

N° d'ordre : 10/2010-M/GC

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTÉ DE GÉNIE CIVIL



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

En Génie Civil

Spécialité : GEOTECHNIQUE

Par **CHERIET FAYSSAL**

Sujet

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INFLUENCE DU
CHARGEMENT SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES
ENROBES BITUMINEUX MODIFIES PAR LE NR.**

Soutenu publiquement, le 20/06/2010, devant le jury composé de :

Mme. F. KHARCHI	Professeur, à USTHB	Présidente
M. S. HADDADI	Maître de Conférences (A) à USTHB	Directeur de Mémoire
M. M. BELACHIA	Professeur à Université de Skikda	Examineur
Mme. K. AIT MOKHTAR	Maître de Conférences (A) à USTHB	Examinatrice
M. M.N. OUDJIT	Maître de Conférences (A) à USTHB	Examineur

Remerciements

Tous d'abord, Nous tenons à remercier Dieu clément et miséricordieux de m'avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur le Docteur **HADDADI SMAIL**, Maître de conférences à l'Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediène, pour l'élaboration de ce mémoire, ses aides précieuses, conseils, son soutien permanent et pour tous ses efforts.

Je suis très honoré par la présence de Madame **F. KHARCHI**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, qui a bien voulu présider le jury de ce mémoire.

J'exprime ma gratitude à Madame **K. AIT MOKHTAR**, Maître de Conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène qui m'a encouragé et guidé et qui a accepté d'examiner ce travail.

Je voudrais exprimer mes remerciements à Monsieur **M. BELACHIA**, Professeur à l'Université de Skikda, et à Monsieur **M.N. OUDJIT**, Maître de Conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de participer au jury de ce mémoire.

En fin, je tiens à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, à la concrétisation de ce travail.

Dédicace

A mes très chers parents,

A mes frères,

A mes sœurs,

A ma fiancée (farida),

A toute ma famille,

A tous mes amis,

A tous mes enseignants.

Résumé

L'objectif de cette étude est l'amélioration des liants bitumineux par de la poudre de caoutchouc naturel (NR), et l'influence du chargement sur le comportement des enrobés. Cette étude a montré :

- L'amélioration, pour le bitume de ses caractéristiques physiques et mécaniques telles que :
 - la diminution de la pénétrabilité, de la ductilité et de la susceptibilité thermique,
 - augmentation de la température de ramollissement TBA.
- L'amélioration du comportement des enrobés bitumineux, tels que :
 - L'augmentation de la stabilité, la compacité et le quotient Marshall,
 - La diminution du fluage Marshall,
 - L'augmentation de la résistance à la traction indirecte,
 - L'augmentation de la résistance aux déformations de fluage,
 - La réduction de la déformation initiale de l'enrobé bitumineux,
 - La diminution de la vitesse de déformation.

Mots Clés: *Bitume, Caoutchouc naturel, Enrobés bitumineux, Marshall, Traction indirecte, Fluage.*

Abstract

The aim of this study is the improvement of the bitumen binders by natural rubber fine powder (NR), and the loading influence on the behavior of the bituminous concrete.

This study showed:

- an improvement for the bitumen of its physical and mechanical characteristics such as:
 - a reduction in penetrability, ductility and thermal susceptibility,
 - an increase in the softening point.
- an Improvement of the behavior of the bituminous concrete, such as:
 - an increase in stability, compactness and the Marshall quotient,
 - a reduction in Marshall flow,
 - an increase in the indirect tensile strength ,
 - an increase in resistance to the deformations of creep,
 - a reduction of the initial deformation of the bituminous concrete,
 - a reduction the speed of deformation.

Key Words: *Bitumen, Natural rubber, Bituminous concretes, Marshall test, Indirect tensile strength, Creep.*

ملخص

- يهدف هذا العمل لدراسة تأثير مسحوق المطاط الطبيعي على الخصائص الميكانيكية و الريولوجية لخليط الزفت من جهة ومن جهة أخرى على تأثير التحميل على تصرف الخلائط الزفتية.
- تعديل الزفت مع مسحوق المطاط الطبيعي يحسن الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية.
 - انخفاض في الاحتراق، نقص في الليونة و نقص في قابلية التمدد الحراري.
 - زيادة في TBA.
- كما أن تعديل الزفت يحسن تصرف الخلائط الزفتية و ذلك عن طريق:
- زيادة في استقرار الرص و معامل مارشال.
 - انخفاض تمييع مارشال.
 - زيادة في مقاومة الشد الغير مباشر.
 - زيادة في مقاومة تشوه التميع.
 - انخفاض في التشوه الأولي الخلائط الزفتية .
 - انخفاض في سرعة التشوه .
- الكلمات المفتاحية الزفت ،مسحوق المطاط الخلائط الزفتية، مارشال، الشد الغير مباشر، التميع.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	3
CHAPITRE 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I. LE BITUME	5
I.1 Origine	6
I.2 Composition chimique et structure des bitumes	6
I.2.1 Composition chimique	6
I.2.1.1 Méthodes de séparation	7
I.2.1.2 Groupes génériques fondamentaux	7
a. Les Asphaltènes	7
b. Les aromatiques :	9
c. Les saturés :	9
d. Les résines :	9
I.2.2 Structure colloïdale du bitume :	9
I.3. Les essais de caractérisation des bitumes	12
I.3.1 Les essais classiques	12
I.4.2 Les essais Mécaniques	12
II. LES POLYMERES	15
II.1 Structure des polymères	15
II.2 Les Agents modifiants	16
II.2.1 Les thermdurcissables	16
II.2.2 Les thermoplastiques :	16
II.2.3 Les latex	17
II.2.4 Poudrette de caoutchouc	18
II-2-5 Les cendres volantes	21
II-3 Les polymères Les plus utilisés pour la modification des bitumes :	21
II-4 Comportement mécanique	22
III BITUME MODIFIE	24
III-1 Objectifs de modification	24
III-2 Définition de la modification	25
III-3 Composition du bitume - polymère	25
III-4 Mécanisme de la modification	26
III-5 La compatibilité	28

III-6 Solubilité-----	28
III-7 Convenance-----	29
III-7 Influence de la teneur en polymère -----	30
III-8 Fabrication des bitumes polymères -----	31
IV.BITUMES CAOUTCHOUCS -----	32
IV-1 Procédés de fabrication -----	32
IV-2 Application du bitume caoutchouc dans le domaine routier -----	35
IV-2-1 Enduit superficiels -----	35
IV-2-2 Joints pour fissures-----	36
IV-2-3 Membranes gravillonnées-----	36
IV-2-4 Enrobé bitumineux à chaud-----	37
IV-2-5 Émulsion -----	37
V. LES GRANULATS-----	38
V-1 Caractéristiques et propriétés des granulats -----	38
V-2 Classification des granulats -----	38
VI. LES ENROBES BITUMINEUX-----	39
VI-1 Les structures des chaussées -----	39
VI-2 Généralité sur les enrobés -----	41
VI-2-1 Définition -----	41
VI-2-2 Teneur en liant -----	41
VI-2-3 Influence des actions appliquées à la chaussée-----	42
a) Sollicitations mécaniques (effet de trafic) -----	42
b) Les Sollicitations climatiques (effet de la température) -----	44
VI-3 Classement des types de comportement des matériaux bitumineux -----	44
VI-4 Essais sur Enrobé bitumineux-----	46
VII. Résumé de quelques travaux -----	46
CHAPITRE 2 : PRESENTATIONS DES MATERIAUX-----	59
I. IDENTIFICATION DES GRANULATS -----	59
I-1. Origine des granulats :-----	59
I-2. Analyse chimique : -----	59
I-3Analyse granulométrique : -----	60
I-5Coefficient d'aplatissement -----	60

I-6 Les caractéristiques intrinsèques : -----	61
I-7 L'essai au bleu de méthylène VB-----	61
I-8 Conclusion : -----	61
II. IDENTIFICATION DE BITUME -----	62
II-1. Caractéristique du bitume-----	62
II-2 Susceptibilité thermique :-----	62
III. IDENTIFICATION DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC -----	64
III-1 Caractéristique de la poudrette : -----	64
III-2Caractérisation du NR par FTIR : -----	65
IV. IDENTIFICATION DE BITUMES MODIFIES -----	66
IV-1 Fabrication du bitume caoutchouc :-----	66
IV-2 Désignation des liants modifiés : -----	67
IV-3 Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité : -----	68
IV-4 La susceptibilité thermique des bitumes modifiés au NR :-----	68
IV-5 Variation de la pénétrabilité (25°C) du bitume modifié par rapport au bitume pur : -----	69
IV-6 Influence de la teneur en NR sur la température bille et anneau (TBA) : -----	70
IV-7 Variation de TBA du bitume modifié par rapport au bitume pur : -----	70
IV-8 Influence de la teneur en NR sur la ductilité : -----	71
IV-9 Conclusion : -----	71
V. FABRICATION DES ENROBES BITUMINEUX -----	72
V-1 Étude de la formulation : -----	72
V-2 Les essais sur l'enrobé bitumineux : -----	73
Conclusion : -----	81
CHAPITRE 3 : ETUDE DE FLUAGE STATIQUE-----	82
3-1Généralité :-----	82
3-2 But de l'essai : -----	82
3-3 Appareil utilisé : -----	82
3-4 Condition particulière de l'essai : -----	83
3-7 Résultats de l'essai de Fluage – Recouvrance 0,14 Mpa : -----	86

3-8 Résultats de l'essai de Fluage – Recouvrance 0,28 Mpa : -----	101
3-9 Résultats de l'essai de Fluage – Recouvrance 0,42 Mpa : -----	111
CONCLUSION GENERALE -----	121
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES -----	123
ANNEXES -----	127

LISTE DES FIGURES

Fig.1.1 Structure d'une micelle Yen et Edrman	8
Fig.1.2 Macrostructure des Asphaltènes selon Dickie et Yen	8
Fig.1.3 Schématisation de la structure colloïdale.....	10
Fig.1.4 Le modèle colloïdal original : A) sol et B) gel bitume.....	11
Fig. 1.5 Comportement rhéologique	13
Fig. 1.6 classement des essais mécaniques sur le liant.....	14
Fig.1 .7 Structure des polymères	16
Fig 1 .8 Elément structuraux du pneu d'automobile.....	19
Fig.1.9 Structure du SBS	22
Fig .1.10 Description du comportement mécanique.....	24
Fig.1.11 Effet de la modification polymère sur la structure colloïdale du bitume	26
Fig.1.12 Mécanisme de la dispersion d'un polymère de type SBS dans le bitume.	27
Fig.1.13 Variation du taux de gonflement en fonction de la teneur en polymère.....	29
Fig.1.14 Mélange bitume/polymère à teneur croissante	30
Fig.1.15 Variation de la pénétrabilité et TBA en fonction de la teneur en polymère.....	31
Fig.1.16 chaîne de fabrication de bitume caoutchouc non stockable.....	33
Fig.1.17 courbe de viscosité en fonction du temps de mélange	34
Fig.1.18 chaînes de fabrication de bitume caoutchouc stockable-procédé Beugnet.....	34
Fig.1.19 Schéma d'une coupe de chaussée.....	40
Fig.1.20 Schéma des différents types de structures des chaussées.	40
Fig.1.21 Sollicitations dans la chaussée induite par un véhicule	43
Fig.1.22 Sollicitations dans la chaussée induite par la température.....	44
Fig.1.23 Type de comportement des matériaux bitumineux	45
Fig.1.24 DSC du bitume, du NBR et des bitumes modifiés aux différentes teneurs.....	48
Fig.1.25 Variation de la Tg en fonction de teneur en NBR.....	48
Fig.1.26 Courbes d'ATG pour les différents éléments.....	49
Fig.1.27 Courbes d'ATG pour les différents éléments entre 190°C et 210°C.....	49
Fig.1.28 Quotient Marshall en fonction de la teneur en poudrette.....	49
Fig.1.29 Compacité des différents mélanges.....	49

Fig.1.30 Courbes contrainte déformation en compression simple pour les différents mélanges à 25°C, 40°C et 60°C.....	50
Fig.1.31 Taux de fluage pour $0.25 \sigma_{max}$	51
Fig.1.32. Quotient Marshall en fonction de NR.....	54
Fig.1.33. Compacité Marshall en fonction NR.....	54
Fig.1.34. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume pur.....	55
Fig.1.35. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume modifié à 4% de NR.....	55
Fig.1.36. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume modifié à 8% de NR.....	56
Fig.1.37. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 25 °C.....	56
Fig.1.38. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 40 °C.....	57
Fig.1.39. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 60 °C.....	57
Fig.1.40. Variation du taux de déformation de fluage.....	58
Fig.2.1 Courbe granulométrique des fractions 0/3, 3/8, 8/15.....	60
Fig.2.2 Variation de la pénétrabilité en fonction de la température.	63
Fig.2.3. La poudrette de caoutchouc NR sous une loupe.	64
Fig.2.4 Courbe granulométrique de la poudrette de caoutchouc.	65
Fig.2.5. Résultat du Spectre FTIR de la poudrette de caoutchouc [NR]	66
Fig.2.6 Schéma de l'appareillage servant à fabriquer le bitume caoutchouc	67
Fig 2.7 Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité 25°C.....	68
Fig 2.8 Influence de la teneur en NR sur la susceptibilité thermique.....	69
Fig 2.10 Variation de la pénétrabilité du bitume modifié par rapport au bitume pur.....	70
Fig 2.11 Influence de la teneur en NR sur la température bille et anneau.	70
Fig 2.12 Variation de TBA du bitume modifié par rapport au bitume pur.	71
Fig 2.13 Influence de la teneur en NR sur la ductilité.	71
Fig 2.14 Courbe granulométrique du mélange et fuseau de référence BB 0/14	72
Fig 2.15 Stabilité Marshall 30 min en fonction de la teneur en NR.	75
Fig 2.16 Fluage Marshall 30 min en fonction de la teneur en NR.....	75
Fig 2.17 Quotient Marshall 30 min en fonction de la teneur en NR.....	76
Fig 18 Compacité Marshall 30 min en fonction de la teneur en NR.	76
Fig 2.19 Stabilité Marshall à 24 h en fonction de la teneur en NR.	77

Fig 2.20 Fluage Marshall à 24 h en fonction de la teneur en NR.	78
Fig 2.21 Quotient Marshall à 24 h en fonction de la teneur en NR.	78
Fig 2.22 Traction indirecte en fonction de la teneur en NR.	79
Fig 2.23 Déformation de traction indirecte en fonction de la teneur en NR.	80
Fig 2.24 Déformation de traction indirecte en fonction de la teneur en NR.	81
Fig .3.1 Appareil utilisé pour la consolidation des sols.	83
Fig 3.2. Essai de fluage recouvrance.....	84
Fig 3.3 Courbe de fluage – recouvrance à différentes températures pour 0% de NR.....	86
Fig 3-4 Courbes de fluage – recouvrance à différentes températures pour 2 % de NR.	86
Fig 3.5 Courbes de fluage – recouvrance à différentes températures pour 4 % de NR.	87
Fig 3-6 Courbe de fluage – recouvrance à différentes températures pour 8 % de NR.....	87
Fig 3-7 Courbe de fluage - recouvrance pour différents teneurs en NR à 25°C.	88
Fig 3-8 Courbe de fluage - recouvrance pour différents teneurs en NR à 40°C.	88
Fig 3-9 Courbe de fluage - recouvrance pour différents teneurs en NR à 60°C.	89
Fig 3-10 Courbe des vitesses de déformation pour différents teneurs en NR à 25°C.	89
Fig 3-11 Courbe des vitesses	89
Fig 3-12 Courbe des vitesses de déformation pour différents teneurs en NR à 40°C.	90
Fig 3-13 Courbe des vitesses de déformation	90
Fig 3-14 Courbe des vitesses de déformation pour différents teneurs en NR à 60°C.	90
Fig 3-15 Courbe des vitesses de déformation	90
Fig 3-16 Variation des déformations initiales en fonction de la température.	93
Fig 3-17 Variation des déformations totales en fonction de la température.	94
Fig 3-18 Variation des déformations finales en fonction de la température.	95
Fig 3-19 Variation des déformations réversibles en fonction de la température.	96
Fig 3-20 Variation des déformations finales en fonction de la température.	97
Fig 3-21 Variation de taux de déformation en fonction de la température.	98
Fig 3-22 Variation des déformations finales en fonction de la température.	99
Fig 3-23 Variation des déformations finales en fonction de la température.	100
Fig 3-24 Variation des déformations finales en fonction de la température.	101
Fig 3-25 Courbes de fluage – recouvrance à différentes températures pour 0 % de NR.....	102
Fig 3-26 Courbes de fluage – recouvrance à différentes températures pour 8 % de NR.....	102
Fig 3-27 Courbe de fluage - recouvrance pour différents teneurs en NR à 25°C.....	103

Fig 3-28 Courbe de fluage - recouvrance pour différents teneurs en NR à 40°C.	103
Fig 3-29 Courbe de fluage - recouvrance pour différents teneurs en NR à 60°C.	104
Fig 3-30 Variation des déformations initiales en fonction de la température.	105
Fig 3-31 Variation des déformations totales en fonction de la température.	105
Fig 3-32 Variation des déformations finales en fonction de la température.....	106
Fig 3-33 Variation des déformations réversibles en fonction de la température.....	107
Fig 3-34 Variation des déformations irréversibles en fonction de la température.....	107
Fig 3-35 Variation de taux de déformation de fluage en fonction de la température.	108
Fig 3-36 Variation des recouvrance élastiques en fonction de la température.....	109
Fig 3-37 Variation des modules des rigidités initiales en fonction de la température.....	110
Fig 3-38 Variation des modules des rigidités totales en fonction de la température.....	110
Fig 3-39 Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume pur.....	111
Fig 3-40 Influence de la température sur le fluage des enrobés à base	111
Fig 3-41 Influence de la teneur en NR sur le fluage des enrobés à 25°C.....	112
Fig 3-42 Influence de la teneur en NR sur le fluage des enrobés à 40°C.....	112
Fig 3-43 Influence de la teneur en NR sur le fluage des enrobés à 60°C.....	113
Fig 3-44 Variation des déformations initiales en fonction de la température.....	114
Fig 3-45 Variation des déformations totales en fonction de la température.....	115
Fig 3-46 Variation des déformations finales en fonction de la température.....	116
Fig 3-47 Variation des déformations réversibles en fonction de la température.....	116
Fig 3-48 Variation des déformations irréversibles en fonction de la température.....	117
Fig 3-49 Variation des taux des déformations en fonction de la température.....	118
Fig 3-50 Variation des recouvrances viscoélastiques en fonction de la température.....	119
Fig 3-51 Variation des modules des rigidités initiales en fonction de la température.....	119
Fig 3-52 Variation des modules des rigidités totales en fonction de la température.....	120

LISTE DES TABLEAUX

Tableau.1.1. Différents types de bitumes en fonction de leur composition	11
Tableau 1.2 Essais mécanique sur le bitume	14
Tableau.1.3 Production annuelle des pneus usagés	18
Tableau 1.4 Différentes matières contenues dans le pneu par ordre d'importance.....	20
Tableau 1.5 Classification des granulats.	39
Tableau 1.6. Caractéristiques des granulats.	46
Tableau 1.7. Caractéristiques du bitume.....	47
Tableau.1.8 Températures correspondant à 5% de perte.....	48
Tableau 1.9 Conditions opératoires de l'essai de compression simple.	50
Tableau 1.10 Caractéristique intrinsèque des granulats.	52
Tableau 1.11 Caractéristique de bitume.	53
Tableau.2.1. Analyse chimique sommaire des différents types de granulats.	59
Tableau.2.2 Coefficient d'aplatissement.....	60
Tableau.2.3 Caractéristiques intrinsèques des fractions granulaires.	61
Tableau.2.4 valeurs du bleu de méthylène	61
Tableau.2.5 Caractéristiques du bitume.	62
Tableau2.6 Densité de la poudrette de caoutchouc.....	64
Tableau 2.7 Désignation des liants modifiés.....	67
Tableau 2.8 Les valeurs de la susceptibilité thermique.....	68
Tableau 2.9 Indice de pénétrabilité.....	69
Tableau 2.10 Composition de la formule utilisée.....	73
Tableau 2.11 Résultats de l'essai de Marshall du mélange étudié.....	74
Tableau 2.12 Désignation des liants modifiés.....	74
Tableau 2.13 Caractéristique mécanique des enrobés en fonction de la teneur en NR.....	74
Tableau 2.14 Caractéristique Marshall 24h en fonction de la teneur en NR.....	77
Tableau 2.15 Caractéristique de traction directe en fonction de la teneur en NR.....	79
Tableau 2.16 Caractéristique des déformations de traction indirecte fonction de la teneur en NR	80
Tableau 3-1 les déformations en fonction de la teneur en NR et de la température.....	92
Tableau 3-2 les valeurs du taux de déformation de fluage.....	97
Tableau 3-3 Variation de la RVE des enrobés bitumineux.....	99

INTRODUCTION GENERALE

Les structures de chaussées routières sont composées généralement par quatre couches superposées : le sol support, la couche de forme, les couches d'assises, les couches de surfaces. Ces structures sont soumises à des sollicitations très complexes telles que le trafic et le climat qui ont une influence importante sur le comportement des matériaux bitumineux. Les chaussées subissent de grandes amplitudes thermiques et sont donc soumises aux phénomènes de fissuration thermique et d'orniérage. Pour réduire ces phénomènes, diverses techniques ont été utilisées; parmi les quelles : les modifications des liants par des polymères qui apparaît comme la meilleur voie pour améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques des bitumes et des enrobés bitumineux.

La modification des liants avec des polymères compatibles peut s'avérer bénéfique. La modification des bitumes peut être réalisée :

- Par les procédés de raffinage (oxydation, désasphaltage, soufflage)
- Par ajouts d'additifs (polymère, pneus recyclés, produits chimiques et autres).

Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux de chaussées, en particulier les bitumes et les enrobés bitumineux modifiés. Une meilleure connaissance des propriétés thermomécaniques des matériaux bitumineux utilisés en construction routière permette à terme de formuler des enrobés suffisamment performant pour résister de manière durable aux efforts appliqués.

Le but de cette étude est de montrer la possibilité d'amélioration des liant bitumineux par la poudrette de caoutchouc naturel, et l'influence du chargement sur le comportement des enrobés.

Dans cette étude, nous nous proposons de modifier un bitume de grade 35/50 par de la poudrette de caoutchouc naturel (NR) aux différentes teneurs. La poudrette de caoutchouc utilisée pour la fabrication du liant bitume caoutchouc a été fournie par la société algérienne SAEL « Société d'Application d'Élastomères », il s'agit d'étudier l'incidence du chargement sur les comportements mécaniques des enrobés bitumineux modifiés sous différentes sollicitations (Marshall, Traction indirecte et fluage).

Le travail que nous nous proposons d'étudier se divise en trois parties.

La première partie est entièrement consacrée à une synthèse bibliographique axée sur :

- Généralité sur les liants bitumineux, les polymères possibles utilisées pour les modifications, les bitumes caoutchoucs et les enrobés bitumineux.
- Synthèse des travaux de recherche effectués sur la modification des enrobés bitumineux.

La deuxième partie, est axée sur la présentation des matériaux et méthodes expérimentales utilisées :

- Identification des matériaux tel que : bitume, granulat, la poudrette de caoutchouc.
- La modification du bitume : principe et détermination de ces caractéristiques.
- La formulation de l'enrobé bitumineux

La troisième partie est dédiée à l'étude de l'incidence du chargement sur le comportement mécanique des enrobés bitumineux modifiés à la poudrette de caoutchouc naturel sous différentes sollicitations (températures et fluage statique aux différents chargements : 0,14 MPa, 0,28 MPa, 0,42 MPa).

On termine par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur les matériaux bitumineux utilisés dans cette étude. On présente quelques généralités sur les liants hydrocarbonés, les polymères et les enrobés bitumineux, ainsi que quelques travaux de recherche effectués sur la modification des enrobés bitumineux.

I. LE BITUME

En 1903 apparaît le terme d'émulsion : les huiles lourdes de pétrole sont émulsionnées et saponifiées avec de l'eau ammoniacale et l'application est immédiate (80 km en Ardennes). Les brevets ne sont pris qu'en 1924 au Royaume-Uni. Des émulsions de bitume sont utilisées en 1923 aux États-Unis, et en 1924 en France. La production de béton bitumineux routier commence en France à partir de 1929. [Cla 2001]

Le bitume naturel a ainsi été employé généralement comme adhésif, en particulier pour le génie civil, dans des mortiers ou en tant qu'agent d'imperméabilisation [Abr 1999]

Il est d'abord nécessaire de faire la distinction entre les mots français "asphalte" et "bitume" et leur homologue anglais "bitumen" et "asphalt". Le terme anglais Américain "asphalt" désigne ce que l'on nomme bitume dans les pays francophones (contraction de l'expression officielle "asphalt cerment"); de même "asphaltic" se traduit par bitumineux.

En anglais (Anglais) et en allemand, "asphalt" désigne aussi très souvent l'enrobé bitumineux, le mélange de bitume et de granulats [Che 2006].

I.1 Origine

Le bitume, corps plus au moins viscoélastique, est un corps complexe et il est illusoire de vouloir identifier la totalité de ses composants. De ce fait, le fractionnement des bitumes en familles chimiques est apparu comme l'approche la plus efficace.

Le bitume est composé d'hydrocarbures de poids moléculaire élevés appartenant en majorité aux groupes naphthénique et asphaltiques [Ait 1994].

En générale il existe trois types de liants hydrocarbonés :

- Les liants naturels, qui se trouvent dans la nature et qui sont utilisés depuis des temps très anciens. C'est une roche asphaltique telle qu'elle se présente dans le gisement et qui, après broyage est dénommée asphalte.

- Les bitumes de pétrole, qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers.

- Les goudrons, qui proviennent de la pyrogénéation à l'abri de l'air, du lignite et de la tourbe et du bois.

Mais les bitumes utilisés de nos jours pour le revêtement des routes et certains usages industriels sont fabriqués à partir de la distillation des pétroles bruts.

I.2 Composition chimique et structure des bitumes

I.2.1 Composition chimique

Ils contiennent des mélanges complexes et des métaux lourds tels que le nickel, vanadium, fer, et des hétéroatomes comme : [Ait 1994]

- Carbone de 80 à 85 %
- Hydrogène de 10 à 15 %
- Oxygène de 2 à 3 %

Des traces de nombreux métaux tels que soufre azote vanadium nickel aluminium.

Les premiers travaux sur la chimie du bitume sont dus à Boussingault, qui a séparé une fraction distillable qu'il a nommé « pétrolènes » (maintenant appelée plutôt « maltènes ») et une fraction non-distillables, les asphaltènes. Plus récemment, le développement des techniques de chimie analytique a permis de mieux définir et caractériser ses fractions, mais la séparation des bitumes

en maltènes et asphaltènes est encore très largement acceptée, avec toutefois des méthodes d'obtention différentes qui seront précisées plus loin [Les 2002].

Donc Le Bitume = Asphaltènes + Maltène (saturés + aromatiques + résines).

I.2.1.1 Méthodes de séparation [Had 2007]

Les méthodes de séparation sont :

a. Séparation par distillation

b. Extraction aux solvants sélectifs

c. Chromatographie d'adsorption

d. Chromatographie par perméation de gel (GPC)

e. Chromatographie sur baguette de silice (IATROSCAN)

I.2.1.2 Groupes génériques fondamentaux

On a dit précédemment que les bitumes sont des mélanges complexes ou bien des métaux lourds mais pratiquement regroupent les différents constituants au sein des grandes familles chimiques (asphaltènes, maltènes) qui sont déterminés par la méthode de séparation SARA (Saturés, Aromatiques, Résines, Asphaltènes). La SARA est réalisée en deux étapes [Had 2007] :

- la première consiste à isoler les asphaltènes par précipitation des composés insolubles dans un hydrocarbure saturé de poids moléculaire faible avec du n-heptane ou l'heptane normal. La partie soluble constitue les maltènes, produits huileux (molécules moins grosses) dans lesquels baignent les asphaltènes.
- la seconde étape consiste à séparer les maltènes en trois familles (résines, saturés, aromatiques). La méthode la plus couramment utilisée est la chromatographie sur gel de silice ou d'alumine.

a. Les Asphaltènes

Les Asphaltènes représentent généralement moins de 20 % d'un bitume routier de distillation directe, Leur masse molaire est estimée à 800-4000 g/mol par osmométrie [Les 2002].les Asphaltènes constituent typiquement 5 à 25% du bitume [Sin 2000]. Ils sont les molécules les plus complexes actuelles en asphaltes et sont considérés comme étant constitué par la condensation des résines. Ils sont colorée noir ou brun, dur, non plastique, non malléable, Ils contiennent principalement du carbone et de l'hydrogène avec du soufre, l'oxygène, l'azote et

autres hétéroatomes. Depuis plusieurs années de nombreux travaux ont été réalisés afin de mieux comprendre la structure des asphaltènes du fait notamment de leur rôle essentiel sur la rhéologie. [Bri 1986]. Les asphaltènes sont des composés polaires essentiellement aromatiques (solides brun-noirs et friables). Le rapport H/C dépend de l'origine du brut et du procédé de fabrication, mais il demeure souvent supérieur à 0,8 .

Yen montra que les molécules de bitume sont :

- Soit sous forme de micelles (entité élémentaire de quelques feuillets de molécule).
- Soit sous forme de paquets qu'on appelle agglomérats (les forces qui lient ces paquets sont de type hydrogène).

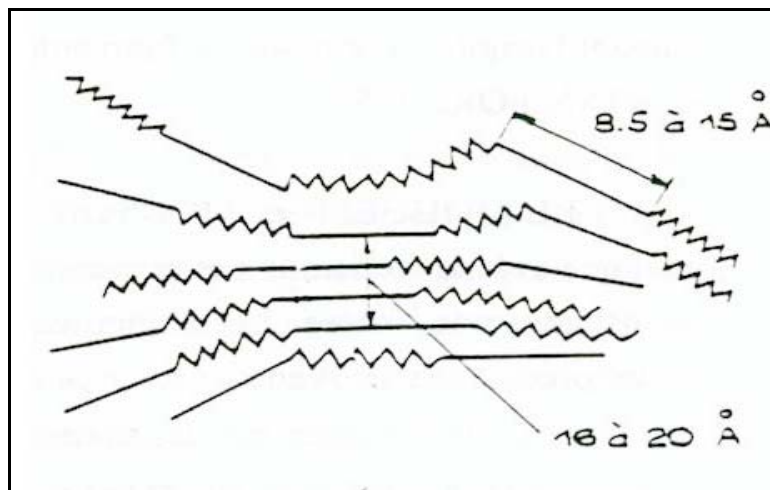


Fig.1.1 Structure d'une micelle Yen et Edrman [Kam 2001].

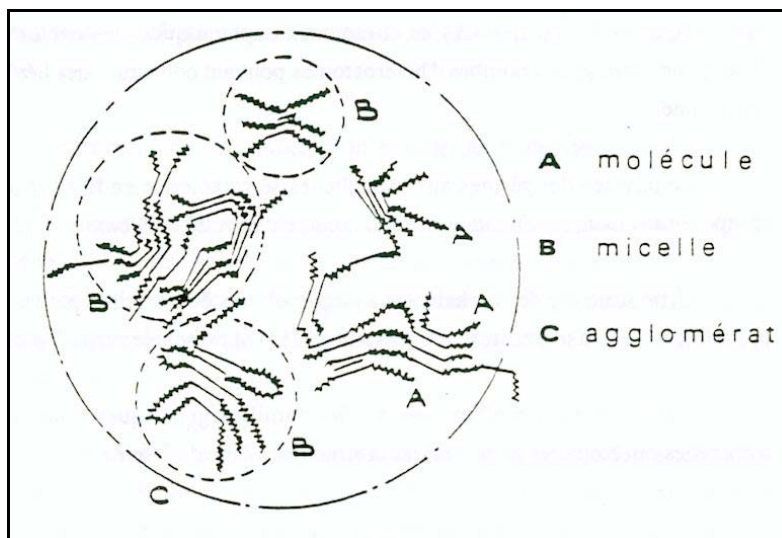


Fig.1.2 Macrostructure des Asphaltènes selon Dickie et Yen [Kam 2001].

b. Les aromatiques

Les aromatiques sont les fractions présentes en majorité (environ 60 %) et sont notamment les espèces impliquées dans la transition vitreuse du bitume, en conjonction avec les saturés non cristallisés. Leur vitrification se produit ainsi pour des températures de l'ordre de -50 à -10°C , suivant la nature du brut, ce qui correspond aux températures de transition vitreuse des bitumes. Leur masse moyenne est généralement autour de 800 g/mol et ils sont peu différents d'une huile minérale de forte viscosité [Les 2002].

c. Les saturés

Les saturés ont de faibles masses molaires, autour de 600 g/mol et comportent un faible pourcentage d'alcane linéaires pouvant cristalliser, qui se rapprochent des cires ou paraffines et généralement appelés « fractions cristallisables ». Ces fractions dépassent rarement les 5 % massiques du bitume, mais peuvent parfois atteindre 10 % voire plus pour certains bitumes chinois ou d'Europe de l'Est par exemple [Les 2002].

d. Les résines

Les résines sont des matériaux semi liquides et parfois pleins de couleur rouge foncé à la température ambiante, Ils sont chimiquement très semblable aux asphaltènes ; ils constituer généralement par : carbone, hydrogène, l'oxygène, soufre, azote et beaucoup d'autres éléments y compris des métaux. Les résines se composent principalement de polycyclic contenant des molécules saturées, aromatique et hétéro-aromatique anneaux et hétéroatoms dans divers groupes fonctionnels. Ces résines assurent adhérence, ductilité, malléabilité et plasticité [Oye 2006].

1.2.2 Structure colloïdale du bitume

Le degré d'agrégation des Asphaltènes dépend des paramètres tels que la température, la concentration ou la nature chimique du solvant.

Nellelsteyll (1923) à proposé une structure colloïdale pour le bitume pour laquelle les Asphaltènes ont tendance à absorber la fraction la plus lourde des maltènes, c'est à dire les résines et forment des micelles tandis que les huiles aromatiques et saturées représentent la phase intermicellaire [Bég 2003].

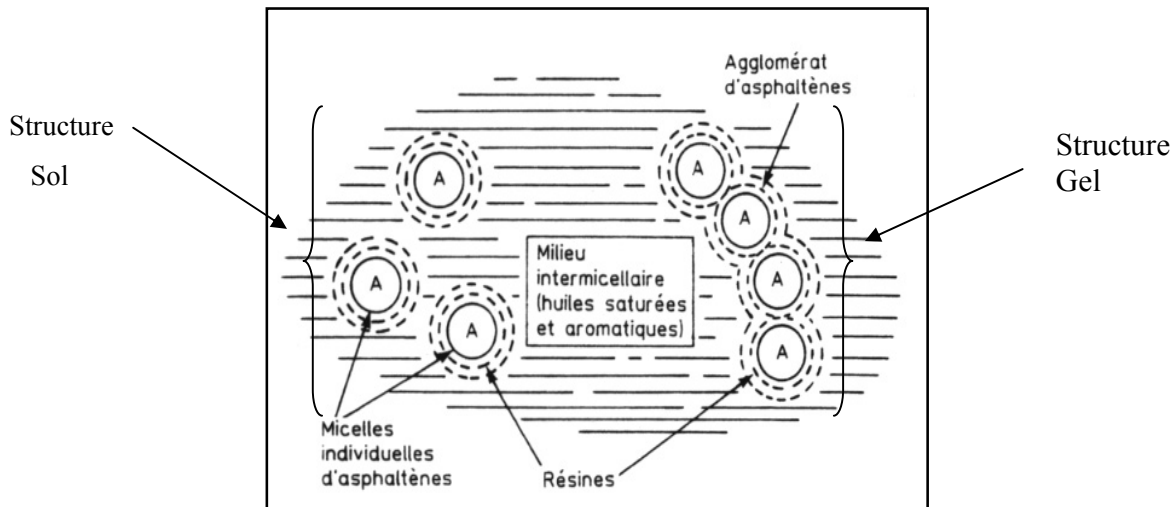


Fig.1.3 Schématisation de la structure colloïdale [Yves 2003]

Le modèle colloïdal du bitume décrit ainsi trois types de liants à température ambiante, les bitumes dits « sols » dont les propriétés rhéologiques sont essentiellement newtoniennes, les bitumes dits « gels », typiquement des bitumes soufflés très rigides, dont les propriétés rhéologiques à température ambiante étaient nettement non newtoniennes. Une classe intermédiaire, appelée « sol - gel », correspond aux bitumes intermédiaires.

a. Structure GEL

Les saturés et les aromatiques (les huiles du bitume) peuvent être considérés comme le milieu porteur des asphaltènes. Ces derniers sont la cause du comportement du bitume, notamment de sa viscoélasticité à température ambiante. A partir d'un certain taux d'huile, les molécules d'asphaltènes acquièrent une certaine liberté de mouvement. La structure gel confère à la substance un caractère très élastique. YEN [Yen 1986] considère que les asphaltènes, qui constituent le réseau, interagissent par leurs zones polaires à travers de fines pellicules du milieu dispersant pour former des agglomérats

b. Structure SOL

Caractérisée par une péptisation totale des micelles d'Asphaltènes par les résines. Ces bitumes à phase maltène riche en aromatique ont un comportement visqueux.

c. Structure " Sol – Gel"

Structure qui est intermédiaire entre les deux précédentes structures et correspond à la majorité des bitumes. Elles sont ainsi caractérisées par un comportement viscoélastique [Yves 2003].

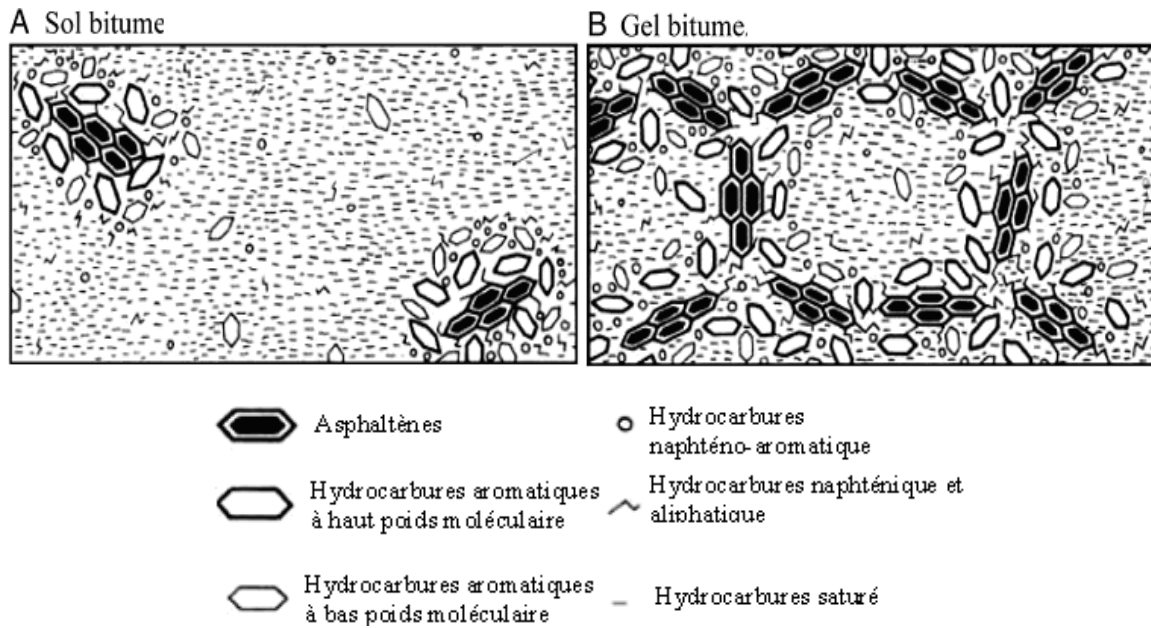


Fig.1.4 Le modèle colloïdal original : A) sol et B) gel bitume [Les 2009].

La stabilité du bitume dans son environnement dépend en grande partie de son équilibre micellaire. Nous avons vu que les divers types de structure mettent en jeu contenu des fractions de SARA dans l'échantillon. L'indice d'instabilité colloïdal I_c , qui caractérise le type de bitume étudié est donné par la formule :

$$I_c = \frac{\text{Asphaltènes} + \text{Saturés}}{\text{Résines} + \text{Aromatique}}$$

Plus cet indice est élevé plus le bitume se rapproche de l'état gel et plus sa stabilité colloïdale est médiocre.

En règle générale, l'état sol correspond à un I_c inférieur à 0,25 et pour l'état gel I_c est proche de 1. Le tableau suivant présente les différents types de structure de bitume en fonction de leur composition générique

Tableau.1.1. Différents types de bitumes en fonction de leur composition [Mag 2009]

Type de bitume		% d'asphaltènes	% de résines	% d'huiles
1	Gel	> 25	< 24	> 50
2	Sol	< 18	> 36	< 48
3	Sol-Gel	21 à 33	30 à 34	45 à 49

I.3. Les essais de caractérisation des bitumes

Pour caractériser un bitume plusieurs essais sont utilisés. On les classe en deux types :

I.3.1 Les essais classiques

- a. Essais de pénétrabilité à l'aiguille (NF T 66-004)**
- b. La température bille anneau ou le point de ramollissement (TBA) (NF T 66-008)**
- c. Ductilité (NF T 66-006)**
- d. Température de fragilité FRAASS (NF T 66-006)**
- e. Essais de RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) (NF T 66-032)**
- f. L'essai PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PP1)**

I.4.2 Les essais Mécaniques

Notion de la Rhéologie

La rhéologie est la science qui étudie la déformation pour les solides et l'écoulement pour les fluides. On a caractérisé les matériaux par la rhéologie pour pouvoir prédire leur comportement sous sollicitation mécanique.

Certains matériaux ont un comportement élastique c'est à dire que la contrainte de cisaillement est proportionnelle à la déformation (loi de Hooke) (**fig 1.5 a**), par contre il y a des matériaux au comportement visqueux c'est à dire la contrainte de cisaillement est proportionnelle au taux de cisaillement (loi de Newton) (**fig 1.5 b**). Mais il existe de matériaux de comportement intermédiaire viscoélastique. Ce sont des matériaux ou bien des mélange complexes (bitume, polymère...).

Ce comportement est présenté par le modèle de Maxwell pour les fluides et le modèle de Kelvin-voigt pour les solides (**fig 1.5 c et d**).

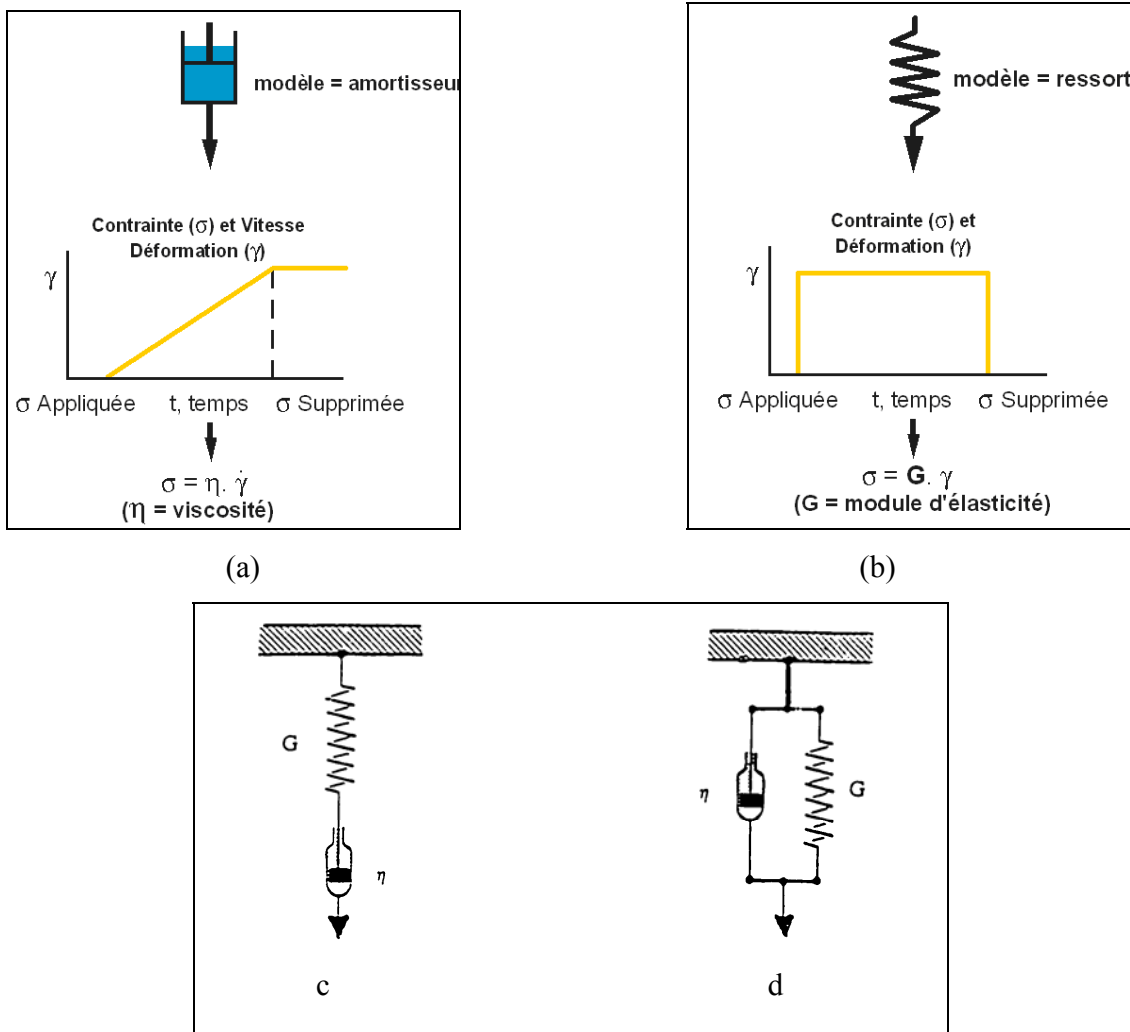


Fig. 1.5 Comportement rhéologique [Che 2006].

I.4.2.1. Viscosité

La viscosité est la consistance ou la résistance d'écoulement du bitume. La relation entre La température et la viscosité est c'est-à-dire lorsque la température augmente la viscosité diminue.

Il peut être défini de deux manières différentes :

a. viscosité dynamique

b. viscosité cinématique

I.4.2.2 Viscoélasticité

I.4.2.3 Le module de rigidité

I.4.2.4 Le module complexe

I.5.2.5 Programme SHRP

Au début des années 1990 l'administration américaine lancé à une grande échelle un programme de recherche dite SHRP (Strategic Highway Research Program) pour l'objet de mesuré les caractéristique des liants.

Quatre essais ont été choisis dans ce programme, ils sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1. 2 Essais mécanique sur le bitume [Baa 2002]

Type de l'essai	But de l'essai
Dynamic Shear Rheometer (DSR) (Rhéomètre de cisaillement dynamique) 1>	Mesurer les propriétés du liant à hautes et moyennes températures
Rotational Viscometer (RV)	Mesurer les propriétés du liant à hautes températures
Bending Beam Rheometer (BBR) (Essai de flexion de poutre)	Mesurer les propriétés à Basse température
Essai de traction directe (DTT)	Mesurer les propriétés à Basse température

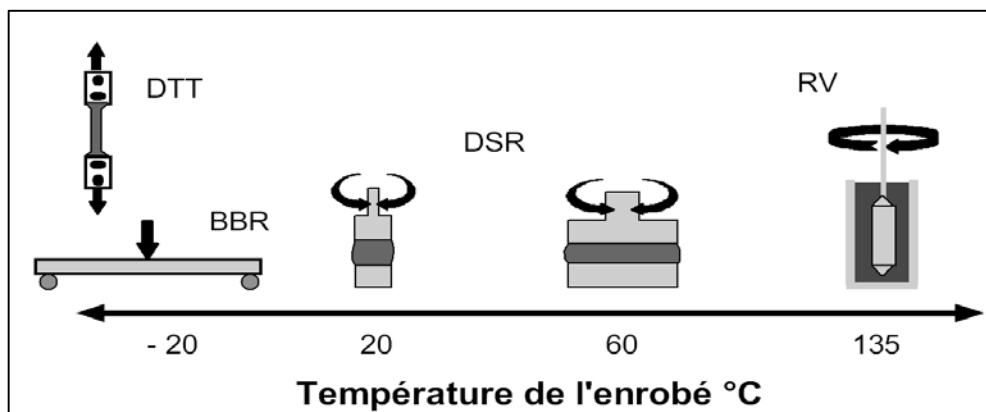


Fig. 1.6 classement des essais mécaniques sur le liant.

DTT – BBR : fissuration à basse Température.

DSR (petits échantillons) : Fissuration par fatigue.

DSR (grands échantillons) : Phénomène d'orniérage.

RV : Construction.

II. LES POLYMERES

Les matériaux polymères (polymère = plusieurs unités, en grec), appelés aussi matières plastique ou simplement plastique, sont des matériaux organiques composés essentiellement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Outre leur rigidité, qui est inférieure à celles de l'acier, respectivement, d'un ordre et de deux ordres de grandeur. 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 [Got 2000].

II.1 Structure des polymères

On distingue :

a Structure Linéaire (figure 1.7 a) les Macromolécules linéaires sont constituées des chaînes individuelles. Ils sont souvent assimilés à des spaghettis cuits. La cohésion de la matière correspondante est due principalement à la cohésion des chaînes, à leur enchevêtrement des macromolécules et la présence de liaisons secondaires entre les chaînes. Nous pouvons déjà noter que l'augmentation de la température ou l'ajout d'un solvant briser ces liens et de donner lieu à l'individualisation des macromolécules. Cela signifie que la matière est soluble dans certains solvants et généralement fusible par une augmentation de la température. Inversement, le refroidissement ou l'évaporation du solvant sera de retour du produit à son état initial.

b Structure embranchées (figure 1.7 b) les Macromolécules embranchées sont constituées des chaînes en général à long relié à la principale chaîne.

c Structure réticulées : (figure 1.7 c) les Macromolécules réticulées forment un réseau tridimensionnel Ils peuvent être comparés à une grille métallique (tour de haute tension, par exemple). Leurs résultats de cohésion de l'enchevêtrement, mais essentiellement de la haute énergie des liaisons covalentes existantes dans les différentes branches du réseau: ces obligations ne peuvent être rompues par une augmentation de la température (au moins dans certaines limites au-delà de laquelle le composé se décompose), ou par l'action de solvants.

Un tel matériau est infusible et insoluble. Il n'est donc pas recyclable. En présence d'un solvant approprié, il peut, toutefois, d'élargir de façon significative (solubilisation partielle des oligomères restants).

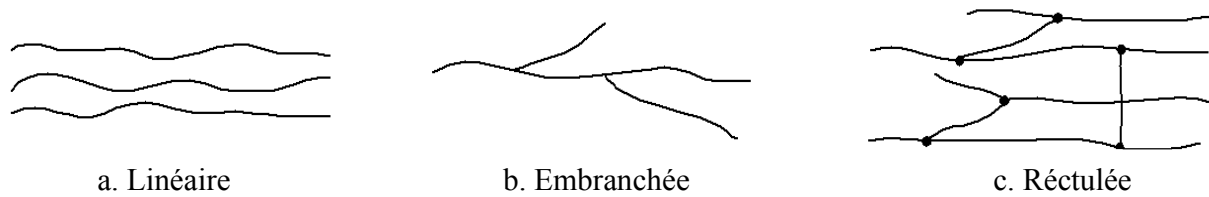


Fig.1 .7 Structure des polymères [Yves 2003]

II.2 Les Agents modifiants

Les principaux agents modifiants utilisés sont :

- Polymères thermodurcissables.
- Polymères thermoplastiques (élastomères, plastomères).
- Latex.
- Poudrettes de caoutchouc.

II.2.1 Les thermodurcissables

Les thermodurcissables durcissent sous l'action de la chaleur d'une manière irréversible, l'enchaînement de leurs molécules forme un réseau tridimensionnel qui s'oppose à toute mobilité thermique.

II.2.2 Les thermoplastiques

Les thermoplastiques (polysulfures, polyisoprènes, polyoléfines du type polyéthylène, polypropylènes et leur copolymères) deviennent malléables quand ils sont chauffés ce qui permet leur mise en œuvre ; de façon réversible c-à-d ils sont caractérisés par un ramollissement durant le chauffage et par un durcissement durant le refroidissement.

Ces types des polymères sont subdivisés en deux familles, les élastomères et les plastomères

- **Les plastomères** la déformation élastique s'accompagne d'une déformation permanente qui peut être relativement importante
- **Les élastomères** présentant l'élasticité du caoutchouc à la température ambiante .résistent bien a l'influence des huiles, les essences et à l'oxygènes, ils sont sensibles à l'eau [Nac 2008].

II.2.3 Les latex

Les objectifs essentiels d'utilisation du latex sont l'adhérence et l'imperméabilité en couche de roulement ultramince sur un support peu déformé, faible déflexion.

On distingue trois types de latex : [Oul 2005]

II.2.3.1 Caoutchouc naturel NR «Naturel Rubber »

On peut trouver le caoutchouc dans un état naturel sous la forme d'une suspension colloïdale de latex sécrétée par les plantes à caoutchouc. Les plus importantes de ces plantes sont l'*Hevea brasiliensis*, arbre de la famille des euphorbiacées et d'autres espèces du même genre.

Les produits vulcanisés à partir du NR ont une bonne résistance mécanique et peuvent être agglomérés pour offrir une excellente élasticité. Le NR a une bonne résistance à l'abrasion et des propriétés dynamiques intéressantes qui en font un matériau utilisé dans les pneus et dans les appareils d'amortissement des vibrations et des chocs. Avec une température de transition vitreuse de -57°C et une température de résistance au vieillissement en service de 75°C , le NR offre une large gamme de températures de service.

II.2.3.2 Le polychloropène (CR)

Plus populaire sous l'appellation "Néoprène", le CR peut être considéré comme un caoutchouc plus spécialisé que les précédents. Sa résistance aux huiles est moyenne, voire assez bonne. Les propriétés dynamiques sont similaires à celles du NR, surtout dans le cas des composites vulcanisés. Sa résistance aux solutions acides et basiques est meilleure que celle du NR et du SBR, mais il est plus coûteux.

II.2.3.3 Caoutchouc styrène butadiène (SBR)

Le « styrène butadiène rubber », SBR dans le cas d'une émulsion et SSBR dans le cas de la solution, est un dérivé pétrolier. Le SBR représente plus de la moitié de la production de caoutchouc synthétique et la plus grande proportion dans la composition des pneus en complément du caoutchouc naturel. En comparaison avec le NR et le CR, le SBR a une faible résistance mécanique qui nécessite le mélange de la gomme brute avec une charge de fillers tel que le carbone noir pour améliorer la rigidité et la résistance mécanique. Les autres propriétés chimiques sont similaires à celles du NR avec néanmoins une meilleure résistance au vieillissement. Les coûts de production du SBR sont à peu près comparables à ceux du NR.

II.2.4 Poudrette de caoutchouc

La poudrette de caoutchouc est obtenue par broyage de pneus usagés non réutilisables (PUNR) ou de déchets de rechapage.

En Algérie, suite à l'enquête menée auprès de la SONATRACH par l'ENTP (Ecole National des Travaux Publics), il a été enregistré :

- 385000 pneus usagés l'année 1990.
- 546000 pneus usagés l'année 1995.
- 656000 pneus usagés l'année 2000.
- 1 Million de pneus usagés pour l'année 2002.

La production annuelle des pneus usagés en France, Suisse, Tunisie et illustrée dans le tableau suivant :

Tableau.1.3 Production annuelle des pneus usagés [Mag 2008]

Pays	Production annuelle des pneus usagés	
	France	60 millions d'unités
Suisse	--	50000 tonnes
Tunisie	2 millions d'unités	--
Ratios et Mesures (source ALIAPUR) <ul style="list-style-type: none"> • 1 tonne =153 pneus VL, VL = 19 pneus PL. • 1 pneus VL = 6,53 Kg. • 1 pneus PL = 53,41 Kg. • 1 tonne = 2 m^2 broyés. 		

Ou VL : Véhicule léger PL : Poids lourd

II.2.4.1 Les pneumatiques

Les pneus sont principalement composés de caoutchouc synthétique, un dérivé du pétrole, et de caoutchouc naturel, provenant d'arbres originaires d'Amérique du Sud et d'Asie.

Dans les années 1970, une structure en acier a été intégrée à la composition du pneu. Une véritable toile d'araignée de fils métalliques a été incrustée dans le caoutchouc. Le pneu radial venait de faire son apparition sur le marché, augmentant ainsi la durée de vie des pneus et constituant un nouveau défi pour le recyclage de la roue moderne.

Des fibres textiles sont également utilisées dans la fabrication des pneus et de minces couches fibreuses permettent de conserver la structure du pneu durant le moulage. Ses propriétés d'élasticité et de résistance sont améliorées par l'ajout de soufre au caoutchouc, ce qui contribue toutefois à rendre son recyclage plus complexe [Rec a]

Les pneumatiques usagés sont majoritairement détenus par :

- Les détenteurs primaires : professionnels de l'entretien et de la réparation automobile, centres auto, négociants, transporteurs.
- les détenteurs secondaires : carcassiers (récupérateurs de pneumatiques usagés), rechapeurs, sociétés de collecte de déchets, agriculteurs, démolisseurs de véhicules hors d'usage.

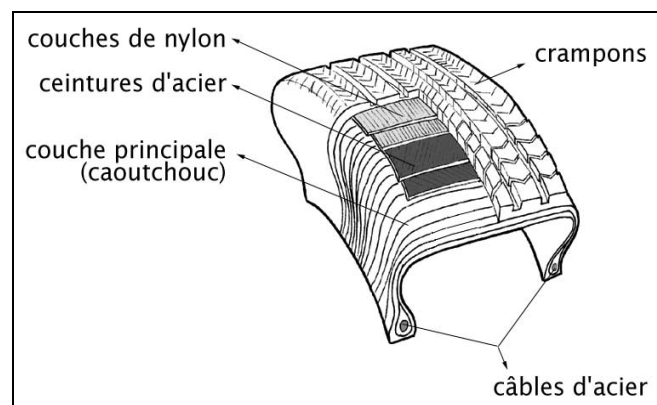


Fig 1 .8 Elément structuraux du pneu d'automobile.

II-2-4-2 Composition chimique des pneumatiques

Les pneumatiques sont composés de mélanges de caoutchouc (naturel et synthétique), d'acier et de textiles, les pneumatiques usagés ne sont pas des déchets dangereux. Cependant, ils présentent un danger pour l'environnement et la santé en cas d'incendie (émissions de gaz toxiques et éventuellement d'un liquide huileux).

Le tableau 1.4 présente la composition chimique du pneu

Tableau 1.4 Différentes matières contenues dans le pneu par ordre d'importance

Matériaux	Pourcentage (%)
Noir de carbone	28
Caoutchouc synthétique	27
Caoutchouc naturel	14
Structure d'acier	10
Huiles	10
Tissus de fibres	4
Produits pétrochimiques divers	4
Soufres et autres additifs	3

II-2-4-3 Fabrication de la poudrette [Rec]

Les copeaux de pneus peuvent être transformés en granulés, qui pourront ensuite servir à la fabrication de produits moulés ou être utilisés tels quels. Les granulés de caoutchouc sont obtenus par broyage « à température ambiante » ou « à température cryogénique ».

a) Le traitement à température ambiante Les granulateurs emploient des couteaux rotatifs qui tournent à une vitesse de 100 à 200 tours/minute à proximité de couteaux fixes. La taille du produit obtenu est contrôlée au moyen d'un tamis à l'intérieur de la machine. Grâce à des tamis interchangeables, il est possible de modifier la taille du produit fini.

Dans les broyeurs à cylindres, deux gros cylindres cannelés très rapprochés tourne en sens inverse. Les cylindres tournent à des vitesses différentes comprises entre 30 et 50 tours/minute, ce qui produit un effet d'écrasement, de concassage ou de broyage. La taille du produit fini est déterminée par l'espace entre les rouleaux. Pour atteindre la taille de particules désirées et séparer l'acier (contenu dans les ceintures et les talons de pneus) et les matières textiles du caoutchouc, les fragments de pneus doivent habituellement passer dans deux ou trois broyeurs.

b) Le traitement cryogénique met à profit l'azote liquide ou d'autres substances ou méthodes pour congeler les copeaux ou les particules de caoutchouc avant d'en poursuivre la fragmentation.

Ce traitement peut avoir lieu à toute étape du processus de fragmentation mais en règle générale, les fragments doivent mesurer moins de 2 pouces (5 cm). Les fragments de pneus sont refroidis dans une chambre à tunnel ou immergés dans l'azote liquide pour abaisser leur température.

Le caoutchouc refroidi est broyé dans un système à percussion, en général un broyeur à marteaux.

II-2-5 Les cendres volantes

La Colombie possède un réseau dense de centrales thermiques qui produisent des cendres volantes (sous-produits de la combustion du charbon). Une étude a été réalisée sur l'utilité de ces cendres en technique routière notamment dans les assises de chaussées. [Ben 2003]

Il existe autres agents modifiants :

- Les polymères ajoutés en centrale
- Les matières plastiques recyclées
- Les granulats de caoutchouc
- Les fibres de différents types, minérales, synthétiques ou métalliques
- Les bitumes et asphaltes naturels

II-3 Les polymères Les plus utilisés pour la modification des bitumes

II-3-1 Les copolymères Styène Butadiène Styène (SBS)

Depuis leur commercialisation en 1965, ces élastomères thermoplastiques ont connu un grand essor de par leur structure et leurs propriétés tout à fait originales et intéressantes qui leur ont permis d'avoir de nombreuses applications : chaussures (67%), adhésifs (9%), modification de bitumes (14%) et de plastiques (6%) .

La qualité essentielle pour un élastomère thermoplastique est de posséder un bon équilibre entre sa faculté de fluer à l'état fondu et son comportement élastique dans les conditions d'usage. A haute température le SBS se comporte comme un corps plastique et élastique à plus basse température est donc totalement réversible. Les meilleures caractéristiques mécaniques sont obtenues à température ordinaire. L'inconvénient est qu'il est très cher [Had 2007].

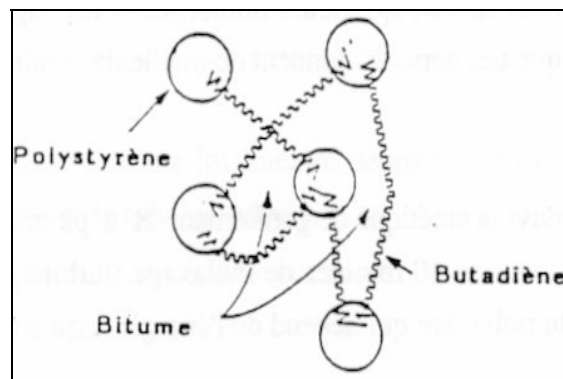


Fig.1.9 Structure du SBS [Jac 1986]

II-3-2 Les copolymères Éthylène Acétate de Vinyle (EVA)

Les plastomères thermoplastiques compatibles avec les bitumes sont fréquemment utilisés pour la fabrication de liants modifiés. Dans le domaine routier on rencontre essentiellement des EVA. Les copolymères d'éthylène et d'acétate de vinyle peuvent éventuellement être utilisés associés à des SBS. Les propriétés essentielles des EVA sont leur résistance à la craquelure en flexion, leur stabilité thermique et leur coût raisonnable. [Had 2007].

II-4 Comportement mécanique [Got 2000]

Le comportement mécanique d'un matériau est caractérisé par sa déformation sous l'action de sollicitations extérieure. Pour les plastiques, on peut distinguer trois types de comportement, qui sont toutefois généralement connexes et peuvent se superposer :

- Déformation élastique (instantanée, totalement réversibles),
- Déformation viscoélastique ou de relaxation (dépendant du temps, réversible),
- Déformation visqueuse (dépendant du temps, irréversible).

a) Comportement élastique

La figure 1.10 illustre les différents types de comportement mécanique obtenus sous l'effet d'une contrainte σ_0 .

La déformation purement élastique, largement mise à contribution pour l'acier par exemple, est observée, dans le cas des plastique, quand ces derniers sont soumis à des charges, plus précisément elle se produit spontanément lors de l'application de la charge, plus précisément elle augmente instantanément jusqu'à une valeur constante ; elle diminue immédiatement à partir de la suppression de la charge, jusqu'à s'annuler.

b) Comportement visqueuse

Contrairement à la déformation purement élastique, est irréversible et dépend du temps. L'état d'origine n'est pas retrouvé après suppression de la charge. Ce comportement peut être assimilé à celui d'un amortisseur de viscosité. La déformation retardée résulte du mouvement des segments macromoléculaires et de leurs glissements les uns par rapport aux autres pour atteindre une nouvelle position d'équilibre correspondant aux contraintes mises en jeu.

c) Comportement viscoélastique ou de relaxation

Est une combinaison entre un comportement élastique et un comportement visqueux. Elle peut être assimilée à un assemblage en parallèle d'un ressort élastique, de constante d'élasticité, et d'un amortisseur visqueux, de constante de raideur .la déformation augmente sous l'effet d'une charge jusqu'à atteindre une asymptote ; elle diminue à partir de la suppression de la charge d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement, et finit par s'annuler complètement .elle est donc réversible.

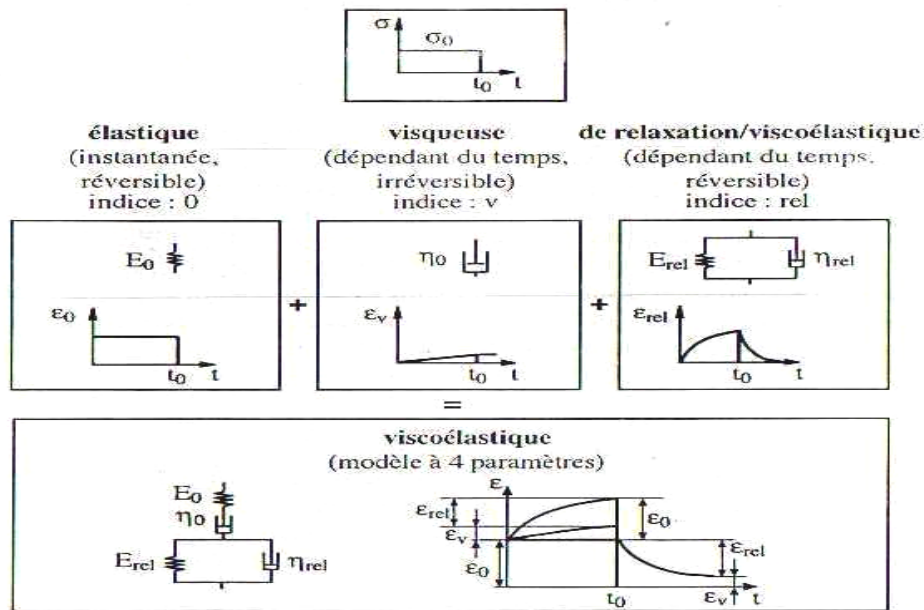


Fig .1.10 Description du comportement mécanique.

III BITUME MODIFIÉ

L'idée d'améliorer les propriétés des bitumes est déjà très ancienne : au début des années soixante par exemple, des travaux ont été consacrés à l'addition de caoutchouc dans le malaxeur de la centrale d'enrobage. Mais nous assistons à un regain d'intérêt pour ces nouveaux liants depuis une dizaine d'années. Les motifs donnés dans les rapports sont que, l'agressivité du trafic continuant à croître alors que bien souvent les crédits disponibles pour l'entretien sont en réduction, on tend à faire travailler les liants dans des conditions de plus en plus sévères : emploi d'enduit superficiels sur des chaussées à trafic de plus en plus élevé, réduction de l'épaisseur des couches d'enrobés. [Jac 1986]

III-1 Objectifs de modification [Rou 1999]

Le bitume pur ne permet plus à l'enrobé de type traditionnel (béton bitumineux 0/10 ou 0/14 à granulométrie continue, semi grenu ou grenu) – même en choisissant un grade dur (35/50 par exemple) d'assurer dans tous les cas une résistance à l'orniérage satisfaisante sous trafic très lourd et canalisé pour des températures durablement élevées.

Un grade plus dur, s'il apporte à l'enrobé un meilleur comportement à l'orniérage accroît à l'inverse les risques de fissuration thermique à basse température.

Certains mélanges enrobés de granularité ouverte n'auront pas la résistance mécanique souhaitée du fait de la cohésivité et de l'adhésivité obtenues avec un bitume pur, ni même une durabilité satisfaisante du fait d'une richesse en liant faible.

De même, les enduits superficiels sous trafic élevé et lourd ne présentent pas la même durabilité lorsqu'ils sont formulés avec un bitume pur pour les mêmes raisons de qualités mécaniques et d'adhésivité.

On peut citer comme objectifs de la modification :

1. Une diminution de sa susceptibilité thermique.
2. Un élargissement de son intervalle de plasticité.
3. Un comportement élastomérique assurant une bonne déformabilité.
4. Un accroissement de sa cohésivité.
5. Un accroissement de l'adhésivité aux granulats.
6. L'amélioration de son comportement élastique c-à-d de la réversibilité des déformations.
7. Donne une bonne résistance au vieillissement, à l'enrobage, puit en place.

III-2 Définition de la modification

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

III-3 Composition du bitume - polymère

Indépendamment de la nature du polymère, et à condition qu'il génère une séparation de phase comme décrit sur, la morphologie obtenue est celle d'une dispersion de nodules de polymères gonflés par les maltènes, dans une matrice enrichie en asphaltènes. Toutefois, pour des teneurs en polymère supérieures à 6 % massique (selon le couple bitume polymère, cette concentration varie typiquement entre 4 et 10 %), une inversion de phase est observée avec la phase riche en polymère en phase continue, et celle riche en asphaltènes en phase dispersé. Autour de cette concentration critique, une morphologie à deux phases continues est observée [Les 2003].

BMP correspondant avec augmentation de la teneur en asphaltènes de la matrice. Dans la réalité, la taille du domaine polymère est typiquement de 10 μm quand celle des particules d'asphaltènes est de l'ordre de quelques nm.

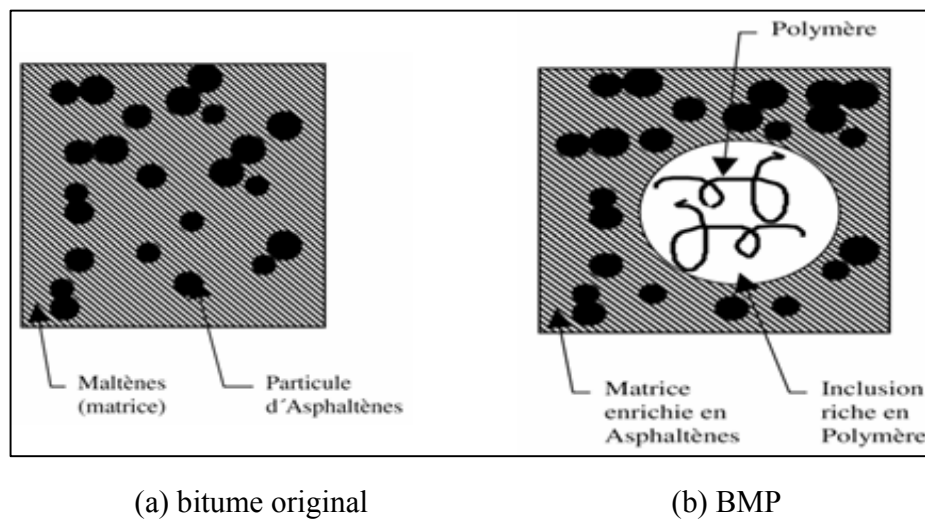


Fig.1.11 Effet de la modification sur la structure colloïdale du bitume [Les 2003]

Le procédé est conçu de façon à ce que le polymère forme un réseau au sein du bitume, créant ainsi l'amélioration désirée.

Plusieurs facteurs déterminent la formation d'un réseau de polymères dans le bitume [War 2003]

- La concentration de polymère dans le bitume
- La nature chimique du polymère
- Les propriétés physiques du polymère
- La nature des interactions entre le polymère et le bitume

III-4 Mécanisme de la modification [Ben 2003]

La modification des propriétés des bitumes par l'addition de polymère est souvent expliquée par le gonflement du polymère par les huiles du bitume. Pour qu'un polymère soit utilisable dans la modification d'un bitume, il doit être au moins gonflable, éventuellement soluble, dans les fractions hydrocarbonées de faibles masses moléculaires du liant [Brû 1986].

Cela induit qu'un liant bitume polymère peut être considéré comme un système à deux phases [Don 1991]

- une phase polymère gonflé par les huiles
- une phase bitume plus riche en résines et en asphaltènes (ceux-ci n'intervenant pas dans la solvatation) que le bitume de base.

La dispersion du polymère dans le bitume est également expliquée en tenant compte de trois paramètres influant [Kra 1980]

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

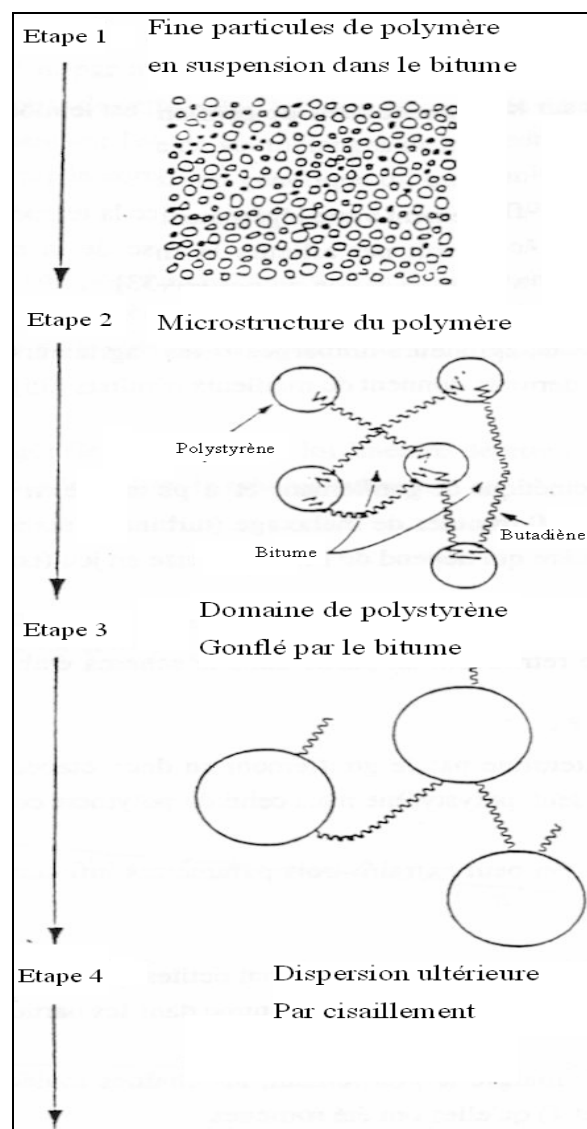


Fig.1.12 Mécanisme de la dispersion d'un polymère de type SBS dans le bitume. [Ben 2003]

III-5 La compatibilité [Rou 1999]

La compatibilité peut en effet être définie de deux façons :

- **En terme thermodynamique** la compatibilité se définit comme une situation où le bitume et le polymère forment une seule phase. Nous nous référerons à cette définition de la compatibilité en parlant de solubilité d'un polymère dans le bitume est qu'il n'y aura pas de séparation de phases et qu'un tel mélange peut être stocké sans agitation.
- **En terme pratique** la compatibilité se définit comme une situation où le bitume et le polymère peut se combiner pour former un produit dont les propriétés se trouvent améliorées et où ce mélange peut être manipulé sans précautions excessives. Nous considérons alors que la compatibilité a le sens de convenance. L'implication pratique pour un tel mélange bitume/polymère est qu'il peut y avoir séparation de phase si le mélange est stocké sans agitation.

Certains chercheurs ont formalisé la notion de compatibilité bitume polymère selon des principes généraux qui permettent d'anticiper grossièrement l'aptitude d'un bitume à former de bons BMP [Les 2002]

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

III-6 Solubilité [Rou 1999]

La solubilité des polymères dans les bitumes dépend de nombreux paramètres dont les plus importants sont :

- La différence des paramètres de solubilité du polymère et de la fraction « maltènes » du bitume.
- La quantité et le type des asphaltènes présents dans le bitume.

Ceci est cohérent avec l'explication du rôle de solvant attribué à la fraction « maltènes » du bitume vis-à-vis du polymère et avec le fait que les asphaltènes se trouvent en compétition avec le polymère pour rester en solution.

La fraction « maltènes » d'un bitume quelconque est un mélange de différents produits hydrocarbonés allant d'espèces paraffiniques ayant un paramètre de solubilité

(= densité d'énergie cohésive) d'environ $16 \text{ (J/cm}^3\text{)}^{0.5}$ à des produits aromatiques pour lesquels cette valeur est de l'ordre $18 \text{ (J/cm}^3\text{)}^{0.5}$. Pour qu'il y ait interaction entre le polymère et le bitume, le paramètre de solubilité du polymère doit être à peu près dans cet intervalle.

La masse moléculaire des constituants est aussi un paramètre pertinent : il est plus facile de mélanger des polymères ayant des masses moléculaires faibles que l'inverse.

III-7 Convenance [Rou 1999]

Qualifier d'incompatibilité un bitume qui ne conduirait pas à un mélange à une seule phase impliquerait trop rapidement que ces bitumes ne sont pas adaptés pour être modifiés par des polymères. L'appréciation de compatibilité est en partie attachée aux performances du produit, mais principalement à des problèmes pratiques.

Les mélanges de bitume et d'élastomères du type styrène butadiène styrène (SBS) ou de plastomères de type éthyle vinyle acétate (EVA) sont à l'échelle de la microstructure, des systèmes à deux phases qui sont composées [Had 1998] :

- d'une phase riche en polymère qui contient le polymère et une partie des maltènes du bitume absorbée par le polymère ;
- d'une phase riche en asphaltènes contenant tous les constituants du bitume qui n'ont pas été absorbés par le polymère, en particulier les asphaltènes.

Concernant le volume des deux phases : les polymères tels que SBS et EVA peuvent absorber des constituants du bitume jusqu'à environ 9 fois leur volume, mais cette capacité d'absorption décroît avec l'augmentation de la concentration.

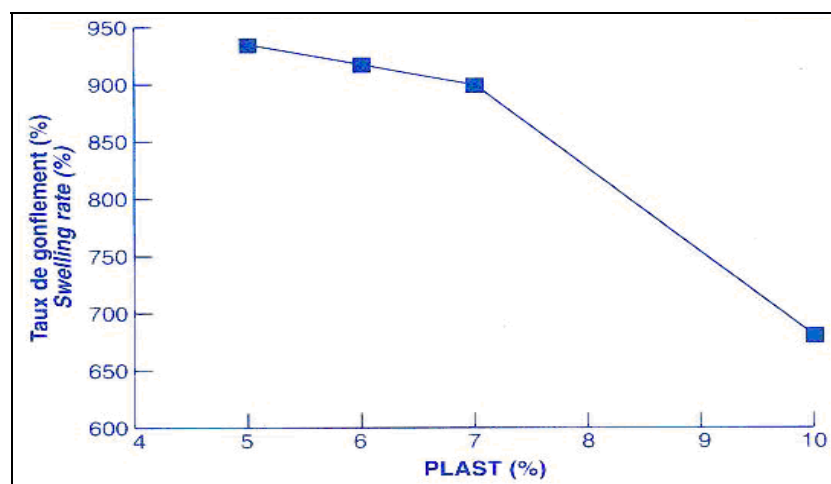


Fig.1.13 Variation du taux de gonflement en fonction de la teneur en polymère [Rou 1999].

III-7 Influence de la teneur en polymère [Rou 1999]

La microstructure des bitumes modifiés peut s'observer par microscopie de fluorescence en réflexion. Leur structure dépend de la teneur en polymère. La figure 1.14 montre les mélanges à teneur croissante en polymère :

- aux faibles teneurs ($< 5\%$) on observe une phase bitume continue avec un polymère dispersé. Dans cette situation, les propriétés du mélange sont surtout modifiées par l'augmentation de la teneur en asphaltènes dans la phase bitume. Dans ce cas, le choix du bitume de base est déterminant.
- aux teneurs autour de 5% , on observe deux phases continues entremêlées.
- aux teneurs élevées ($> 5\%$) on observe une phase polymère continue avec une phase riche en asphaltènes dispersée. Dans cette situation, les propriétés du mélange sont principalement déterminées par la phase riche en polymère et donc par le choix du polymère.

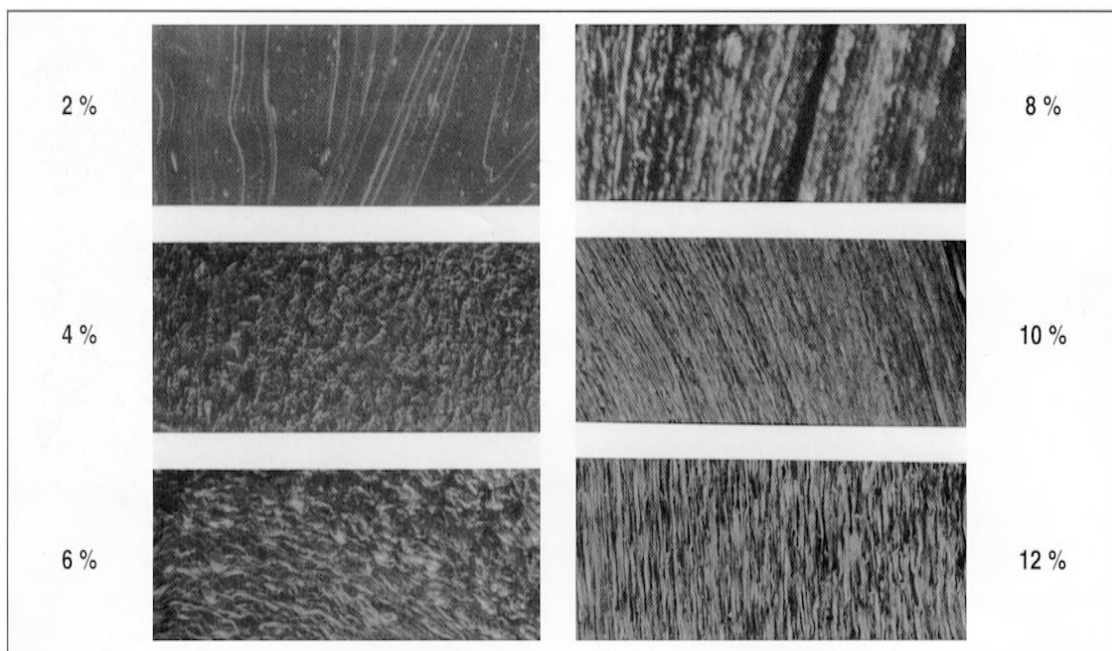


Fig.1.14 Mélange bitume/polymère à teneur croissante [Rou 1999]

La modification des propriétés physiques (pénétrabilité et température bille et anneaux) des bitumes modifiés est représentée sur la figure 1.15. On remarque que la transition qui s'opère autour de 5% de copolymère entre les systèmes à phase continue bitume ($< 5\%$) et ceux à phase continue polymère ($> 5\%$) s'accompagne d'une augmentation plus rapide de la température de ramollissement bille anneau.

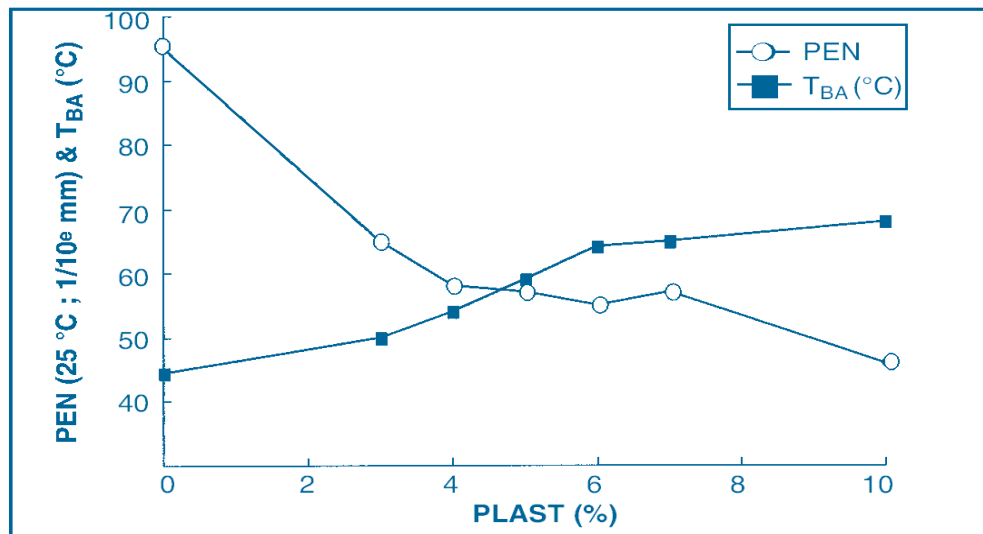


Fig.1.15 Variation de la pénétrabilité et T_{BA} en fonction de la teneur en polymère [Rou 1999]

III-8 Fabrication des bitumes polymères [Sou 2009]

Les procédés d'incorporation des polymères sont :

III-8-1 Procédé humide (voie humide)

Il s'agit des liants bitumineux dont les propriétés ont été modifiées par emploi d'un agent chimique qui, introduit dans le bitume de base et mélangé à haute température entre (150°C et 200°C), en modifie la structure chimique et/ou les propriétés physique et mécanique (wet process). Il s'agit de liants préfabriqués soit dans une usine séparé du lieu d'utilisation, soit immédiatement avant l'emploi par une unité mobile spécialisée. Le liant ainsi modifié peut être caractérisé en tant que tel séparément du mélange bitumineux.

III-8-2 Procédé sec (voie sec)

Suivant la définition retenue, sont considérés les cas d'emploi d'additifs introduits en centrale directement dans le malaxeur avec les agrégats lors de la fabrication de l'enrobé, l'effet de l'additif est apprécié directement sur le mélange bitumineux (dry process).

IV.BITUMES CAOUTCHOUCS

L'idée d'incorporer du caoutchouc pour améliorer les propriétés d'usage des liants hydrocarbonés est très ancienne. En effet, bien avant 1940, des enduits ont été mis au point à partir de goudrons et bitumes dans lesquels macéraient des caoutchoucs naturels sélectionnés.

Des répanduses spéciales munies de malaxeurs avaient été conçues pour la préparation et l'application de ces liants fortement visqueux. L'une des dernières applications, datant d'environ vingt ans, a été réalisée sur la côte du Pecq à Chatou, à l'ouest de Paris.

Non développées à l'époque en France, ces techniques ont été relancées aux États Unis et les premiers essais effectués dans ce sens par Mac Donald ont conduit à un procédé breveté. Elles ont ensuite été réintroduites en France en 1981. [Jacques]

Les premières expériences ont testé d'incorporer du caoutchouc naturel au bitume (Grande-Bretagne, 1840) dans le but de transmettre une partie de sa flexibilité à la structure. [Oul 2005]

IV-1 Procédés de fabrication

Il existe deux procédés de fabrication d'enrobés contenant de la poudrette de caoutchouc: à procédé par voie humide et procédé par voie sec.

IV-1-1 Procédé humide (Wet Process) [Bul 2000]

Ce procédé consiste à incorporer et à malaxer la poudrette au bitume de base. Il peut conduire à la fabrication d'un bitume stable ou non à lors du stockage. La stabilité au stockage du bitume et l'amélioration de sa réponse élastique sont obtenus par la dévulcanisation du caoutchouc présent dans la poudrette pour en favoriser la dissolution et par l'ajout d'un agent de réticulation permettant la formation de liaisons chimiques entre les macromolécules linéaires.

Cette modification est faite à très haute température (température optimale) d'environ 220°C [Shu 2002], avec ajout possible d'huiles aromatiques (figure 1.28).

La poudrette de caoutchouc, de granulométrie 0/2 mm, doit contenir d'environ 50 % de caoutchouc naturel (il convient de remarquer que les pneus de poids lourds sont essentiellement constitués de caoutchouc naturel alors que les pneus des véhicules légers en contiennent peu).

Le mécanisme de modification est identique au principe de bitume polymère c à d le gonflement des particules de caoutchouc à partir de l'effet de la température et des huiles.

La vulcanisation du caoutchouc issu du recyclage des pneumatiques fait que le polymère formant la poudrette ne se dissout pas bien dans le bitume chaud et le mélange est généralement instable au stockage. Cette instabilité impose que le liant soit utilisé immédiatement après sa fabrication. Des procédés brevetés autorisent toutefois un stockage pour des durées plus prolongées.

Cette propriété des liants bitumes caoutchouc permet de les classer dans deux catégories : bitumes caoutchouc non stockables et bitumes caoutchouc stockables. [Oul 2005]

a) Bitume caoutchouc non stockable [Rou 1999]

La poudrette de caoutchouc est composée à parts égales de caoutchouc naturel et de caoutchouc synthétique. Pour ce faire, il est fait usage de 50 % de pneus de voiture (80 % de caoutchouc synthétique et 20 % de caoutchouc naturel) et de 50 % de pneus de camions (20 % synthétique et 80 % naturel).

Le gonflement des particules de caoutchouc par certaines fractions du bitume est favorisé par l'action émollissante de l'huile. A la faveur de la température de fabrication du liant (205 °C), il y a dissolution d'une partie du caoutchouc dans le bitume et dévulcanisation d'une autre partie.

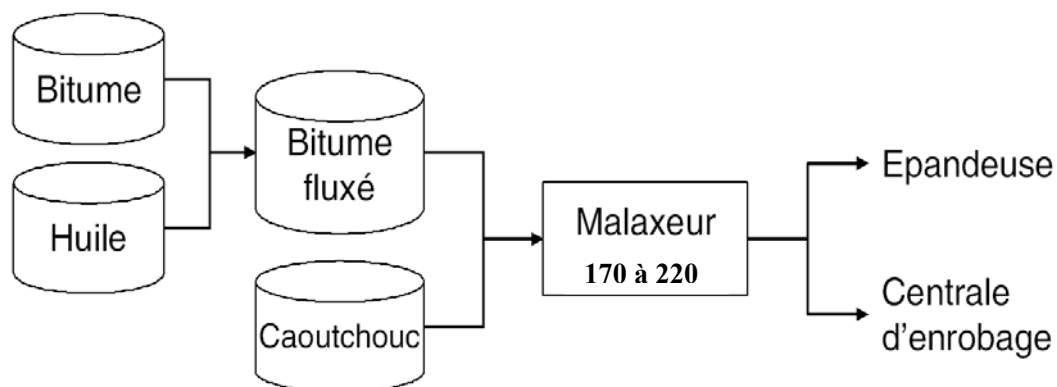


Fig.1.16 chaîne de fabrication de bitume caoutchouc non stockable

Les particules de caoutchouc introduites dans le bitume additionné d'huile sont brassées de façon continue à une température de 200 °C pendant un temps dit "de digestion", au cours duquel s'opère la transformation partielle du caoutchouc. Pendant cette période, les fractions légères du bitume pénètrent les particules de caoutchouc et provoquent leur ramollissement et leur gonflement ; la viscosité du mélange augmente et le liant, à l'origine très granuleux, devient relativement homogène et fluide en fin de réaction. (Figure 1.17) [Jacques]

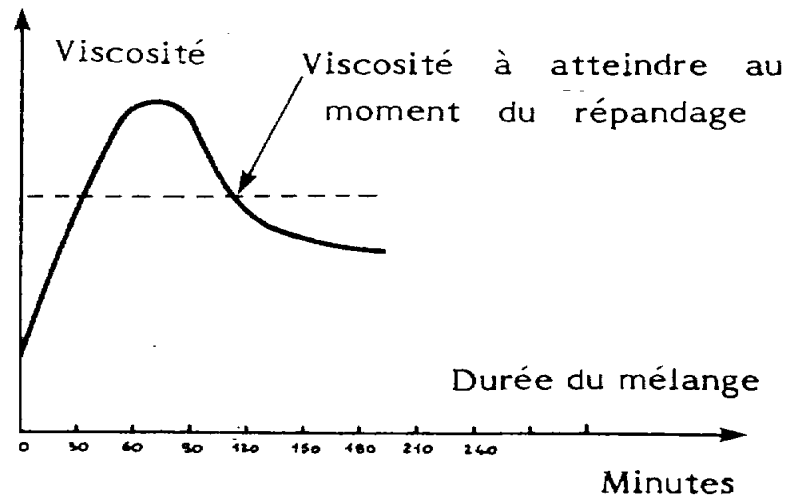


Fig.1.17 courbe de viscosité en fonction du temps de mélange

b) Bitume caoutchouc stockable [Rou 1999]

Différents procédés ont été brevetés pour assurer la stabilité du liant bitume caoutchouc issu du recyclage de pneumatiques usagés pour obtenir une dévulcanisation et comme une déhydrogénisation à haute température, aux environs de 250 °C suivie de l'addition de sélénium. Le procédé de figure 1.18 procède à une température plus basse.

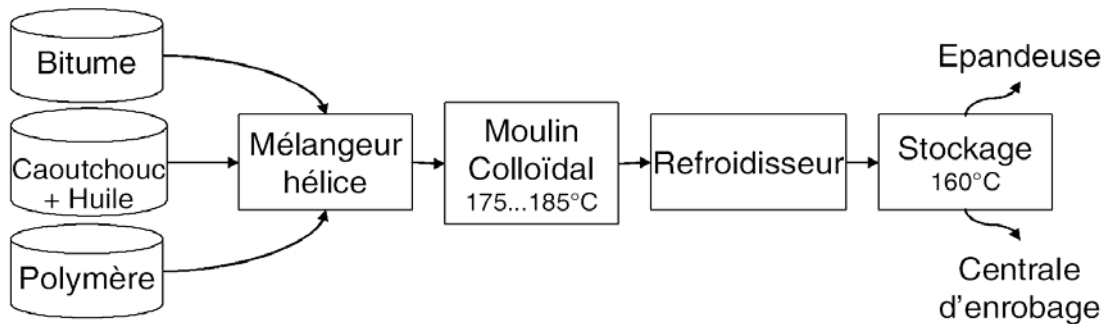


Fig.1.18 chaînes de fabrication de bitume caoutchouc stockable-procédé Beugnet

IV-1-2 Procédé sec (Dry Process)

Le premier consiste à incorporer la poudrette à la fraction granulaire, dans le malaxeur, avant l'ajout de bitume. Mais les granules de caoutchouc ne sont pas dissoutes. L'homogénéité du mélange est difficile à obtenir. Ainsi l'enrobé produit au Québec à la fin des années 1980 avec des granules de caoutchouc et du bitume non modifié n'était pas durable.

Cependant, une expérience municipale réalisée en 1996 avec du bitume polymère semble présenter de meilleurs résultats [Rou 1999].

Toutefois, il existe quelques procédés qui adoptent des distributions granulométriques différentes, parfois discontinues : [Oul 2005]

- Le procédé PlusRise utilise des granulats de caoutchouc grossiers (2-6mm) et une fraction fine de la poudrette de caoutchouc. La teneur en liant varie ici de 7.5 à 9%.
- Le procédé Colsoft de l'entreprise Colas introduit la poudrette de caoutchouc de granularité 0-1.5mm en remplacement d'une partie de la fraction sableuse, soit 2 à 3% en poids, évitant ainsi que des granules de caoutchouc subsistent entre deux gravillons. La teneur en poudrette de caoutchouc sera d'autant plus importante que la fraction en caoutchouc synthétique

IV-2 Application du bitume caoutchouc dans le domaine routier [Pau 1986; Oul 2005]

IV-2-1 Enduit superficiels

Les enduits superficiels à base de bitume caoutchouc sont apparus aux USA à la fin des années 60 et en France au début des années 80.

L'enduit superficiel est une couche de roulement constituée par la superposition alternée d'une ou plusieurs couches de liant hydrocarboné et d'une ou plusieurs couches de gravillons.

Ses composants sont :

- Le liant (bitume fluidifié, émulsion de bitume, etc.).
- Le granulat : de granularité peu étendue et de dimensions maximales comprises entre 2 et 18 mm.
- Le dope d'adhésivité qu'il est parfois nécessaire d'ajouter soit dans la masse du liant, soit à l'interface liant granulat.

L'enduit superficiel doit assurer plusieurs fonctions :

- Transmettre aux couches inférieures les efforts engendrés par les véhicules en mouvement : charge, accélération ou freinage, dérapage.
- Assurer un niveau d'adhérence correct lorsque la surface de la chaussée est humide.
- Protéger la chaussée, notamment sa couche de base, contre les agressions dues au climat et tout particulièrement contre les infiltrations d'eau.
- Garantir une cohésion superficielle s'opposant à l'arrachement du revêtement sous l'action des pneumatiques.

On n'oublie pas l'imperméabilisation des chaussées.

Les principales causes de détérioration des routes en enduit superficiel sont :

- Le vieillissement de bitume sous l'influence de l'oxydation
- Le phénomène de fatigue, sous l'effet des contraintes cycliques répétées, particulièrement dues aux poids lourds.
- L'influence des cycles de gel et dégel en particulier sur les routes dépourvues de protection.

Les phénomènes les plus visibles sont les déformations et la fissuration.

Lorsque la couche de roulement a été dégradée, l'eau s'infiltré dans le corps de chaussée et accélère la dégradation.

IV-2-2 Joints pour fissures

Les utilisations du bitume caoutchouc pour le remplissage des joints et le colmatage des fissures sont très répandues aux USA. Les exigences sur les propriétés désirées pour ce produit ont été développées à travers les années d'expérience et ne sont souvent pas liées à des propriétés fondamentales ou intrinsèques du matériau. Certaines de ces propriétés sont énumérées ci-dessous :

- Aptitude à être manipulé, mis en place et stocké de manière aisée,
- Adhésivité aux surfaces des joints et fissures,
- Résistance au ramollissement pour éviter l'écoulement,
- Résistance à la déformation permanente due au trafic,
- Résistance aux intrusions,
- Élasticité et déformabilité aux basses températures pour prévenir la fissuration,
- Résistance aux effets environnementaux : air, eau, ozone, et température,
- Résistance aux produits chimiques,
- Compatibilité avec les matériaux de la structure,
- Cure rapide pour permettre une mise en circulation dans des délais courts.

IV-2-3 Membranes gravillonnées

Les applications des membranes gravillonnées à base de bitume caoutchouc sont apparues aux USA à la fin des années 60 et en France au début des années 80.

L'utilisation du bitume caoutchouc pour la réalisation de membranes gravillonnées présente certaines particularités.

Pour assurer un bon collage avec le support, la propreté des surfaces recouvertes est essentielle. L'optimisation de la quantité de liant répandu et de la quantité de granulat permet d'assurer une bonne texture et un minimum de rejets de gravillons. En moyenne, la quantité de liant par unité de surface est augmentée par un facteur de 1.5 à 2.5 par rapport un liant classique.

IV-2-4 Enrobé bitumineux à chaud

Les enrobés bitumineux à chaud contenant du caoutchouc, que se soit avec le procédé sec ou humide, sont réalisés à partir de la fin des années 60 et avec des tonnages appréciables à partir du milieu des années 70.

Les deux procédés de fabrication (wet et dry) ont permis de proposer des formulations d'enrobés bitumineux à chaud adoptant des courbes granulométriques fermées, grenues ou ouvertes.

Les méthodes de formulation des mélanges bitumineux ont été adaptées pour palier aux limites des 50 Le bitume caoutchouc méthodes classiques et revoir les exigences de qualité de certains essais performanciels.

Des suggestions pour la formulation d'enrobés contenant des inclusions de caoutchouc peuvent être résumées ci-dessous :

- Augmentation de la teneur en liant de l'ordre de 15 à 25% par rapport à un enrobé au bitume pur,
- Ajustement de la courbe granulométrique afin de prévoir un volume pour les particules de caoutchoucs non dissoutes ainsi que la teneur en liant plus élevée,
- Augmentation de la température de malaxage et de compactage. En pratique, un décalage de 10°C est admis.
- Adaptation de la finesse de la poudre de caoutchouc au diamètre maximale de la courbe granulométrique de la partie minérale.
- Utilisation des principes de formulation classiques, en tolérant toutefois des stabilités Marshall plus faibles et des fluages Marshall plus élevés.

IV-2-5 Émulsion

Il est possible d'émulsifier le bitume caoutchouc (procédé humide) à condition d'utiliser des poudrettes de caoutchouc très fines. Le solvant utilisé doit préserver les propriétés physico-chimiques du bitume et du caoutchouc sans être nocif pour l'environnement. Le solvant, permettant la dissolution et le ramollissement du caoutchouc, améliore le mouillage et l'adhésivité du liant.

V. LES GRANULATS

Les granulats représentent près de 95 % d'un enrobé bitumineux. Il est donc important de bien les caractériser afin de faire un choix optimal lors de la formulation et de la fabrication d'un enrobé performant.

Granulat est un matériau granulaire utilisé en construction ou bien est un ensemble des grains de dimensions comprises entre 0 mm et 125 mm, Qui participe intimement aux performances et à la durabilité des ouvrages.

On a distingué deux catégories de granulats :

- Naturels, lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives, extraites in situ, et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique.
- Artificiels, lorsqu'ils proviennent soit de la transformation thermique de roches, minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers.

V-1 Caractéristiques et propriétés des granulats

L'intégration des granulats dans le mélange bitumineux nécessite de connaître différentes caractéristiques et propriétés, ces caractéristiques dépendent de la nature de la roche de mère et ne peuvent pas être amélioré tel que (les essais mécaniques) : la dureté résistance aux chocs résistance à l'usure par frottement. .

a) Granularité

b) La forme

c) L'angularité

d) La propreté

V-2 Classification des granulats

Les granulats sont classés selon la plus grande dimension « D » et la plus petite « d » comme le tableau 1.6:

Tableau 1.5 Classification des granulats.

Classe de produit	Dimension en millimètre
Fine	$0/D$ ou $D \leq 0,0063$
Sable	$0/D$ ou $D \leq 6,30$
Gravillons	d/D ou $d \geq 2$ et $D \leq 31,50$
Cailloux	d/D ou $d \geq 2$ et $D \leq 820,00$
Graves	$0/D$ ou $6,3 < D \leq 31,50$

VI. LES ENROBES BITUMINEUX

VI-1 Les structures des chaussées [Yan 2001]

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches, qui sont mises en oeuvre pour répartir les charges induites par le trafic que le sol support seul ne pourrait pas soutenir.

La structure complète comprend :

- le sol support ;
- la couche de forme qui protège le sol support pendant les travaux, permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux de remblais ou du terrain en place et de les protéger du gel ;
- les couches d'assise (couche de fondation + couche de base) qui sont constituées de matériaux élaborés (le plus souvent liés pour les chaussées à trafic élevé) qui doivent répartir les contraintes de pression dues au trafic dans les limites admissibles au niveau de la plate-forme support ;
- les couches de surfaces (couche de liaison + couche de roulement) qui subissent directement les actions du trafic.

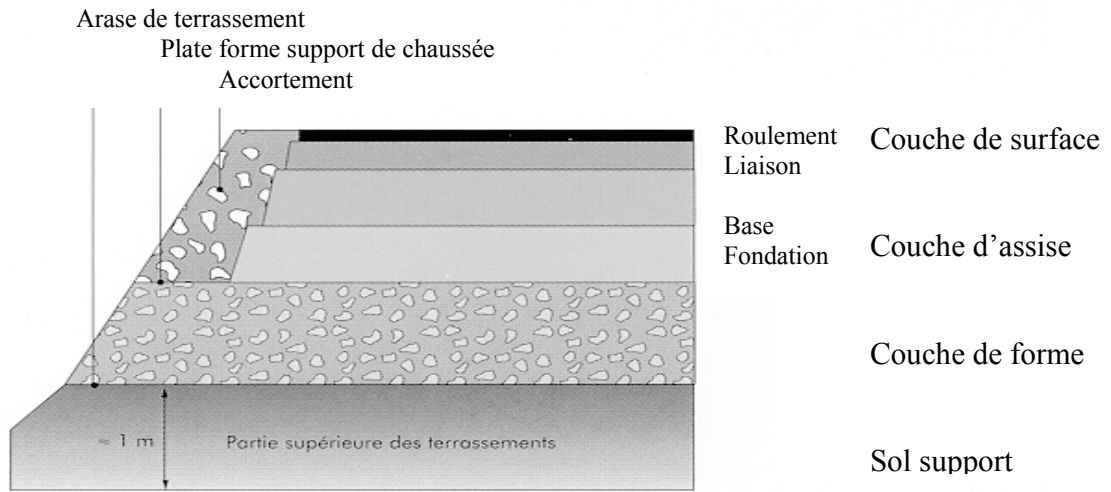


Fig.1.19 Schéma d'une coupe de chaussée.

Les matériaux bitumineux peuvent être utilisés dans les couches de surface et dans les couches d'assise.

Les structures de chaussées sont réparties en deux grandes classes en ce qui concerne le réseau routier : les chaussées bitumineuses et les chaussées en béton de ciment.

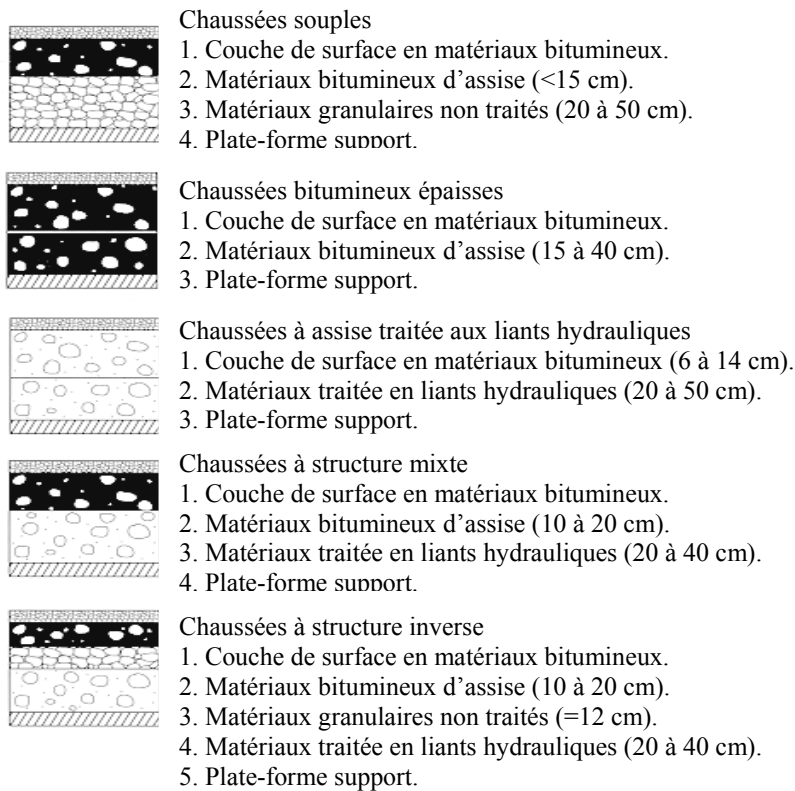


Fig.1.20 Schéma des différents types de structures des chaussées.

Les chaussées souples et les chaussées bitumineuses épaisses sont employées pour le réseau départemental, les autres structures étant utilisées pour des niveaux de trafic plus élevés.

VI-2 Généralité sur les enrobés

VI-2-1 Définition

L'enrobé bitumineux est un mélange de granulats minéraux et de liant hydrocarbonés (bitume pur) dosé dans des proportions convenables. C'est aussi un corps hétérogène auquel le bitume confère un caractère visqueux, alors que sa partie minérale est responsable de sa résistance.

Un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux (5 à 7 % en masse), d'agrégats et de fines (passant à 80 µm). L'obtention des enrobés par mélange des granulats et du bitume fait appel à des propriétés bien spécifiques aux liants hydrocarbonés en général et donc au bitume en particulier : [Had 2007]

- un pouvoir d'adhésion aux granulats,
- une consistance variable avec la température.

VI-2-2 Teneur en liant [Fra 2003]

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d'une trop forte teneur en bitume).

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats, notée Σ et exprimée en m²/kg, c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères.

Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique Σ :

$$100\Sigma = 0,17G + 0,33g + 2,3S + 12s + 135f$$

Avec :

G : pourcentage de gros gravillons ($\phi \geq 11$).

g : pourcentage de petits gravillons ($\phi \leq 6/11$).

S : pourcentage de gros sable ($\phi \leq 0,3/6$).

s : pourcentage de sable fin ($\phi \leq 0,08/0,3$).

f : pourcentage de filler ($\phi \leq 0,08$).

On voit que le pourcentage de filler est prépondérant en ce qui concerne la surface spécifique et donc la teneur en liant. Dans certains cas, on utilise la formule simplifiée suivante :

$$\Sigma = 2,5 + 1,3f$$

La teneur en liant optimale, fonction de la surface spécifique des granulats, est donnée par la formule expérimentale suivante :

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

Avec :

p : teneur en liant (%).

α : facteur dépendant du type de granulats (2,65/masse volumique des granulats).

Σ : surface spécifique des granulats (m²/kg).

k : module de richesse (k variant de 2,75 pour les enrobés donnant le maximum de résistance à la déformation, à 3,5 pour les enrobés les plus souples).

VI-2-3 Influence des actions appliquées à la chaussée

Les chaussées routières sont en permanence soumises à des sollicitations mécaniques et thermiques combinées avec des phénomènes chimiques qui vont participer, plus ou moins rapidement selon leurs niveaux de sollicitation, à la dégradation du revêtement. Ces éléments, responsables des dégradations, ont pour origine : [jun 2004]

a) Sollicitations mécaniques (effet de trafic)

Principalement les effets dynamiques dus aux passages répétés des poids lourds, les effets statiques lors du ralentissement du trafic et les frottements de surface pneu-chaussée.

En première approximation, chaque couche de chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic. Le calcul des efforts et déformations qui apparaissent nécessite, en premier lieu, la connaissance du module complexe et éventuellement du coefficient de Poisson.

Soulignons qu'en raison des propriétés particulières apportées par le bitume (viscoélastique), les enrobés bitumineux ont un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.

Les tractions répétées à la base des couches sous l'effet du passage des véhicules créent des «micro» dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Ce phénomène est la fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Les effets du trafic ont été abondamment étudiés de par le monde et les publications relatives y sont abondantes.

Les compressions répétées sous le passage des véhicules peuvent induire des déformations permanentes qui, si elles sont trop importantes, se traduisent par un orniérage à la surface de la chaussée (figure.1.21).

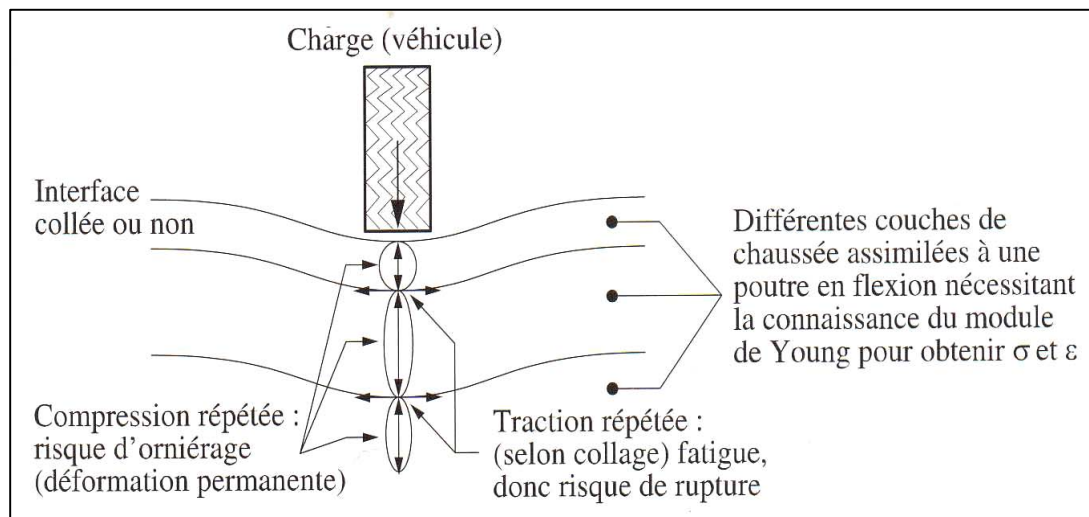


Fig.1.21 Sollicitations dans la chaussée induite par un véhicule [Vin 2005].

A la base d'une couche, l'amplitude et la fréquence de la sollicitation en traction dépendent :

- de la position de ce point verticalement et transversalement par rapport au centre de la charge
- du type de roue (roues jumelées ou simples)
- de la température
- de la vitesse de passage de la roue.

b) Les Sollicitations climatiques (effet de la température) [jun 2004]

Entraînant des variations de température au sein des enrobés bitumineux. Ces variations sont soit de courtes durées (journalières) où soit de longues durées (saisonnnières).

Mis à part l'accélération du vieillissement du matériau et les pertes de portance des chaussées en période de dégel dues à la présence de sols gélifs dans les couches d'infrastructure, les variations de la température ont deux effets mécaniques principaux : (figure 1.22)

- Variation du module de l'enrobé bitumineux (facteur jusqu'à 100x),
- Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations contractions thermiques lors des changements de température (couplage thermomécanique).

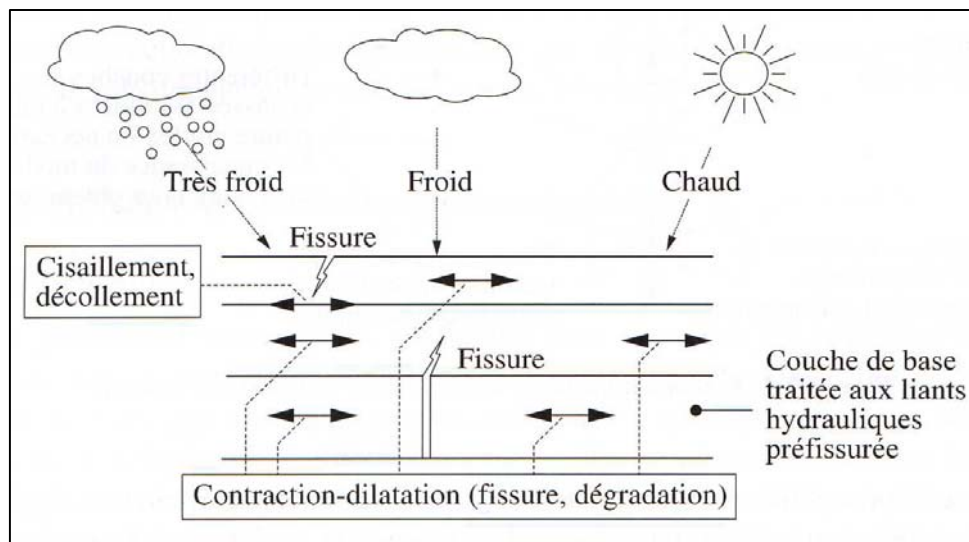


Fig.1.22 Sollicitations dans la chaussée induite par la température [Dan 2006].

VI-3 Classement des types de comportement des matériaux bitumineux [Yan 2001, Dan 2006].

La figure 1- 23 présentes les principaux domaines du comportement des enrobés bitumineux lors des essais de caractérisation mécanique. Ainsi on distingue trois catégories principales d'essais en fonction du nombre de cycles imposés et de la norme de la déformation imposée, ϵ :

- Pour un faible nombre de cycles de chargement et des déformations élevées (quelques pourcents), le comportement est fortement non linéaire.
- Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations faibles, le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.

- Le phénomène de fatigue se produit lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations "faibles" qui favorisent le développement de l'endommagement.
- La production et l'accumulation des déformations irréversibles sous un grand nombre de cycles de chargements favorisent par une température élevée est le quatrième type de comportement.

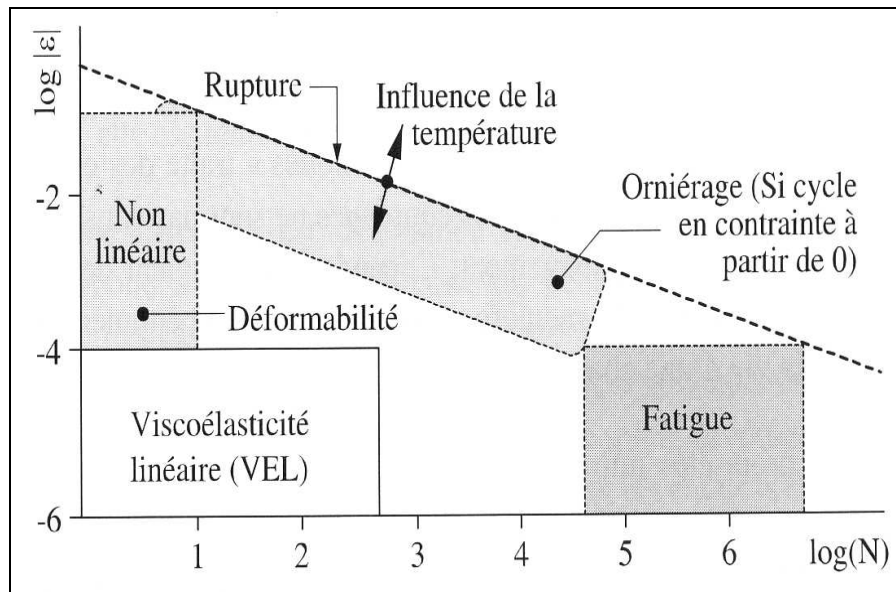


Fig.1.23 Type de comportement des matériaux bitumineux [Yan 2001]

La figure 1.23 fournit un ordre de grandeur de différents domaines de comportement type pour une température fixée. Les frontières considérées correspondent, bien sûr, à des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et la direction du chemin de sollicitation (compression, cisaillement, ...).

Les quatre propriétés mécaniques importantes pour les matériaux traités aux liants hydrocarbonés utilisés en technique routière sont :

- la rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire) ;
- le comportement à la fatigue ;
- le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes. Ce phénomène est donc lié aux irréversibilités et aux non linéarités déjà existantes dans le domaine des faibles déformations ;

- la fissuration et la propagation des fissures. En particulier les phénomènes de fissuration par apparition de contraintes liées aux variations de température (dilatation et/ou contraction thermique) sont un aspect important qui introduit un couplage thermomécanique.

Ces quatre propriétés sont analysées selon des procédures plus ou moins rationnelles dans les méthodes de dimensionnement de chaussées.

VI-4 Essais sur Enrobé bitumineux

On a plusieurs essais sur les enrobés on cite quelques essais tels que :

- a) **Essai Marshall** [NF P 98-251-2]
- b) **Essais Duriez (tenue à l'eau)** [NF P 98-251-1]
- c) **La presse à Cisaillement Giratoire** [Had 2007]
- d) **Essai de traction directe** [Fra 2003]
- e) **Essai de retrait thermique empêché** (AASHTO, TP 10-93) [Fra 2003]
- f) **Essai d'orniérage**
- g) **Essai de fluage statique** [Ben 2003]

VII. Résumé de quelques travaux

Nous allons présenter quelques travaux de recherche sur l'influence de la poudrette sur le comportement des enrobés bitumineux. Il s'agit des études effectués par :

- S.Haddadi « Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux », Thèse de doctorat d'état à l'USTHB.
- D.Magramane « Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification a base de polymères : poudrette de caoutchouc », Thèse de magister à l'ENSTP.

VII.1 Travaux de Haddadi [Had 2007].

VII.1.1 Identification des matériaux

a) Granulats

- Le sable présente une forte teneur en carbonates (CaCO_3), il s'agit d'un sable calcaire.
- Les gravillons sont de nature Siliceuse.

Les caractéristiques intrinsèques des différentes classes de granulats sont données par le tableau

Tableau 1.6. Caractéristiques des granulats.

Essais	Classe granulaire		
	0/3 (Keddara)	3/8 (Cap Djinet)	8/15 (Cap Djinet)
Propreté (%)	-	2.33	1.57
Equivalent de sable (%)	39	-	-
Los Angeles (%)	-	16	14
Micro-Deval (%)	-	29	16
Densité spécifique	2.58	2.70	2.70

Les différents essais effectués (LA, MDE, ES, etc.) sur les granulats montrent que les matériaux choisis présentent, de bonnes caractéristiques en qualités intrinsèques.

b) Polymère

Le polymère qu'il est utilisé est un déchet industriel de couleur noirâtre provenant de la société d'application d'élastomère (SAEL). Il est utilisé sous forme de poudrette. La densité de la poudrette est de 1,22 mesurée par rapport à l'éthanol dont la densité est de 0,79.

c) Bitume

Le bitume utilisé de grade 35/50 provient des raffineries de Naftal. Le tableau résume les résultats des différents essais conduits sur le bitume.

Tableau 1.7. Caractéristiques du bitume

Grade de bitume pur	35/50	Spécifications
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	42	35 à 50
Température bille et anneau «TBA» (°C)	51,6	50 à 58
Densité relative (g/cm ³)	1.029	-
Ductilité à 25°C (mm)	> 1000	> 1000
IP _{LCPC}	0,545	-

VII.1.2 Modification

La transition vitreuse est caractérisée par une température de transition vitreuse (T_g pour "glass temperature"). En dessous de cette température, le polymère est dit vitreux (état solide) et présente le comportement d'un corps solide élastique. Au dessus il présente un comportement de solide plastique (état viscoélastique).

L'analyse enthalpique différentielle (DSC) est l'une des méthodes physiques les plus utilisées pour permettant de mesurer la température de transition vitreuse « Tg ». L'essai a été conduit à la vitesse de 10°C/min entre -90°C et 250°C en utilisant l'appareil Perkin Elmer.

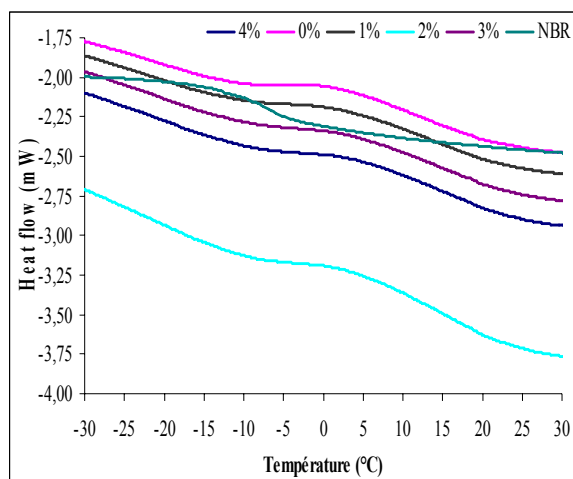


Fig.1.24 DSC du bitume, du NBR et des bitumes modifiés aux différentes teneurs

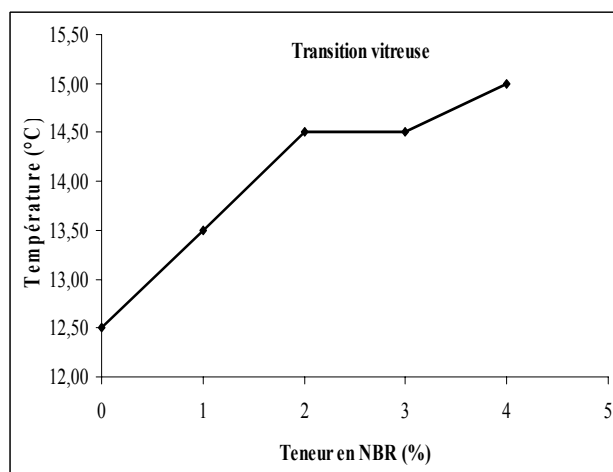


Fig.1.25 Variation de la Tg en fonction de teneur en NBR

Ces résultats montrent que la température de transition vitreuse augmente avec la teneur en NBR.

L'ATG a été effectuée pour étudier l'évolution du poids avec la température. Cet essai a été réalisé en utilisant l'appareil TGA Q500 à la vitesse de 10°C/min. Les figures 1.23 et 1.24 représentent cette évolution.

Selon Ahmedzade l'indice de stabilité thermique correspond à une perte de 5 % du poids initial.

Tableau.1.8 Températures correspondant à 5% de perte

Teneur (%)	0	1	2	3	4	NBR
Température (°C)	257	271	257	262	261	217

Les résultats du tableau 1.9 montrent que les températures initiales de décomposition du bitume pur, des bitumes modifiés et du NBR sont supérieures aux températures de malaxage et de modification. Donc la poudre de caoutchouc peut être utilisée pour la modification.

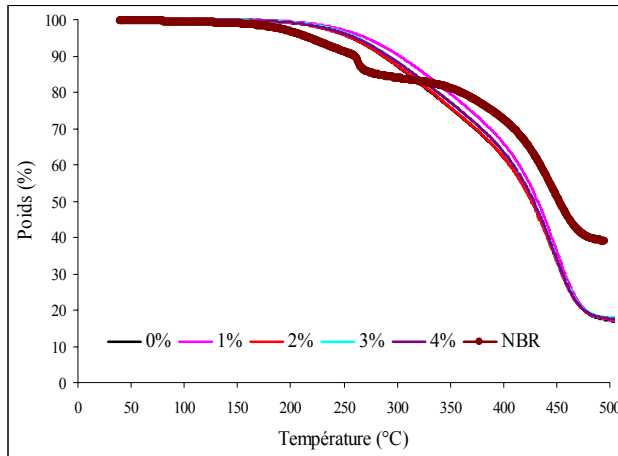


Fig.1.26 Courbes d’ATG pour les différents éléments

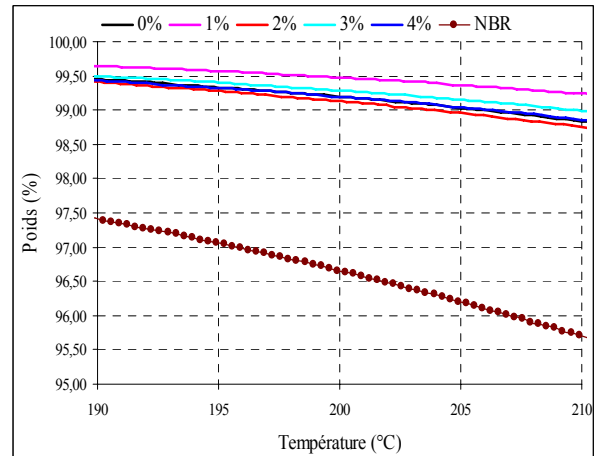


Fig.1.27 Courbes d’ATG pour les différents éléments entre 190°C et 210°C

VII.1.3 Essai Marshall

La figure 1.29 présente la compacité des différents mélanges, la compacité maximale a été enregistrée pour 3% de NBR.

La figure 1.28 présente la stabilité d’un enrobé de 0/14 de formulation 35 % de chaque classe de 0/8 et 8/15 et de 30 % pour la classe 3/8, cette stabilité est maximale pour 2 % de NBR.

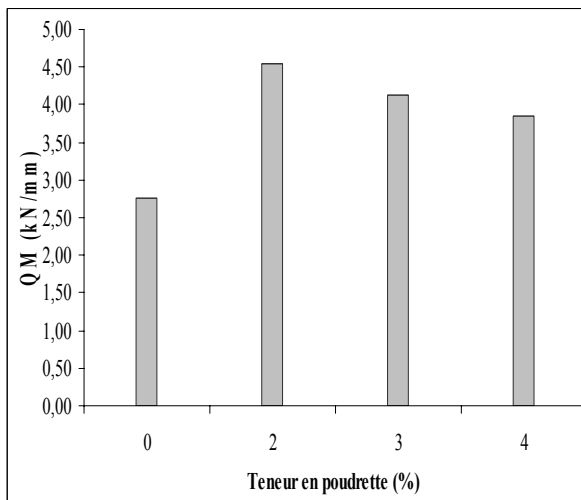


Fig.1.28 Quotient Marshall en fonction de la teneur en poudre

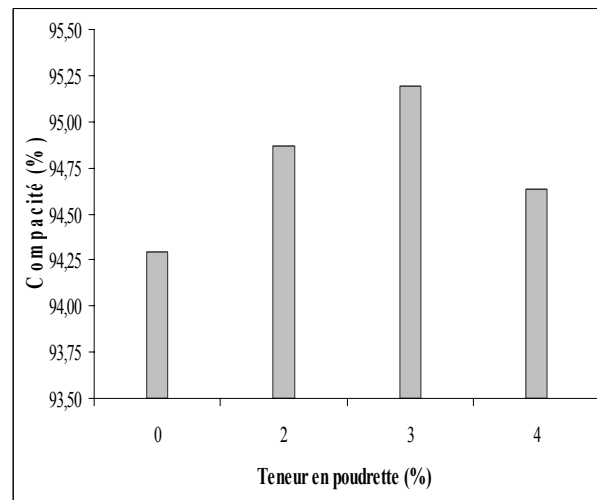


Fig.1.29 Compacité des différents mélanges

VII.1.4 Compression simple

L'essai est réalisé sur des éprouvettes de bétons bitumineux modifiés à 0, 2, 3 et 4% de NBR et de 1,5 d'élançement dont les conditions opératoires sont présentées dans le tableau

Tableau 1.9 Conditions opératoires de l'essai de compression simple.

Diamètre (mm)	80
Hauteur (mm)	120
Température (°C)	25, 40, 60
Vitesse de compression (mm/min)	2
Nombre d'éprouvettes testées pour chaque cas	3

Les éprouvettes, conservées à température ambiante, sont soumises à l'essai de compression simple 24 heures après leur fabrication.

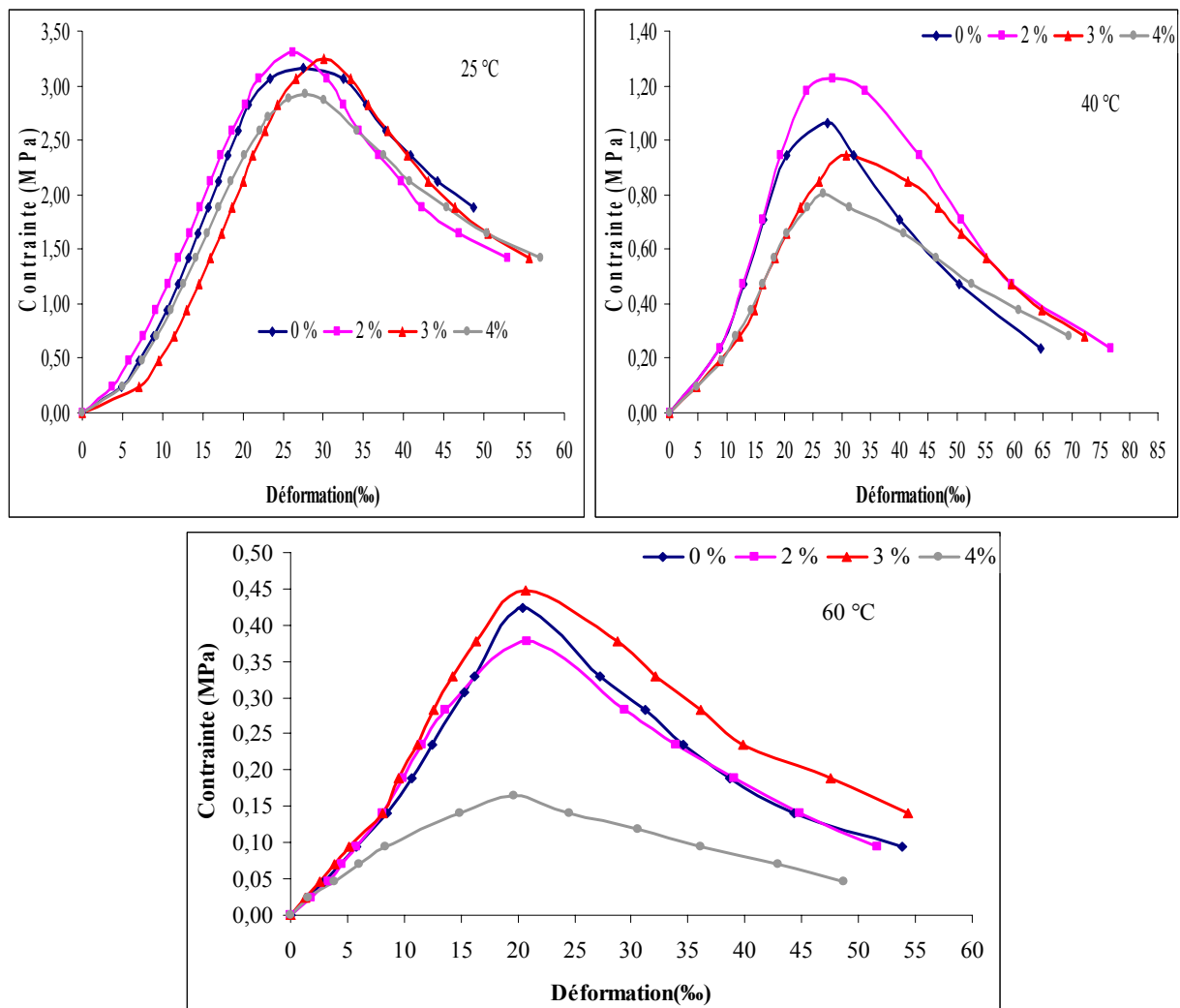


Fig.1.30 Courbes contrainte déformation en compression simple pour les différents mélanges à 25°C, 40°C et 60°C

A 25°C et 40°C, les courbes contrainte-déformation des bétons bitumineux modifiés à 2% de NBR donnent de meilleures résistances que les autres pourcentages.

A 60°C, la courbe contrainte-déformation des bétons bitumineux modifiés à 3% de NBR donne la meilleure résistance comparée aux autres.

VII.1.5 Essai de fluage statique et de relaxation

Les conditions de l'essai sont les suivantes :

- Température de l'essai : 25, 40 et 60°C,
- Contraintes appliquées : 0.05 de σ_{\max} ; 0.125 de σ_{\max} ; 0,20 de σ_{\max} et 0.25 de σ_{\max}
- Teneurs en NBR : 0, 2, 3, et 4%.

Les résultats obtenus montrent que la tendance générale est l'amélioration de la résistance au fluage du mélange à 2% de NBR à 25°C quelque soit le niveau de contrainte appliqué. Par contre pour les températures de 40 et 60°C le mélange à 3% de NBR présente des déformations de fluage plus faible. Ces courbes montrent l'existence de déformations permanentes (irréversibles) pour toutes les expériences.

VII.1.6 Taux de déformation de fluage

La figure 1.31 montre que l'ajout de poudrette de caoutchouc de NBR améliore la résistance aux déformations de fluage. Les mélanges à 2 et 3 % résistent mieux. A 60°C, pour de fortes charges ($0,25 \sigma_{\max}$) les déformations, pour tous les mélanges, sont de même niveau.

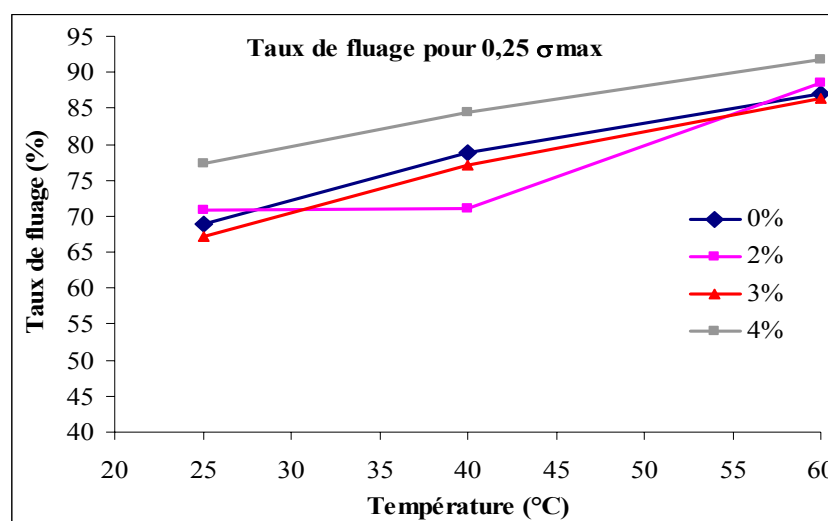


Fig.1.31 Taux de fluage pour $0,25 \sigma_{\max}$.

VII.1.7 Essai de relaxation

Les conditions de l'essai sont les suivantes :

- température : 25°C,
- déplacement (mm) : 0,5 ; 0,75 ; 1,00 et 1,25,
- teneur en NBR : 0, 1, 2, 3 et 4,
- Temps de relaxation: 2h.

Les essais de relaxation ont montré que la relaxation des différents enrobés n'est pas totale pour les grands déplacements. Que pour les faibles déplacements le comportement peut être viscoélastique. La relaxation étant quasi-totale. Ce qui n'a pas été observé lors des essais de fluage parce que les contraintes imposées étaient plus importantes.

VII.2 Travaux de Magramane [Mag 2009].

VII.2.1 Identification des matériaux

a) Granulats

- Le sable présente une forte teneur en carbonates (CaCO_3), il s'agit d'un sable calcaire.
- Les gravillons sont de nature Siliceuse.

Les caractéristiques intrinsèques des différentes classes de granulats sont données par le tableau

Tableau 1.10 Caractéristique intrinsèque des granulats.

Essai	Référence	0/3	3/8	8/15	Qualité	
Poids spécifique (t/m ²)	-	2.68	2.72	2.74	-	
Propreté superficielle (%)	NF P 18-591	-	1.56	1.21	<2%	Propre
LA (%)	NF P 18-573	-	14	14.5	<20	Bon à moyen
MDE (%)	NF P 18-572	-	18	13.5	<20%	Bon à moyen
ES (%)	NF P 18-597	72	-	-	60%	Sable propre

Les matériaux présentent de bonnes caractéristiques intrinsèques et de fabrication et de ce fait, les spécifications sont respectées.

b) Bitume

Le bitume utilisé est de grade 50/70 fourni par le groupe Total. Le tableau résume les résultats des différents essais conduits sur le bitume.

Tableau 1.11 Caractéristique de bitume.

Type d'essai		Résultat	Spécification
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)		60	50 - 70
Température bille et anneau « TBA » (°C)		49.85	46 – 54
Densité relative (g/cm ³)		1.00	1.0 – 1.1
Ductilité à 25°C (cm)		139	> 80
Indice de pénétrabilité « IP » (LCPC)		0.31	-
% Asphaltènes (%)		18.54	-
Après RTFOT	Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	35	-
	TBA (°C)	57.8	> 48
	Pénétrabilité restante (%)	58.33	> 50
	Δ TBA (°C)	7.95	< 9

c) Polymère

Le polymère qui est utilisé est de la poudrette de caoutchouc naturel NR (Voir chapitre polymère).

VII.2.2 Modification

La fabrication du bitume-caoutchouc a été conduite dans les conditions suivantes :

- Température du mélange : 170 + 5 °C
- Vitesse de malaxage : 600 tr/min
- Hélice de 5cm de diamètre fixée à environ 5 mm du fond du récipient.
- Récipient en fer blanc de 11 cm de diamètre contenant environ 450 g de bitume.
- Durée du malaxage : 1h ,2h, 3h, 4h.
- Le bitume a été modifié avec du NR aux teneurs de 2, 4,6 et 8 %.

VII.2.3 Essai Marshall

Un enrobé de 0/14 de formule 45 % de 0/3 ,20 % de 3/8 et de 35 % de 8/15.

Une compacité maximale a été enregistrée pour 6 % et 8 % (figure1.34)

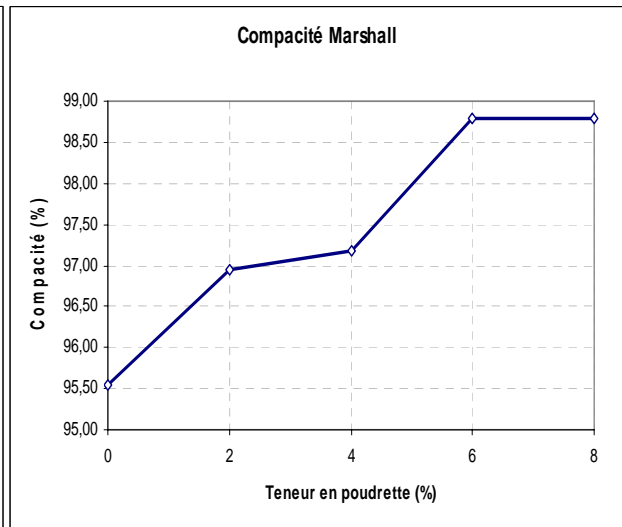
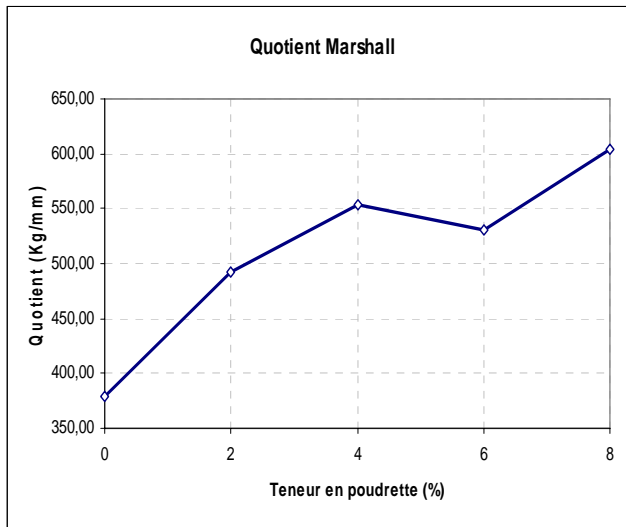


Fig.1.32. Quotient Marshall en fonction de NR

Fig.1.33. Compacité Marshall en fonction NR

Nous remarquons que les bétons bitumineux modifiés à 4% et 8% donnent les meilleures performances mécaniques par rapport aux autres bétons bitumineux.

VII.2.4 Fluage statique

Mode opératoire

L'application de la charge se fait par l'intermédiaire de deux plateaux maintenus parallèlement quelles que soient les caractéristiques de l'éprouvette testée. Un des plateaux est fixe, la course du plateau mobile est de quelques millimètres.

La conduite d'un essai de fluage - recouvrance est la suivante :

- Après avoir conservée l'éprouvette pendant quatre heures à la température de l'essai, elle est placée entre les deux plaques métalliques dans le bain-marie porté préalablement à la même température, et en faisant en sorte qu'elle soit totalement immergée.
- Une contrainte de compression $\sigma_0 = 0,14$ MPa est appliquée pendant 1h. La déformation axiale de fluage est mesurée.
- Au bout d'une heure la contrainte σ_0 est supprimée, la déformation de recouvrance (retour des déformations) est mesurée.

a) Influence de la température

Les mélanges BB (0), BB (4) et BB (8) sont testés à trois températures à savoir : 25 °C, 40 °C et 60 °C,

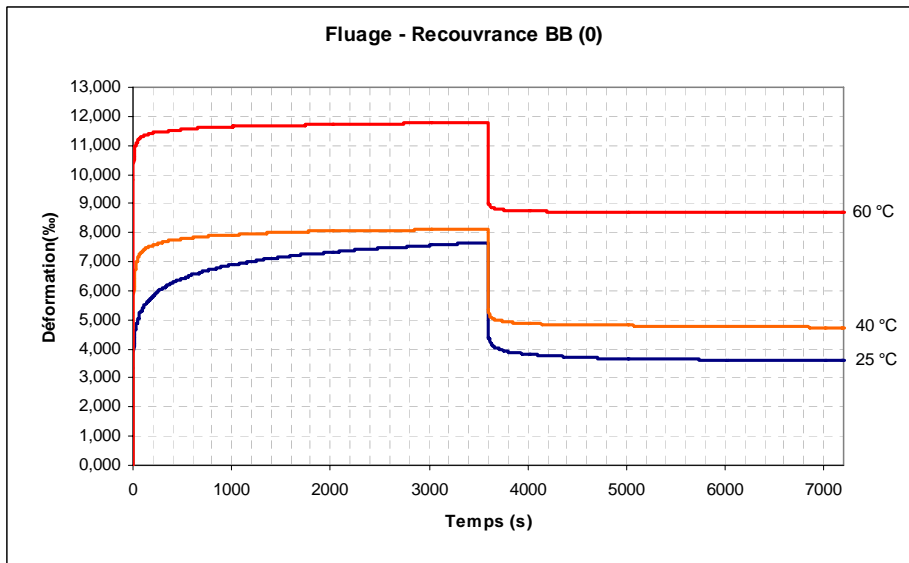


Fig.1.34. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume

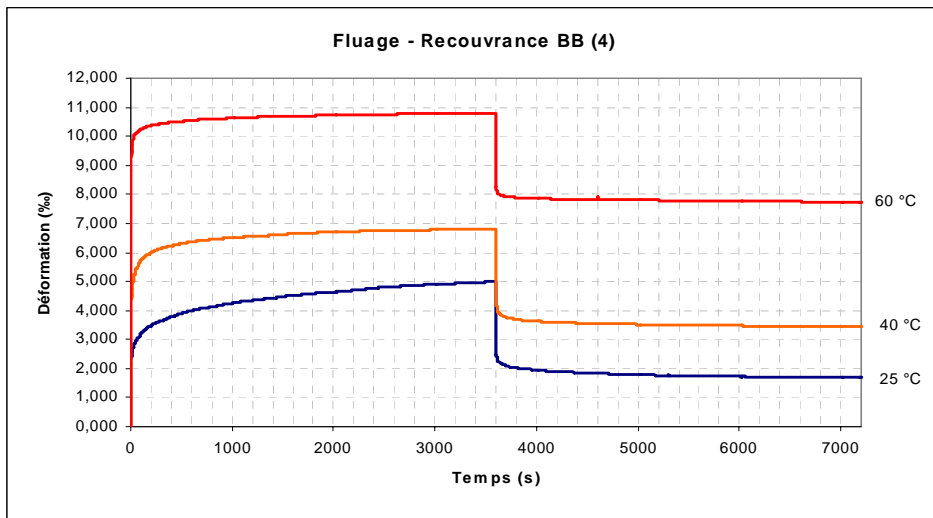


Fig.1.35. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume modifié à 4% de NR

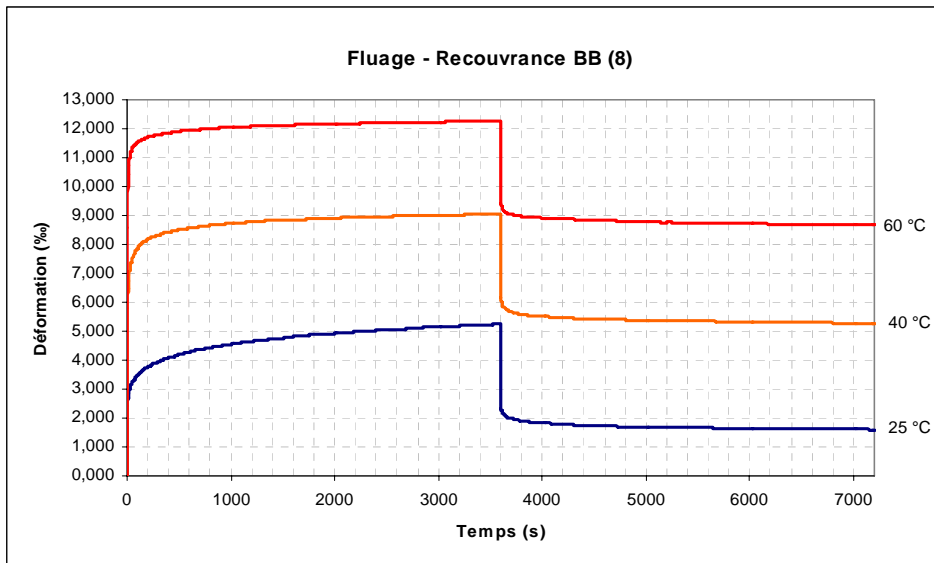


Fig.1.36. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume modifié à 8% de NR

Les courbes de déformations obtenues montrent que la température influe sur le comportement au fluage - recouvrance des enrobés bitumineux, cette influence dépend aussi de la teneur en poudrette de caoutchouc NR.

b) Influence de la teneur en poudrette de caoutchouc NR

Les figures 1.37, 1.38, 1.49, représente les courbes des essais de fluage – recouvrance des enrobés modifiés à différents teneurs en NR et à différentes températures.

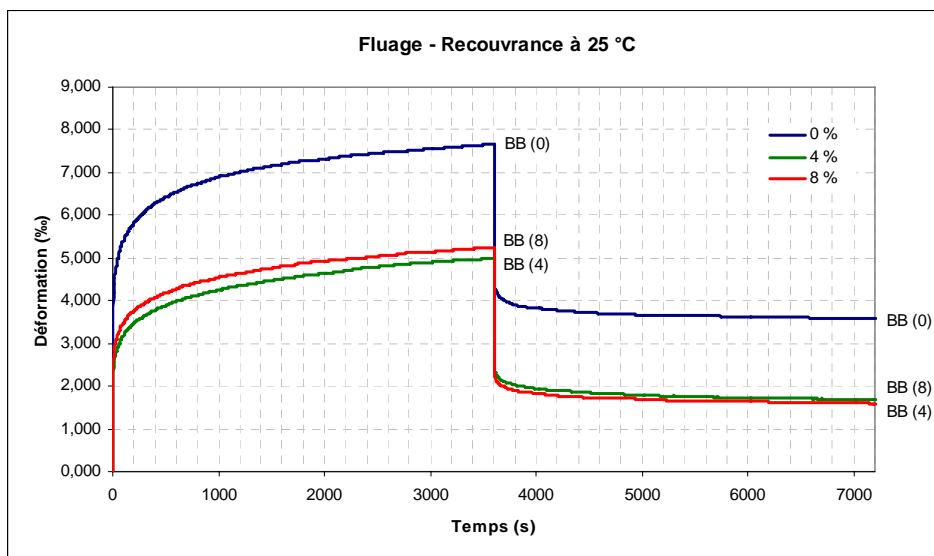


Fig.1.37. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 25 °C

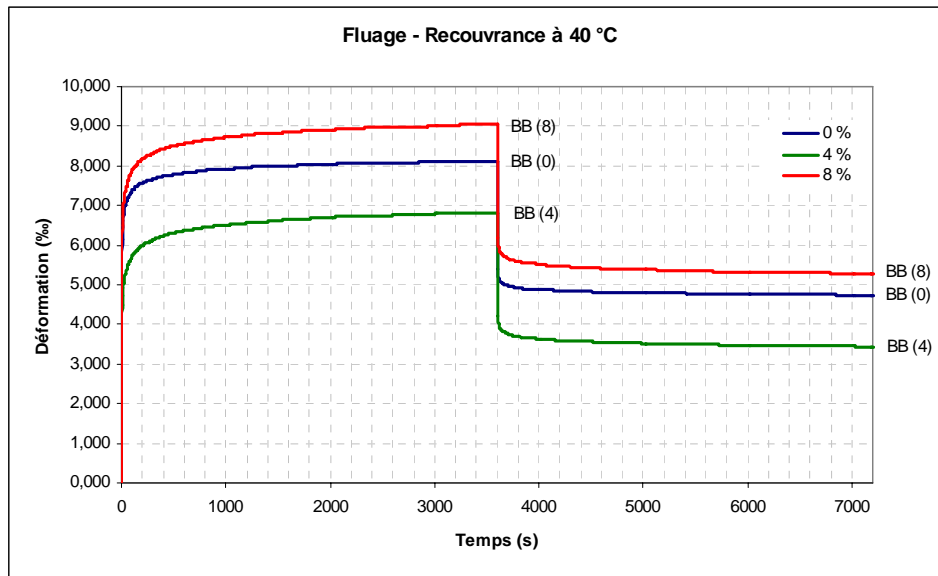


Fig.1.38. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 40 °C

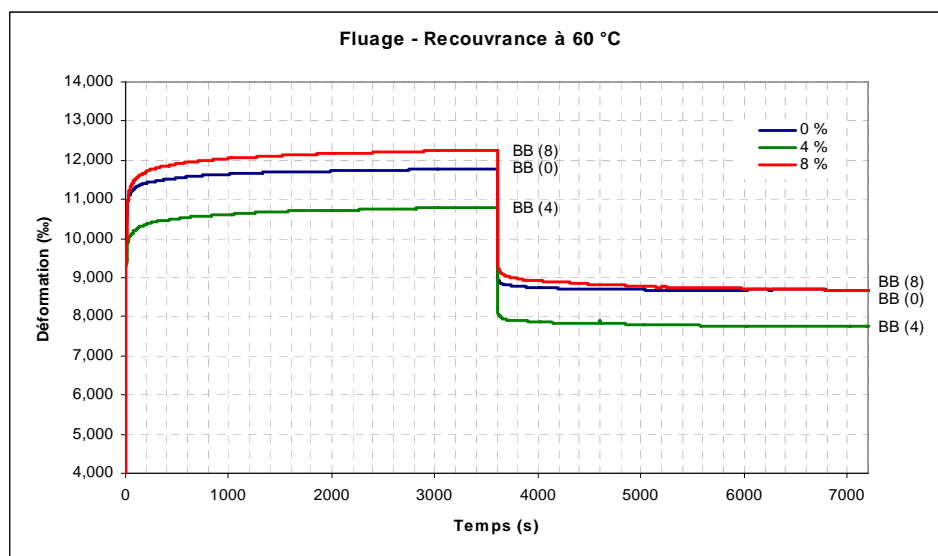


Fig.1.39. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 60 °C

Les résultats obtenus montrent que l'ajout du caoutchouc NR au bitume apporte une amélioration de la résistance au fluage des mélanges bitumineux modifiés. Ces courbes montrent l'existence de déformations permanentes (irréversibles) pour toutes les expériences.

Les bétons bitumineux à base de bitume modifié à 4% [BB (4)] donnent un meilleur comportement au fluage recouvrance.

Taux de déformation de fluage

On remarque aussi que les enrobés bitumineux à base de bitume modifié présentent un rapport faible par rapport à l'enrobé ordinaire BB (0), donc une vitesse de déformation inférieure à celle de l'enrobé BB (0),

Globalement l'ajout de poudre de caoutchouc de NR améliore la résistance aux déformations de fluage.

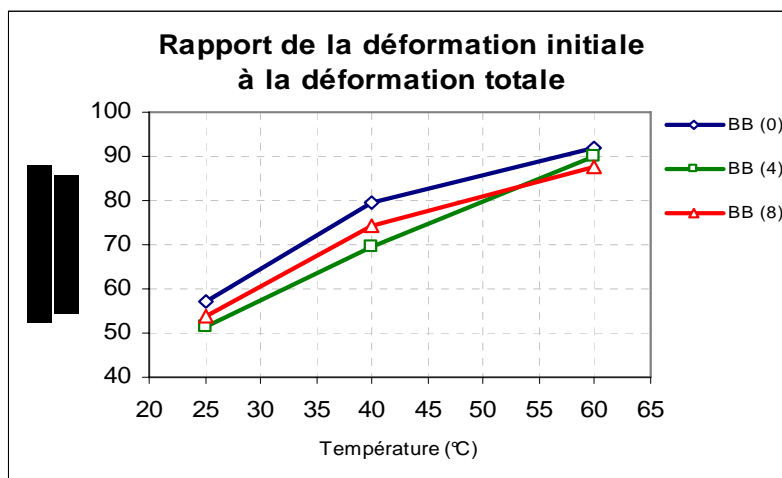


Fig.1.40. Variation du taux de déformation de fluage

CHAPITRE 2

PRESENTATIONS DES MATERIAUX

Ce chapitre résume les principaux résultats d'essais pour les matériaux bitumineux soit les granulats, le bitume et la poudrette de caoutchouc, et déterminer l'influence de la teneur en poudrette de caoutchouc sur le comportement mécanique des enrobés.

I. LES GRANULATS

Les granulats utilisés pour la mise en œuvre des éprouvettes d'enrobés bitumineux peuvent faire l'objet d'une étude détaillée, dans notre mémoire on a présenté quelques essais.

I-1. Origine des granulats

Les granulats (0/3, 3/8, 8/15) utilisés dans cette recherche proviennent de carrière de El'Hachimia de la wilaya de Boumerdes.

I-2. Analyse chimique

Les minéraux jouent un rôle important, sur la qualité de l'adhésivité avec les liants hydrocarbures Les analyses ont été effectuées au LCTP (Hussein Dey), les résultats sont présentés dans le tableau 2.1

Tableau.2.1. Analyse chimique sommaire des différents types de granulats.

Échantillon	Sable 0/3 %	Graviers 3/8 %	Graviers 8/15 %
Insolubles (SiO ₂ +Silicates)	4,8	6,3	5,2
Oxyde de fer et d'Al Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	1,83	1,75	2,6
Gypse (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	Traces	Traces	Traces
Chlorures (NaCl)	0,29	0,47	0,41
Carbonates (CaCO ₃)	94,78	92,04	91,65
Anhydride Carbonique CO ₂	41,70	40,50	40,32
Perte au feu PF	42,66	41,68	41,98
Eau de constitution	0,96	1,18	1,66
Bilan chimique pondéral	102,66	101,74	101,52

L'analyse chimique montre que :

- Les graviers 3/8 et 8/15 proviennent de la même roche mère.
- Le sable et les graviers présentent une forte teneur en carbonates (CaCO_3), ils s'agissent des calcaires.

Notre granulat de nature calcaire donc présente une excellente adhésivité et une bonne tenue à l'eau avec les liants hydrocarbonés.

I-3 Analyse granulométrique

La figure 2.1 représente les courbes granulométriques des trois (03) classes granulaires

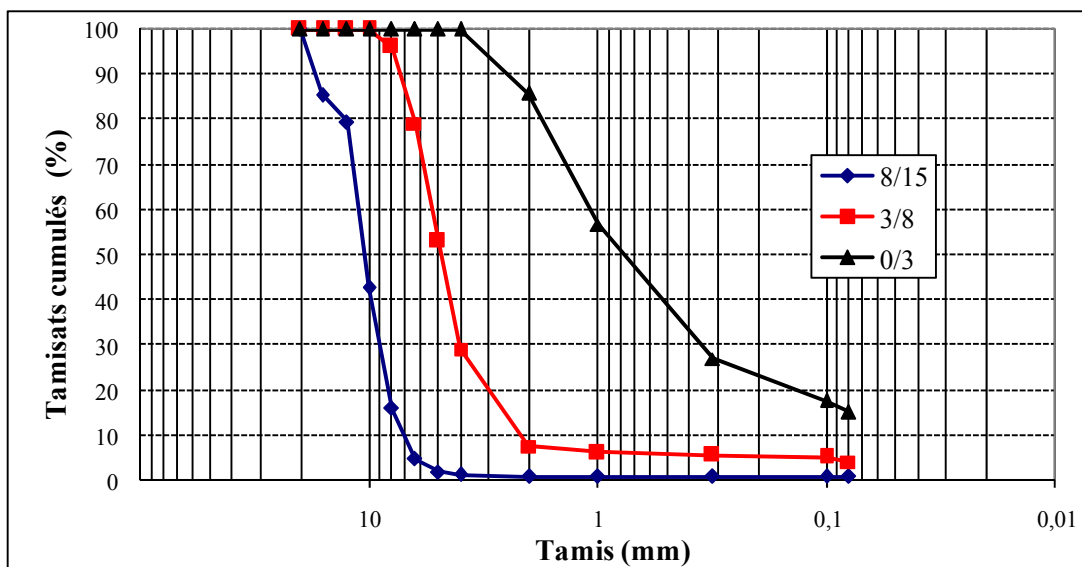


Fig.2.1 Courbe granulométrique des fractions 0/3, 3/8, 8/15

Nous remarquons que les trois fractions présentent des granularités continues.

L'analyse granulométrique montre que la fraction sableuse (0/3) contient un pourcentage faible en éléments fins (15,29 %), l'approvisionnement des trois fractions granulaires a été effectué en période pluviale, l'aire de stockage n'étant pas couverte, les fines ont été emportées par les eaux de pluies.

I-5 Coefficient d'aplatissement (A%) (P18-560)

Le tableau 2.2 montre les résultats des essais d'aplatissement.

Tableau.2.2 Coefficient d'aplatissement

Échantillon	provenance	Coefficient (A%)	Spécification
3/8	El Hachimia	13,88	< 20
8/15	El Hachimia	8,97	< 20

I-6 Les caractéristiques intrinsèques

Le tableau 2-3, montre les résultats des différents essais effectués sur les granulats.

Tableau.2.3 Caractéristiques intrinsèques des fractions granulaires.

Essais \ classe	0/3	3/8	8/15	Observation
Propreté (%)	/	4,97	0,91	< 2
Los Angeles (%)	/	22,18	21,61	20<LA<30 Moyen
Micro-Deval (%)				13<MDE<20 Moyen MDS<13 Très bon
• Humide	/	18,9	18,7	
• Sec		5,2	5,1	
Équivalent de sable (%)	65,01	Sable propre		
Densité spécifique	2,68	2,71	2,67	/

Les résultats du tableau 2.3 indiquent que les deux fractions 3/8 et 8/15 ont des caractéristiques mécaniques moyennes à bonnes.

La propreté de la fraction 3/8 est >2, mais cette impureté est de nature calcaire.

Le sable 0/3 est propre.

I-7 L'essai au bleu de méthylène VB

L'essai au bleu de méthylène (**P18-592**) a été effectué au LCTP. Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène.

Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

Le résultat est présenté dans le tableau 2.4.

Tableau.2.4 valeurs du bleu de méthylène

Échantillon	Résultats	Spécification
3/8	0,83 ml /g	< 1

Vb<1 Donc le sable de l'Hachimia est propre.

Conclusion

Les granulats ont donc de bonnes caractéristiques pour être utilisés dans la fabrication des enrobés bitumineux.

II. LE BITUME

La campagne expérimentale a été effectuée avec un bitume 35/50 de fabrication algérienne à partir de bruts importés. Il provient des raffineries de TOTAL.

II-1. Caractéristique du bitume

Les analyses ont été effectuées au niveau de laboratoire de routes et aérodromes de la faculté de génie civil / USTHB sur les différents échantillons de bitume pur. Le tableau 2.5 donne les caractéristiques physiques et mécaniques classiques du bitume :

Tableau.2.5 Caractéristiques du bitume.

Grade de bitume pur		35/50	Spécifications
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)		40	35 à 50
Température bille et anneau «TBA» (°C)		52,25	50 à 58
Densité relative (g/cm ³)		1.029	-
Ductilité à 25°C (mm)		> 1000	> 1000
IPLCPC		0,545	-
Après RTFOT	Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	24	-
	TBA (°C)	58,25	>48
	Pénétrabilité restante %	60	>50
	Δ TBA (°C)	6	<9

II-2 Susceptibilité thermique

La susceptibilité thermique est définie comme la pénétrabilité à différente température c-a-d la variation de la pénétrabilité en fonction de la température, les différentes températures sont choisies à partir du grade de bitume. Pour le bitume de grade 35/50 les températures sont : 20 ; 25 ; 30 ; 35 et 40°C

Les résultats des essais sont représentés dans la figure 2.2.

Nous observons que la température change l'état physique du bitume c'est-à-dire lorsque la température augmente le bitume devient mou donc la pénétrabilité augmente.

Nous remarquons aussi, que la pénétrabilité diminue après l'essai de RTFOT.

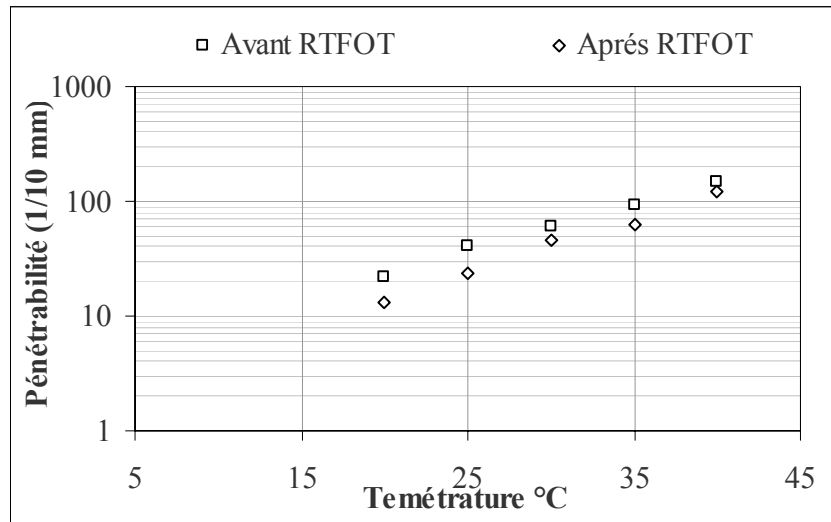


Fig.2.2 Variation de la pénétrabilité en fonction de la température.

Les courbes de la figure 2.2 montre que la variation de la pénétrabilité en fonction de la température est linéaire en coordonnées semi logarithmiques. La pente de la droite représente la susceptibilité thermique du bitume.

$$\text{Log (Pen)} = AT + C$$

Où :

A est la susceptibilité thermique,

C une constante.

La susceptibilité thermique des bitumes routiers est représentée par un indice appelé indice de pénétrabilité (IP) exprimé par les relations suivantes :

$$50A = \frac{20 - IP}{10 + IP}$$

Où :

$$IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A}$$

La valeur de l'indice de pénétration varie de -3 pour les bitumes très susceptibles à la température, jusqu'à environ +7 pour les bitumes moins susceptibles. Les valeurs de A et de IP peuvent être calculées à partir des mesures de pénétration à deux températures T_1 et T_2 , à l'aide de la relation suivante :

$$A = \frac{\log(\text{Pen}(T_1)) - \log(\text{Pen}(T_2))}{T_1 - T_2} \quad A \text{ (avant RTFOT)} = 0,0366 \quad A \text{ (après RTFOT)} = 0,0546$$

Pour bitume : - Avant RTFOT $\text{Log (Pen)} = 0,0366T + 5$
 - Après RTFOT $\text{Log (Pen)} = 0,0546T + 3$

Le bitume que nous avons utilisé est un bitume routier car les valeurs de « $A = 0,0366$ et $0,0546$ » sont comprises entre 0,015 et 0,06 (intervalle des bitumes routiers).

III.LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC

La poudre de caoutchouc utilisée pour la fabrication du liant bitume caoutchouc a été fournie par la société Algérienne SAEL « Société d'Application d'Élastomères » avec une granulométrie de 0-1mm. Cette poudrette est issue de la fabrication des joints des buses hydrauliques [Mag 2009].



Fig.2.3. La poudrette de caoutchouc NR sous une loupe[Mag 2009].

La nature du caoutchouc qui compose notre déchet est un caoutchouc naturel [NR] (Naturel Rubber). Les analyses que nous avons effectuées sur la poudrette de caoutchouc sont :

- La densité,
- La granulométrie,
- L'analyse FTIR.

III-1 Caractéristique de la poudrette

Les résultats des essais effectués sur la poudrette de caoutchouc sont montrés dans le tableau 2.6. La densité de la poudrette est mesurée par rapport à l'éthanol dont la densité est de 0,79 g/ml.

Tableau2.6 Masse volumique de la poudrette de caoutchouc [Mag 2009]..

Poudrette de caoutchouc [NR]	Masse volumique absolue
0 – 1 mm	1,21 g/ml

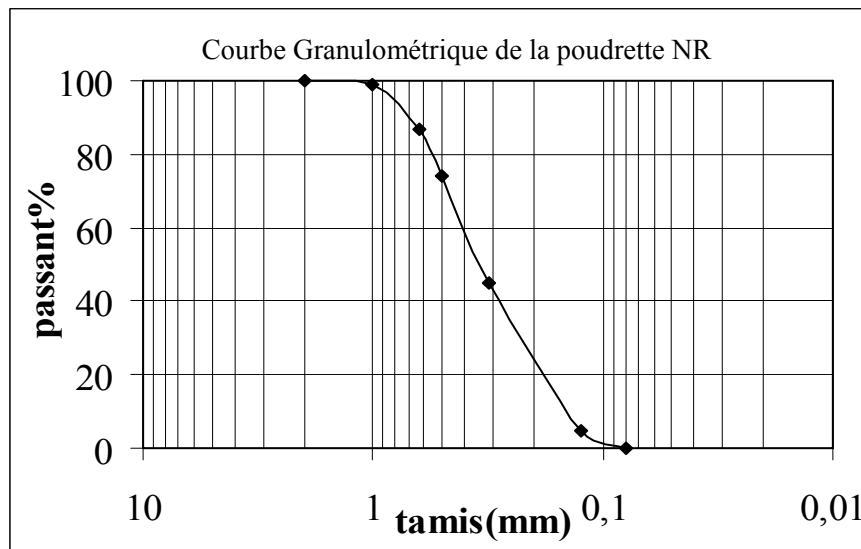


Fig.2.4 Courbe granulométrique de la poudrette de caoutchouc [Mag 2009].

L'analyse granulométrique montre que la poudrette de caoutchouc [NR] est constituée de grains inférieurs à 1.2 mm.

La poudrette de caoutchouc présente une granulométrie continue.

III-2 Caractérisation du NR par FTIR

L'analyse spectroscopique d'absorption a été réalisée sur la poudrette de caoutchouc avec le même matériel et le même mode opératoire utilisé pour le bitume pur.

Il est à noter que :

- L'aspect visuel de notre déchet est celui d'une poudre fine de couleur noire,
- L'odeur est celle d'une matière caoutchouteuse,

L'analyse du spectre montre :

- La présence de deux bandes larges à savoir :
 - La bande de 3458 cm^{-1} due à la présence des groupements OH non liés, à priori engendrée par l'absorption de l'humidité. Un séchage de l'échantillon s'avère nécessaire pour s'assurer de cette éventualité.
 - Une forte présence des groupements C-H sur les bandes de 1420 cm^{-1} , 2950-2800 cm^{-1} , 872 cm^{-1} et 709 cm^{-1} ces groupements sont ceux d'une chaîne macromoléculaire (polymère),
- La bande 2510 cm^{-1} élongations de la liaison S-H, donc la matière a été vulcanisée avec du soufre,

La matière étudiée est un polymère de type NR (Naturel Rubber) vulcanisé avec du soufre.

Le spectre obtenu pour la poudre de caoutchouc est représenté dans la figure 2.5.

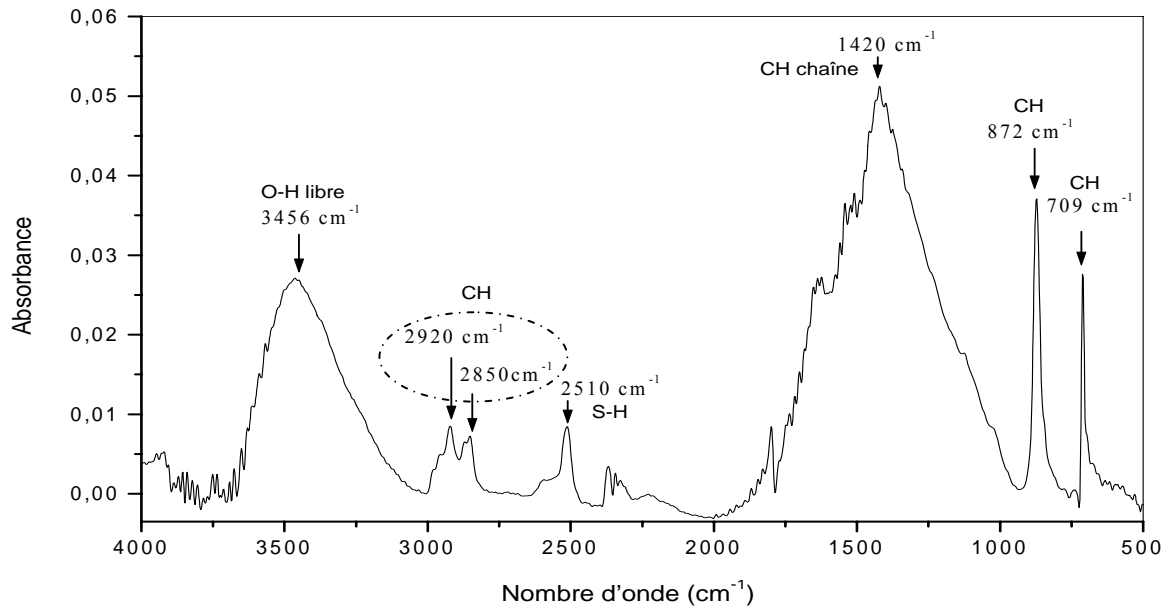


Fig.2.5. Résultat du Spectre FTIR de la poudre de caoutchouc [NR] [Mag 2009].

IV. BITUMES MODIFIES

Dans ce chapitre nous avons procédé à la modification du bitume par la poudre de caoutchouc naturel (NR) et l'identification du bitume-caoutchouc tel que :

- Pénétrabilité à l'aiguille,
- Ductilité,
- Le point de ramollissement,

IV-1 Fabrication du bitume caoutchouc

La fabrication du bitume caoutchouc est une opération nécessitant un contrôle strict de tous les facteurs influant le comportement du produit final. De plus, il est important de contrôler la constance des facteurs figés afin de limiter au mieux leur effet sur la variabilité du produit final.

Dans notre cas la modification a été réalisée au laboratoire de routes de la faculté de génie civil de l'USTHB (Algérie). Nous avons adopté les paramètres de fabrication suivants :

- Température du mélange comprise entre $195 \pm 5^\circ\text{C}$
- Vitesse de malaxage : 600 tr/min.
- Hélice de 5cm de diamètre fixée à environ 5mm du fond du récipient.
- Récipient en fer blanc de 11cm de diamètre contenant environ 500g de bitume.
- Durée du malaxage : 2h.
- Le bitume a été modifié aux teneurs suivantes : 2, 4, 5, 6 et 8 %.

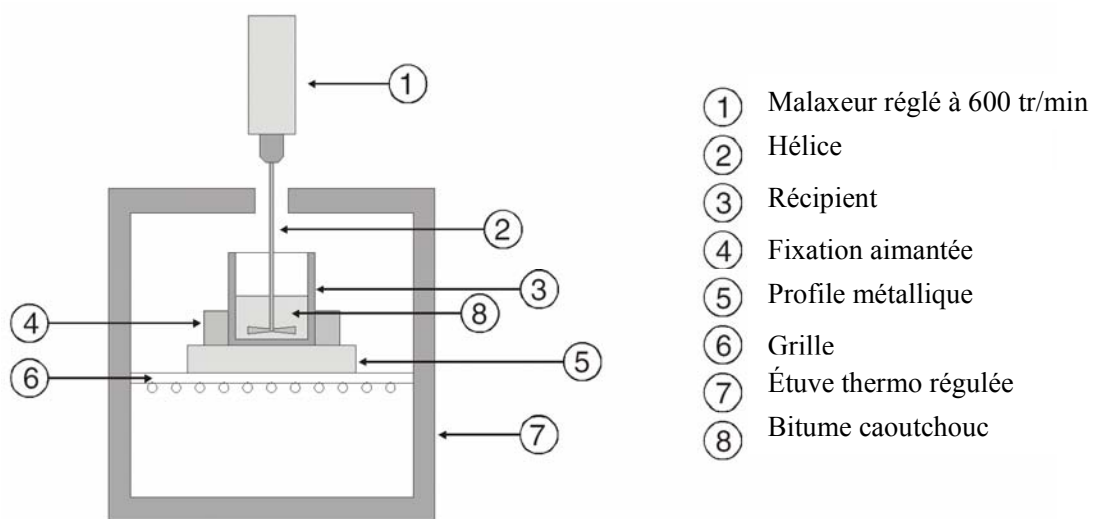


Fig.2.6 Schéma de l'appareillage servant à fabriquer le bitume caoutchouc [Mah 2005]

IV-2 Désignation des liants modifiés

Pour chaque pourcentage nous avons prélevé des échantillons pour faire la pénétrabilité à 25°C , le point de ramollissement et la ductilité à 25°C . Les références des liants modifiés pour tous les pourcentages sont représentées dans le tableau 2.7:

Tableau 2.7 Désignation des liants modifiés

	Bitume 35/50 « B »					
% NR	0	2	4	5	6	8
Référence	B (0)	B (2)	B (4)	B (5)	B (6)	B (8)

IV-3 Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité

La figure 2.7 représente l'influence ou bien l'évolution de la pénétrabilité en fonction de la teneur en poudrette :

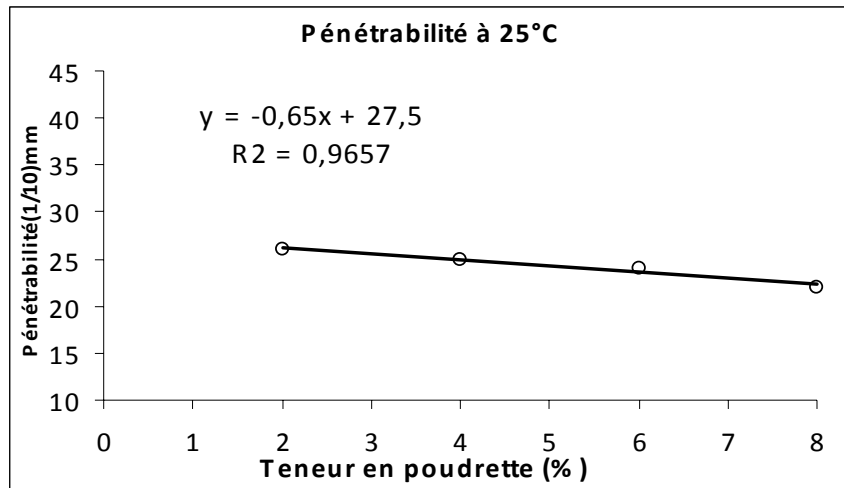


Fig 2.7 Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité 25°C

L'effet de la modification par le NR est clair, la pénétrabilité diminue rapidement à 2%.

La figure 2.7 montre que la pénétrabilité diminue avec la teneur en NR.

IV-4 La susceptibilité thermique des bitumes modifiés au NR

Nous avons utilisé la méthode LCPC dite « à 5 températures ». Les valeurs de la pénétrabilité aux différentes températures et différent teneur sont données dans le tableau 2.8

Tableau 2.8 Les valeurs de la susceptibilité thermique

	B (0)	B (2)	B (4)	B (5)	B (6)	B (8)
20°C	22	18	16	15	15	14
25°C	40	26	25	25	24	22
30°C	61	38	35	35	35	32
35°C	94	64	57	53	47	42
40°C	150	92	92	85	85	75

La figure 2.8 montre cette évaluation :

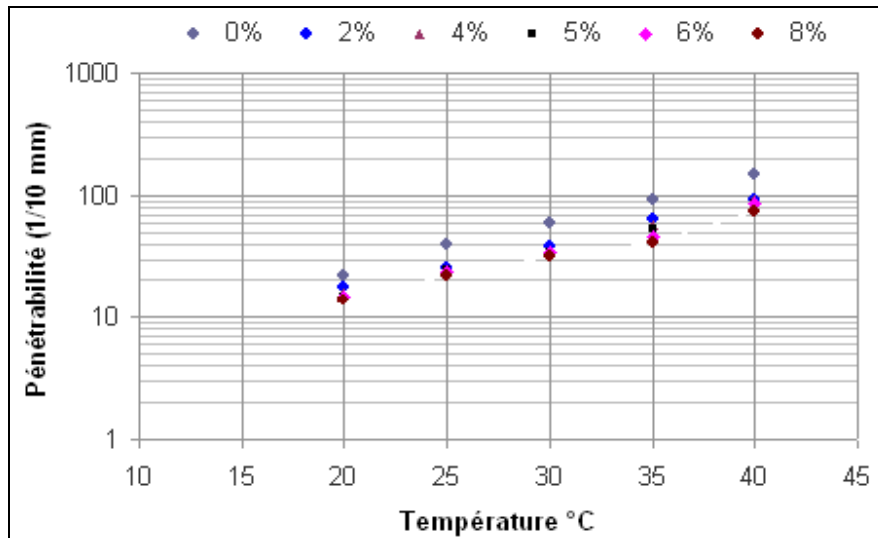


Fig 2.8 Influence de la teneur en NR sur la susceptibilité thermique

Le calcul de l'indice de pénétration IP est effectué comme pour le bitume pur (tableau 2.9).

Tableau 2.9 Indice de pénétrabilité

% Poudrette	A	IP (LCPC)
0	0,00366	0,590
2	0,00329	1,328
4	0,00292	2,188
5	0,00292	2,188
6	0,00327	1,369
8	0,00325	1,418

Les résultats du tableau 2.9 montrent que :

- pour toutes les teneurs, une variation linéaire entre la pénétrabilité et la température;
- les valeurs de A sont comprises entre 0,015 et 0,06 (intervalle des bitumes routiers) ;
- la susceptibilité diminue avec la teneur en polymère.

IV-5 Variation de la pénétrabilité (25°C) du bitume modifié par rapport au bitume pur

Les résultats de la variation de la pénétrabilité des bitumes modifiés par rapport au bitume pur sont représentés dans la figure 2.10.

Le rapport de variation de la pénétrabilité des bitumes, pour une teneur en NR donné est calculé par la formule suivante :

$$\text{Rapport de variation Pen (NR\%)} = \frac{\text{pén(Pur)} - \text{pén(NR\%,t)}}{\text{pén(Pur)}} \times 100$$

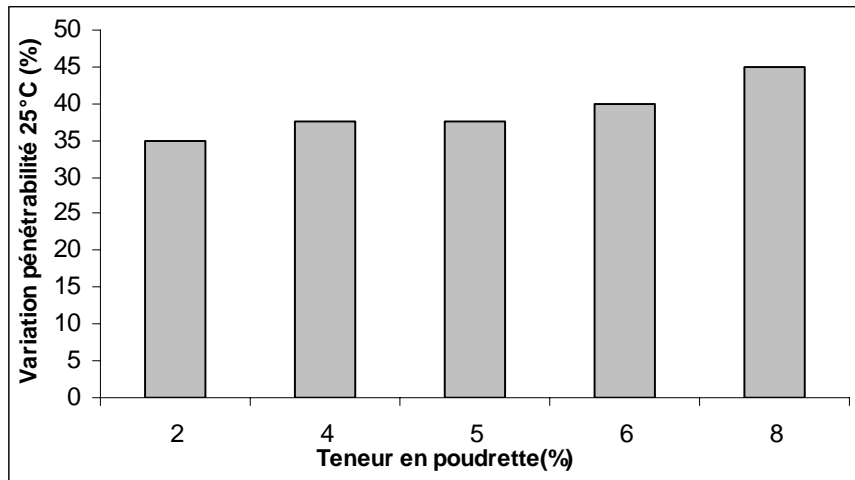


Fig 2.10 Variation de la pénétrabilité du bitume modifié par rapport au bitume pur.

Plus la teneur en poudrette augmente, plus le rapport de variation de la pénétrabilité est augmenté.

IV-6 Influence de la teneur en NR sur la température bille et anneau (TBA)

La température bille et anneau a été mesurée. La figure 2.11 représente l'influence de la teneur en NR sur le TBA et montre que la température de ramollissement augmente avec la teneur en poudrette.

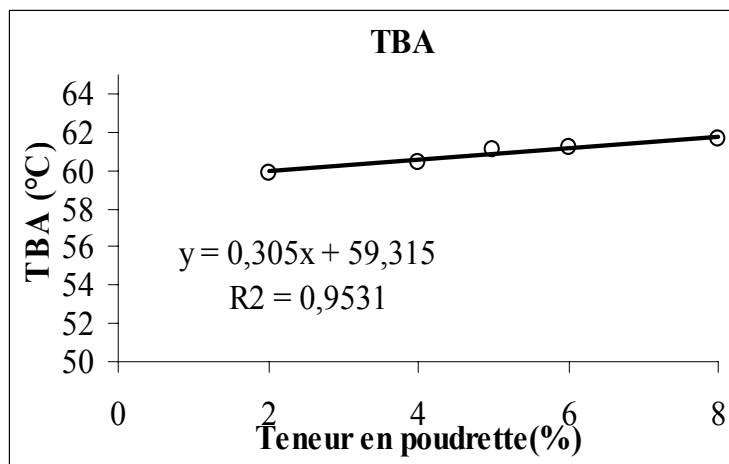


Fig 2.11 Influence de la teneur en NR sur la température bille et anneau.

IV-7 Variation de TBA du bitume modifié par rapport au bitume pur

Les résultats de la variation de la température bille et anneau des bitumes modifiés par rapport au bitume pur sont représentés dans la figure 2.12.

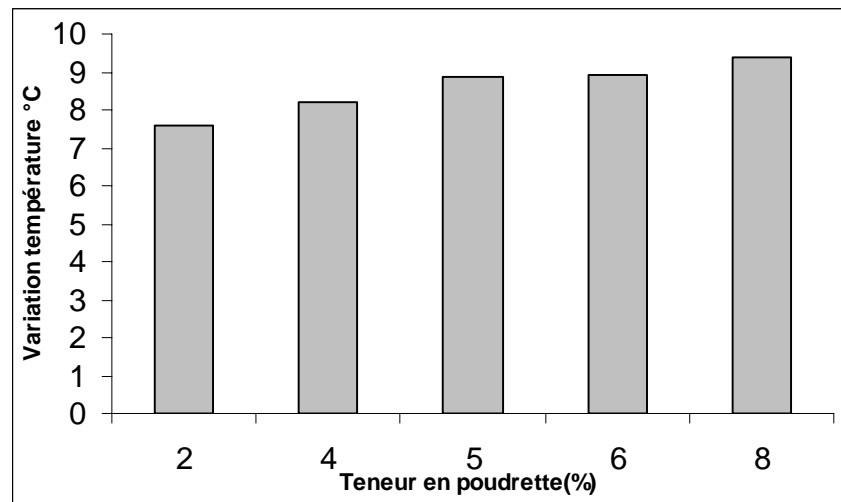


Fig 2.12 Variation de TBA du bitume modifié par rapport au bitume pur.

IV-8 Influence de la teneur en NR sur la ductilité

La figure 2.13 montre la variation de la ductilité en fonction de la teneur en NR. Elle montre que la ductilité augmente d'une manière linéaire à 25°C avec la teneur en NBR ce qui se traduit par une augmentation de la résistance à la traction.

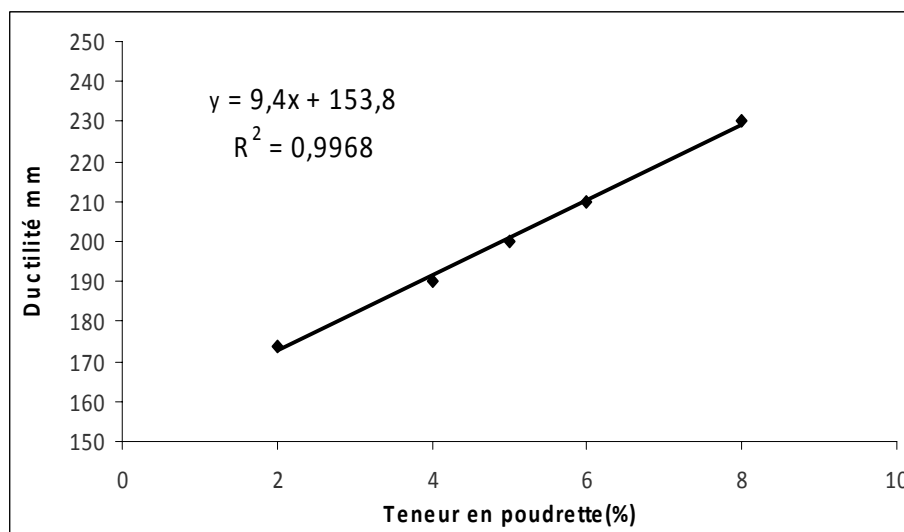


Fig 2.13 Influence de la teneur en NR sur la ductilité.

IV-9 Conclusion

D'après les résultats précédents nous pouvons conclure que :

La modification du bitume par la poudre de caoutchouc naturel NR amélioré les propriétés du bitume tels que la pénétrabilité, la susceptibilité thermique, le point de ramollissement et la ductilité.

V. ENROBE BITUMINEUX

V-1 Étude de la formulation

La fabrication de l'enrobé bitumineux doit répondre à certaines règles de composition, l'étude de formulation consiste à :

- Choisir un mélange granulaire composé des trois fractions granulométrique (0/3,3/8,8/15) qui doivent s'insérer parfaitement dans un fuseau de référence (fuseau SERTA /LCPC BB 0/14),
- Déterminer la teneur optimale en bitume à l'égard des spécifications de compacité et de résistance mécanique (Marshall et Duriez) en vigueur en Algérie.

V-1-1 Courbe granulométrique du mélange

La figure 2.14 représente la courbe granulométrique du mélange et le fuseau de référence.

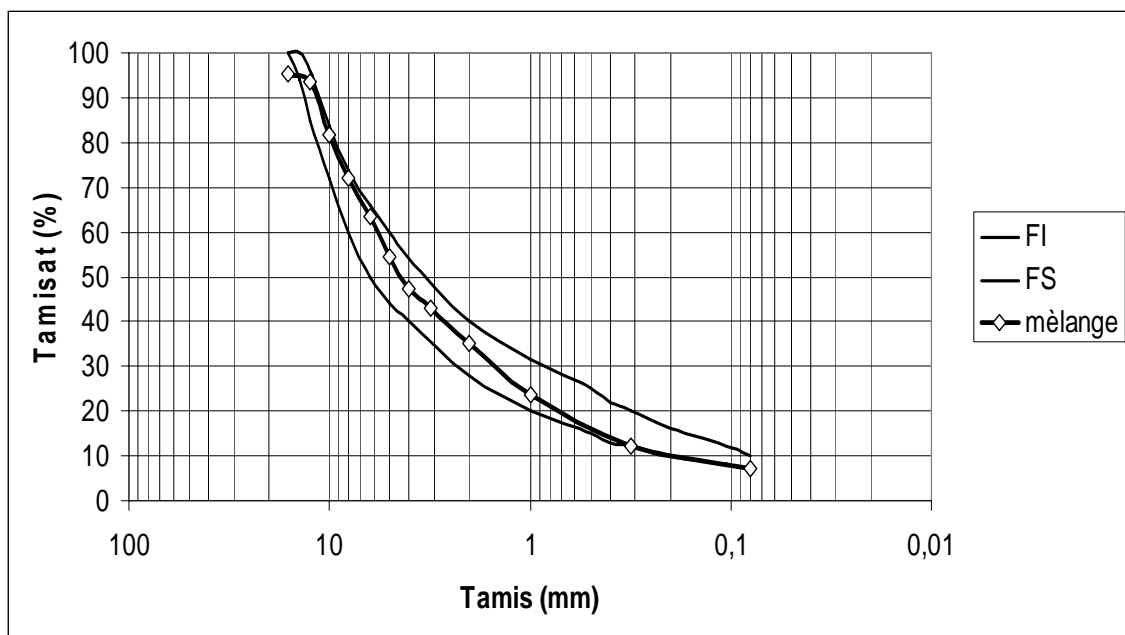


Fig 2.14 Courbe granulométrique du mélange et fuseau de référence BB 0/14 [Gui 200].

La courbe granulométrique s'insère parfaitement dans le fuseau de référence préconisé en Algérie pour les bétons bitumineux semi-grenus 0/14.

V-1-2 Teneur en liant optimale

La teneur en liant pour un béton bitumineux semi-grenu 0/14 est déterminée en pourcentage du poids des agrégats par la méthode basée sur le module de richesse et la surface spécifique, donnée par la formule :

$$P = \alpha \cdot k \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

P : teneur en liant %

α : Coefficient destiné à tenir compte de la masse volumique réelle des granulats « MVRg ». Si celle-ci diffère de 2,65 t/m³, on utilise la formule suivante :

$$\alpha = \frac{2.65}{\sum P_i \cdot \delta_i}$$

P_i : Pourcentage de la fraction i.

δ_i : Poids spécifique de la fraction i.

K : module de richesse (varie pour un enrobé bitumineux 0/14 de 3,45 à 3,9).

Σ : Surface spécifique des granulats (m² / kg)

Et :

$$\Sigma = (0.25 G + 2.30 S + 12 s + 135 f)/100$$

Avec :

G : Pourcentage de refus supérieur ou égal à 6.3 mm.

S : Pourcentage de refus compris entre 0.315 mm et 6.3 mm.

s : Pourcentage de refus compris entre 0.08 mm et 0.315 mm.

f : Pourcentage de passant à 0.08 mm.

Après plusieurs essais sur les pourcentages des granulats, nous avons adopté le mélange donné dans le tableau 2.10 :

Tableau 2.10 Composition de la formule utilisée.

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
% du mélange	38	30	32
Teneur en liant (%)	5,57		

V-2 Les essais sur l'enrobé bitumineux

V-2-1 Marshall 30 min

Les résultats de formulation de l'essai Marshall sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 2.11 Résultats de l'essai de Marshall du mélange étudié.

	Résultats	Spécification
Stabilité Marshall (Kg)	1119,7	>800
Fluage Marshall (1/10 mm)	24,65	20-40
Densité apparente (g/cm ³)	2,68	/
Compacité (%)	94,34	92-97
% vides résiduels	5,66	/
Quotient Marshall	454,2	/

V-2-1-1 Désignation des enrobés bitumineux

Les références des liants modifiés pour tout le pourcentage sont représentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.12 Désignation des liants modifiés

	Béton bitumineux « BB »					
% NR	0	2	4	5	6	8
Référence	BB (0)	BB (2)	BB (4)	BB (5)	BB (6)	BB (8)

V-2-1-2 Résultats des essais Marshall 30 min

Les résultats sont donnés par le tableau suivant :

Tableau 2.13 Caractéristique mécanique des enrobés en fonction de la teneur en NR.

Béton bitumineux	Stabilité (Kn)	Fluage (mm)	Quotient (Kg /mm)	Compacité (%)
BB (0)	11,197	2,465	4,542	94,43
BB (2)	11,617	2,9	4,006	95,53
BB (4)	11,849	2,469	4,799	95,67
BB (5)	11,446	2,765	4,140	96,32
BB (6)	11,375	3,116	3,651	96,3
BB (8)	12,351	2,36	5,233	96,42

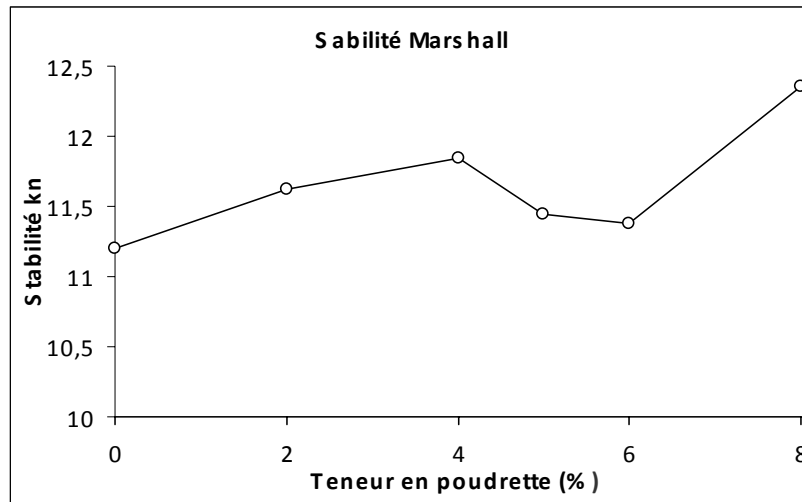


Fig 2.15 Stabilité Marshall 30 min en fonction de la teneur en NR.

La courbe de la stabilité Marshall augmente légèrement à 2 et 4 % de NR, ensuite elle diminue pour 5 et 6 %, puis elle augmente de nouveau pour 8 %, donc les teneurs 4 et 8% de NR donnent les stabilités maximales.

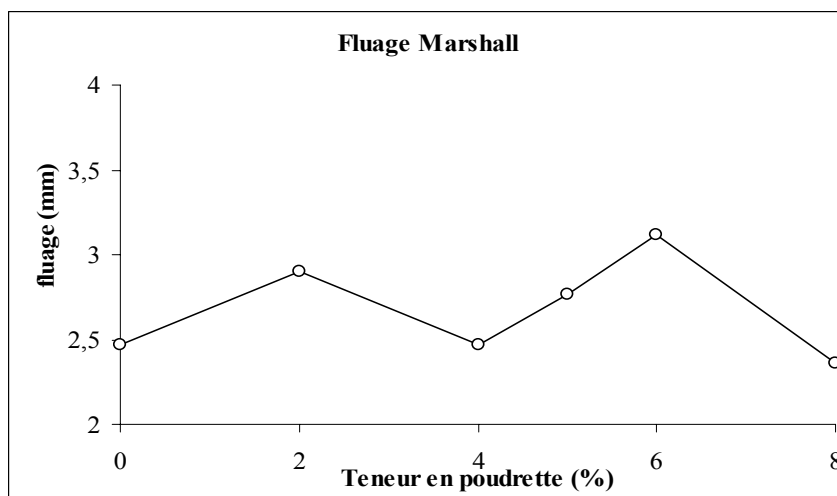


Fig 2.16 Fluage Marshall 30 min en fonction de la teneur en NR

La courbe de fluage Marshall augmente à 2 %, puis elle diminue à 4 %, ensuite elle augmente de nouveau pour 5 et 6 % de NR, puis elle diminue rapidement pour 8 %.

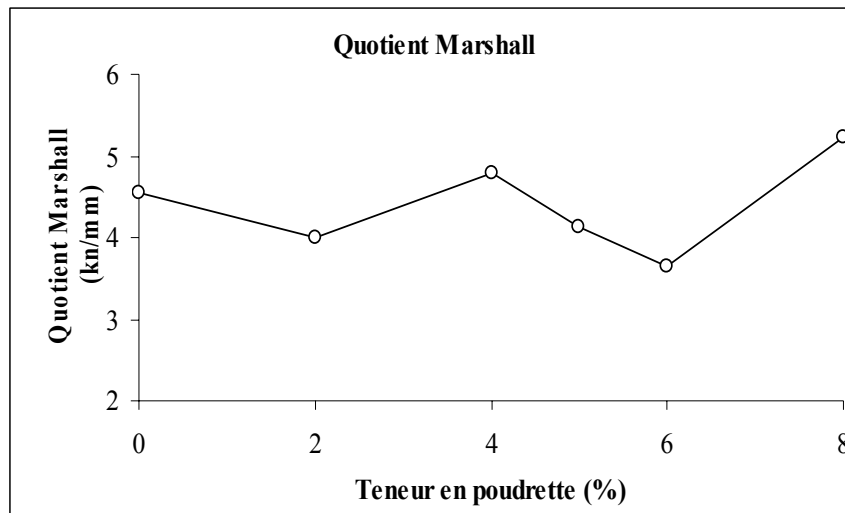


Fig 2.17 Quotient Marshall 30 min en fonction de la teneur en NR

Le quotient Marshall est un indicateur pour la résistance aux déformations, permanentes, contraintes de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux.

Les plus grandes valeurs du quotient indiquent que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes.

Notre courbe du quotient Marshall diminue à 2 %, puis elle augmente à 4 %, ensuite elle diminue de nouveau pour 5 jusqu'à 6 %, puis elle augmente rapidement pour 8 %.

Donc les enrobés bitumineux modifiés à 4 et 8 % sont les plus résistants aux déformations permanentes.

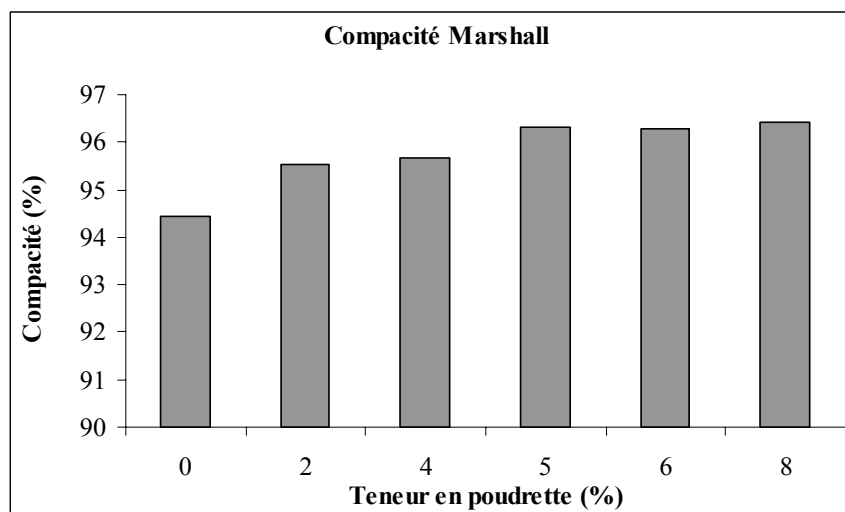


Fig 18 Compacité Marshall 30 min en fonction de la teneur en NR.

La courbe de la compacité Marshall augmente pour les différents teneurs.

V-2-2 Marshall 24h (tenue à l'eau)

L'essai de Marshall 24h ou bien tenue à l'eau est le même que celui de l'essai Marshall normale (30 min) mais les éprouvettes sont conservé à l'eau à 60°C pendant 24h et après on va écrasé et noté les valeurs de la stabilité et le fluage des différents teneur en NR.

L'essai consiste à déterminer la teneur à l'eau de l'enrobé bitumineux modifiés dans les températures extrêmes.

Le tableau ci-dessous résumé les valeurs de l'essai de Marshall 24h

Tableau 2.14 Caractéristique Marshall 24h en fonction de la teneur en NR.

Béton bitumineux	Stabilité (Kn)	Fluage (mm)
BB (0)	10,882	3,553
BB (2)	11,817	4,35
BB (4)	11,159	4,74
BB (5)	11,009	4,51
BB (6)	10,929	2,37
BB (8)	13,561	3,58

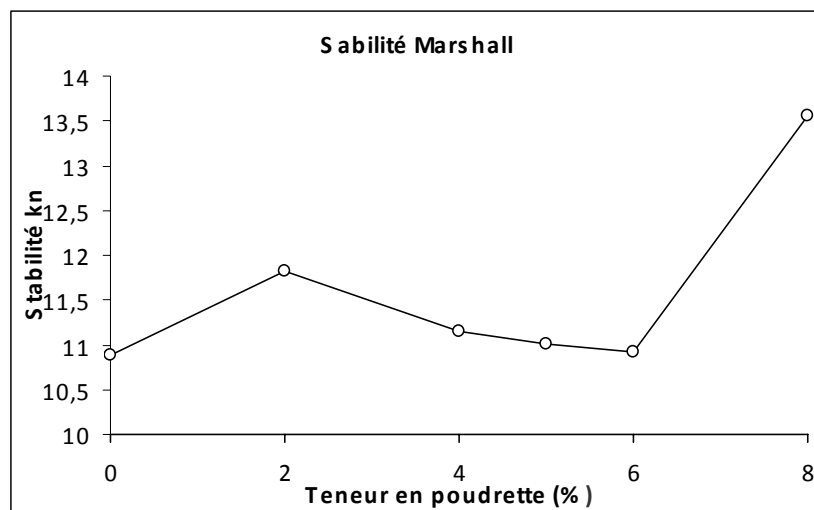


Fig 2.19 Stabilité Marshall à 24 h en fonction de la teneur en NR.

La courbe de la stabilité Marshall 24h augmente à 2 %, ensuite elle diminue jusqu'à 6 %, puis elle augmente rapidement de nouveau à 8 %, donc les teneurs 2 et 8% de NR donnent les stabilités maximales.

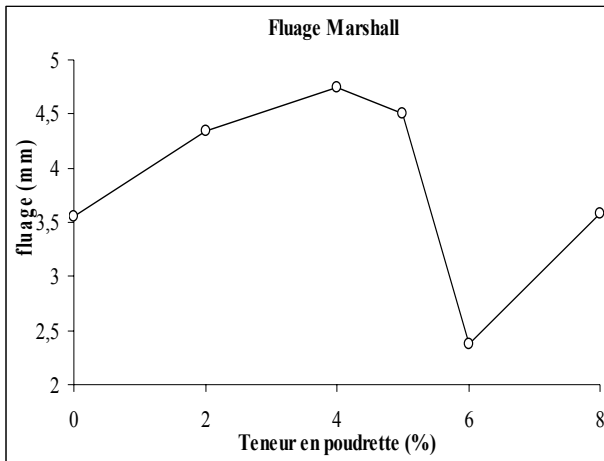


Fig 2.20 Fluage Marshall à 24 h en fonction de la teneur en NR.

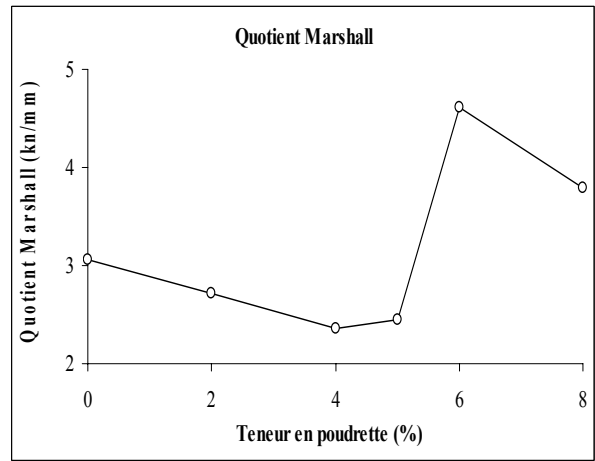


Fig 2.21 Quotient Marshall à 24 h en fonction de la teneur en NR.

La courbe de fluage Marshall 24h augmente jusqu'à 2 %, puis elle diminue rapidement à 6 %, ensuite elle augmente de nouveau pour 8 % de NR.

La courbe du quotient Marshall 24h diminue jusqu'à 5 %, puis elle augmente brusquement à 6 %, ensuite elle diminue de nouveau pour 8 % de NR.

En remarque un comportement meilleur aux températures extrêmes en particulière pour une teneur de 6 % en NR.

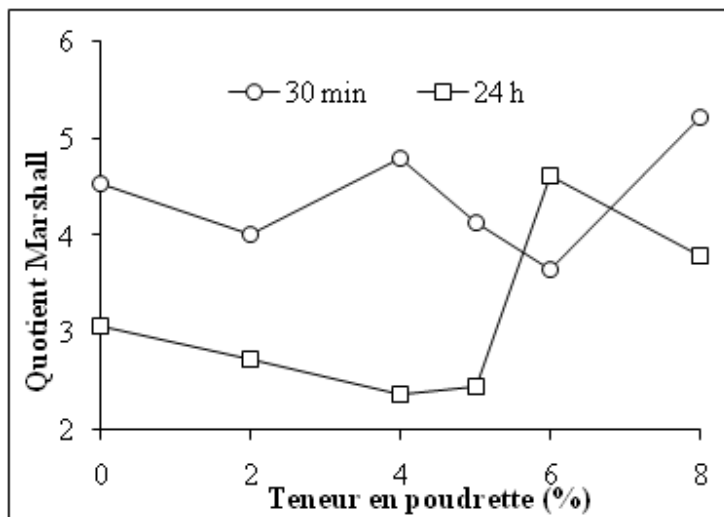


Fig 2.22 Quotient Marshall à 30 min et 24 h en fonction de la teneur en NR.

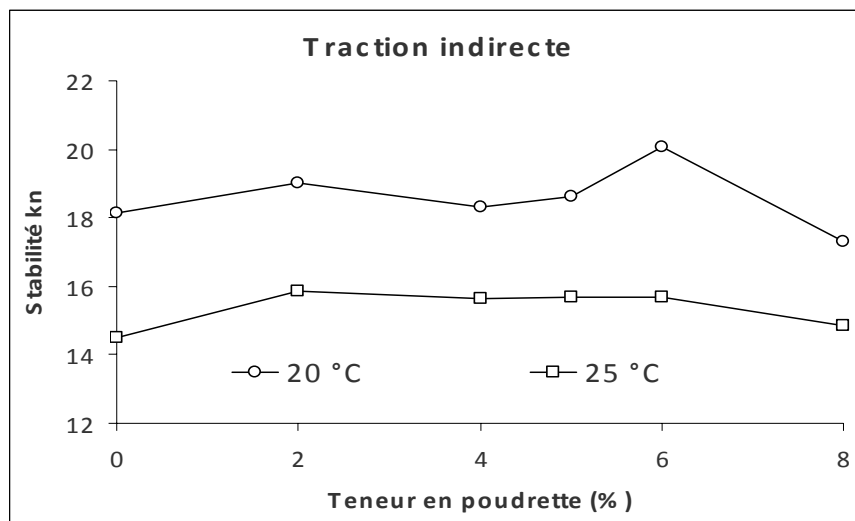
V-2-2 Traction indirecte (NF EN12697-23)

Le tableau (2-15) si dessous représente l'essai de traction indirecte à différente température (20°C et 25°C) en fonction de la teneur en poudrette de (%) NR.

Tableau 2.15 Caractéristique de traction directe en fonction de la teneur en NR.

Béton bitumineux	TI 20°C (Kn)	TI 25°C (Kn)
BB (0)	18,162	14,502
BB (2)	19,034	15,852
BB (4)	18,328	15,659
BB (5)	18,62	15,664
BB (6)	20,05	15,676
BB (8)	17,294	14,85

Les résultats du tableau 2.15 sont illustrés dans la figure 2.22

**Fig 2.23** Traction indirecte en fonction de la teneur en NR.

Pour 20°C :

La courbe de traction indirecte augmente à 2 %, puis elle diminue à 4 %, ensuite elle augmente à 6 %, puis elle diminue de nouveau à 8 %.

Pour 25°C :

La courbe augmente à 2 %, puis elle reste presque constante pour les teneurs 4 % 5 % 6 %, ensuite elle diminue de nouveau à 8 %.

Le tableau (2.16) représente la résistance à la traction indirecte à différentes températures (20°C et 25°C) en fonction de la teneur en poudre de (%) NR.

Tableau 2.16 Caractéristique des déformations de traction indirecte fonction de la teneur en NR.

Béton bitumineux	TI 20°C (mm)	TI 25°C (mm)
BB (0)	1,424	1,472
BB (2)	1,444	1,392
BB (4)	1,429	1,34
BB (5)	1,522	1,385
BB (6)	1,534	1,458
BB (8)	1,369	1,506

Les résultats du tableau 2.16 sont illustrés dans la figure 2.23

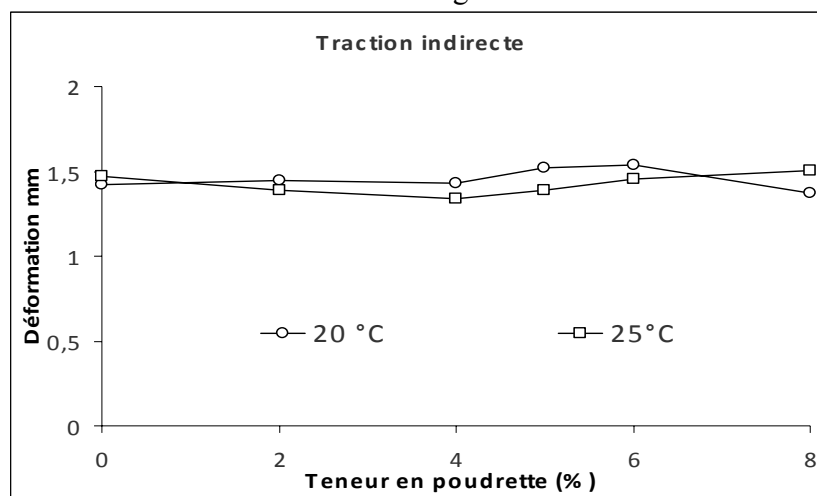


Fig 2.24 Déformation de traction indirecte en fonction de la teneur en NR.

- ❖ 20°C : Les valeurs des déformations restent presque constantes pour les teneurs 0,2 et 4 %, puis elle augmente pour 5 et 6 %, ensuite elle diminue à 8 %.
- ❖ 25°C : La courbe de déformation diminue légèrement jusqu'à 4 %, puis elle augmente légèrement jusqu'à 8 %.

La résistance à la traction indirecte

La figure 2.24 représente la résistance à la traction indirecte en fonction de la teneur en poudre ITS, elle est calculée selon la formule suivante :

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH}$$

Avec :

P : est la charge maximale;

D : est le diamètre de l'éprouvette;

H : est la hauteur de l'éprouvette.

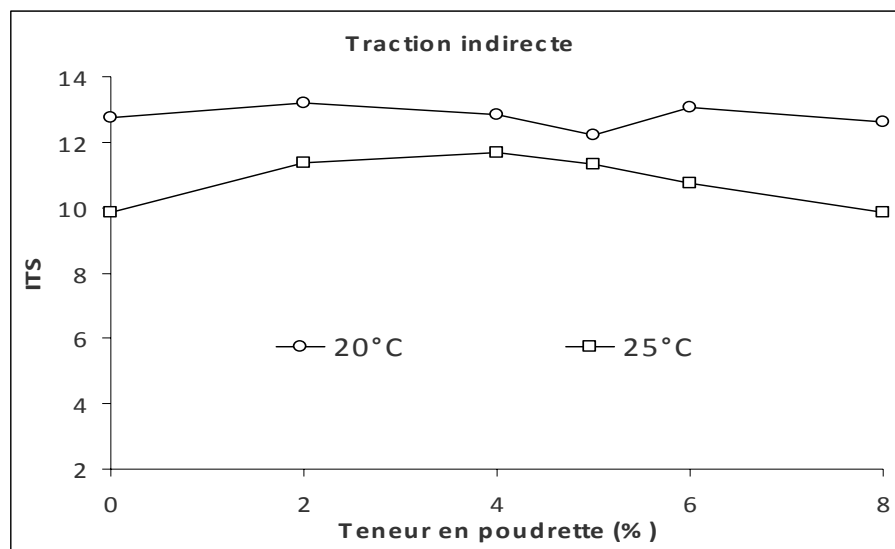


Fig 2.25 Déformation de traction indirecte en fonction de la teneur en NR.

En remarque que le béton bitumineux modifié à 2 % donne la meilleure résistance à la traction à la température 20°C. Et 4 % pour la température 25 °C

Conclusion

D' après les résultats précédents nous observons que :

- Les bétons bitumineux modifiés à 4 % et 8 % donnent de meilleures performances vis-à-vis de l'essai Marshall (à 30 min) par rapport aux autres bétons bitumineux.
- La modification du bitume par le NR améliore les capacités de l'enrobé bitumineux.
- Les bétons modifiés à 6 et 8 % donnent de meilleures performances vis-à-vis l'essai Marshall 24h (tenu à l'eau) par rapport aux autres bétons bitumineux.
- Le béton bitumineux modifié à 2 % donne la meilleure résistance à la traction à la température 20°C. et 4% pour la température 25°C

Les résultats obtenus montrent que les bétons bitumineux modifiés à 2, % 4% et 8% donnent des meilleures performances.

Pour la suite du travail, on va étudier les fluages statiques des enrobés bitumineux modifiés à 2%,4% et 8 %.

CHAPITRE 3

ETUDE DE FLUAGE STATIQUE

3-1 Généralité

Un usage établi désigne sous le nom de fluage la déformation permanente que certains matériaux subissent quand ils sont soumis à l'action prolongée d'une charge. Pour bien distinguer le «fluage» de la «plasticité», précisons que les déformations permanentes dues au fluage peuvent fort bien prendre naissance pour des charges inférieures à la limite élastique, mais que leur apparition exige une action durable de la charge. Autrement dit que leur ampleur dépend essentiellement du facteur temps. Par contre l'appellation de «déformation plastique» est réservée aux déformations permanentes qui apparaissent d'une manière pratiquement instantanée lorsque la charge dépasse la «limite élastique» du matériau. [Lev 1951]

3-2 But de l'essai

L'essai de fluage en compression simple uni-axial, peut être effectué sur tous les types de matériaux bitumineux, il a été corrélé avec des expériences d'orniérage conduites sur des structures routières réelles.

Il complète les essais de formulation classique et permet de conformer l'influence des paramètres de formulation et de fabrication sur la stabilité au fluage des enrobés bitumineux.

Ce comportement est très influencé par les conditions climatiques. [Yai 2004]

3-3 Appareil utilisé

Il existe plusieurs types d'appareils utilisés pour effectuer l'essai de fluage statique.

L'appareil utilisé dans notre travail est représenté à la figure 3.1. Cette appareil a été développé au laboratoire des routes et aérodromes de la faculté de génie civil de l'USTHB.

La figure 3.1 présenté un appareil qui est utilisé pour mesuré la consolidation des sols et est conçu par la société de fabrication des matériels d'essais CONTROLS. [Met 2001]

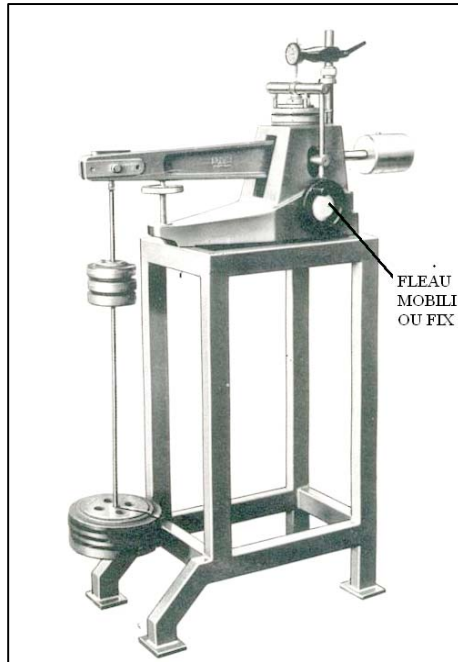


Fig .3.1 Appareil utilisé pour la consolidation des sols.

3-4 Condition particulière de l'essai

L'enregistrement de la déformation initiale après 15s de chargement avait été choisit arbitrairement. Le nombre de 15s est à peu près le même temps moyen d'immobilisation d'un bus sur un arrêt :

- Mélanges testés : béton bitumineux 0/14 (pur et modifié à 2%,4% et 8%).
- Températures de l'essai : +25°C, +40°C, +60°C.
- Contraintes des compressions appliquées : $\sigma_o = 0.14Mpa, 0.28Mpa, 0.42Mpa$
- Type d'éprouvettes utilisées : Éprouvettes Marshall compactées à 50 coups par face.
- Écart maximum d'épaisseur toléré suivant plusieurs génératrices : 0.1 mm
- Temps de conservation des éprouvettes : 24 h après la fabrication elle est mise à la température de l'essai pendant 4 heures.
- Intervalles des lectures : l'enregistrement des déformations s'effectue à l'aide d'un ordinateur muni à un système d'acquisition de données toutes les cinq secondes durant deux heures.
 - Temps de chargement : 1h.
 - Temps de déchargement : 1h.

Notre objectif consiste en :

- La détermination de l'influence de la température sur le comportement rhéologique de l'enrobé (25°C, 40°C et 60°C°).
- La détermination de l'influence de la teneur en poudrette en NR sur le comportement rhéologique de l'enrobé (2% ,4% et 8%).
- La détermination de l'influence du chargement sur le comportement de l'enrobé (10kg, 20kg et 30kg).

3-5 Valeurs déterminées

La contrainte appliquée, ainsi que les composantes de la déformation mesurées durant l'essai sont représentées par la figure 3.2 :

Où :

- σ_0 : Contrainte de compression appliquée sur l'éprouvette.
- ε_{tot} : Déformation totale enregistrée après 1h de chargement.
- $\varepsilon_{\text{init}}$: Déformation initiale enregistrée après 15s de chargement.
- $\varepsilon_{\text{final}}$: Déformation finale complémentaire.
- ε_{irr} : Déformation irréversible ou permanente.
- ε_{rev} : Déformation réversible.

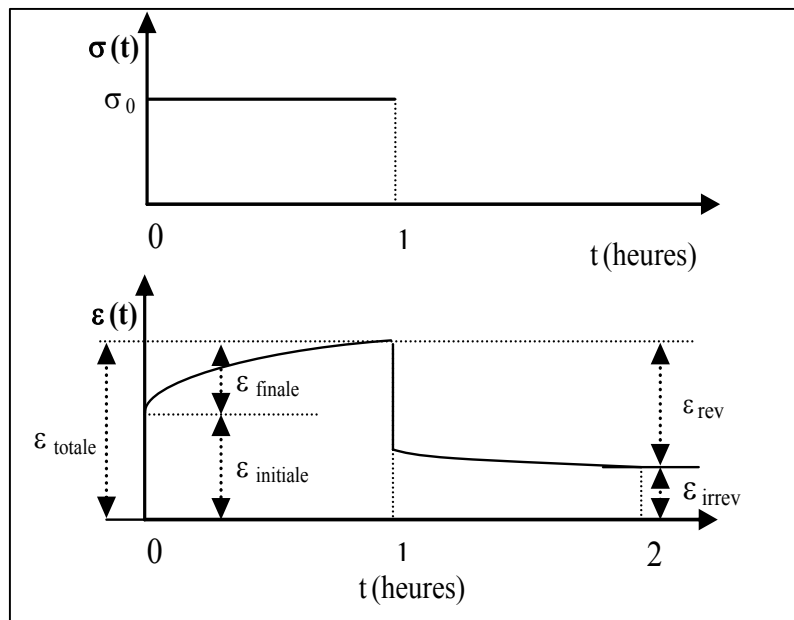


Fig 3.2. Essai de fluage recouvrance

Les déformations durant l'essai sont calculées par :

$$\varepsilon(t, T) = \frac{\Delta h}{h_0} 1000 \quad [\%]$$

Avec :

$\varepsilon(t, T)$: 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 :

$$S_M(t, T) = \frac{\sigma_0}{\varepsilon(t, T)} \quad [\text{MPa}]$$

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.

3-6 Exécution de l'essai

L'essai se fait selon les étapes suivantes :

- On conserve les éprouvettes à la température de l'essai pendant quatre heures.
- On place l'éprouvette entre deux plateaux et on vérifie qu'elle est totalement immergée dans l'eau.
- On règle le niveau de l'appareil.
- On place le capteur de telle sorte qu'il soit en contact avec l'éprouvette.
- On règle le compteur à zéro.
- On lance le logiciel qui enregistre les mesures toutes les cinq secondes.
- Après une heure de chargement, on enlève le chargement brusquement sans déséquilibrer l'appareil tout en continuant la prise des mesures.

3-7 Résultats de l'essai de Fluage – Recouvrance 0,14 MPa

3-7-1 Influence de la température

Les figures 3-3 à 3-6 montrent l'influence de la température sur le comportement en fluage statique pour chaque pourcentage en NR.

Les bétons bitumineux BB0 (%), BB (2%), BB (4%), BB (8%) sont testés à trois températures : 25°C, 40°C et 60°C. et une contrainte appliquée de 0.14 MPa.

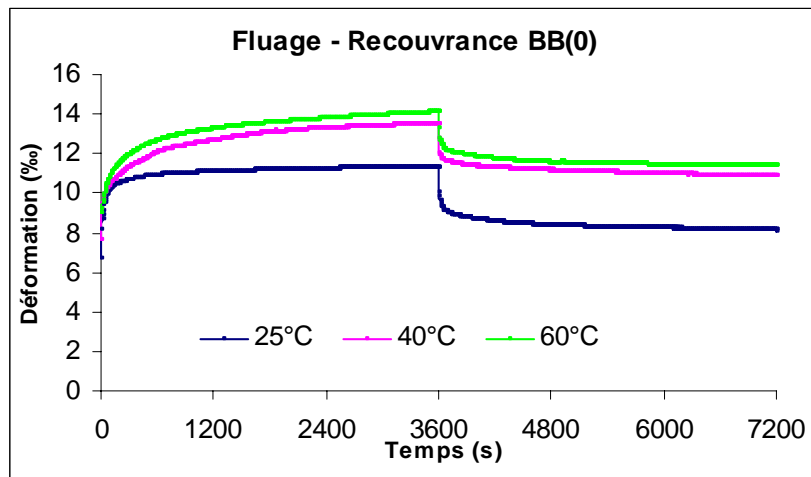


Fig 3.3 Courbes de fluage – recouvrance aux différentes températures pour 0% de NR.

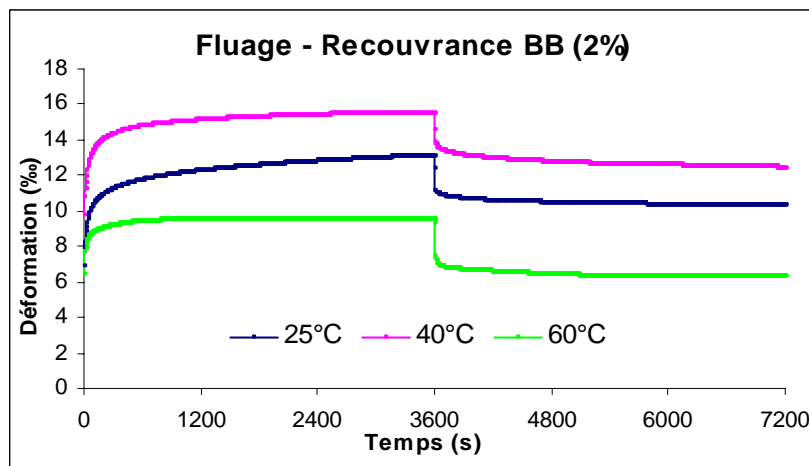


Fig 3-4 Courbes de fluage – recouvrance aux différentes températures pour 2 % de NR.

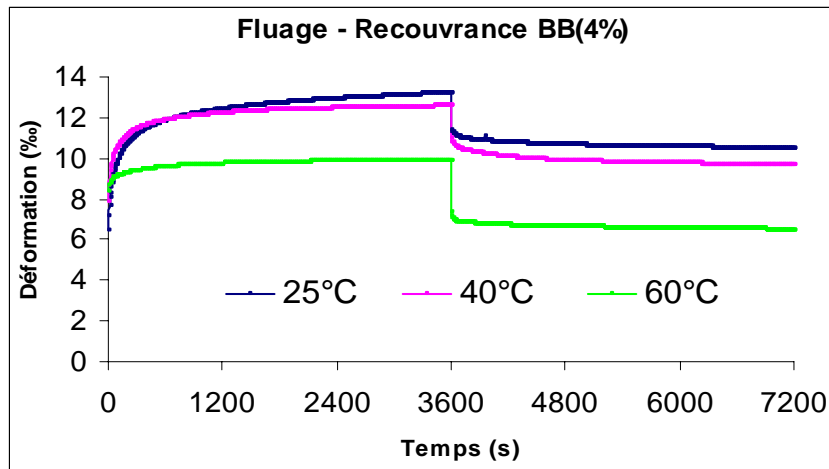


Fig 3.5 Courbes de fluage – recouvrance aux différentes températures pour 4 % de NR.

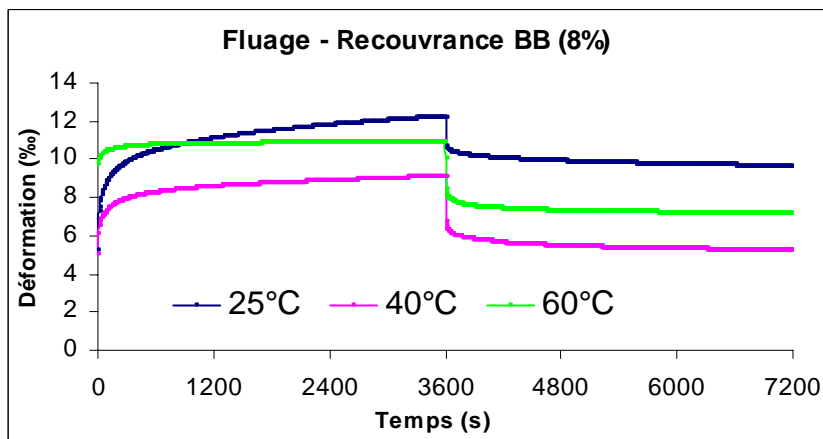


Fig 3-6 Courbes de fluage – recouvrance aux différentes températures pour 8 % de NR.

Interprétation des résultats

- Plus la température augmente plus les déformations et ses vitesses augmentent pour l'enrobé à base de bitume pur ; on observe aussi de faibles variations des déformations entre 40°C et 60°C et des déformations élastiques faibles à 60°C et 40°C.
- Pour les enrobés modifiés à 2 %, on observe que la recouvrance n'est pas totale pour les températures 25°C et 40°C mais elle est totale pour 60°C.
- Plus la température augmente plus les déformations diminuent pour l'enrobés modifiés à 4 % de NR ; les déformations présentent une faible variation entre les températures 25°C et 40°C et des déformations élastiques faibles à 40°C et 25°C.
- Pour les enrobés modifiés à 8 % on remarque que la recouvrance n'est pas totale pour la température 25°C et sa vitesse de déformation est rapide, Par contre à 40°C et 60°C la recouvrance est totale, ce phénomène est due à l'élasticité du caoutchouc.

3-7-2 Influence de la teneur en poudre de caoutchouc NR

Les figures 3-7 3-9 présentent l'influence de la teneur sur le comportement des enrobés bitumineux (pur et modifiés) au fluage recouvrance.

Les bétons bitumineux BB0 (%), BB (2%), BB (4%), BB (8%) sont testé à trois température : 25°C, 40°C et 60°C. et une contrainte appliqué égale à 0.14 Mpa.

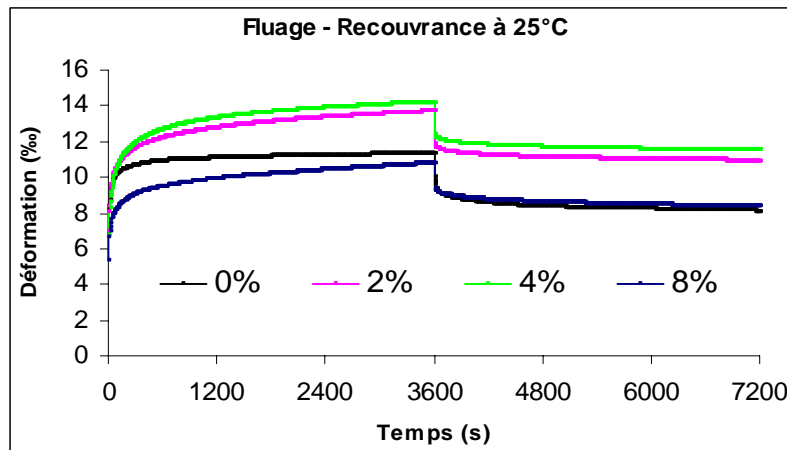


Fig 3-7 Courbe de fluage - recouvrance pour différents teneurs en NR à 25°C.

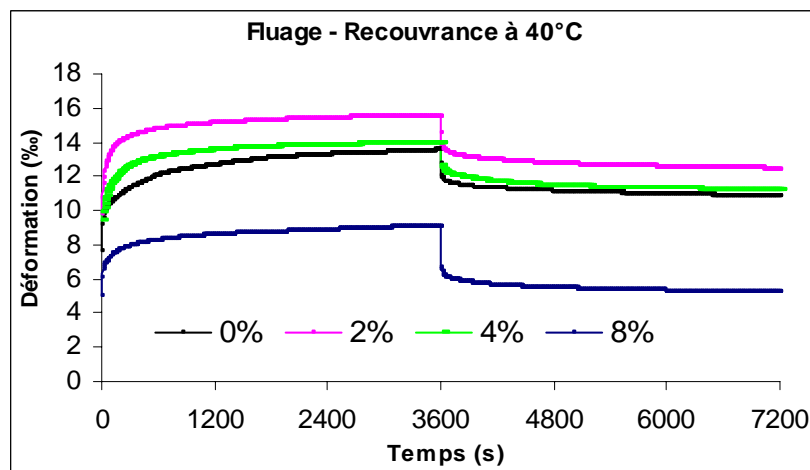


Fig 3-8 Courbe de fluage - recouvrance pour différents teneurs en NR à 40°C.

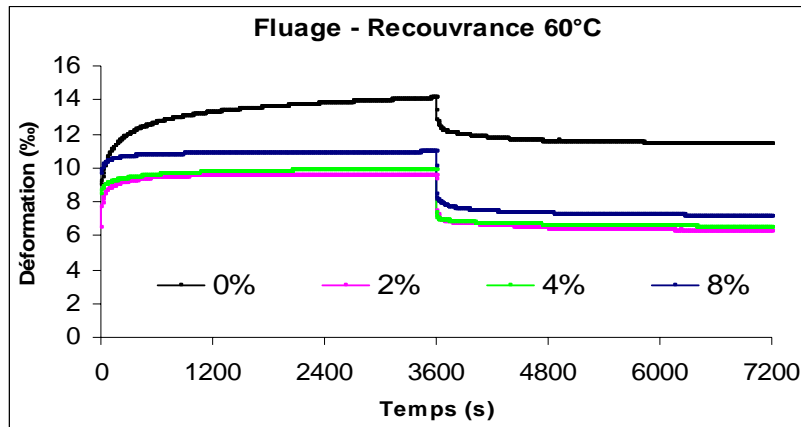


Fig 3-9 Courbe de fluage - recouvrance pour différentes teneurs en NR à 60°C.

Les figures 3-10 à 3-15 représentent les vitesses de déformation initiales en fonctions de temps.

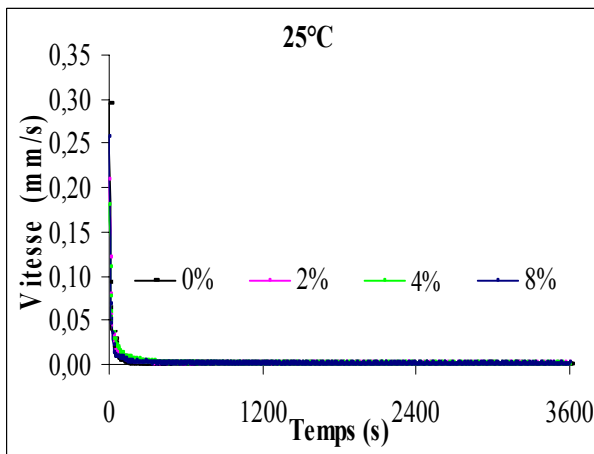


Fig 3-10 Courbe des vitesses de déformation pour différentes teneurs en NR à 25°C.

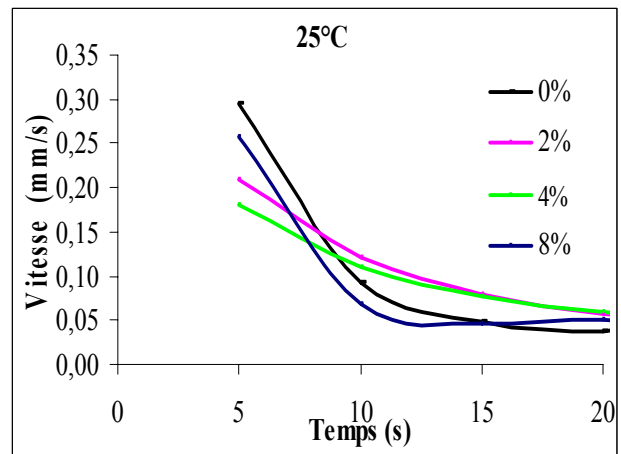


Fig 3-11 Courbe des vitesses

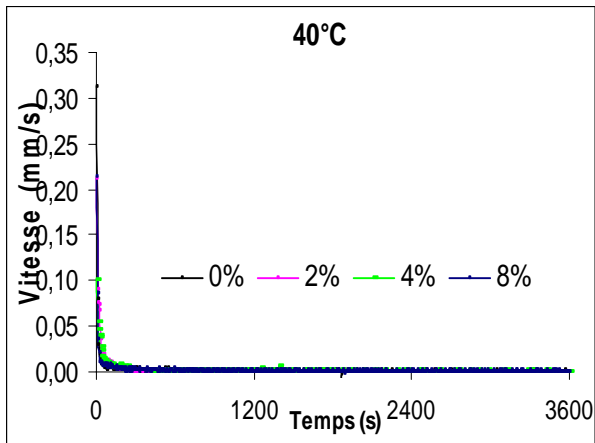


Fig 3-12 Courbe des vitesses de déformation pour différentes teneurs en NR à 40°C.

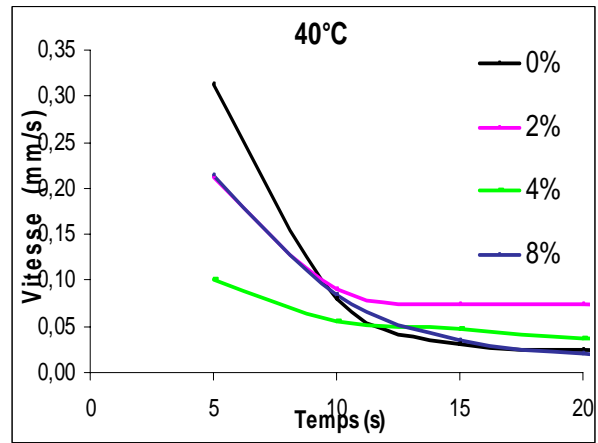


Fig 3-13 Courbe des vitesses de déformation

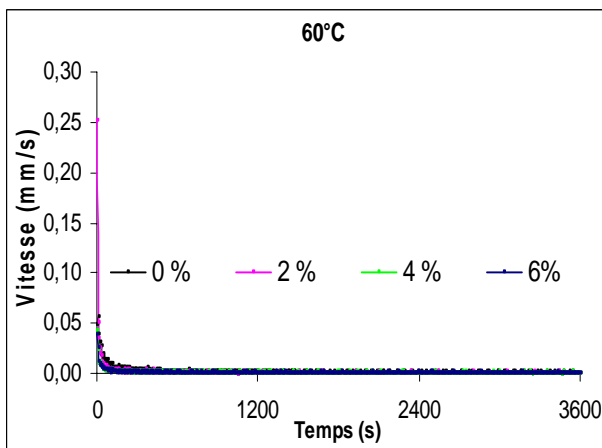


Fig 3-14 Courbe des vitesses de déformation pour différentes teneurs en NR à 60°C.

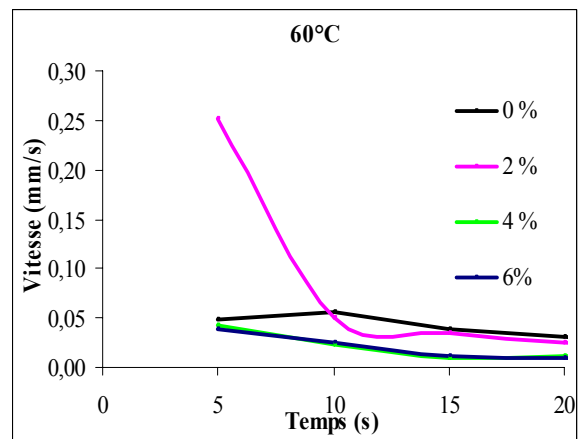


Fig 3-15 Courbe des vitesses de déformation

D'après les courbes des figures précédentes on remarque :

à 25°C, nous observons que :

- la recouvrance n'est pas totale sauf pour l'enrobé à la base de bitume pur.
- Les enrobés bitumineux à base de bitume modifiés à 4 % donnent les déformations les plus élevées.
- Les déformations de l'enrobé bitumineux modifié à 8 % sont inférieures par rapport à celles de l'enrobé bitumineux pur, par contre pour la partie de recouvrance on remarque que les courbes sont presque identiques c'est-à-dire la poudrette de caoutchouc influence le comportement vis-à-vis du fluage.
- L'écart entre les courbes des enrobés bitumineux modifiés à 2 % et 4% est faible.
- Les vitesses de déformation (fluage – recouvrance) pour les enrobés modifiés sont plus faibles que l'enrobé ordinaire. Donc la poudrette de caoutchouc naturel soulage les enrobés.

à 40°C, nous remarquons que :

- La recouvrance n'est pas totale pour les enrobés bitumineux modifiés à 0 %, 2 % et 4 % par contre elle est totale pour les enrobés modifiés à 8 %. Ce phénomène est dû à l'élasticité linéaire du caoutchouc.
- Les enrobés bitumineux modifiés à 2 % présentent des déformations les plus élevées par contre les enrobés modifiés à 8 % présentent les déformations les plus faibles.
- L'écart entre les courbes des enrobés bitumineux modifiés à 0 % et 4% est faible.
- Les vitesses de déformation (fluage – recouvrance) pour les enrobés modifiés sont plus faibles que l'enrobé ordinaire. Donc la poudrette de caoutchouc naturel soulage les enrobés.

à 60°C, nous observons que :

- La recouvrance est totale sauf l'enrobé à base de bitume pur.
- Les enrobés bitumineux à base de bitume pur donnent les déformations les plus élevées.
- Les courbes des enrobés modifiés à 2 % et 4 % sont presque les mêmes.
- La vitesse de déformation (fluage – recouvrance) pour l'enrobé modifié à 2 % présente la vitesse la plus élevée que les autres. Donc la poudrette de caoutchouc naturel soulage les enrobés.

3-7-3 Influence de la teneur en poudrette et de la température sur les déformations et module de rigidité

Les résultats obtenus à partir des essais de fluage statique nous ont permis d'évaluer les caractéristiques rhéologiques des mélanges étudiés.

Le tableau 3-1 présente les résultats obtenus à partir des essais de fluage recouvrance sur les bétons bitumineux pur et modifié.

Tableau 3-1 les déformations en fonction de la teneur en NR et de la température

Température (°C)	Déformation (‰)	Béton bitumineux			
		BB(0)	BB(2)	BB(4)	BB(8)
25°C	ϵ_{rev}	3,223	2,815	2,695	2,422
	ϵ_{irr}	8,106	10,888	11,508	8,346
	ϵ_{ini}	6,729	6,977	6,766	5,321
	ϵ_{tot}	11,329	13,703	14,203	10,768
	ϵ_{fin}	4,600	6,726	7,438	5,447
40°C	ϵ_{rev}	2,707	3,088	2,774	3,868
	ϵ_{irr}	10,835	12,438	11,199	5,231
	ϵ_{ini}	7,609	9,719	9,389	5,037
	ϵ_{tot}	13,542	15,526	13,973	9,099
	ϵ_{fin}	5,933	5,807	4,585	4,062
60°C	ϵ_{rev}	2,649	3,312	3,390	3,772
	ϵ_{irr}	11,437	6,260	6,484	7,136
	ϵ_{ini}	8,955	6,411	8,404	9,697
	ϵ_{tot}	14,086	9,572	9,874	10,908
	ϵ_{fin}	5,131	3,161	1,470	1,211

a) Déformation initiale

Les variations des déformations initiales enregistrées après quinze secondes de chargement en fonction de la teneur en poudrette NR et de la température, sont représentées dans la figure 3-15 :

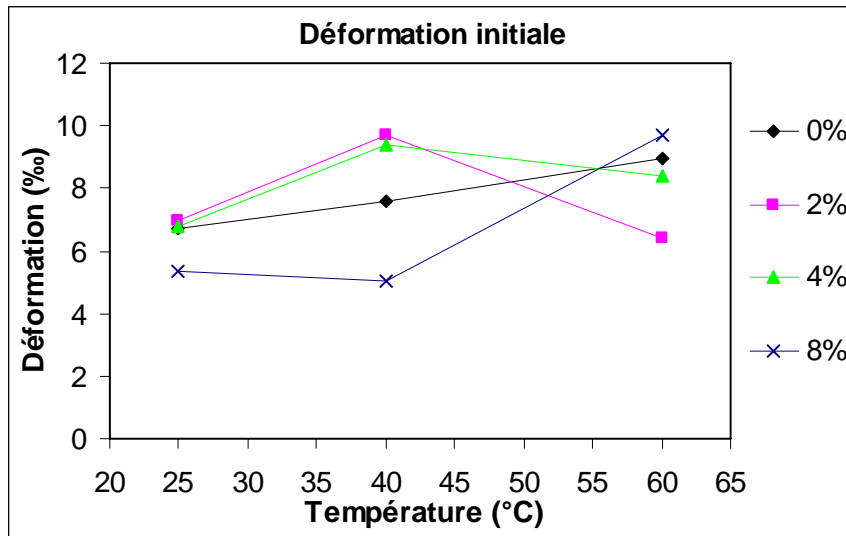


Fig 3-16 Variation des déformations initiales en fonction de la température.

D'après la figure précédente on observe :

- L'enrobé bitumineux modifiés à 8 % de NR présente les déformations les plus faibles aux températures 25°C et 40°C et la déformation le plus élevés à 60°C.
- Le béton bitumineux modifié à 2 % présente la déformation la plus faible à 60°C.
- Les bétons bitumineux modifiés à 2 %,4 % et pur présentent des déformations identiques à 25°C.

Donc le béton bitumineux à base de bitume modifié à 8 % de NR est le plus résistant au chargement à courte durée aux températures 25°C et 40°C, et 2 % les plus résistants à la température 60°C.

b) Déformation totale

Les déformations totales des enrobés bitumineux sont enregistrées après une heure de chargement aux différentes températures et teneurs en poudre de NR.

La variation des déformations totales en fonction de la température pour chaque teneur est illustrée dans la figure 3-16.

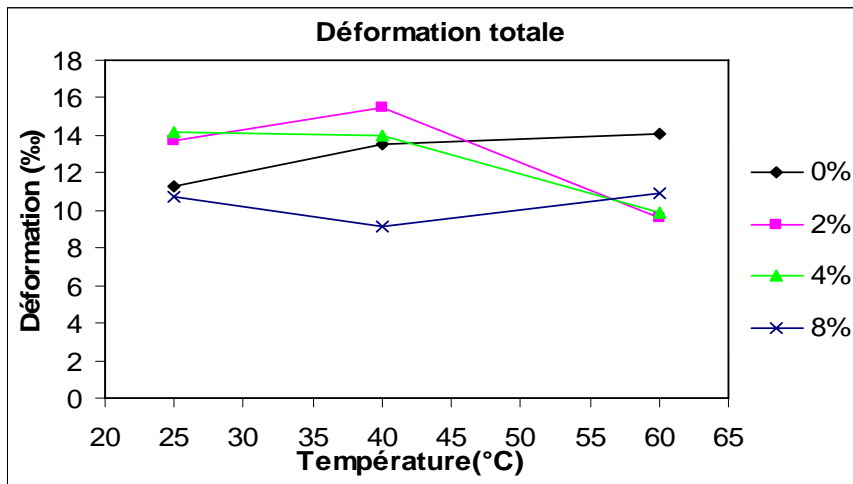


Fig 3-16 Variation des déformations totales en fonction de la température.

L'analyse des résultats de la figure précédente montre :

- Plus la température augmente, plus les déformations sont élevées pour le béton bitumineux à base de bitume pur.
- L'enrobé bitumineux modifiés à 8 % de NR présente les déformations les plus faibles dans les températures 25°C et 40°C.
- Les bétons bitumineux modifiés à 2 % et 4 % donnent des déformations identiques aux températures 25°C et 40°C.

Donc le béton bitumineux à base de bitume modifié à 8 % de NR est le plus résistant au chargement à longue durée aux températures 25°C et 40°C, et 2 % ,4 % les plus résistants à la température 60°C.

c) Déformation finale

La figure 3-17 représente la variation des déformations finales en fonction de la température pour chaque teneur en poudrette de NR.

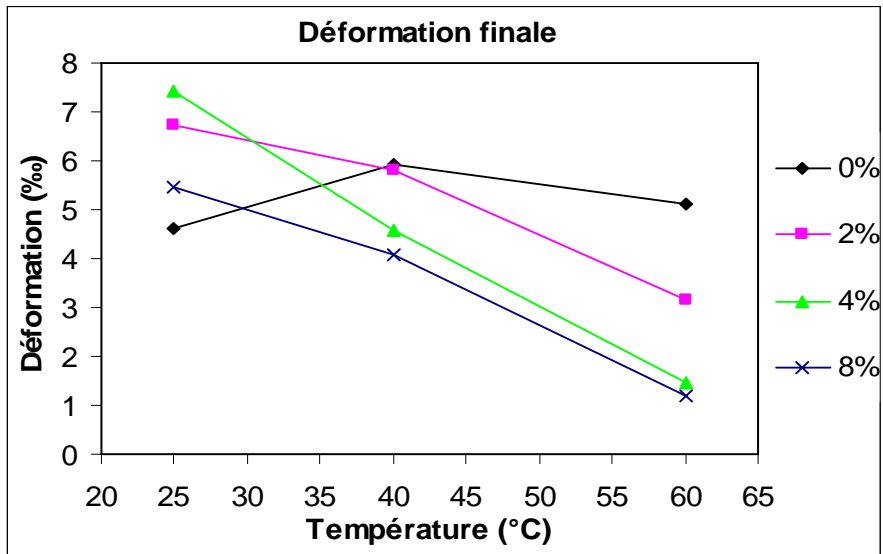


Fig 3-17 Variation des déformations finales en fonction de la température.

On remarque que :

- Plus la température augmente, plus les déformations finales diminuent pour les bétons bitumineux modifiés sauf pour l'enrobé à la base de bitume pur.
- Le béton bitumineux modifié à 8 % présente les déformations finales les plus faibles pour les températures 40°C et 60°C.
- Les bétons bitumineux modifiés à 0 % et 2 % donnent des déformations identiques à la température 40°C.

d) Déformation réversible

La figure 3-18 représente la variation des déformations finales en fonction de la température pour chaque teneur en poudrette de NR.

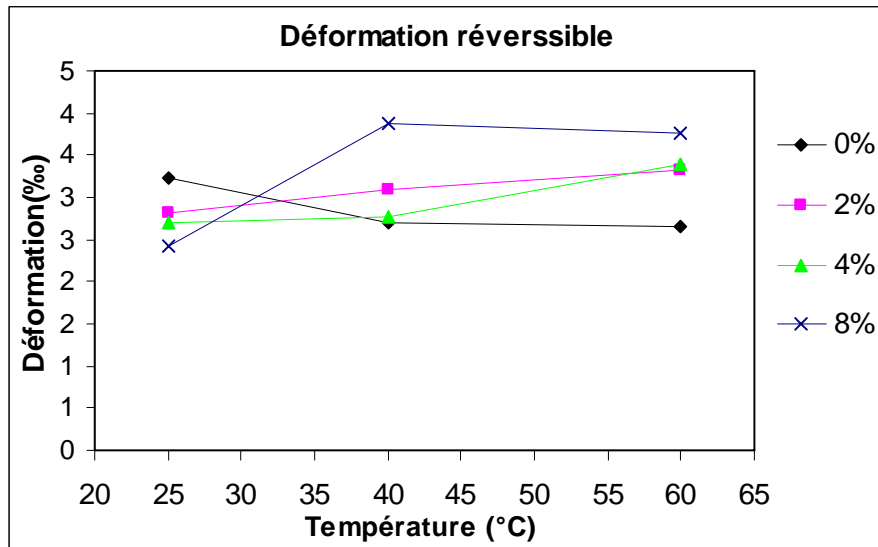


Fig 3-18 Variation des déformations réversibles en fonction de la température.

D'après la figure ci-dessus on observe que :

- A 25°C Le béton bitumineux à base de bitume pur (0 %) présente la déformation la plus élevés c'est-à-dire déformation élastique.
- L'enrobé modifié à 8 % présente les déformations les plus élevés aux températures 40°C et 60°C.
- Les bétons bitumineux modifiés à 2 % et 4 % donnent des déformations identiques à température 60°C.

On constate que l'enrobé bitumineux à base de bitume modifié à 8 % de NR présente une meilleur élasticité aux températures élevées (40°C et 60°C).

e) Déformation irréversible

La variation des déformations irréversibles en fonction de la teneur en NR et de la température, est représentée dans la figure 3-19.

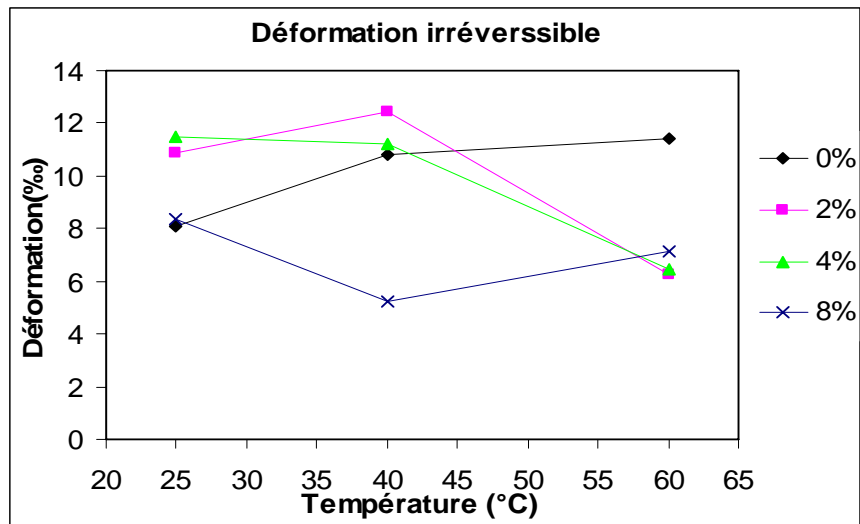


Fig 3-19 Variation des déformations irréversibles en fonction de la température.

L'analyse des résultats de la figure précédente montre :

- Les bétons bitumineux modifiés à 8 % et pur donnent des déformations identiques à température 25°C et plus faible que les enrobés modifiés à 2 % et 4 %.
- L'enrobé modifié à 8 % de NR donne la déformation la plus faible avec une différence important par rapport aux autre enrobés.
- A 60°C Les bétons bitumineux modifiés à 2 %, 4 % et 8 % présentent les déformations les plus faibles par rapport à l'enrobé ordinaire.

Donc le béton bitumineux modifié à 8 % est le plus résistant à l'orniérage à la température 40°C par contre les bétons bitumineux modifiés à 2 % et 4 % les plus résistants à 60°C.

f) Taux de déformation de fluage

Le taux de déformation de fluage est le rapport de la déformation de fluage après 15 secondes (initiale) à la déformation de fluage après 1h (totale).

Les résultats du taux de déformation de fluage sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau 3-2 les valeurs du taux de déformation de fluage

Température °C	Béton bitumineux			
	BB (0%)	BB (2%)	BB (4%)	BB (8%)
25	59,396	50,913	47,635	49,418
40	56,188	62,598	67,190	55,354
60	63,574	66,977	85,112	88,898

Les résultats du tableau sont représentés dans la figure 3-20 :

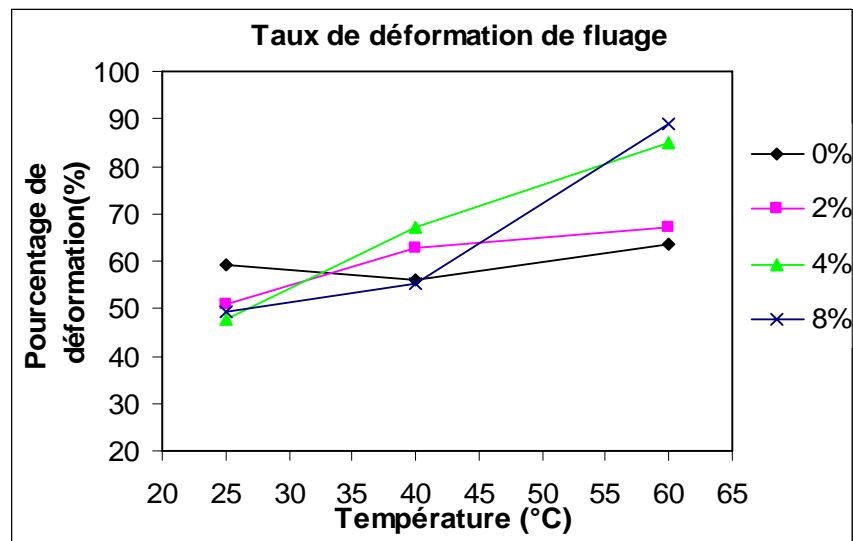


Fig 3-20 Variation de taux de déformation en fonction de la température.

On remarque que :

- A 25°C : Les enrobés bitumineux à base de bitume modifié présentent un taux de déformation de fluage faible par rapport à l'enrobé ordinaire. Tous les enrobés, les 45 % de la déformation ont lieu principalement dans la phase initiale.
- A 40°C : l'enrobé bitumineux modifiés à 8 % présente un taux de déformation de fluage faible que les autres enrobés, et la déformation initiale dépasse les 50 % de la déformation totale pour tous les enrobés.
- A 60°C : la déformation initiale dépasse les 60 % de la déformation totale pour tous les enrobés.

L'ajout de la poudre de caoutchouc de NR améliore la résistance aux déformations de fluage aux températures 25°C et 40°C.

g) Variation de la recouvrance viscoélastique

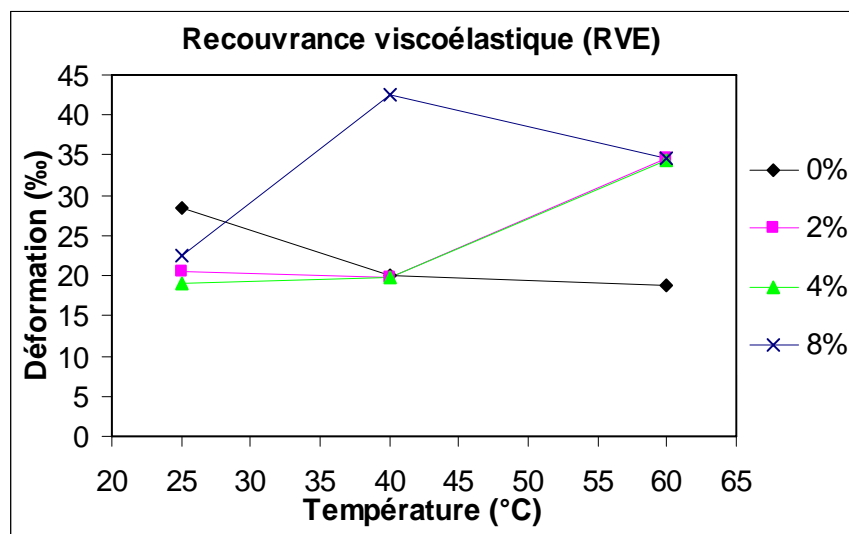
Le quotient de la déformation réversible après 1h de déchargement et la déformation totale après une heure de chargement.

Le tableau suivant 3-3 présente la variation de la RVE des enrobés bitumineux en fonction de la température pour chaque teneur.

Tableau 3-3 Variation de la RVE des enrobés bitumineux.

Température °C	Béton bitumineux			
	BB (0%)	BB (2%)	BB (4%)	BB (8%)
25	28,449	20,547	18,977	22,489
40	19,990	19,889	19,855	42,510
60	18,806	34,601	34,333	34,580

Les résultats de tableau 3-3 sont représentés dans la figure ci-dessous :

**Fig 3-21** Variation des déformations finales en fonction de la température.

D'après les résultats de la figure on observe :

- Les enrobés bitumineux modifiés donnent des valeurs du recouvrement viscoélastique plus faible que l'enrobé ordinaire à 25°C, mais le contraire à la température 60°C (les valeurs de enrobés modifiés est identique et plus grande que l'enrobé ordinaire).
- Les enrobés bitumineux modifiés à 2 %, 4% et pur donnent des valeurs du recouvrement viscoélastique identique à 40°C, mais l'enrobé bitumineux modifié à 8 % donne une valeur important et plus grand que celle.
- L'enrobé à base de bitume modifié à 8 % présente le meilleur recouvrement élastique en fonction de la température

Donc la modification des bitumes apporte une amélioration aux températures extrêmes (40°C, 60°C) des enrobé résultant vis-à-vis leur comportement viscoélastique,et elle diminue les déformation permanentes.

h) Le module de rigidité initiale

Les modules de rigidité correspondant aux déformations initiales mesurées à quinze secondes sous l'effet de la température et de la teneur en NR, sont représentés sur la figure 3-22

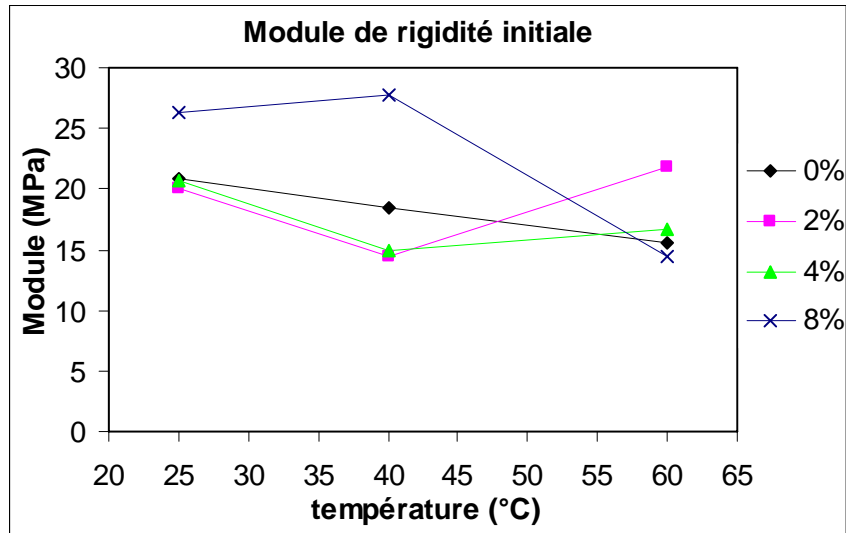


Fig 3-22 Variation des déformations finales en fonction de la température.

La variation de la module de rigidité initial montre que :

- Les enrobés bitumineux modifiés à 2 %, 4% et pur donnent des valeurs du module de rigidité initiale identique à 25°C
- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente la valeur le plus élevé à 25°C et 40°C.
- L'enrobé bitumineux modifié à 2 % présente la valeur le plus élevé à 60°C.
- L'écart entre les modules de rigidité des enrobés modifiés à 2 % et 4 % est faible jusqu'à 40°C.

i) Le module de rigidité finale

Les modules de rigidité correspondant aux déformations totales mesurées après une heure de chargement sous l'effet de la température et de la teneur en NR, sont représentés sur la figure 3-23.

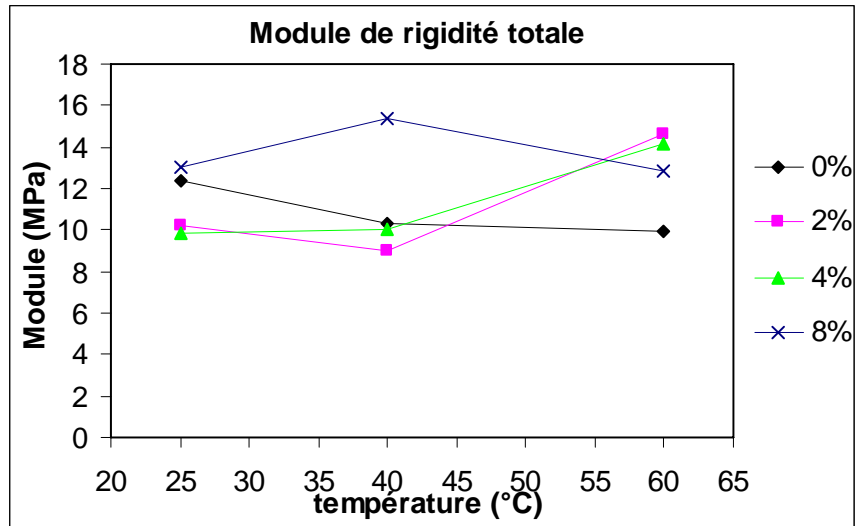


Fig 3-23 Variation des déformations finales en fonction de la température.

La variation de la module de rigidité initial montre que :

- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente la valeur le plus élevé à 25°C et 40°C.
- L'enrobé bitumineux modifié à 2 % présente la valeur le plus élevé à 60°C.

3-8 Résultats de l'essai de Fluage – Recouvrance 0,28 Mpa

3-8-1 Influence de la température

Les figures 3-24 et 3-25 présentent l'influence de la température sur le comportement des enrobés bitumineux (pur et modifiés) au fluage recouvrance.

Les bétons bitumineux BB0 (%), BB (8%) sont testé à trois température : 25°C, 40°C et 60°C. et une contrainte appliqué égale à 0.28 Mpa.

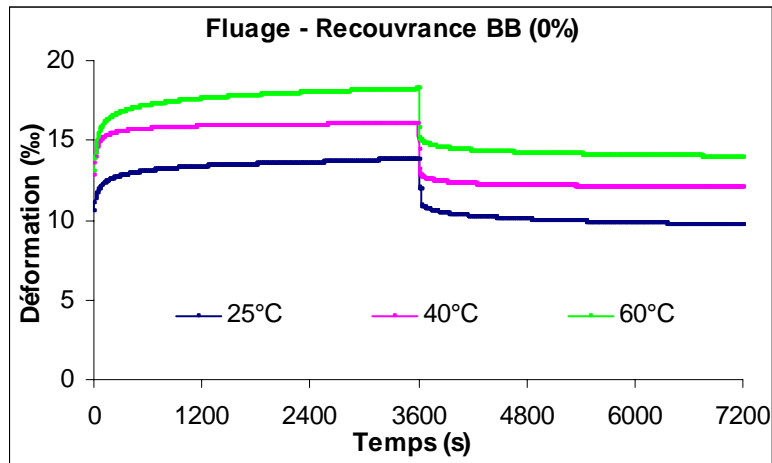


Fig 3-24 Courbes de fluage – recouvrance à différentes températures pour 0 % de NR.

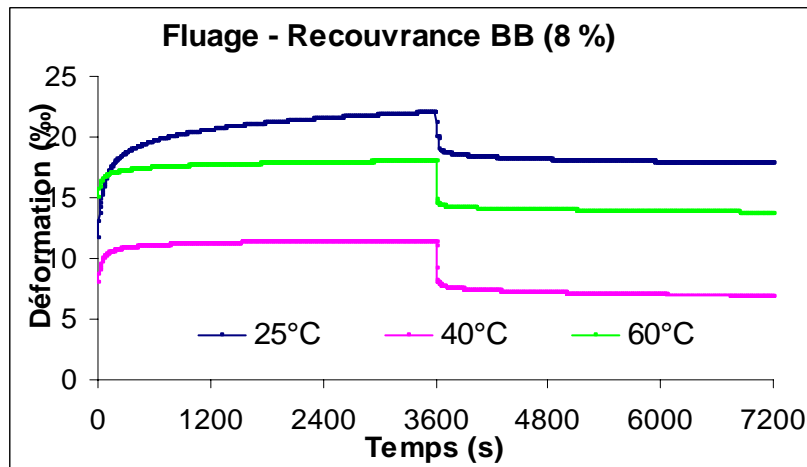


Fig 3-25 Courbes de fluage – recouvrance à différentes températures pour 8 % de NR.

- Plus la température augmente, plus les déformations augmentent pour l'enrobé à base de bitume pur.
- Pour l'enrobé modifié à 8 %, on observe que la recouvrance n'est pas totale pour la température 25°C mais elle est totale pour 40°C 60°C, donc l'effet de la poudre de caoutchouc est à ces températures précédentes (40°C et 60°C).

3-8-2 Influence de la teneur en poudre de caoutchouc NR

Les figures 3-26 à 3-27 présentent l'influence de la teneur sur le comportement des enrobés bitumineux (pur et modifiés) au fluage recouvrance.

Les bétons bitumineux BB0 (%), BB (8%) sont testé à trois température : 25°C, 40°C et 60°C. et une contrainte appliqué égale à 0.28 Mpa.

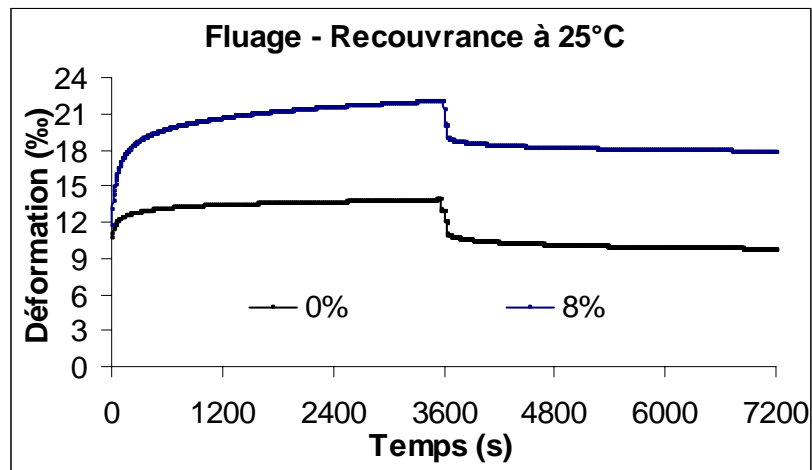


Fig 3-26 Courbe de fluage - recouvrance pour différentes teneurs en NR à 25°C

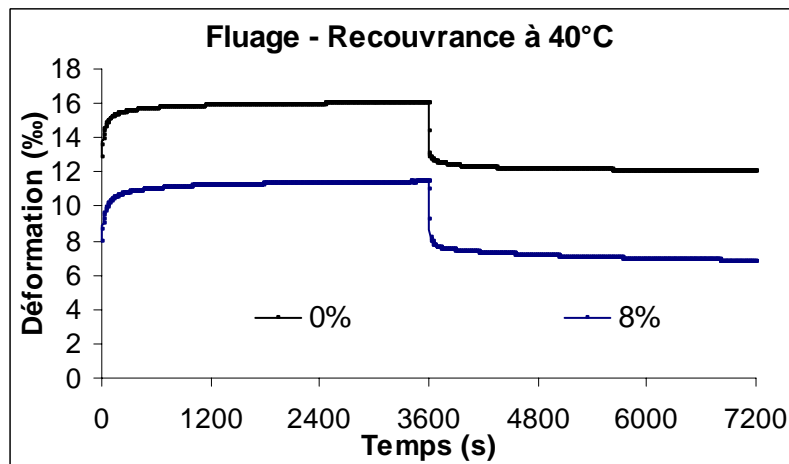


Fig 3-27 Courbe de fluage - recouvrance pour différentes teneurs en NR à 40°C.

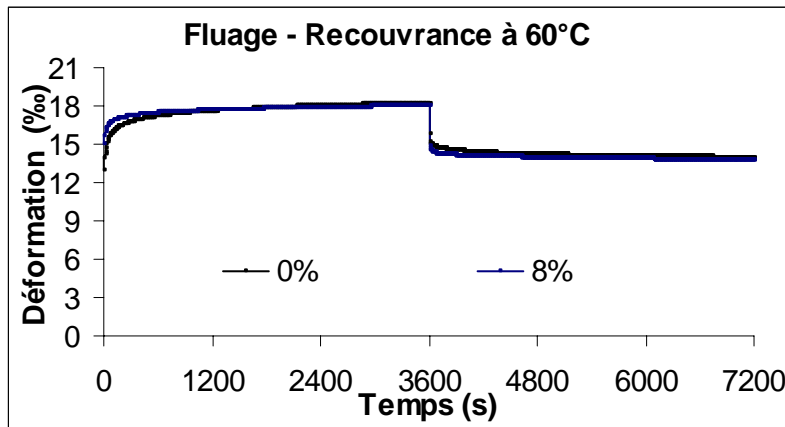


Fig 3-28 Courbe de fluage - recouvrance pour différentes teneurs en NR à 60°C.

Pour les essais à 25°C on observe :

- Les résultats obtenus montrent que la recouvrance n'est pas totale sauf pour l'enrobé à la base de bitume pur.
- L'enrobé bitumineux à base de bitume modifié à 8 % donne les déformations les plus élevés.
- L'écart entre les courbes des enrobés bitumineux modifiés à 8 % et pur est important.

Pour les essais à 40°C on observe :

- Les enrobés bitumineux modifiés à 8 % et pur montrent que la recouvrance est totale.
- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente des déformations les plus faibles.
- L'écart entre les courbes des enrobés bitumineux modifiés à 8 % et pur est important.

Pour les essais à 60°C on observe :

- Les résultats obtenus montrent que la recouvrance est totale sauf l'enrobés à base de bitume pur.
- On a remarque que les courbes des enrobés modifiés à 8 % et pur est presque les même ou bien n'a pas une influence remarquable pour la partie de fluage mais dans la partie de recouvrance on observe que l'enrobé bitumineux modifié à 8 % est inférieur à la courbe de l'enrobé pur, ce phénomène est due à l'élasticité du caoutchouc.

3-8-3 Influence de la teneur en poudrette et de la température sur les déformations et module de rigidité 0,28 Mpa

a) Déformation initiale

La figure 3-29 représente l'influence de la température sur les déformations initiales pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

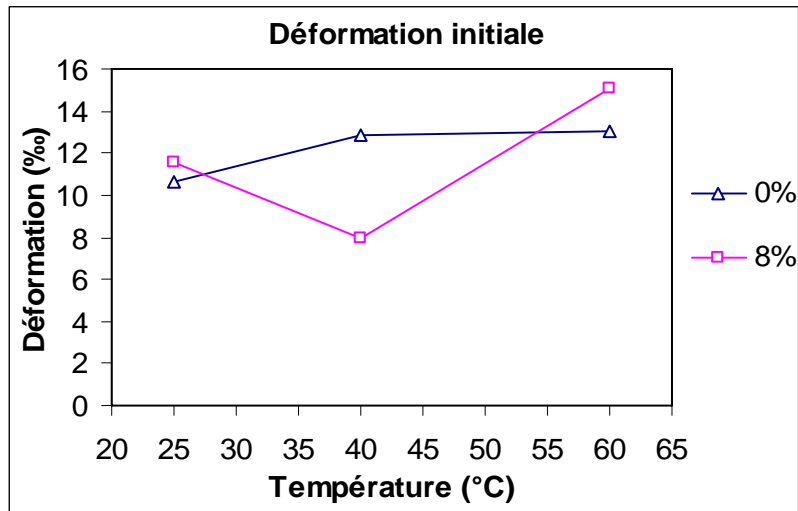


Fig 3-29 Variation des déformations initiales en fonction de la température.

D'après la figure ci-dessus on observe :

- L'enrobé bitumineux modifiés à 8 % de NR présente la déformation la plus faible à température 40°C et les déformations les plus élevés à 25°C et 60°C.

Donc le béton bitumineux à base de bitume modifié à 8 % de NR est le plus résistant au chargement à courte durée à la température 40°C.

b) Déformation totale

La figure 3-30 représente l'influence de la température sur les déformations totales pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

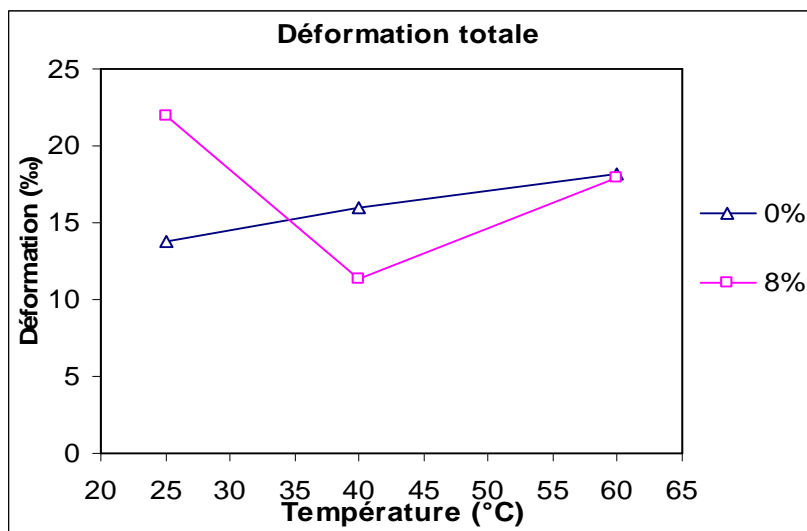


Fig 3-30 Variation des déformations totales en fonction de la température.

L'analyse des résultats de la figure précédente montre :

- Plus la température augmente, plus les déformations sont élevées pour le béton bitumineux à base de bitume pur.
- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % de NR présente les déformations les plus faibles aux températures 40°C et 60°C.
- Le béton bitumineux à la base de bitume pur présente la déformation la plus faible à la température 25°C.

Donc le béton bitumineux à base de bitume modifié à 8 % de NR est le plus résistant au chargement à longue durée aux températures 40°C et 60°C.

c) Déformation finale

La figure 3-31 représente l'influence de la température sur les déformations finales pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

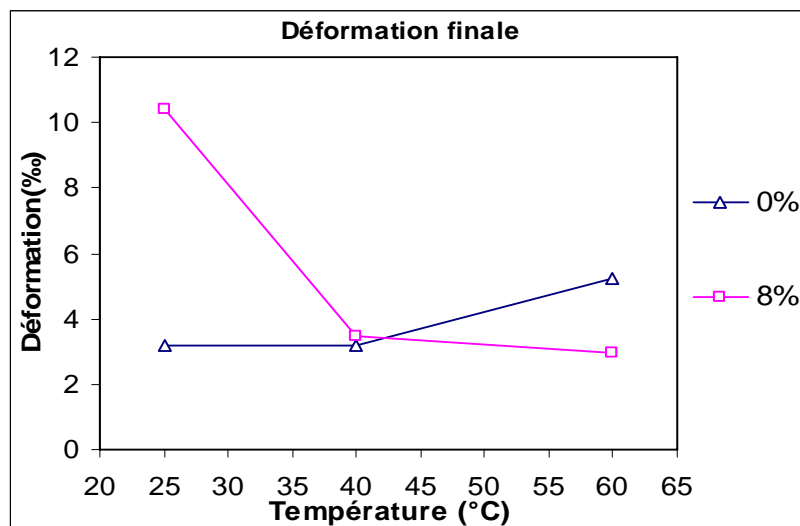


Fig 3-31 Variation des déformations finales en fonction de la température.

On remarque que :

- Plus la température augmente, plus les déformations finales diminuent pour le béton bitumineux modifié à 8 % de NR, le contraire pour l'enrobé à base de bitume pur.
- Le béton bitumineux modifié à 8 % présente les déformations finales les plus élevées pour les températures 25°C et 40°C, et la déformation la plus faible à la température 60°C.

d) Déformation réversible

La figure 3-32 représente l'influence de la température sur les déformations réversibles pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

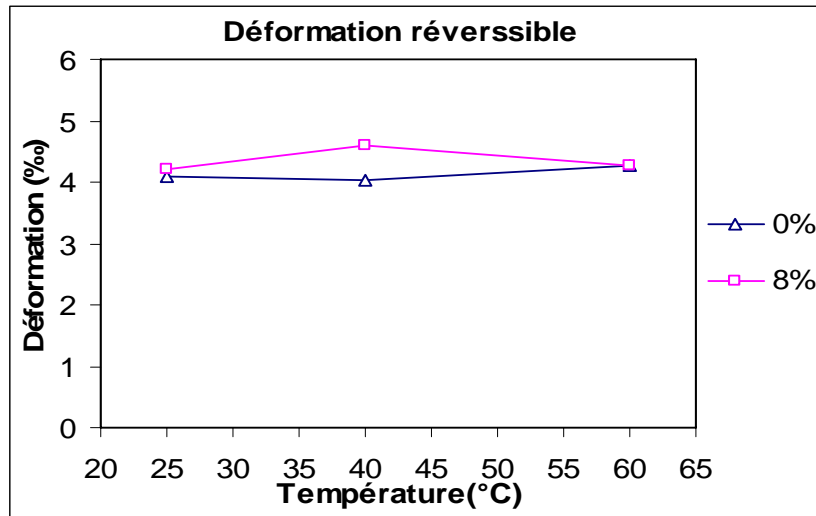


Fig 3-32 Variation des déformations réversibles en fonction de la température.

D'après la figure ci-dessus on observe que :

- L'enrobé modifié à 8 % présente les déformations les plus élevés aux températures 25°C, 40°C et 60°C.
- L'enrobé à base de bitume pur présente les déformations les plus élevés.

On constate que l'enrobé bitumineux à base de bitume modifié à 8 % de NR présente une meilleur élasticité aux températures 25°C, 40°C et 60°C par rapport à l'enrobé ordinaire.

e) Déformation irréversible

La figure 3-33 représente l'influence de la température sur les déformations irréversible pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

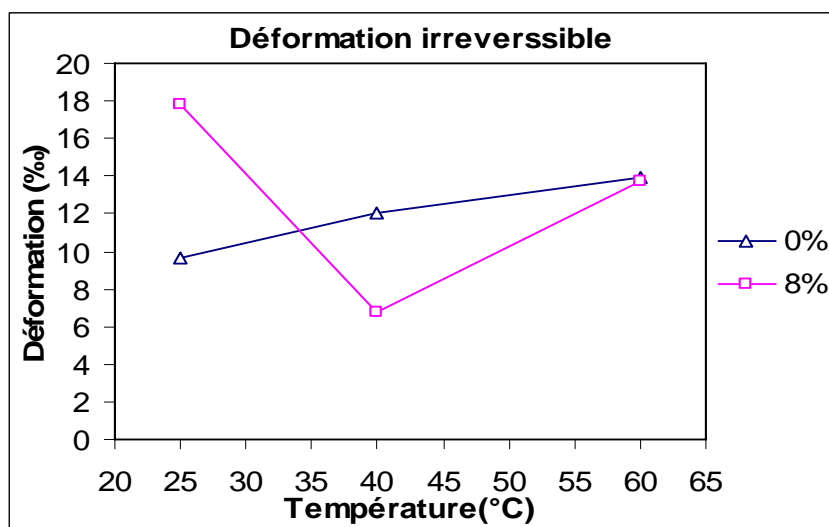


Fig 3-33 Variation des déformations irréversibles en fonction de la température.

L'analyse des résultats de la figure précédente montre :

- Les bétons bitumineux modifiés à 8 % et pur donnent des déformations identiques à température 60°C.
- L'enrobé ordinaire donne la déformation la plus faible avec une différence important à 25°C.
- Le béton bitumineux modifié à 8 % donne la déformation la plus faible à 40°C.

Donc le béton bitumineux modifié à 8 % est le plus résistant à l'orniérage aux températures 40°C et 60°C par contre le béton bitumineux ordinaire le plus résistant à 25°C.

f) Taux de déformation de fluage

La figure 3-34 représente l'influence de la température sur le taux de déformation de fluage pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

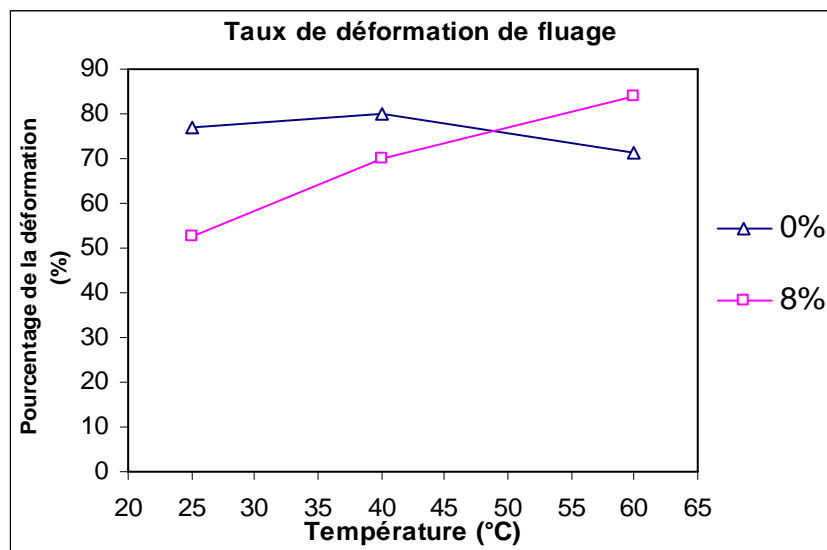


Fig 3-34 Variation de taux de déformation de fluage en fonction de la température.

On constate à partir de la figure 3-34 que :

- Plus la température augmente, plus le taux de déformation de fluage augmente pour le béton bitumineux modifié à 8 % de NR
- A 25°C : L'enrobés bitumineux modifié à 8 % présente un rapport faible par rapport à l'enrobé ordinaire. et tous les enrobés, les 50 % de la déformation ont lieu principalement dans la phase initiale.

- A 40°C : l'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente un rapport faible que l'enrobé ordinaire, et la déformation initiale dépasse les 60 % de la déformation totale pour tous les enrobés.
- A 60°C : l'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente un rapport élevé que l'enrobé ordinaire, et la déformation initiale dépasse les 70 % de la déformation totale pour tous les enrobés.

L'ajout de la poudre de caoutchouc de NR améliore la résistance aux déformations de fluage aux températures 25°C et 40°C.

g) La recouvrance viscoélastique (RVE)

La figure 3-35 représente l'influence de la température sur la recouvrance viscoélastique pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

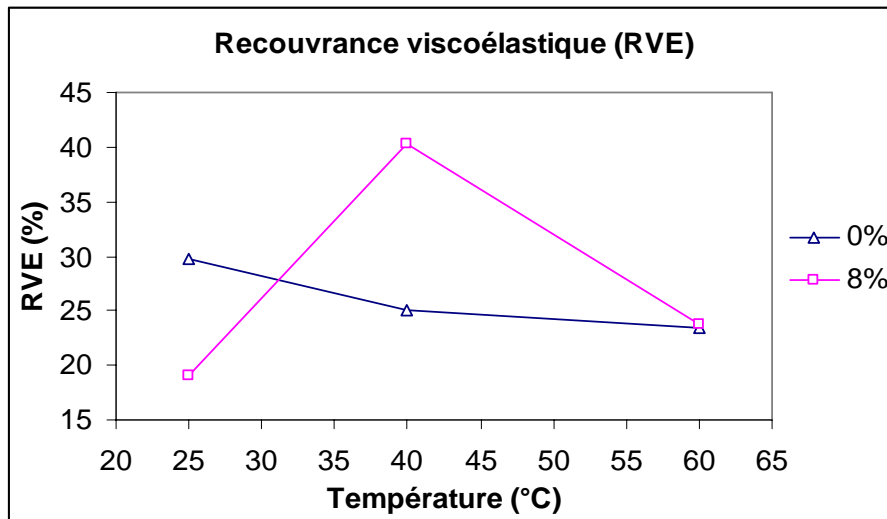


Fig 3-35 Variation des recouvrance élastiques en fonction de la température.

D'après les résultats de la figure on observe :

- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % donne la valeur du recouvrement viscoélastique plus faible que l'enrobé ordinaire à 25°C, mais le contraire aux températures 40°C et 60°C.

h) Module de rigidité initiale

La figure 3-36 représente l'influence de la température sur les modules de rigidités initiales pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

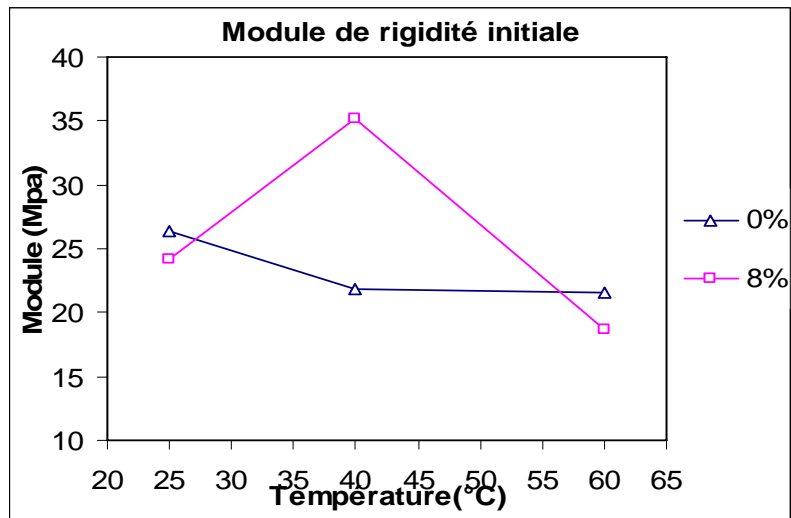


Fig 3-36 Variation des modules des rigidités initiales en fonction de la température.

La variation de la module de rigidité initial montre que :

- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % donne des valeurs du module de rigidité initiale plus faible que l'enrobé ordinaire à 25°C et 60°C.
- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente la valeur le plus élevé à 40°C.

La modification du bitume à 8 % apporte une amélioration des mélange bitumineux vis-à-vis le module de rigidité initiale à la température 40°C.

i) Module de rigidité totale

La figure 3-37 représente l'influence de la température sur les modules de rigidités totales pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

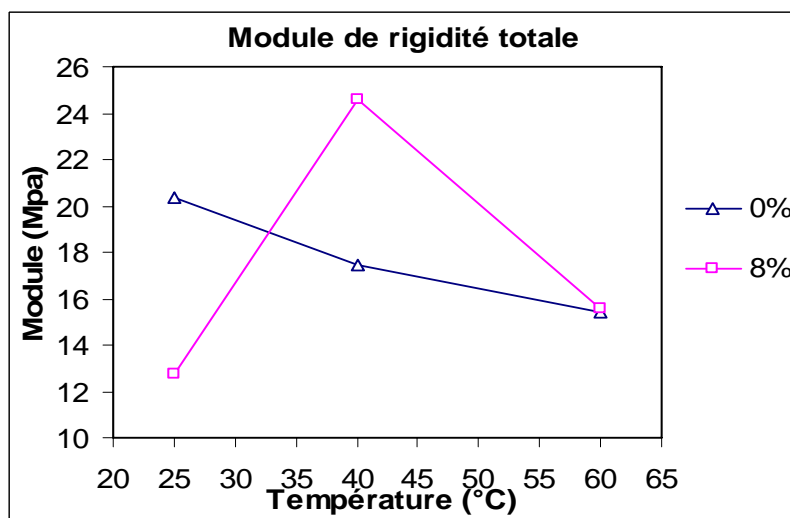


Fig 3-37 Variation des modules des rigidités totales en fonction de la température

La variation de la module de rigidité totale montre que :

- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % donne des valeurs du module de rigidité totale plus faible que l'enrobé ordinaire à 25°C.
- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente la valeur le plus élevé à 40°C et 60°C.

La modification du bitume à 8 % apporte une amélioration des mélange bitumineux vis-à-vis le module de rigidité totale aux températures élevées (40°C et 60°C).

3-9 Résultats de l'essai de Fluage – Recouvrance 0,42 MPa

3-9-1 Influence de la température

Les figures 3-38 à 3-39 montrent l'influence de la température sur le comportement en fluage statique pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 % de NR. Les bétons bitumineux BB0(%),BB(8%) sont testé à trois température : 25°C, 40°C et 60°C. et une contrainte appliqué égale à 0.28 Mpa.

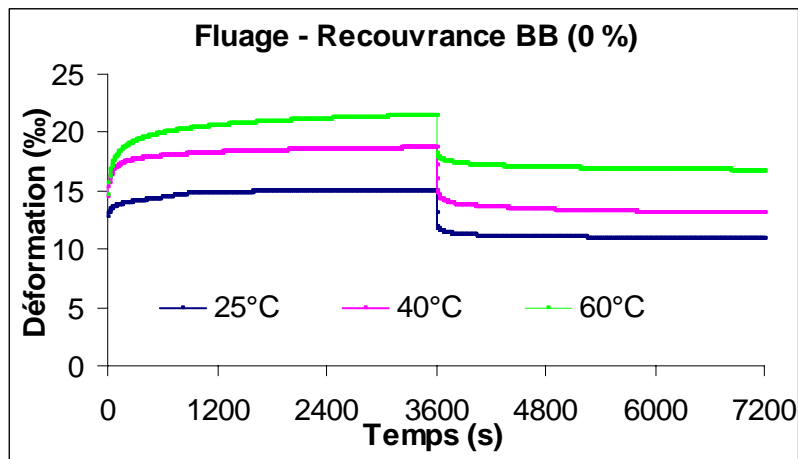


Fig 3-38 Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume pur.

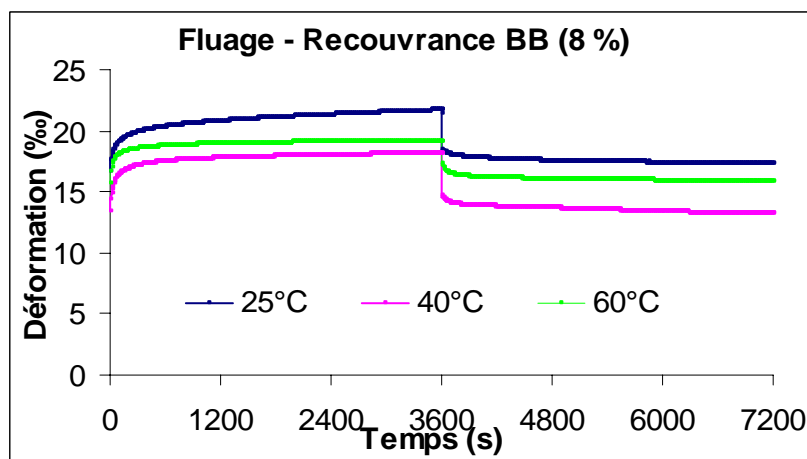


Fig 3-39 Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume modifié à 8 %.

Interprétation des courbes

- Plus la température augmente, plus les déformations augmentent pour l'enrobé à base de bitume pur.
- Pour l'enrobé modifié à 8 %, on observe que la recouvrance n'est pas totale pour la température 25°C mais elle est totale pour 40°C 60°C, donc l'effet de la poudre de caoutchouc est à ces températures précédentes (40°C et 60°C).

3-9-2 Influence de la teneur en poudre de caoutchouc NR

Les figures 3-40 à 3-42 présentent l'influence de la teneur sur le comportement des enrobés bitumineux (0 % et 8 %) au fluage recouvrance.

Les bétons bitumineux BB0 (0%), BB (8%) sont testés à trois températures : 25°C, 40°C et 60°C. et une contrainte appliquée égale à 0.42 Mpa.

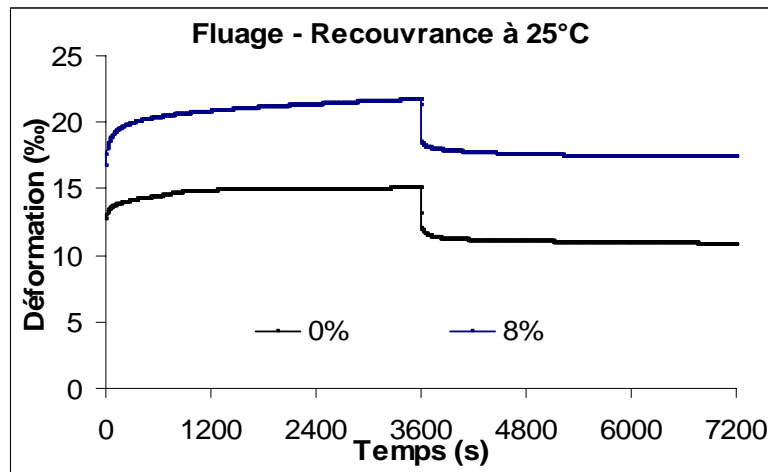


Fig 3-40 Influence de la teneur en NR sur le fluage des enrobés à 25°C.

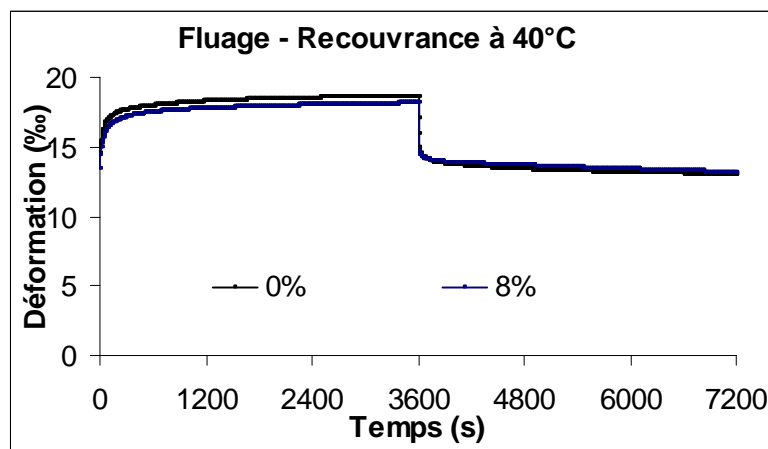


Fig 3-41 Influence de la teneur en NR sur le fluage des enrobés à 40°C.

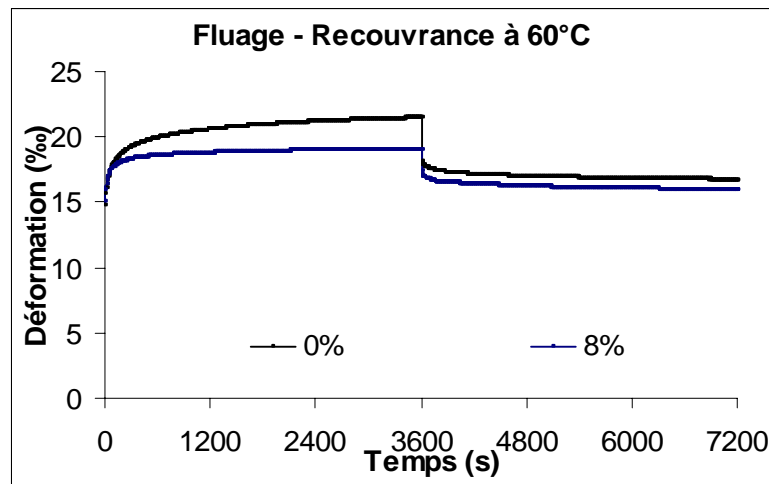


Fig 3-42 Influence de la teneur en NR sur le fluage des enrobés à 60°C.

Pour les essais à 25°C on observe :

- Les résultats obtenus montrent que la recouvrance n'est pas totale sauf pour l'enrobé à la base de bitume pur.
- L'enrobé bitumineux à base de bitume modifié à 8 % donne les déformations les plus élevés.
- L'écart entre les courbes des enrobés bitumineux modifiés à 8 % et pur est important.

Pour les essais à 40°C on observe :

- Les enrobés bitumineux modifiés à 8 % et pur montrent que la recouvrance est totale.
- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente des déformations les plus faibles dans la partie de fluage mais dans la partie de recouvrance n'a pas une déformation remarquable.

Pour les essais à 60°C on observe :

- Les résultats obtenus montrent que la recouvrance est totale sauf l'enrobés à base de bitume pur.
- L'écart entre les courbes des enrobés bitumineux modifiés à 8 % et pur dans la partie de fluage est grand par rapport à la partie de recouvrance.
- L'enrobé bitumineux à base de bitume modifié à 8 % donne les déformations les plus faibles.

3-9-3 Influence de la teneur en poudrette et de la température sur les déformations et module de rigidité

a) Déformation initiale

La figure 3-43 représente l'influence de la température sur les déformations initiales pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

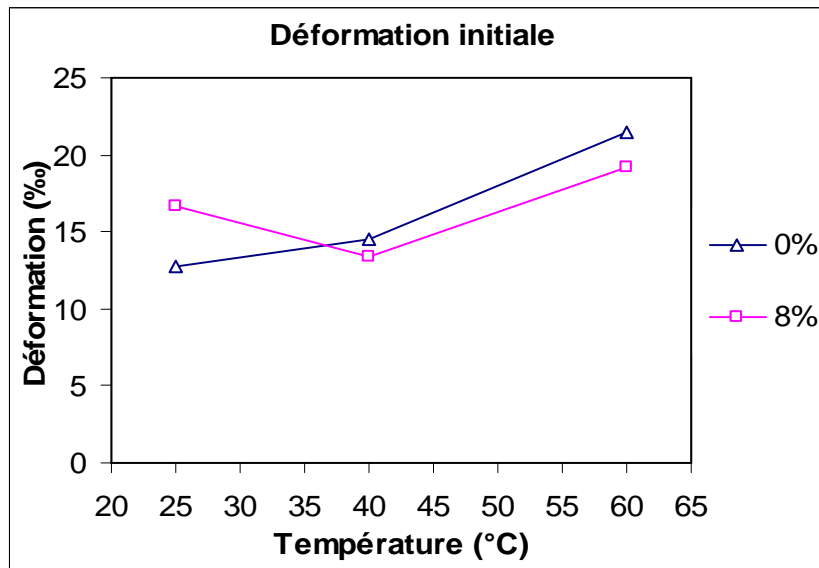


Fig 3-43 Variation des déformations initiales en fonction de la température.

D'après la figure ci-dessus on observe :

- L'enrobé bitumineux modifiés à 8 % de NR présente les déformations les plus faibles aux températures 40°C et 60°C et la déformation la plus élevée à 25°C.

Donc le béton bitumineux à base de bitume modifié à 8 % de NR est le plus résistant au chargement à courte durée aux températures 40°C et 60°C.

b) Déformation totale

La figure 3-44 représente l'influence de la température sur les déformations totales pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

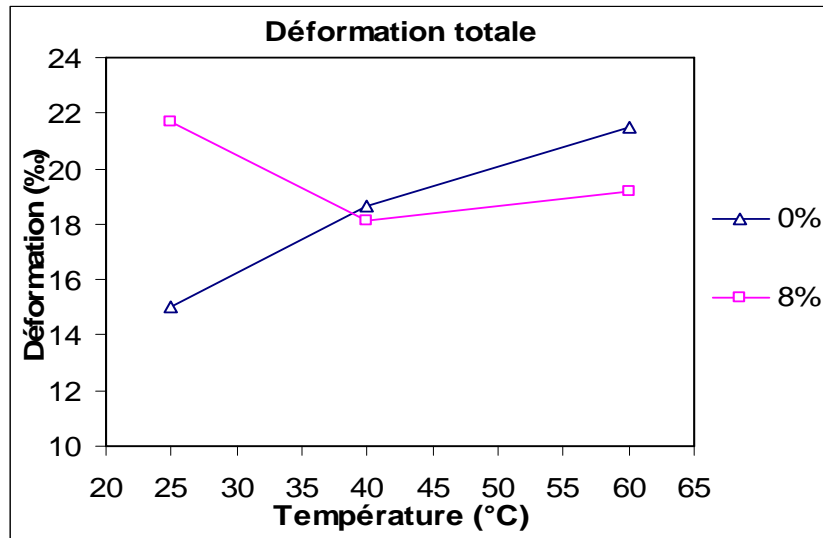


Fig 3-44 Variation des déformations totales en fonction de la température.

L'analyse des résultats de la figure précédente montre :

- Plus la température augmente, plus les déformations sont élevées pour le béton bitumineux ordinaire.
- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % de NR présente les déformations les plus faibles aux températures 40°C et 60°C.
- Le béton bitumineux à la base de bitume pur présente la déformation la plus faible à la température 25°C.

Donc le béton bitumineux à base de bitume modifié à 8 % de NR est le plus résistant au chargement à longue durée aux températures 40°C et 60°C.

c) Déformation finale

La figure 3-45 représente l'influence de la température sur les déformations finales pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

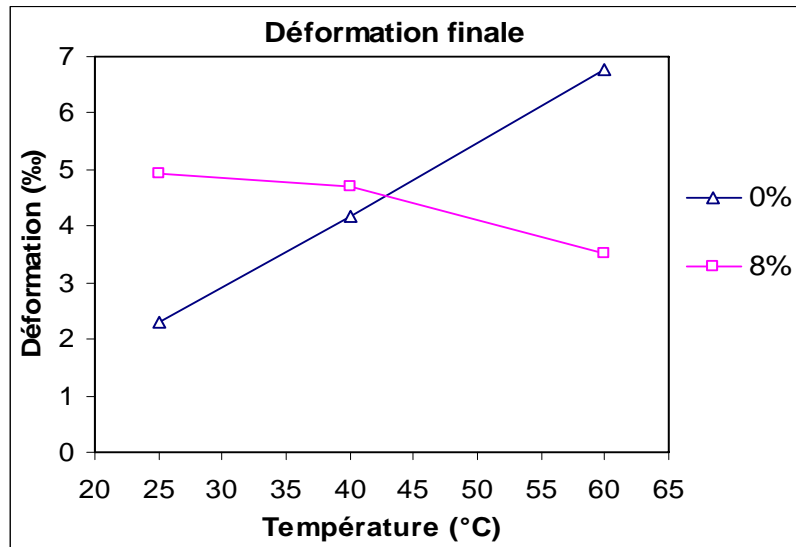


Fig 3-45 Variation des déformations finales en fonction de la température.

On remarque que :

- Plus la température augmente, plus les déformations finales diminuent pour le béton bitumineux modifié à 8 % de NR, le contraire pour l'enrobé à base de bitume pur.
- Le béton bitumineux modifié à 8 % présente les déformations finales les plus élevées pour les températures 25°C et 40°C, et la déformation la plus faible à la température 60°C.

d) Déformation réversibles

La figure 3-46 représente l'influence de la température sur les déformations réversibles pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

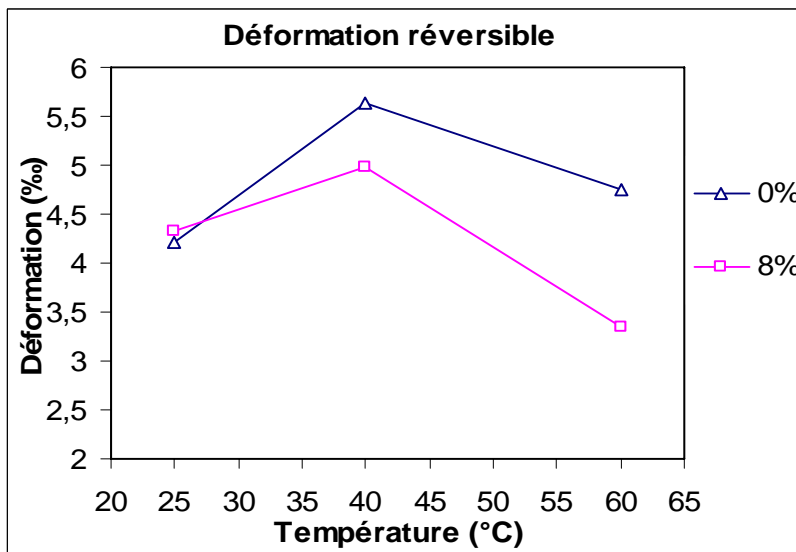


Fig 3-46 Variation des déformations réversibles en fonction de la température.

D'après la figure ci-dessus on observe que :

- L'enrobé ordinaire présente les déformations les plus élevés aux températures 40°C et 60°C.
- L'enrobé à base de bitume modifié à 8 % présente la déformation la plus élevée à 25°C.

On constate que l'enrobé bitumineux à base de bitume modifié à 8 % de NR présente une mauvaise élasticité aux températures 40°C et 60°C par rapport à l'enrobé ordinaire.

e) Déformation irréversibles

La figure 3-47 représente l'influence de la température sur les déformations irréversibles pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

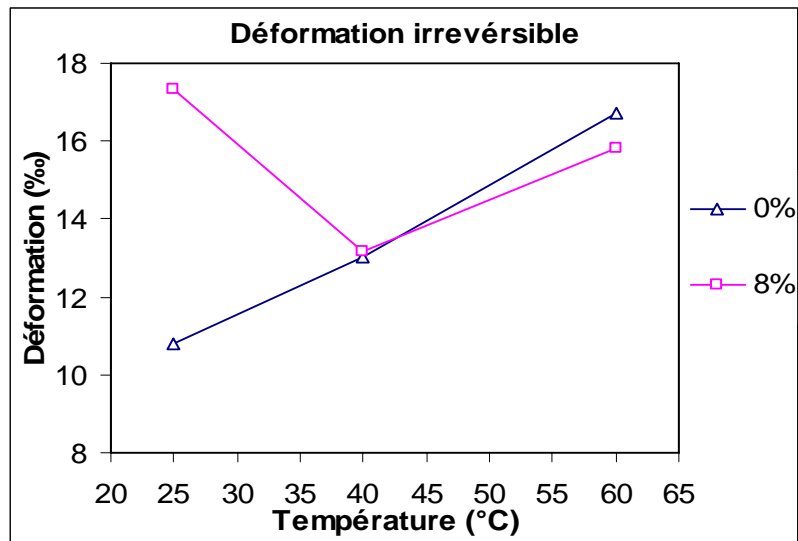


Fig 3-47 Variation des déformations irréversibles en fonction de la température.

L'analyse des résultats de la figure précédente montrent :

- L'enrobé ordinaire donne la déformation la plus faible avec une différence importante à 25°C.
- Le béton bitumineux modifié à 8 % donne la déformation la plus faible à 60°C.

Donc le béton bitumineux modifié à 8 % est le plus résistant à l'orniérage aux températures 60°C par contre le béton bitumineux ordinaire le plus résistant à 25°C et 40°C.

f) Taux de déformation de fluage

La figure 3-48 représente l'influence de la température sur les taux de déformations de fluage pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

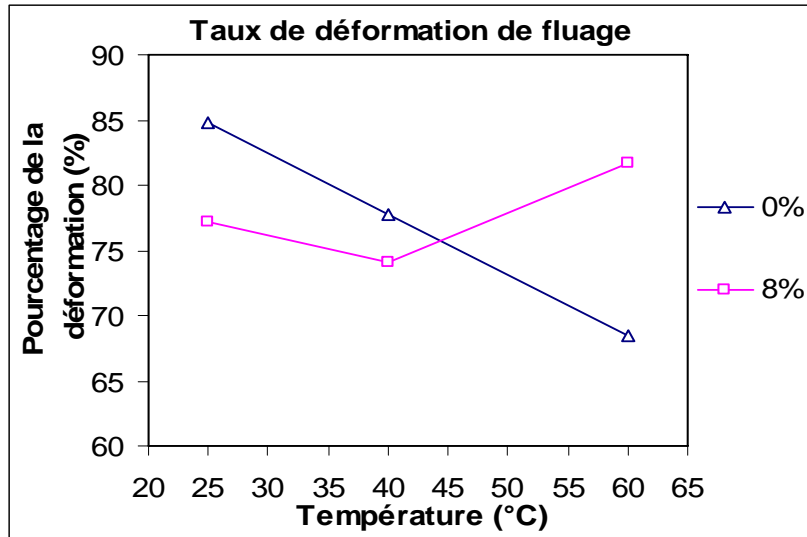


Fig 3-48 Variation des taux des déformations en fonction de la température.

On constate à partir de la figure 3-48 que :

- Plus la température augmente, plus le taux de déformation de fluage diminue pour le béton bitumineux ordinaire.
- A 25°C : L'enrobés bitumineux modifié à 8 % présente un rapport faible par rapport à l'enrobé ordinaire. Tous les enrobés, les 70 % de la déformation ont lieu principalement dans la phase initiale.
- A 40°C : l'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente un rapport faible que l'enrobé ordinaire, et la déformation initiale dépasse les 70 % de la déformation totale pour tous les enrobés.
- A 60°C : l'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente un rapport élevé que l'enrobé ordinaire, et la déformation initiale dépasse les 60 % de la déformation totale pour tous les enrobés.

L'ajout de la poudre de caoutchouc de NR améliore la résistance aux déformations de fluage aux températures 25°C et 40°C.

g) La recouvrance viscoélastique

La figure 3-49 représente l'influence de la température sur les recouvrances viscoélastiques pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

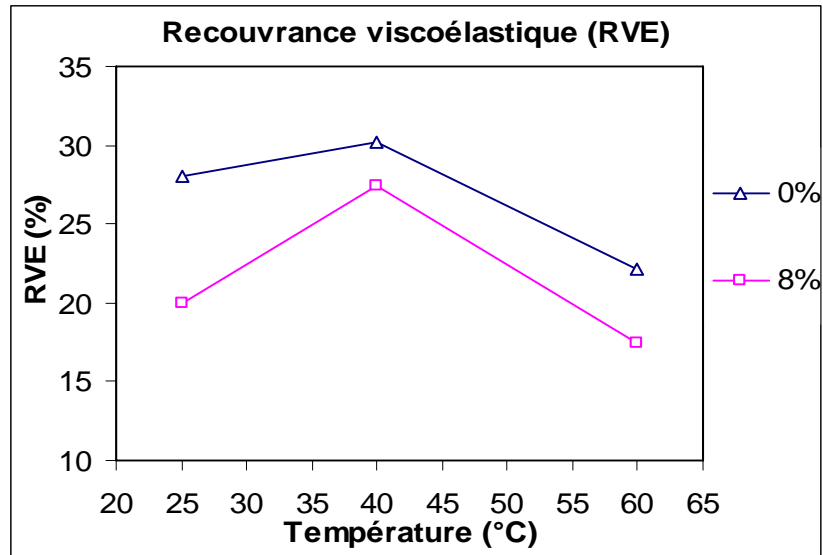


Fig 3-49 Variation des recouvrances viscoélastiques en fonction de la température.

D'après les résultats de la figure on observe :

- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % donne les valeurs du recouvrement viscoélastique plus faibles que l'enrobé ordinaire.

h) Module de rigidité initiale

La figure 3-50 représente l'influence de la température sur les modules de rigidités initiales pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

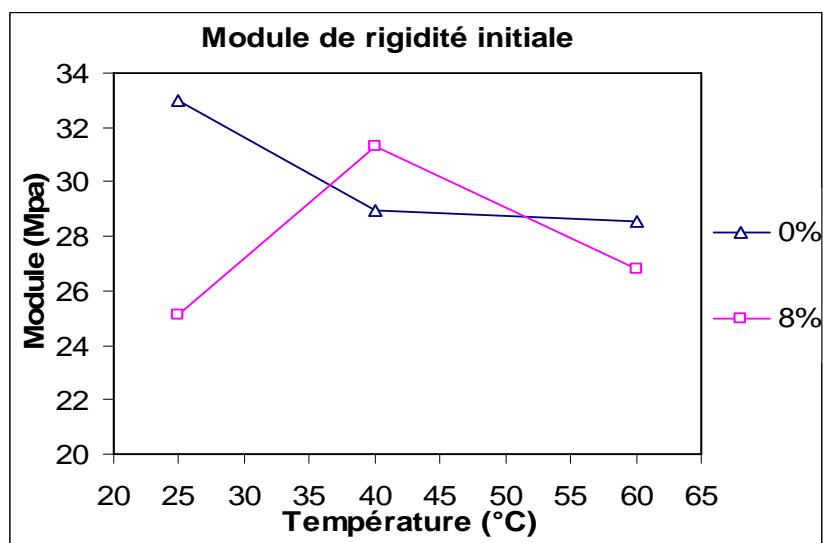


Fig 3-50 Variation des modules des rigidités initiales en fonction de la température.

La variation de la module de rigidité initial montre que :

- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % donne des valeurs du module de rigidité initiale plus faible que l'enrobé ordinaire à 25°C et 60°C.
- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente la valeur le plus élevé à 40°C.

La modification du bitume à 8 % apporte une amélioration des mélange bitumineux vis-à-vis le module de rigidité initiale à la température 40°C.

i) Module de rigidité totale

La figure 3-51 représente l'influence de la température sur les modules de rigidités totale pour l'enrobé ordinaire et modifié à 8 %.

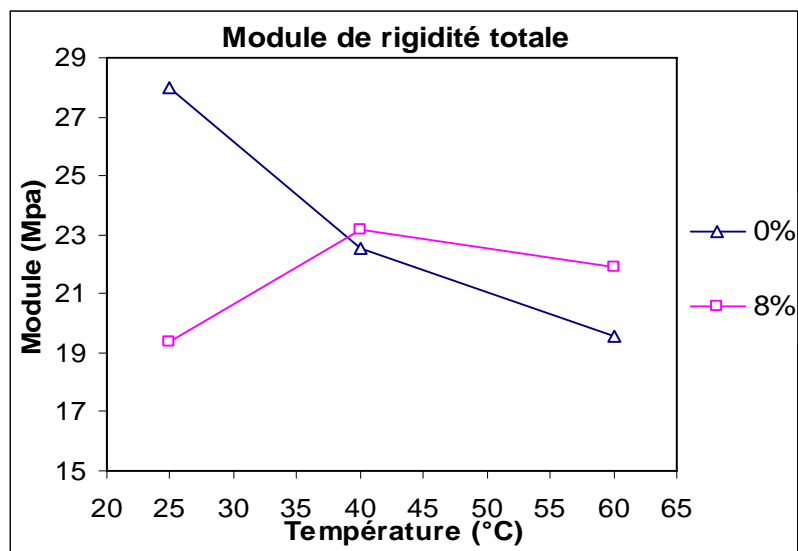


Fig 3-51 Variation des modules des rigidités totales en fonction de la température.

La variation de la module de rigidité totale montre que :

- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % donne des valeurs du module de rigidité totale plus faible que l'enrobé ordinaire à 25°C.
- L'enrobé bitumineux modifié à 8 % présente les valeurs les plus élevées à 40°C et 60°C.

La modification du bitume à 8 % apporte une amélioration des mélange bitumineux vis-à-vis le module de rigidité totale aux températures élevées (40°C et 60°C).

CONCLUSION GENERALE

Les sollicitations du trafic, les sollicitations climatiques, les phénomènes chimiques .Ces actions diverses, agissant simultanément sur le revêtement bitumineux conduisent aux dégradations couramment observées.

Plusieurs étude ont montre que le comportement du béton bitumineux dépend essentiellement du comportement du bitume, pour cette raison notre travail consiste à la modification de l'enrobé par la voie humide c'est-à-dire la modification du bitume par la poudrette de caoutchouc naturel NR afin :

- ✓ D'améliorer les performances du bitume pur.
- ✓ De valoriser les déchets industriels.
- ✓ D'optimiser les quantités et les coûts de réalisations.

Le présent travail s'est intéressé à étudier l'influence du chargement sur le comportement mécanique des enrobés bitumineux modifié à base de poudrette de caoutchouc naturel.

Ce travail a été mené au laboratoire des routes et aérodromes de la faculté de génie civil de l'USTHB (Université des Sciences et des Technologie Houari Boumediene), il est divisé en deux grandes parties à savoir :

- Une étude bibliographie sur le bitume pur, bitume modifiés, les polymères et les enrobés bitumineux, et synthèse des quelques travaux de recherche effectués sur la modification des enrobés bitumineux.
- Une étude partie expérimentale, comportait trois partie tel que :
 - Une étude du bitume pur, modifié et polymère
 - Une étude de Marshall (30 min, 24h) et traction indirecte (20°C, 25° C)
 - Une étude de fluage statique des enrobés pur et modifié a différent température (25°C ,40 °C ,60 °C) et différent chargement (0,14 MPa, 0,28 MPa, 0,42 MPa).

L'utilisation de la poudrette de caoutchouc s'est effectuée par le procédé humide. Nous avons d'abord modifié le bitume puis obtenu l'enrobé. Les observations suivantes ont été notées :

Le bitume

- La modification du bitume par la poudrette de caoutchouc naturel NR a amélioré les propriétés du bitume tels que la pénétrabilité, la susceptibilité thermique, le point de ramollissement et la ductilité.

L'essai Marshall

- La compacité augmente avec la teneur en poudrette de caoutchouc NR.
- Les enrobés bitumineux modifiés à 4 % et 8 % donnent les meilleures stabilités, fluage et résistance aux déformations permanentes par rapport aux autres mélanges.
- L'enrobés bitumineux modifiés à 6 % et 8 % donnent des meilleurs comportements en présence d'eau (Marshall après 24 h).

Traction indirecte

- la meilleure résistance à la traction indirecte est obtenue à 20°C par le béton bitumineux modifié à 6 % et à 25°C par celui à 2% de NR.

Fluage statique

- Une augmentation de la température se traduit par l'augmentation des déformations permanentes.
- Le béton bitumineux modifié à 8 % donne les meilleures performances vis-à-vis du fluage (déformation permanentes, recouvrance élastique) à 25°C et 40°C.

En perspective :

- Il serait intéressant d'utiliser le NR comme additif par la méthode sèche (Dry process) qui consiste à l'ajouter directement en centrale en même temps que les granulats et le bitume.
- Associer au NR un autre agent qui pourrait améliorer les performances des enrobés.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Ait 1994] Ait Mokhtar K., Influence de l'affinité liant hydrocarboné granulat sur les caractéristiques des mélanges hydrocarbonés. Thèse de Magister, IGC/USTHB, 1994.
- [Bég 2003] Alain Béghin, Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants bitumineux, thèse de doctorat, Université Paris 6, 2003.
- [Ben 2003] Bensbaa kamel, Etude rhéologique des liants modifiés, impact du vieillissement intégrant la démarche, haute qualité environnementale, thèse de magistère 2003, USTHB.
- [Brû 1986] Brûlé B., «Liants modifiés par les polymères pour les enduits et enrobés spéciaux» Rapport des Laboratoires, PC 6, 1986.].
- [Bul 2000] Bulletin d'information technique 2000, « Enrobés modifiés au caoutchouc ». Vol. 5, no 9.
- [Che 1996] Chebil S., Etude des liants modifiés par le noir de carbone et le charbon de bois pyrolytiques, sous produits de la décomposition thermique sous vide des pneus et du bois hors d'usage. Thèse de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 1996.
- [Cla 2001] Claire B, Jérémie D, Chef de projet: Guillaume P. Caractérisation des déchets, Unité Déchets et Sites Pollués Direction des Risques Chroniques décembre 2001.
- [Cor 1969] Corbett L.W. (1969), Composition of asphalt based on generic fraction using solvent deasphalting, elution adsorption chromatography and densimetric characterization, Analytical chemistry, 41, pp. 576-585
- [Dan 2006] Dang-Truc, N prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineux. Thèse de doctorat à l'ENPC 2006.
- [Les 2002] Lesueur Didier, la rhéologie des bitumes : Principe et modification. Vol 2 1-30 (2002).
- [Les 2009] Lesueur Didier, The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification, science direct 145 (2009) 42-82.
- [Don 1991] Dony A., Liants bitumes-polymères, études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Décembre 1991
- [Ola 2003] François Olard Comportement thermomécanique des Enrobés bitumineux à basses températures, Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2003, p 221.
- [Got 2000] Gottfried W. Ehrenstein, Fabienne Montagne : Matériaux polymères Structure, propriétés et applications ; HERMES Science Publications, Paris, 2000, ISBN 2-7462-0149-6.
- [Had 2007] Haddadi S, Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des Enrobés bitumineux .Thèse de Doctorat d'état, FGC/USTHB FGC/USTHB 2007.

- [Has 2002] Hassan BAAJ, Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traité aux liant hydrocarbure. Thèse de Doctorat Lyon 2002.
- [Jac 1986] Jacque B et Fernand P : Matériaux bitumineux spéciaux. Rapport général Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N° V144. Juil-Décembre 1986.
- [Jac] Jacques M et al, Enduit superficiel. Note d'information de la division chaussées terrassements de service d'étude technique des routes et autoroutes.
- [Jun 2004] Junod. A, ing. Dipl. EPF Prof A.-G. Dumont Formulation et optimisation des formules d'enrobés Mandat de recherche ASTRA 2000/421-2 Décembre 2004.
- [Kam 2001] Kamel H, Etude de l'action des bitumes modifiés sur le comportement des enrobés. Thèse de magister DGC/USTHB, 2001.
- [Kra 1980] Kraus G., Rollman K.W., Morphology and mechanical behaviour of bitumen modified with S.B. block polymers, Int. Rubber Conference Nürnberg, Germany, Sep. 1980.
- [Lev 1951] Levi, F., Pizetti, G. : Fluage – Plasticité – précontrainte. Edition Dunod, Paris 1951.
- [Mag 2009] Magramane D, Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification a base de polymère : Poudrette de caoutchouc, thèse de magister ENSTP 2009.
- [Mét 2001] Métiche S., Influence des paramètres de formulation sur la stabilité au fluage des sables bitumes et des bétons bitumineux, Thèse de Magister, USTHB, Alger, 2001.
- [Gui 2000] Ministère des travaux publics, Guide CTTTP « Recommandation sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaux », Alger 2000.
- [Oul 2005] Ould henia Mahdi, Modélisation et prédiction du comportement rhéologique des mélanges bitume caoutchouc. Thèse De Doctorat, Lausanne, EPFL 2005.
- [Oye 2006] Oyekunle. L.O, Certain Relationships between Chemical Composition and Properties of Petroleum Asphalts from Different Origin, Vol. 61 (2006), No. 3, pp. 433-441
- [Rec a] Recyc-Québec, les pneus hors d'usage, fiche technique.
- [Rec] « Recyclage des pneus hors d'usage au Canada » la transformation des pneus hors d'usage en produits à valeur ajoutée.
- [Rou 1999] Routes, « Les liants modifiés, les liants avec additifs et les bitumes spéciaux », AIPCR, N° 303 III – 1999.
- [Sao 2008] Saoudi N, Comportement rhéologique des bitumes modifiés au polymère (NBR) influence de la température sur la résistance et le fluage des enrobés bitumineux. Thèse de magister FGC/USTHB, 2008.
- [Shu 2002] Shunin. D.G, A. G. Filippova, N. A. Okhotina, A. G. Liakumovich, and Ya. D. Samuilov Possibilities of Production and Use of Rubber3Bitumen Compounds. Russian Journal of Applied Chemistry, Vol. 75, No. 6, 2002, pp. 1020-1023.
- [Sou 2009] Soudani K, Caractéristiques mécaniques et rhéologiques des enrobés bitumineux modifiés par des polymère- Impact sur l'environnement,2009.

- [Sin 2000] Toby Singleton, effects of rubber – bitumen interaction on the performance of impact absorbing asphalt. 2000 Society of Chemical Industry. All rights reserved LPS 107/2000, ISSN 1353-114X.
- [Via 2007] Via Bitume. Regroupement Professionnel des exploitants de centrale d'enrobage (RPECE) Bitume Québec. Vol 2 No 2 juin 2007.
- [Vin 2005] Vincent Domac M, Endommagement par fatigue des enrobes bitumineux en condition de trafic simulé et de température. Thèse de doctorat 2005. Université Bordeaux 1.
- [War 2003] Nicolas Ward, Caractérisation de nouveau bitume caoutchouc. Université de Sherbrooke 2003.
- [Yai 2004] Yaici N, Etude de l'influence de la propreté du sable sur les caractéristiques mécaniques et rhéologiques d'un enrobe bitumineux. Thèse de magister, FGC/USTHB,2004.
- [Yan 2001] Yann .L, Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux Étude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus, Expérimentation modélisation. Thèse de doctorat LNPC 2001.
- [Yves 2003] Yves, M.: Organic Materials in civil engineering, ISBN978-1-905209-11-8. Lavoisier 2003.

ANNEXES

1/ Températures de l'indice de pénétrabilité

Tableau 1. Températures de l'indice de pénétrabilité.

Classe de bitume	Température [C°]
20/30	25 – 30 – 35 – 40 - 45
40/50	20 - 25 – 30 – 35 – 40
60/70	15 – 20 - 25 – 30 – 35
80/100	10 - 15 – 20 - 25 – 30

2/ Calcul des vitesses des déformations

2.1 Pour un chargement de 0,14 MPa

a) Influence de la température

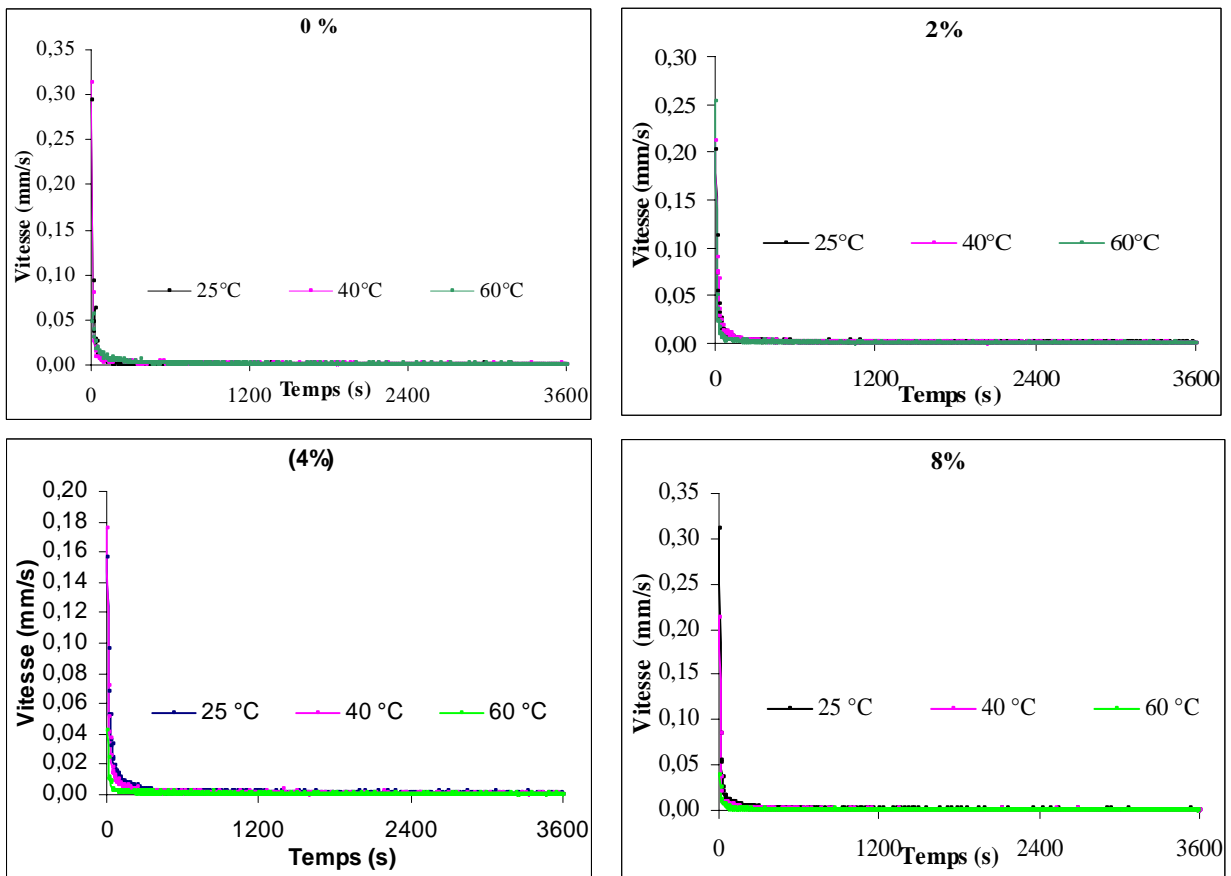


Fig 1. Influence de la température sur la vitesse de déformation aux différentes teneurs 0,14 Mpa.

b) Influence de la teneur en poudre de caoutchouc NR

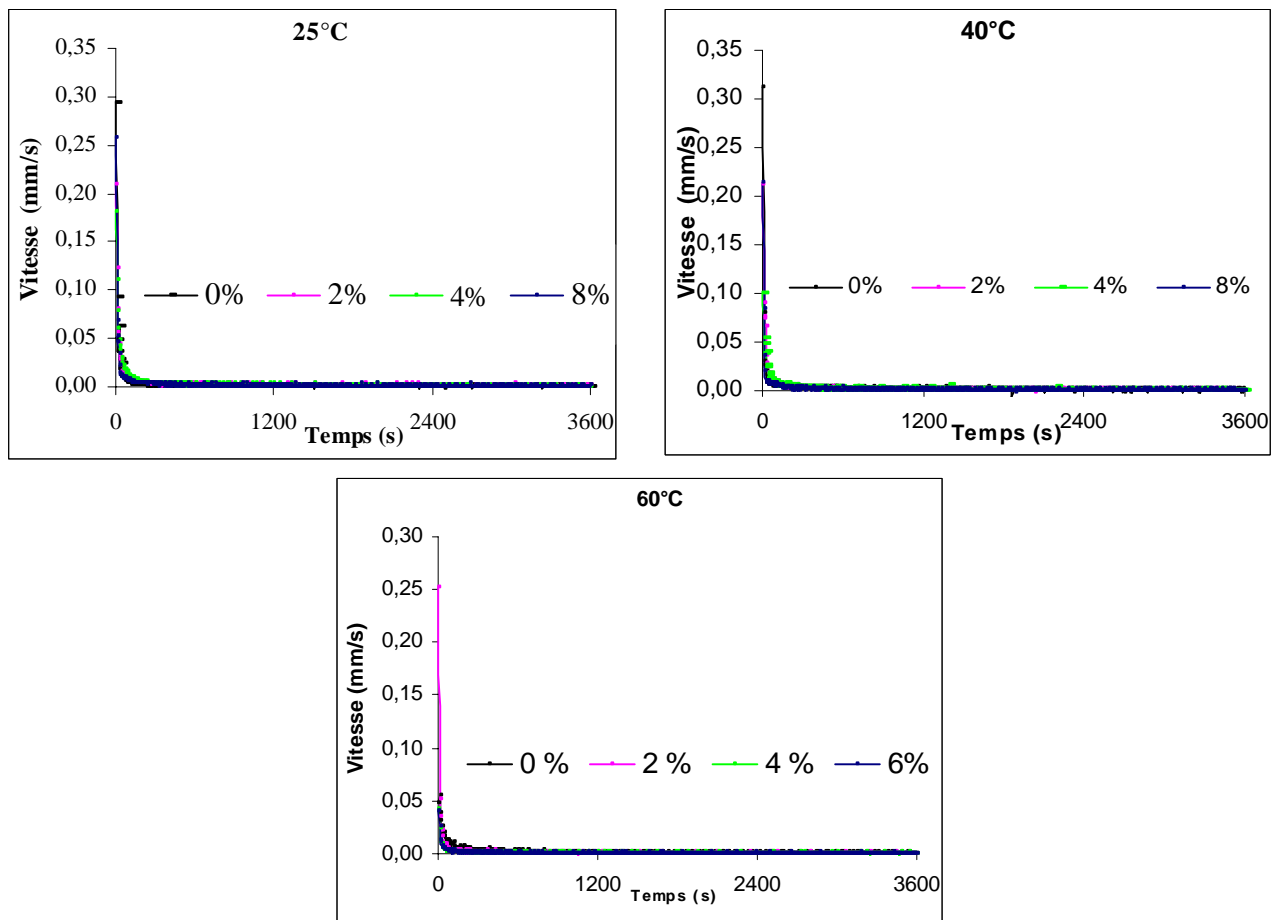


Fig 2. Influence de NR sur la vitesse de déformation aux différentes températures à 0,14 Mpa.

2.2 Pour un chargement de 0,28 MPa

a) Influence de la température

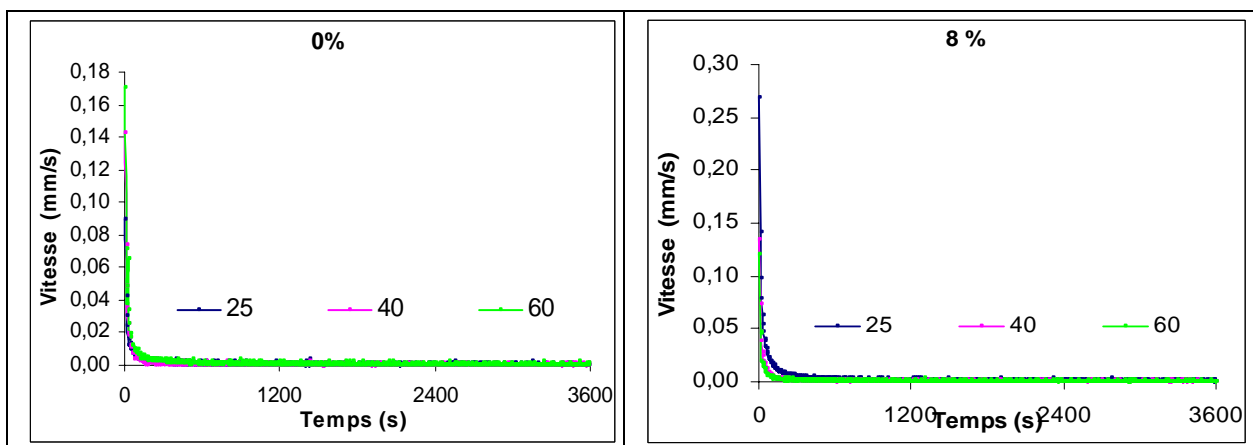


Fig 3. Influence de la température sur la vitesse de déformation aux différents teneurs 0,28 Mpa.

b) Influence de la teneur en poudre de caoutchouc NR

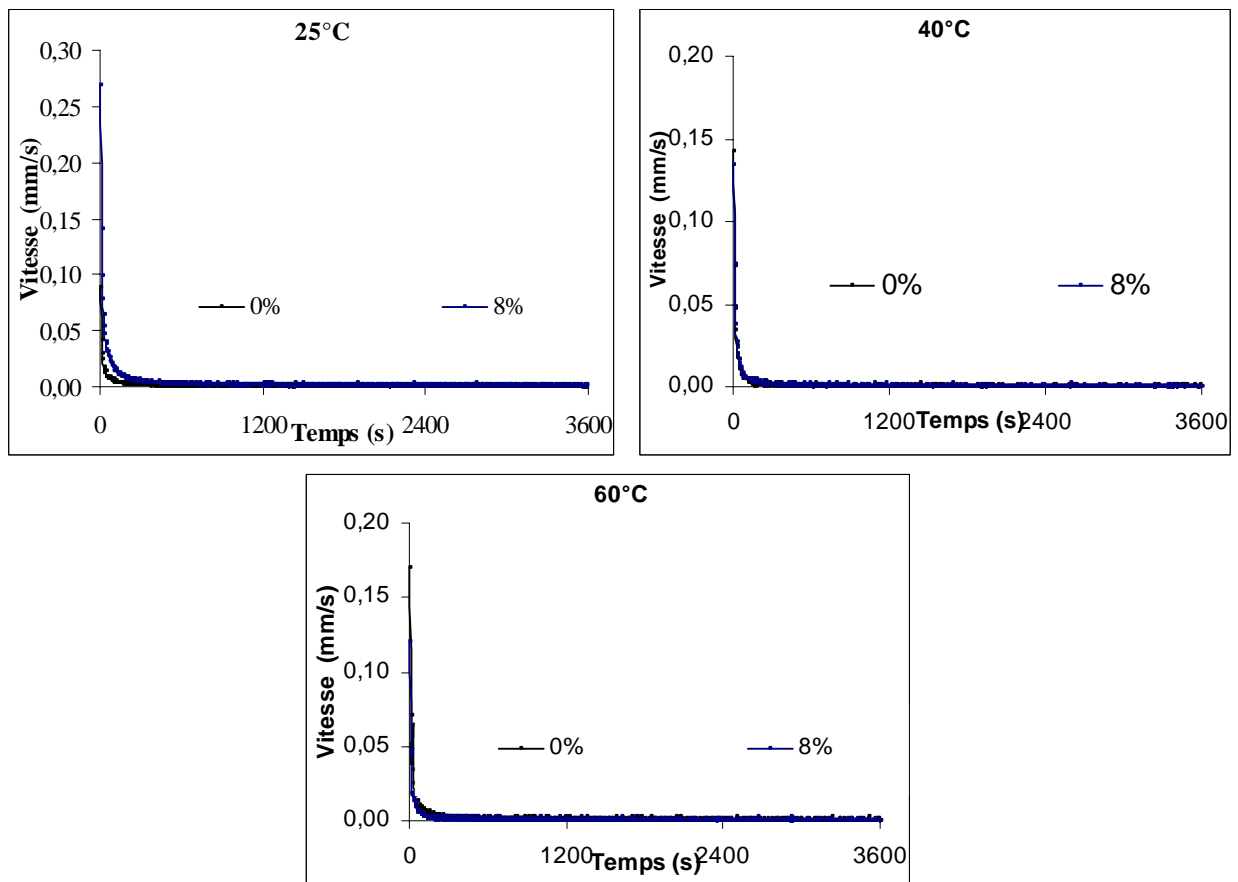


Fig 4. Influence de NR sur la vitesse de déformation aux différentes températures à 0,28 Mpa.

2.2 Pour un chargement de 0,42 MPa

a) Influence de la température

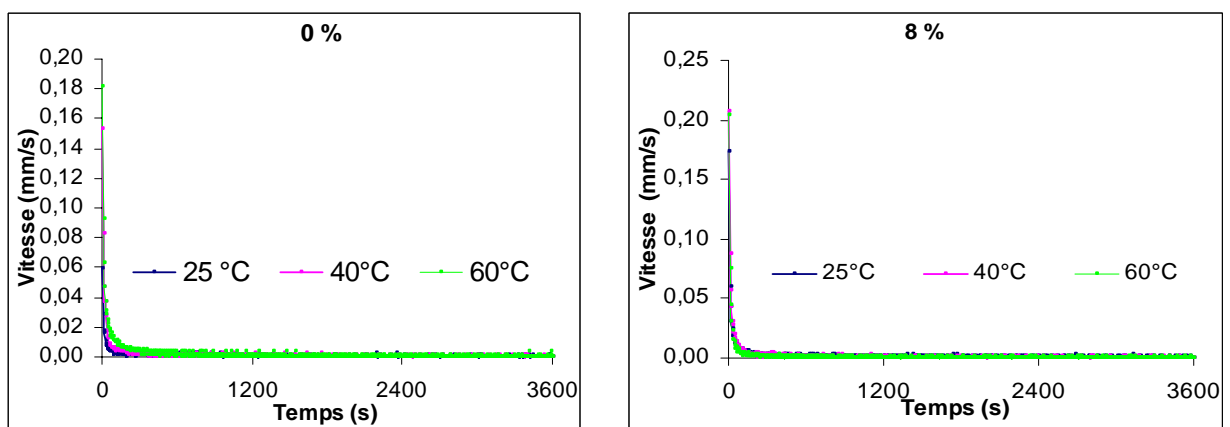


Fig 5. Influence de NR sur la vitesse de déformation aux différentes températures à 0,42 Mpa.

b) Influence de la teneur en poudre de caoutchouc NR

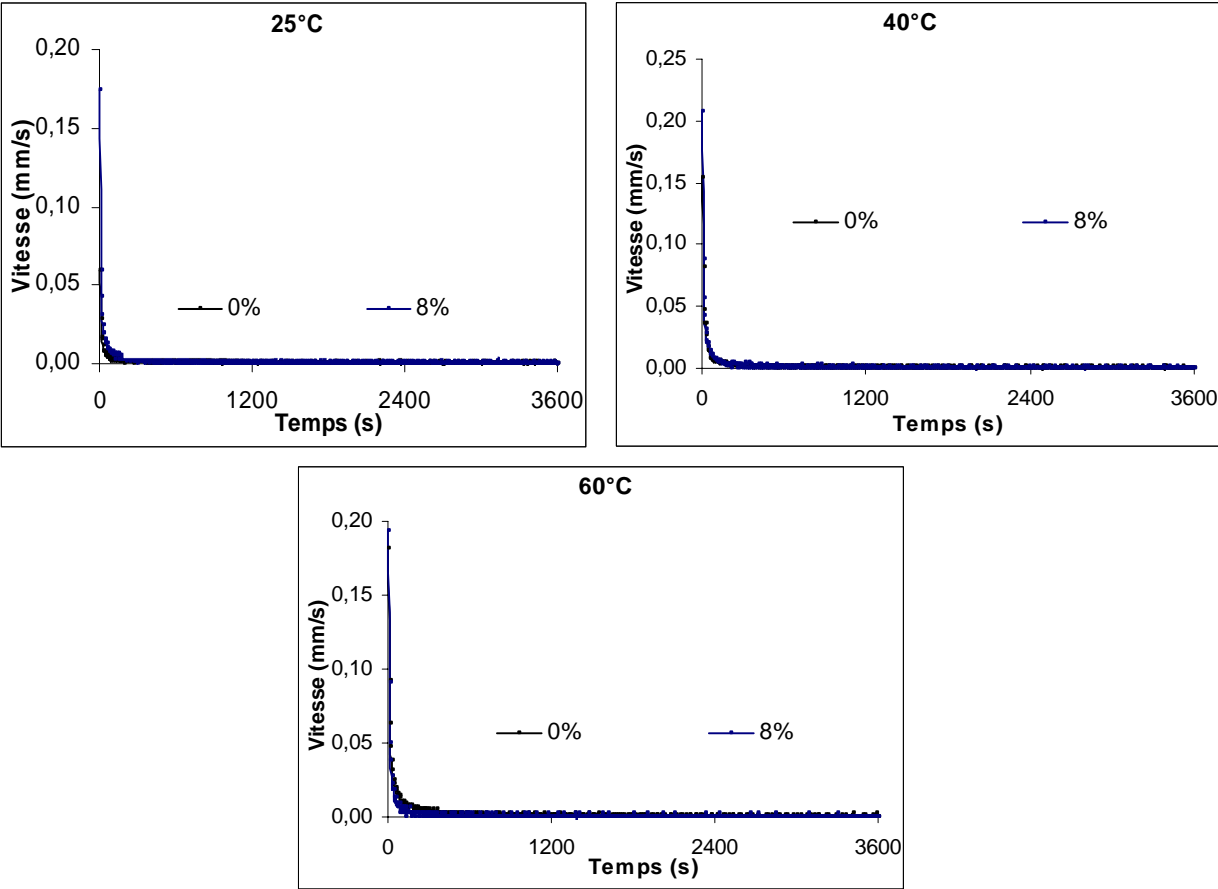


Fig 6.Influence de NR sur la vitesse de déformation aux différentes températures à 0,42 Mpa.