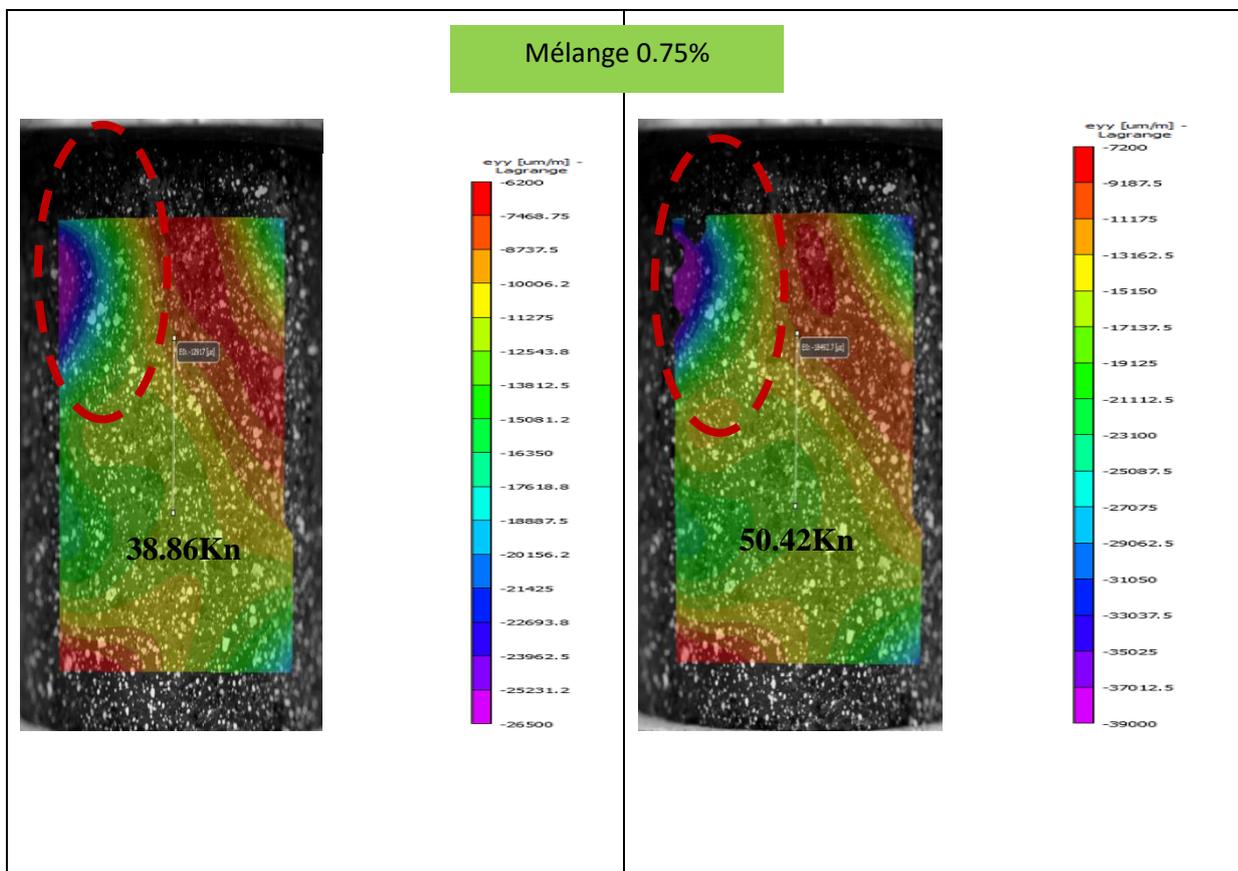
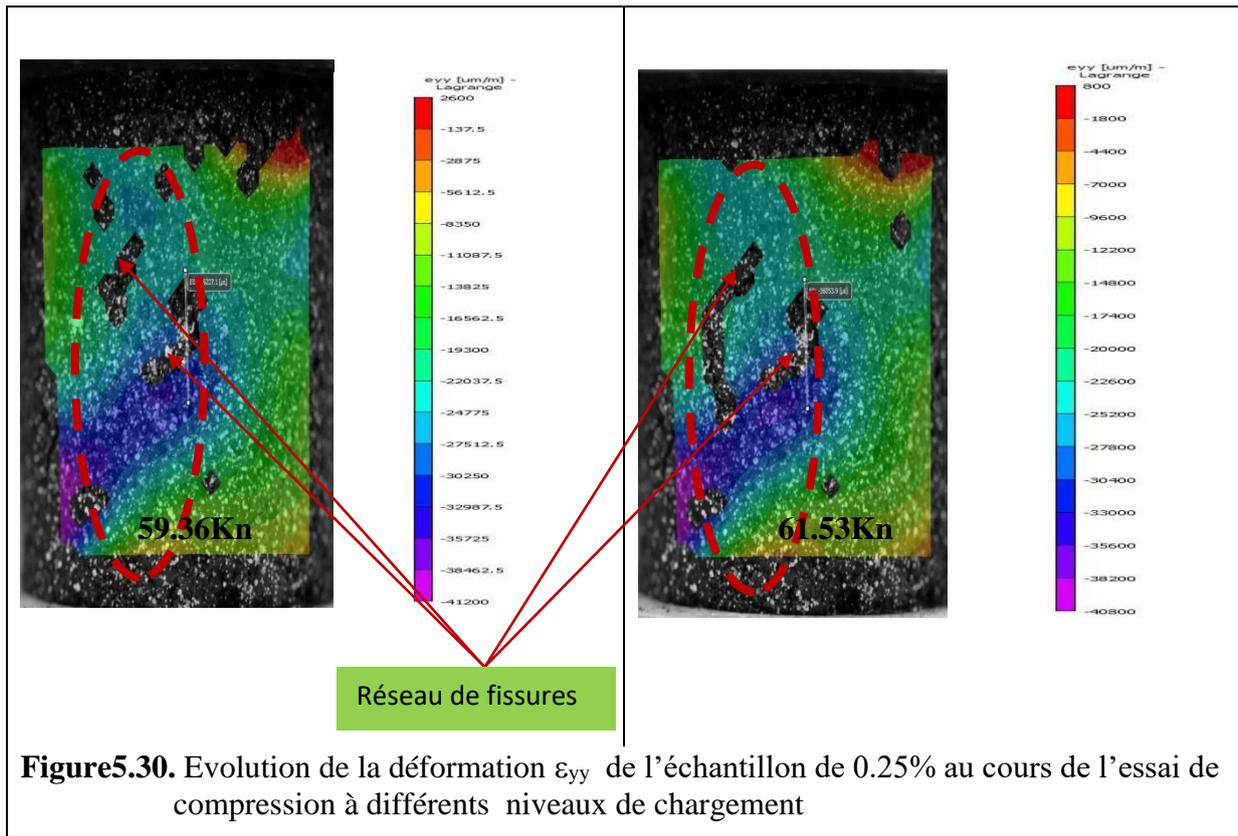
Concernant le mélange modifié par la poudrette de caoutchouc (0.25%), la zone centrale de l'échantillon est concernée par la concentration des déformations.

En ce qui concerne la cartographie de déformations du mélange de 0.75% de poudrette, les déformations sont principalement concentrées dans la partie gauche de l'échantillon.

✓ Déformations suivant Y







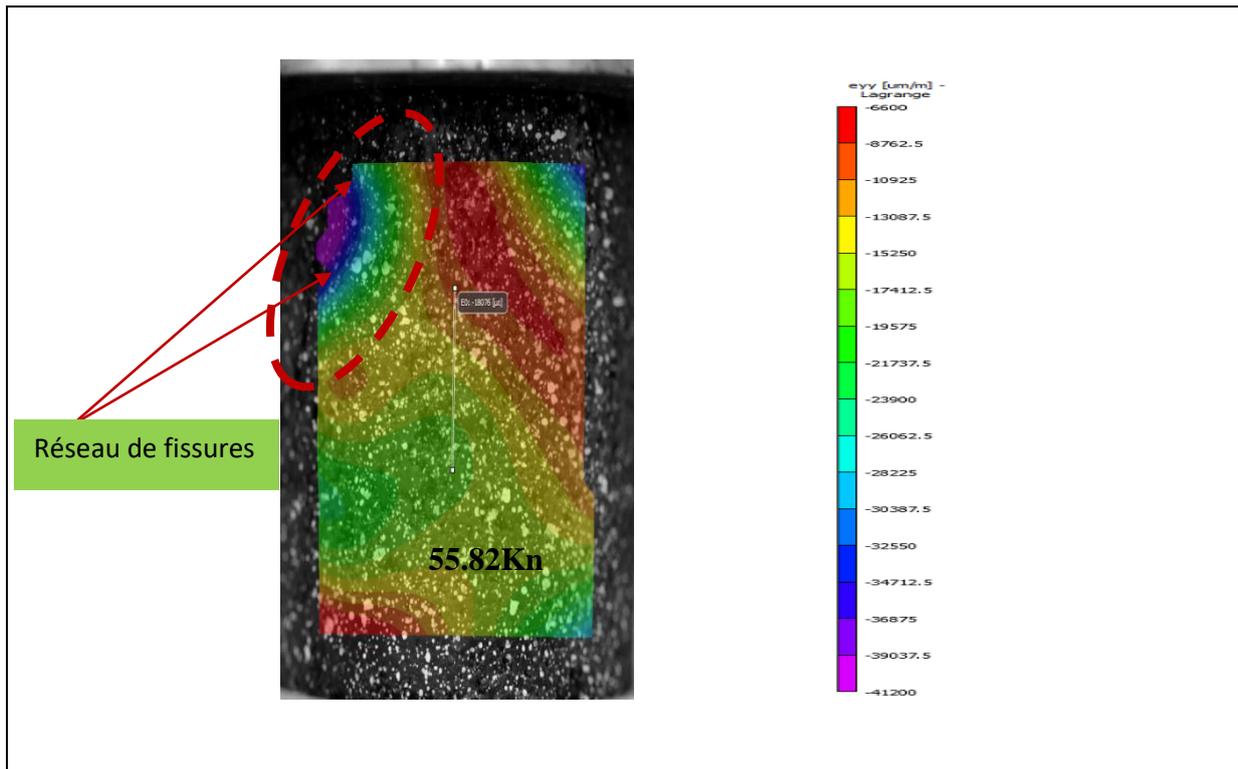
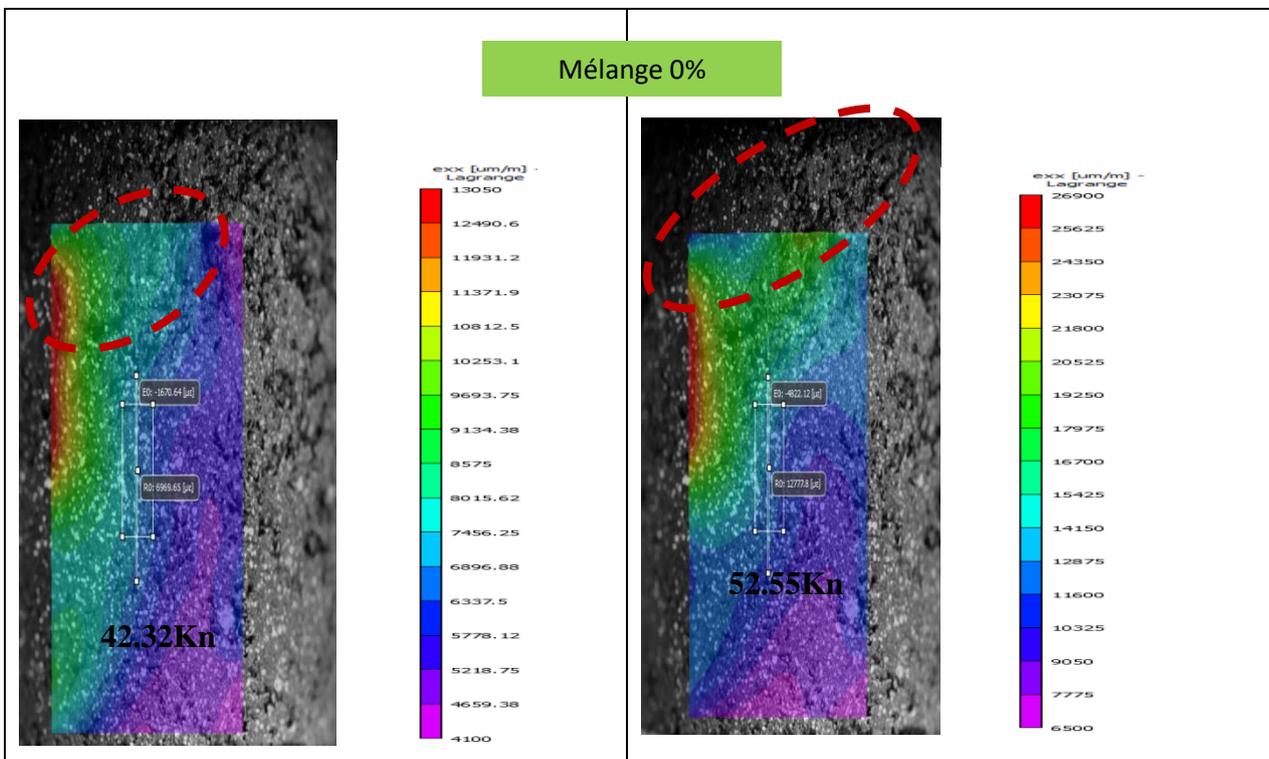
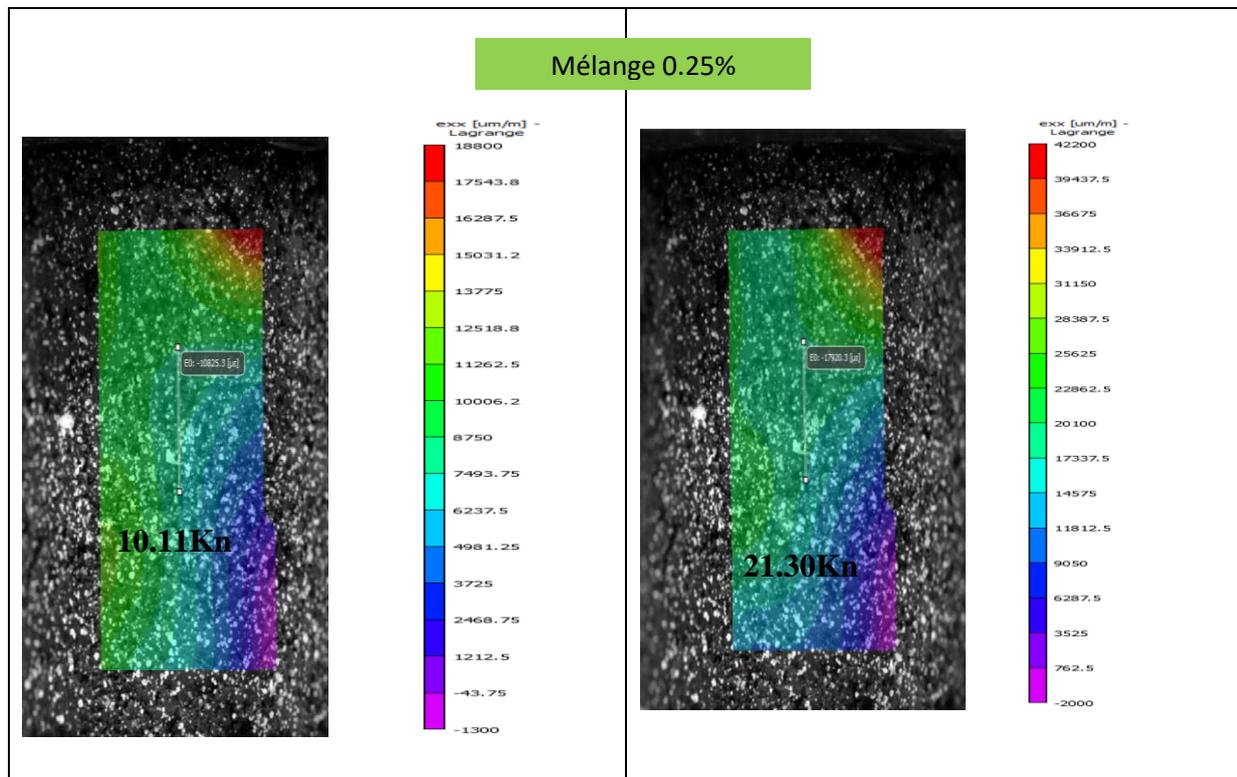
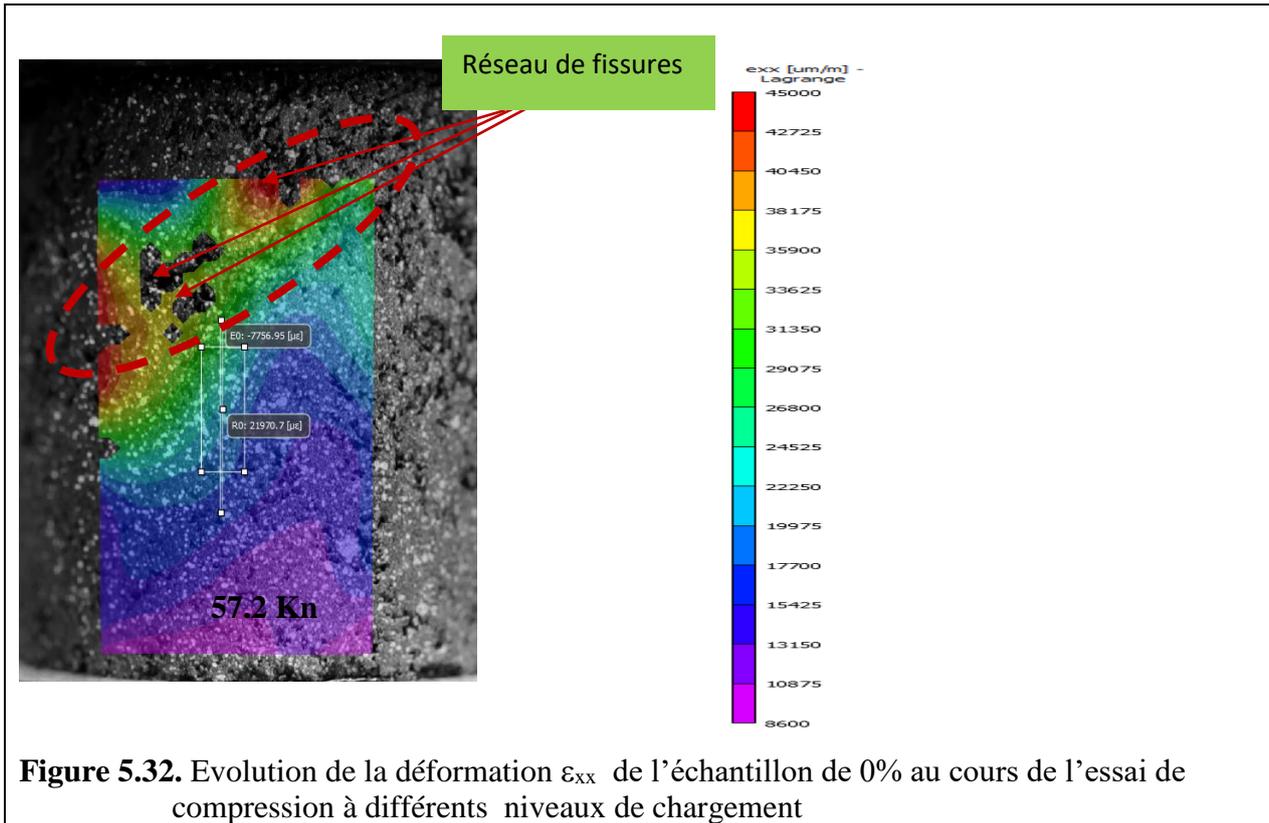


Figure 5.31. Evolution de la déformation ϵ_{yy} de l'échantillon de 0.75% au cours de l'essai de compression à différents niveaux de chargement.

✓ Déformations suivant X





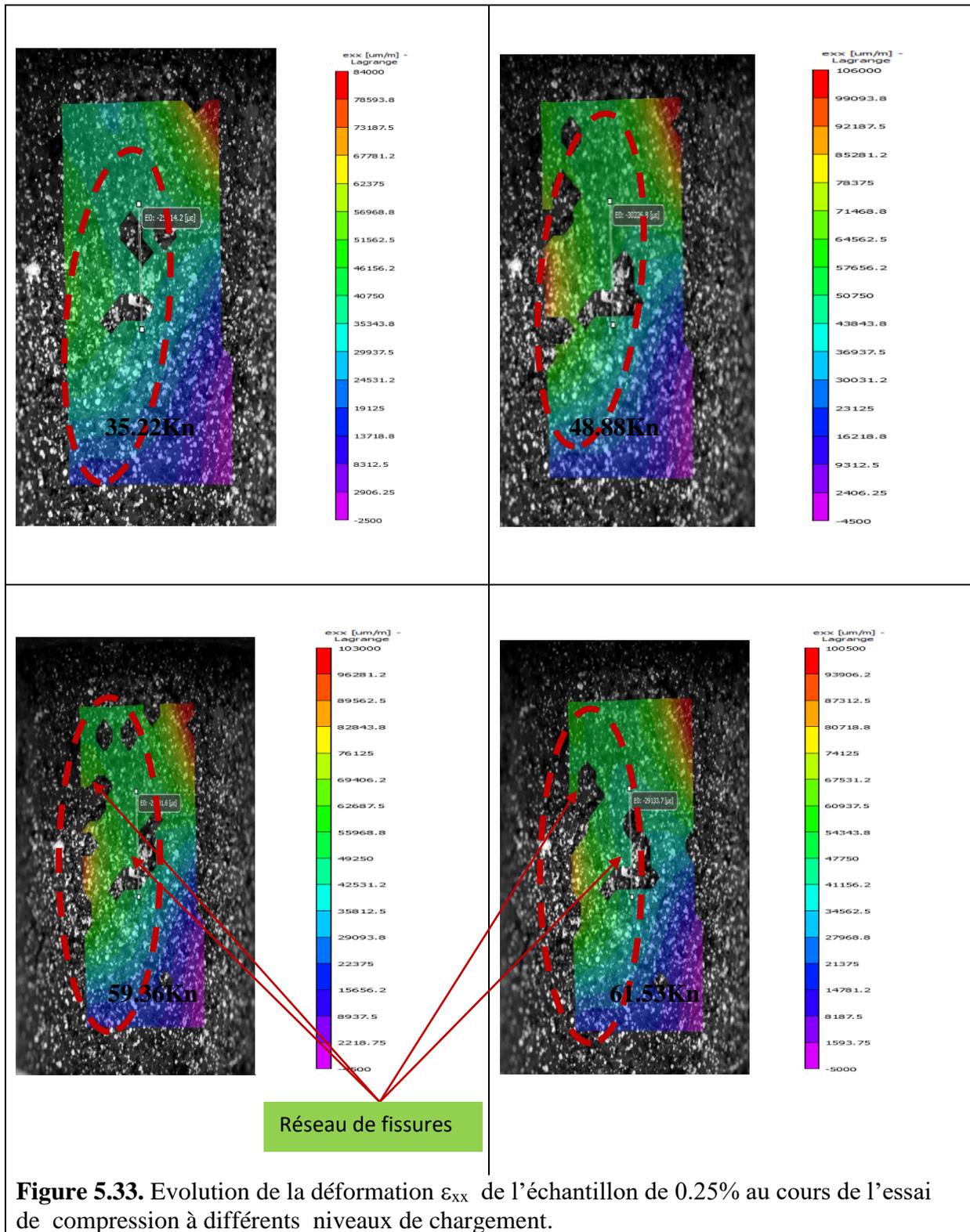
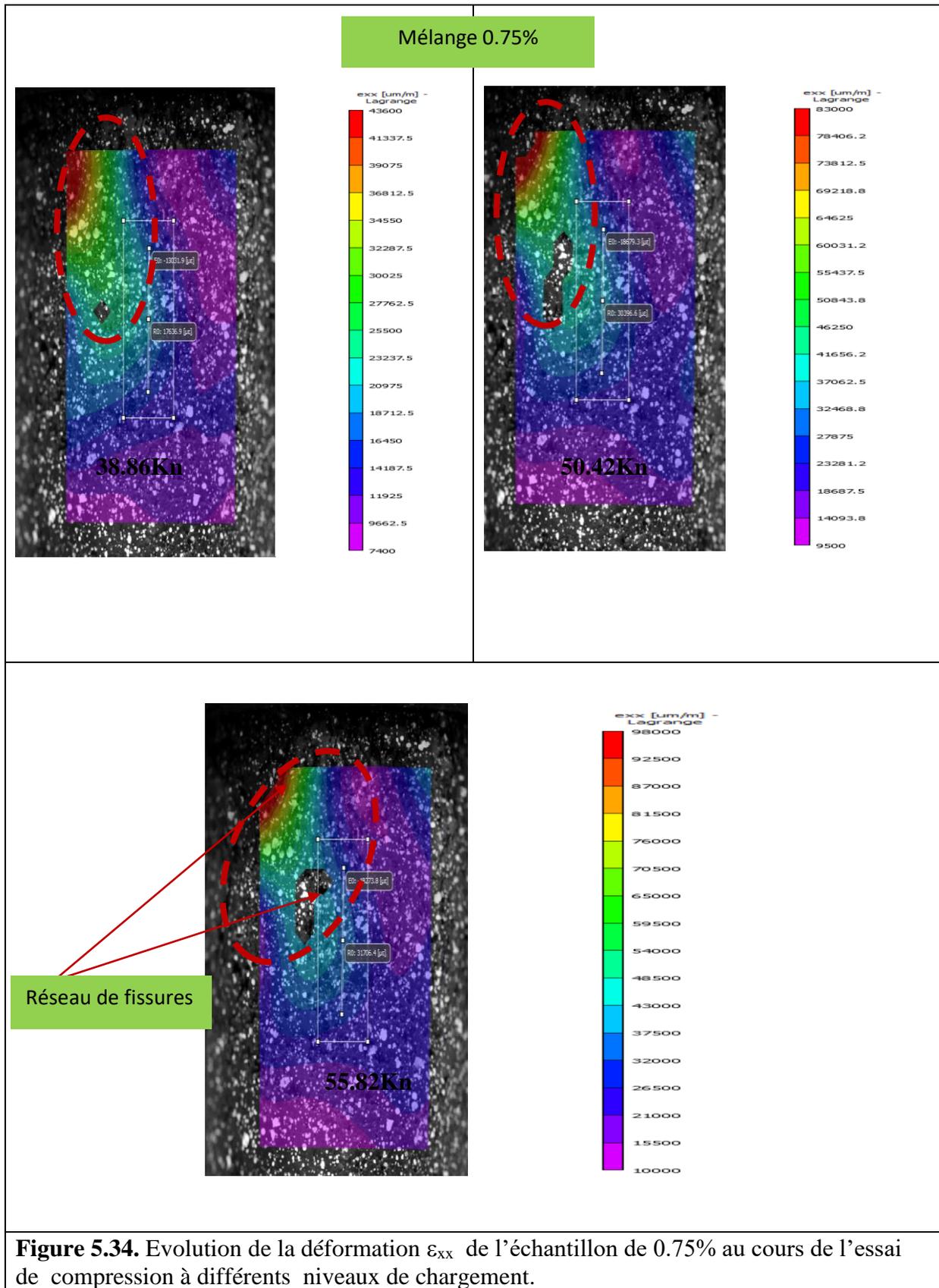


Figure 5.33. Evolution de la déformation ϵ_{xx} de l'échantillon de 0.25% au cours de l'essai de compression à différents niveaux de chargement.

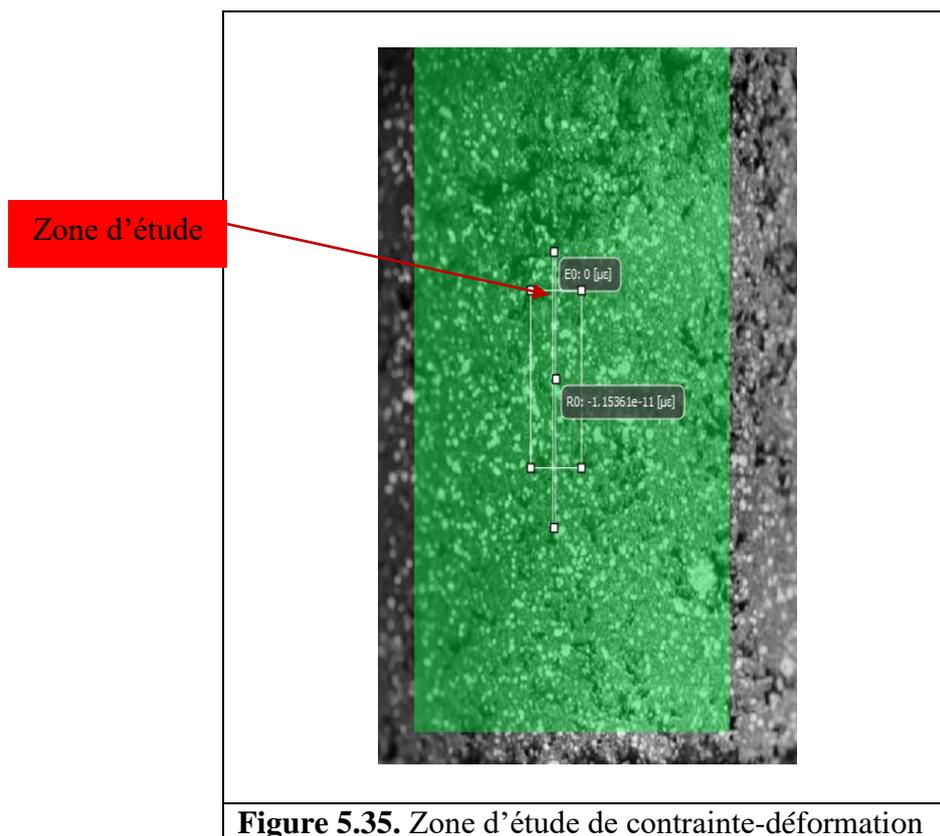


A partir de ces cartographies de déformation mesurées par la technique de DIC, il est clair que le champ de déformation en compression uni-axiale est fortement hétérogène. Cela peut s'expliquer par la distribution aléatoire des constituants de l'enrobé et de la forte différence entre les propriétés mécaniques des constituants du mélange. Dans ce cas, on peut se poser la question sur le module de Young local de ce matériau fortement anisotrope.

▪ Diagramme contrainte- déformation

Afin d'avoir une idée globale sur les valeurs du Module de Young, au niveau des échantillons pour les trois mélanges, une zone d'étude concentrée au milieu de l'éprouvette a été choisie dans ce sens (figure 5.35).

Le diagramme contrainte-déformation réelle de la zone étudiée (à l'échelle microscopique) suivant la direction de compression (verticale), pour des charges enregistrées dans un temps bien déterminé est présenté sur la figure 5.36.



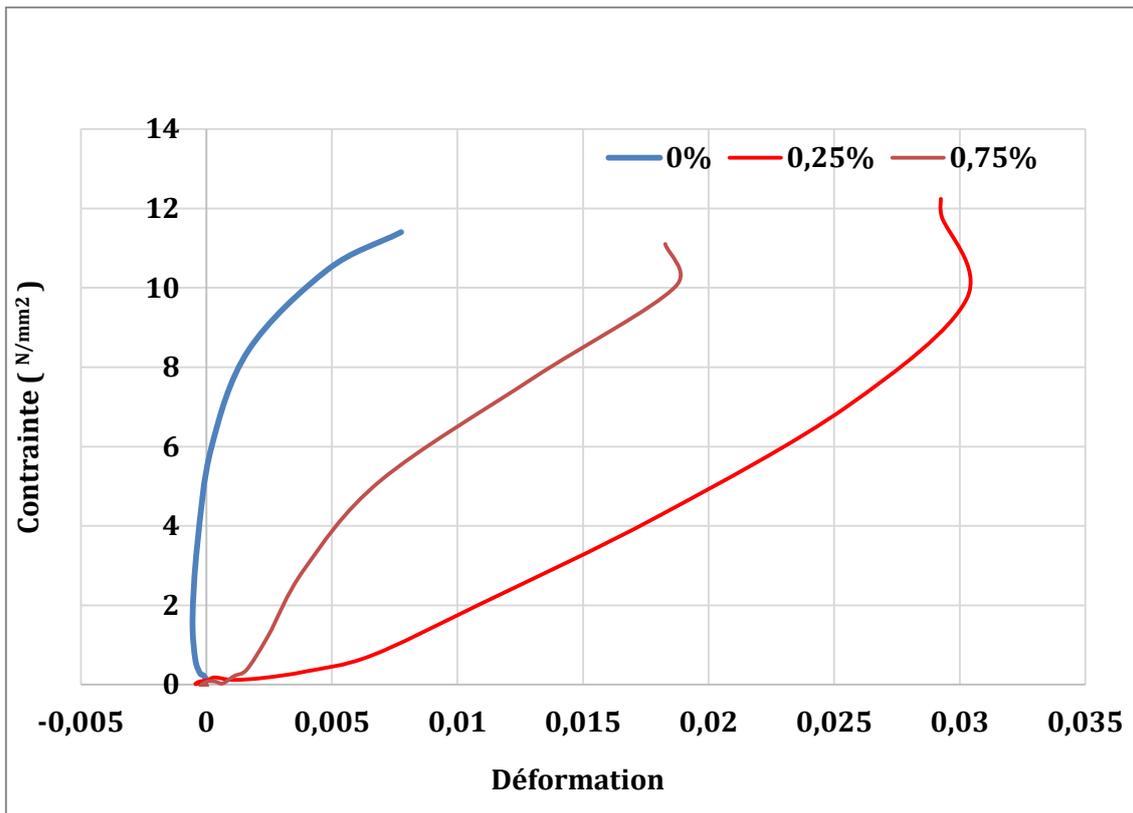


Figure 5.36. Diagramme contrainte-déformation

D'après les diagrammes présentés sur la figure 5.36, on remarque que le mélange sans additif (0%) présente un Module de Young plus élevé par rapport aux autres mélanges. On note aussi que l'incorporation de 0.25% de poudre de caoutchouc dans le mélange a participé dans la diminution du Module de Young, donc elle confère une certaine souplesse au mélange. Tandis qu'à 0.75% de poudre, le Module de Young a augmenté à une valeur intermédiaire entre les deux valeurs précédentes. Cela est dû probablement au fait que la poudre à 0.25% a été absorbée par le liant (rôle de liant), contrairement à celle de 0.75% qui a été partiellement absorbée, donc le reste de la poudre a joué le rôle de fillers qui a renforcé la rigidité du mélange.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Dans cette étude, un intérêt particulier a été porté à l'amélioration des performances des mélanges bitumineux par leur modification. Pour cela, la méthode à sec a été utilisée pour modifier les mélanges bitumineux.

A cet effet, la teneur en bitume a été maintenue à une valeur optimale. La plage des pourcentages de la poudrette de caoutchouc a été fixée par la vérification du critère sur la maniabilité des mélanges.

Sur la base des résultats des essais effectués sur les mélanges bitumineux, des conclusions peuvent être tirées:

- Après avoir testé le mélange avec différents pourcentages de bitume, la teneur optimale en bitume (5,45%) a été identifiée comme référence dans notre étude.
- Le contrôle de la maniabilité des mélanges bitumineux pour les différentes formulations est primordial. Les résultats de la maniabilité pour différents mélanges montrent que les pourcentages de 0,25%, 0,5% et 0,75% donnaient un mélange maniable contrairement à celui de 1%. Par conséquent, la teneur en caoutchouc a été limitée à 0,75%.
- Les résultats des propriétés Marshall du béton bitumineux modifié montrent que:
 - Les vides diminuent en fonction de la teneur en poudrette de caoutchouc.
 - La compacité augmente légèrement en fonction de la teneur en poudrette de caoutchouc.
 - La densité apparente diminue en fonction de la teneur en poudrette de caoutchouc.
 - La stabilité augmente en fonction de la teneur en poudrette de caoutchouc jusqu'à un optimum de 0,25% de caoutchouc, puis diminue.
 - Le fluage Marshall augmente avec l'augmentation de la teneur en poudrette de caoutchouc et diminue ensuite à 0,75%.
 - Le quotient Marshall (MQ) augmente avec l'augmentation de la teneur en caoutchouc jusqu'à atteindre la teneur optimale à 0.25%.
- La tenue à l'eau des enrobés bitumineux modifiés augmente avec l'augmentation de la teneur de poudrette et présente un optimum à 0.25% qui est de l'ordre de 1 (dope d'adhésivité).
- Le module de rigidité des enrobés modifiés par les différentes teneurs de poudrette, augmente avec l'augmentation de poudrette et présente un optimum à 0.25%. Il est à

Conclusion générale

noter que pour les différents pourcentages de caoutchouc, la valeur du module de rigidité diminue avec l'augmentation de la température.

- Les résultats montrent que la profondeur d'orniérage diminue en augmentant le pourcentage de poudrettes de caoutchouc et on remarque aussi que les valeurs de déformation restent toujours inférieures au seuil fixé par la norme ($< 5\%$), ce qui conduit à une amélioration des performances mécaniques de l'enrobé et au comportement vis à vis des déformations permanentes.
- Les résultats du comportement au fluage statique des mélanges bitumineux montrent que :
 - Les déformations minimales se trouvent généralement à 0.25% de poudrette.
 - La variation des déformations en fonction de la température est proportionnelle pour l'ensemble des mélanges.
 - L'ajout de la poudrette de caoutchouc aux mélanges bitumineux améliore le module de rigidité de ces derniers par rapport au mélange témoin.
- La mesure des champs de déformations locales des mélanges bitumineux, nous a permis de déterminer la variation à l'échelle microscopique de la contrainte en fonction de la déformation ; on peut estimer le module de Young réel en tout point et pour l'ensemble du mélange.

En final, la poudrette de caoutchouc a joué un double rôle (correcteur granulaire et /ou liant). Le dosage de 0.25% semblerait le plus recommandé pour les investigations futures.

Perspectives et recommandations

Les travaux de recherche dans cette thèse se sont intéressés à l'étude des performances mécaniques des enrobés modifiés, ainsi aux déformations locales par corrélation d'images numériques. Afin d'élargir la compréhension du comportement des enrobés modifiés il est recommandé de réaliser des essais de tomographie, qui consistent à connaître la distribution des composants avant et après l'écrasement des éprouvettes.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. A. Santagata, F. Canestrari, and E. Pasquini, “Mechanical characterization of asphalt rubber-wet process,” in Proceedings of 4th international SIV congress. Palermo. Italy, 2007.
- [2] V. Mouillet, J. Lamontagne, F. Durrieu, J.-P. Planche, and L. Lapalu, “Infrared microscopy investigation of oxidation and phase evolution in bitumen modified with polymers,” *Fuel*, vol. 87, no. 7, pp. 1270–1280, 2008.
- [3] H. Zhu, L. Sun, J. Yang, Z. Chen, and W. Gu, “Developing master curves and predicting dynamic modulus of polymer-modified asphalt mixtures,” *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 2, pp. 131–137, 2011.
- [4] D. Lo Presti, “Recycled tyre rubber modified bitumens for road asphalt mixtures: a literature review,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 49, pp. 863–881, 2013.
- [5] D. Sibachir, S. Dakhli, and K. Ait Mokhtar, “Rheological Properties and Storage Stability of SEBS Polymer Modified Bitumen,” *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 5, no. 5, p. 1031, 2013.
- [6] M. Ameri and D. Nasr, “Performance properties of devulcanized waste PET modified asphalt mixtures,” *Pet. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 1, pp. 99–104, 2017.
- [7] G. Sarang, B. M. Lekha, G. Krishna, and A. U. Ravi Shankar, “Comparison of Stone Matrix Asphalt mixtures with polymer-modified bitumen and shredded waste plastics,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 17, no. 4, pp. 933–945, 2016.
- [8] H. Ziari, R. Babagoli, and A. Akbari, “Investigation of fatigue and rutting performance of hot mix asphalt mixtures prepared by bentonite-modified bitumen,” *Road Mater. Pavement Des.*, vol. 16, no. 1, pp. 101–118, 2015.
- [9] R. Kettab and A. Bali, “Modified bituminous concrete using rubber powder,” in Proceedings of the International Conference organized by the Concrete and Masonry Research Group, Kingston University, London, Thomas Telford, 2004, pp. 163–170.
- [10] W. Cao, “Study on properties of recycled tire rubber modified asphalt mixtures using dry process,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 21, no. 5, pp. 1011–1015, 2007.
- [11] F. Hernández-Olivares, B. Witoszek-Schultz, M. Alonso-Fernández, and C. Benito-Moro, “Rubber-modified hot-mix asphalt pavement by dry process,” *Int. J. Pavement Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 277–288, 2009.
- [12] M. Rahman, G. Airey, and A. Collop, “Moisture susceptibility of high and low compaction dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures,” *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board*, no. 2180, pp. 121–129, 2010.

- [13] F. Moreno, M. C. Rubio, and M. J. Martínez-Echevarria, “Analysis of digestion time and the crumb rubber percentage in dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes,” *Constr. Build. Mater.*, 2011.
- [14] F. Moreno, M. C. Rubio, and M. J. Martínez-Echevarria, “The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 26, no. 1, pp. 466–474, 2012.
- [15] F. J. López-Moro, M. C. Moro, F. Hernández-Olivares, B. Witoszek-Schultz, and M. Alonso-Fernández, “Microscopic analysis of the interaction between crumb rubber and bitumen in asphalt mixtures using the dry process,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 48, pp. 691–699, 2013.
- [16] P. Lastra-González, M. A. Calzada-Pérez, D. Castro-Fresno, Á. Vega-Zamanillo, and I. Indacochea-Vega, “Comparative analysis of the performance of asphalt concretes modified by dry way with polymeric waste,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 112, pp. 1133–1140, 2016.
- [17] M. Arabani, S. A. Tahami, and G. H. Hamed, “Performance evaluation of dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial,” *Road Mater. Pavement Des.*, pp. 1–18, 2017.
- [18] Eurobitume.. « Qu’est-ce que le bitume ? » 2014
- [19] Diakité, I. S. Caractérisation d'un enrobé bitumineux haute performance et évaluation de son utilisation en couche de base en remplacement d'une grave bitume. (Thèse de doctorat, École de technologie supérieure, Montréal, Qc), 2014.
- [20] Terre, Laisse. « Qu'est-ce que désasphaltage? », 2016< <http://laisseterre.com/article/qu-est-ce-que-dsasphaltage> >.
- [21] A.Kanabar. Physical and Chemical Aging Behavior of Asphalt Cements from Two Northern Ontario Pavement Trials (Mémoire de maîtrise, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada), (2010).
- [22] G.Fernández , W. D., Rondón Quintana, H., & Reyes Lizcano, F. A review of asphalt and asphalt mixture aging: Una revisión. *Ingenieria e investigacion*, (2013).
- [23] M. H. Merbouh, Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux: influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue (Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, Bordeaux, France), (2010).
- [24] S.Lamothe, Enrobé grenu: influence du dosage en filler et et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-ornière (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, Qc), (2004).
- [25] F.Ben Salem. Evaluation de l’effet d’ajout du régénérant sur le bitume vieilli et sur les enrobés recyclés a froid. Diss. Ecole de technologie superieure, (2017).
- [26] D.Lesueur, La rhéologie des bitumes: principes et modification. *Rhéologie*, 2, 1-30, (2002).

- [27] O.Solomatnikova, Comportement rhéologique et propriétés cohésives et adhésives des liants bitumineux. (Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec City, Qc), (1998).
- [28] D.Lesueur, Planche, J. P., & Dumas, P. Détermination de la teneur en paraffines des bitumes. Bulletin-Laboratoires Des Ponts Et Chaussées, 3-12, (2000).
- [29] N.Tachon, Nouveaux types de liants routiers à hautes performances, à teneur en bitume réduite par addition de produits organiques issus des agroressources (Thèse de doctorat, École Doctorale Sciences de la Matière (Toulouse), (2008).
- [30] J-P.Gingras, « Émulsification de bitume en phase concentrée ». Montréal, École Polytechnique, (2006).
- [31] S.Le Bec, « Les émulsions de bitume Formulation et Fabrication selon leur usage » , (2012).
- [32] J. A. Cardenas, Évaluation de l'effet de la température de cure sur le comportement des matériaux bitumineux de type MR-5 traités à la mousse de bitume. (Mémoire de maîtrise, École de technologie supérieure, Montréal, Qc), (2013).
- [33] S.Trudeau, <Introduction aux bitumes> vol.Formation technique de bitume Québec 2012, (2012).
- [34] C. W. Curtis, Ensley, K., & Epps, J. Fundamental properties of asphalt-aggregate interactions including adhesion and absorption (No. SHRP-A-341). Washington, DC, USA: National Research Council, (1993).
- [35] R. A.Tarefder, & Arisa, I. Molecular dynamic simulations for determining change in thermodynamic properties of asphaltene and resin because of aging. Energy & Fuels, 25(5), 2211-2222, (2011).
- [36] O. G. Ciochina,. Incorporation dans les bitumes petroliers des residus de la distillation des huiles provenant de la pyrolyse sous vide de pneus usés, de bois et des rebuts de broyage d'automobiles (Mémoire de maîtrise, Université Laval, Québec, (1998).
- [37] H. Y.Liu, & Y.Q.Jia, Study on the Action Mechanism of Bitumen Emulsion and Aggregate. In Advanced Materials Research (Vol. 250, pp. 3039-3043). Trans Tech Publications, Aguiar-Moya, J. P., Salazar-Delgado, J., Baldi-Sevilla, A., Leiva-Villacorta, F., & Loria, (2011).
- [38] L .Salazar,. Effect of aging on adhesion properties of asphalt mixtures with the use of bitumen bond strength and surface energy measurement tests. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, (2505), 57-65, (2015).
- [39] S.Kazziha, , et L .Bernard. (2005). « Bitume.info ».
- [40] Guide technique « Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud », fascicule2 (La formulation), CCTP, Février (2004).
- [41] Norme Francaise. Analyse granulométrique par tamisage.NF P 18-586. Octobre (1978).
- [42] <https://www.vicat.fr/Activites/Granulats/Les-types-de-granulats>.
- [43] R. Maillot, « Mémento technique des Granulats », les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 166 p, (2001).
- [44] Lechgueur. Science des matériaux de construction. Université aboubekr belkaid faculté des sciences de l'ingénieur département de génie civil.

- [45] H.Miloudi, « Etude du comportement mécanique des bétons bitumineux discontinus », Thèse de master ENSTP, P12, (2017).
- [46] Synthèse, «Les caractéristiques principales des granulats», P7.
- [47] K. Amor et Z.Mustafa «Influence de la poudrette de caoutchouc sur les propriétés des enrobés bitumineux», thèse d'ingénieur. École nationale supérieure des travaux publics (E.N.S.T.P), pp 34-53-56,(2013).
- [48] R. Dupain, R. Lanchon, J.C Saint Arroman « GRANULATS, SOLS, CIMENTS ET BETON » 2e édition conforme aux normes européennes.
- [49] P. Régis sebben « approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobes a chaud », thèse de doctorat de l'université de rouen, février (2007).
- [50] https://www.facebook.com/permalink.php?id=22137322454472&story_fbid=481809868510805
- [51] A. Djabri, A.Hammana. « Caractérisation des enrobes bitumineux recyclés », Master II option travaux publics. Université de Tebessa faculté des sciences et de la technologie département génie civil.105p, (2015/2016).
- [52] W.Gottfried, Ehrenstein et F. Montagne « Matériaux polymères : structure, propriétés et applications » paris, hermès science publication editor (2000).
- [53] R. Murray ; Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples ; Québec Canada.
- [54] K. Belkidar, « généralité sur les chaussées » mémoire de magistère en génie civil.
- [55] J.Berthier « Les routes- Matériaux de chaussées souples et semi rigides »
- [56] <https://www.texum.swiss/fr/renforcement-de-chaussees/la-problématique/orniérage>.
- [57] S.Haddadi, , E. Ghorbel, and N.Laradi. "Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA." *Construction and Building Materials* 22.6 (2008): 1212-1219
- [58] S.Saoula, , S.Haddadi, and K.Ait Mokhtar. "The study of the improvement of mechanical performance of asphalt modified by the optimization of mixing time of EVA bitumen." *AIP Conference Proceedings*. Vol. 1400. No. 1. AIP, 2011.
- [59] R.Bazzine, , and T.Bentebba. "Influence De L'ajout De La Poudrette De Caoutchouc Sur La Stabilité Des Enrobes Bitumineux."
- [60] N.Kebaïli, , and Y.Abimouloud. "Etude D'amélioration Des Propriétés Des Bitumes Routiers Par La Poudrette De Caoutchouc."
- [61] Dias, JL Feiteira, L. G. Picado-Santos, and S. D. Capitão. "Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network." *Construction and Building Materials* 73 (2014): 247-254.

- [62] H. Nguyen, , and T. Nhan Tran. "Effects of crumb rubber content and curing time on the properties of asphalt concrete and stone mastic asphalt using dry process." *International Journal of Pavement Research and Technology* 11.3 (2018): 236-244.
- [63] M. Arabani , S.Tahami, and GH. Hamed. "Performance evaluation of dry process crumb rubber-modified asphalt mixtures with nanomaterial." *Road Materials and Pavement Design* 19.5 (2018): 1241-1258.
- [64] F. Moreno,, M. C. Rubio, and M. J. Martinez-Echevarria. "The mechanical performance of dry-process crumb rubber modified hot bituminous mixes: The influence of digestion time and crumb rubber percentage." *Construction and Building Materials* 26.1 (2012): 466-474.
- [65] T.Moghaddam, , M.Soltani, and M.Rehan Karim. "Stiffness modulus of Polyethylene Terephthalate modified asphalt mixture: A statistical analysis of the laboratory testing results." *Materials & Design* 68 (2015): 88-96.
- [66] C.Sengul et al. "Evaluation of SBS modified stone mastic asphalt pavement performance." *Construction and Building Materials* 41 (2013): 777-783.
- [67] Norme Française. Pénétrabilité a l'aiguille. NF T 66-004. Décembre 1986.
- [68] Norme Française. Détermination du point de ramollissement des produits bitumineux. NF 66-008. Juillet 1979.
- [69] R. A. Tarefder, & I.Arisa,. Molecular dynamic simulations for determining change in thermodynamic properties of asphaltene and resin because of aging. *Energy & Fuels*, 25(5), (2011). 2211-2222.
- [70] Norme Anglaise. Ductilité des bitumes (NA 5223).
- [71] Norme Française. Essai point d'éclair et de fer. (NF EN ISO 2592).
- [72] Norme Francaise. Determination de l'effet de la chaleur et de l'air sur un film mince de liant en renouvellement permanent. Essai de durcissement simulé <<RTFOT>>. T. 66-032. Aout (1992).
- [73] C. Robert,. « Les exigences du MTQ sur les granulats et le comportement des matériaux ». En ligne, (2010). 28 p. <http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/ files/3fd3a8b7724debc_file.pdf>.
- [74] A.Zemmiri «Comparaison des formulations d'enrobes à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniérage» *Certificat d'études supérieures - ENTPE de Lyon 2008*, 112 p.
- [75] M.Paradis, et M.Routhier. « Formulation des enrobés à matrice de pierre (SMA) selon la formulation du Laboratoire des chaussée ». *Bulletin Innovation Transport*, no 27, (juin 2006), p. 25-31.
- [76] Norme Française. Echantillonnage des granulats. (NF EN 933-1)
- [77] Norme Francaise. Analyse granulometrique par tamisage. NF P 18-586- Septembre 1990.
- [78] Norme Francaise. Determination des propreté superficielle. NF P 18-591. Septembre 1990.
- [79] Norme Francaise. Equivalent de sable. NF EN 933-8 Mars 2012

- [80] Norme Française. Coefficient d'aplatissement NF EN 933-3 Mars 2012.
- [81] Norme Française. Essai Los Angeles. NF EN 1097-2 juin 2010.
- [82] Norme Française. Essai d'usure Micro Deval. NF EN 1097-1 Aout 2011.
- [83] Norme Américaine. Essai de traction des polymères (ASTM D 638).
- [84] M.Duriez. *Traité de matériaux de construction*. T1. Edition Dunod.
- [85] Norme Française. Essais statiques sur mélanges hydrocarbures. Essai Marshall. NF EN 12697-34 aout 2012.
- [86] Norme Française. Essai de la Presse à cisaillement Giratoire NF EN 12697-31. Aout 2007.
- [87] Norme Française. Essai Duriez NF EN 12697-12 Septembre 2008 actualisée Juin 2018.
- [88] Norme Française. Essai du module de rigidité (NF EN 12697-26 annexe C).
- [89] Norme Française. Essai d'orniérage (NF EN 12697-22).
- [90] J.Zawadzki, : Adaptation of a creep test for evaluation of the permanent deformation of bituminous mixes .Mechanical Test for bituminous materials. Fith International Rilem symposium MTBM, Lyon, France 1997. P 317-323
- [91] P.O.Bouchard, V.Manuel T.Navas, M.Shakoor, A.Buljac, M.Bernacki, T.Morgeneyer, F.Hild: Analysis of local strain in nodular graphite cast iron at the onset of coalescence by means of 3D numerical modeling combined with X-Ray laminography and digital volume correlation, WCCM 2018, Jul 2018, New-York, United States.
- [92] A.Buljac, V.Manuel T.Navas, M.Shakoor, A.Bouterf, J.Neggers, M.Bernacki, P.Olivier Bouchard, T. Morgeneyer, F.Hild, On the calibration of elastoplastic parameters at the microscale via X-ray microtomography and digital volume correlation for the simulation of ductile damage, *European Journal of Mechanics - A/Solids*, Elsevier, 2018, 72, pp.287-297.
- [93] L. da Silva, A. Benta, and L. Picado-Santos, "Asphalt rubber concrete fabricated by the dry process: Laboratory assessment of resistance against reflection cracking," *Constr. Build. Mater.*, 2018.
- [94] J. L. Feiteira Dias, L. G. Picado-Santos, and S. D. Capitão, "Mechanical performance of dry process fine crumb rubber asphalt mixtures placed on the Portuguese road network," *Constr. Build. Mater.* 2014.
- [95] S. Hınıslioglu., E.Agar., Use of waste high density polyethylene as bitumen modifier in asphalt concrete mix, *Materials Letters*, Vol.58, pp. 267-71, 2004.
- [96] Shell Bitumen, *Handbook Vol.260*, 1991.
- [97] H. Xu, W. Guo, and Y. Tan, "Internal structure evolution of asphalt mixtures during freeze–thaw cycles," *Materials & Design*, vol. 86, pp. 436–446, 2015.

- [98] E. Masad, N. Somadevan, H. Bahia, and S. Kose, “Modeling and Experimental Measurements of Strain Distribution in Asphalt Mixes,” *Journal of Transportation Engineering*, vol. 127, no. 6, pp. 477–485, 2001.
- [99] E. Romeo, “Two-dimensional digital image correlation for asphalt mixture characterisation : interest and limitations,” *Road Materials and Pavement Design*, vol. 14, pp. 747–763, Dec. 2013.