

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES TRAVAUX PUBLICS
E.N.S.T.P
DIRECTION ADJOINTE POST-GRADUATION ET RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de

Magister en Génie Civil

Spécialité : Géotechnique Routière

**AMELIORATION DES PERFORMANCES DES ENROBES
BITUMINEUX PAR LA MODIFICATION A BASE DE
POLYMERES : POUDRETTE DE CAOUTCHOUC**

Présenté par :

MAGRAMANE Djamel

Ingénieur d'Etat en Travaux Publics

Diplômé de l'Ecole Nationale des Travaux Publics d'Alger - ENTP

Soutenu le 02/07/2009 devant le jury composé de :

A. ZERZOUR	Maître de conférences / E.N.S.T.P	Président
K. AIT MOKHTAR	Maître de conférences /USTHB	Directrice de mémoire
Z. DERRICHE	Professeur / E.N.S.T.P	Directrice de mémoire
B. GUETTACHE	Docteur / E.N.S.T.P	Examineur
S. HADDADI	Maître de conférences /USTHB	Examineur
M.N. OUDJIT	Maître de conférences /USTHB	Examineur
Z. DJIDJELI	Directeur de la recherche au MTP	Invité

*Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics – ENSTP
Rue Sidi Garidi – Vieux Kouba – Alger*

Dédicaces

A mes chers parents,

A mon frère Sofiane que Dieu ait son âme et le compte parmi ses fidèles au paradis,

A ma femme Nadia et mon fils Sofiane,

A mes frères Rabah, Kamel et Mohamed,

A mes soeurs Zakia, Dalila et Oum El Hacene,

A mes neveux,

A toute ma famille,

A tous mes amis.

Remerciements

*J'*adresse mes sincères remerciements aux personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de magister.

Je tiens à exprimer, en premier lieu, ma gratitude et ma reconnaissance à Madame K. Ait Mokhtar, Maître de conférences à l'USTHB qui m'a encadré et guidé pour l'accomplissement de ce travail, pour ses conseils instructifs et son soutien moral pendant ces années, ainsi que pour l'aide permanente et efficace qu'elle n'a cessé de me prodiguer.

Je remercie très sincèrement, Madame Z. Derriche, Professeur à l'ENSTP, pour son soutien moral et intellectuel, ainsi que pour son apport très enrichissant dans ce travail.

Il m'est agréable aussi d'exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements aux personnes qui m'honorent en étant membre du jury, à noter :

- Monsieur A. Zerzour, Directeur de l'ENSTP, qui ma fait l'honneur d'accepter la présidence de ce jury.
- Monsieur, B. Guettache, Docteur à l'ENSTP qui a bien voulu être examinateur,
- Monsieur, S. Haddadi, Maître de conférence à l'USTHB, qui n'a pas hésité à accepter de me faire l'honneur d'apporter sa contribution productive à la discussion des résultats de ce travail.
- Monsieur M.N. Oudjit, Maître de conférence à l'USTHB qui a bien voulu être membre du jury.
- Monsieur Z. Djidjeli, Directeur de la recherche au MTP d'avoir accepté d'être membre du jury.

Aussi, un grand remerciement à l'équipe du Laboratoire Route et Aéroport de la faculté Génie Civil, USTHB, en particulier S. Haddadi, K. Ait Mokhtar, N. Saoudi, S. Saoula, D. Benour, où la partie expérimentale a été réalisée.

Et pour finir, mes remerciements vont à Madame D. MEDDAD et à mes collègues de l'Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics qui par leurs aides et leurs encouragements ont fortement contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

L'objectif du présent travail est de déterminer l'influence de la modification des bitumes avec la poudrette de caoutchouc d'une part sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du bitume et des enrobés et d'autre part sur le comportement rhéologique au fluage statique des enrobés bitumineux.

L'étude montre que :

- La modification du bitume avec du caoutchouc naturel (NR) améliore ses caractéristiques physiques et mécaniques (pénétrabilité, TBA, ductilité, susceptibilité thermique, etc.).
- La modification des bitumes améliore le comportement des enrobés bitumineux. Cette amélioration se traduit par :
 - § Une augmentation de la stabilité, la compacité, et le quotient Marshall,
 - § Une diminution du fluage Marshall,
 - § Une augmentation de la résistance aux déformations de fluage,
 - § Une atténuation de la déformation initiale de l'enrobé bitumineux.

En plus de l'amélioration des caractéristiques des liants bitumineux qui se répercutera sur la durabilité des structures bitumineuses, l'environnement sera par cette pratique préservé par la valorisation des déchets industriels notamment les pneus usagés.

Mots Clés : Bitume, Poudrette de caoutchouc, Caoutchouc naturel NR, Enrobés bitumineux, Marshall, Fluage.

Abstract

The objective of this work is to determine the influence of the modification of the bitumen with the rubber fine powder on the one hand on the physical properties, chemical and mechanics of the bitumen and the bituminous mix and on the other hand on rheological behaviour with the static creep of the bitumen binders.

The study shows that :

- The modification of the bitumen with Natural Rubber (NR) improves its physical and mechanical characteristics (penetrability, TBA, ductility, thermal susceptibility, etc).
- The modification of the bitumens improves the behavior of the bitumen binders. This improvement is translated by :
 - § An increase in stability, compactness and the Marshall quotient,
 - § A reduction in Marshall Creep,
 - § An increase in resistance to the deformations of creep,
 - § An attenuation of the initial deformation of the bitumen binder.

In addition to the improvement of the characteristics of the bitumen binders which will be reflected on the durability of the bituminous structures, the environment by this practice will be preserved by the valorisation of the industrial waste in particular the worn tires.

Key Words Bitumen, rubber Poudrette, Natural rubber NR, bitumen Binders, Marshall, Creep.

المخلص

الهدف المنشود من هذه الدراسة هو تحديد تأثير تعديل الزفت مع مسحوق المطاط على الخصائص الفيزيائية والكيميائية والميكانيكية للزفت والإسفلت من ناحية، ومن ناحية أخرى على السلوك الريولوجي للتشوه الساكن للإسفلت.

وتشير الدراسة إلى أن :

• تعديل الزفت مع المطاط الطبيعي (NR) يحسن الخصائص الفيزيائية والميكانيكية (الاختراق، TBA،

الليونة، وقابلية التمدد الحراري، الخ) ..

• تعديل الزفت يحسن سلوك الإسفلت وينعكس هذا التحسين على :

■ زيادة في الاستقرار، الرص و معامل مارشال،

■ انخفاض تميع مارشال،

■ زيادة مقاومة تشويه التميع،

■ تخفيض التشوه الأولي للإسفلت.

وبالإضافة إلى تحسين خصائص الإسفلت والتي ستؤثر على متانة الهياكل الإسفلتية، فإن البيئة هي المستفيد الثاني من

إعادة معالجة النفايات الصناعية بما فيها إطارات السيارات المستعملة.

ملخص الدراسة: الزفت، مسحوق المطاط، المطاط الطبيعي (NR) ، الإسفلت ، مارشال، التميع.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	17
Partie 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	
Chapitre 1 : LE BITUME	21
1.1. Généralités sur les bitumes	21
1.2. Origines des bitumes	21
1.3. Fabrication des bitumes	22
1.3.1. La distillation	22
1.3.2. L'extraction (Désasphaltage)	23
1.3.3. Le Soufflage	23
1.3.4. Le Craquage	23
1.4. Composition des bitumes	24
1.5. Structure colloïdale du bitume	26
1.6. Caractérisation des bitumes	29
1.6.1. Les analyses physico-chimiques	29
1.6.1.1. Méthodes de séparation des bitumes	29
1.6.1.2. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)	31
1.6.2. Les caractéristiques mécaniques	32
1.6.3. Les caractéristiques rhéologiques	37
1.7. Relations entre composition chimique et rhéologie	42
1.8. Propriétés adhésives des bitumes	42
1.8.1. Introduction	42
1.8.2. Différents types d'adhésivité	43
1.8.2.1. L'adhésivité active	43
1.8.2.2. L'adhésivité passive	43
1.9. Conclusion	44
Chapitre 2 : LES ENROBES BITUMINEUX	45
2.1. Généralités	45
2.2. Granulats	45
2.3. Les structures de chaussées	48
2.3.1. Introduction	48
2.3.2. Influence des actions appliquées à la chaussée	48
2.4. Grandes classes de comportement des enrobés bitumineux	50
2.5. Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux bitumineux	51
2.5.1. Susceptibilité thermique et cinétique	51
2.5.2. Rôle des contraintes de confinement	52
2.5.3. Déformations permanentes	53

2.6. Les essais sur les enrobés bitumineux	55
2.7. Conclusion	62
Chapitre 3 : LES POLYMERES	63
3.1. Introduction	63
3.2. Agents modifiants	63
3.2.1. Polymères thermodurcissables	64
3.2.2. Polymères thermoplastiques	64
3.2.2.1. Les élastomères	64
3.2.2.2. Les plastomères	65
3.2.3. Le latex	66
3.2.3.1. Caoutchouc naturel (NR)	66
3.2.3.2. Le caoutchouc styrène butadiène (SBR)	66
3.2.3.3. Le polychloroprène (CR)	66
3.2.4. Poudrette de Caoutchouc	67
3.2.4.1. Le pneumatique	67
3.2.4.2. Composition chimique des pneumatiques	68
3.2.4.3. Production de la poudrette de caoutchouc	69
3.3. Conclusion	70
Chapitre 4 : LES BITUMES POLYMERES	71
4.1. Introduction	71
4.2. Objectifs de la modification	71
4.3. Notions de compatibilité	71
4.4. mécanisme de la modification	73
4.5. Fabrication des bitumes polymères	76
4.5.1. Procédé humide	76
4.5.2. Procédé sec	76
4.6. Caractérisation des bitumes polymères	77
4.6.1. Analyses physico-chimiques	77
4.6.2. Indicateurs traditionnels pour la caractérisation des liants modifiés	77
4.6.3. Essais spécifiques aux liants modifiés	78
4.7. domaines d'application des bitumes polymères	79
4.7.1. Les enduits superficiels	79
4.7.2. Enrobés minces	79
4.7.3. Enrobés drainants	80
4.7.4. Enrobés à haut module en liants modifiés	80
4.7.5. Chapes d'étanchéité, membranes antifissures	81
4.8. Conclusion	82

Chapitre 5 : LES BITUMES CAOUTCHOUCS	83
5.1 Introduction	83
5.2. Procédés de fabrication	83
5.2.1 Procédé humide : Wet Process	83
5.2.2 Procédé sec : Dry Process	86
5.3. Influence des paramètres de fabrication sur les caractéristiques physico-chimiques du bitume - caoutchouc	87
5.4. Applications du bitume – caoutchouc dans le domaine routier	89
5.4.1. Colmatages des fissures	89
5.4.2. Enduits superficiels	89
5.4.3. Enrobé bitumineux à chaud	89
5.4.4. Emulsions	91
5.5. Conclusion	91
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	92
Partie 2 : ETUDE EXPÉRIMENTALE	
Chapitre 1 : LES MATERIAUX D'ETUDE	95
1.1. Les granulats	95
1.1.1. Origines des granulats	95
1.1.2. Analyse chimique sommaire	95
1.1.3. Analyse granulométrique	96
1.1.4. Caractéristiques des granulats	97
1.2. Bitume	98
1.2.1. Caractéristiques du bitume	98
1.2.2. Susceptibilité thermique	99
1.2.3. Caractérisation du bitume par FTIR	99
1.3. La poudrette de caoutchouc	100
1.3.1. Caractéristiques de la poudrette	101
1.3.2. Caractérisation du NR par FTIR	102
Chapitre 2 : LE BITUME MODIFIE	104
2.1. Nomenclature des matériaux	104
2.2. Fabrication du bitume caoutchouc	104
2.2.1. Principe et matériels	104
2.2.2. Mode opératoire	105
2.3. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur la pénétrabilité du bitume	106
2.3.1. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité	106
2.3.2. Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité	107
2.3.3. Variation de la pénétrabilité du bitume modifié par rapport au bitume pur	107

2.4. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur la température bille et anneau du bitume	109
2.4.1. Influence du temps de malaxage sur la température bille et anneau	109
2.4.2. Influence de la teneur en NR sur la température bille et anneau	110
2.4.3. Variation du point de ramollissement du bitume modifié par rapport au bitume pur	110
2.5. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur la susceptibilité thermique des bitumes	111
2.5.1. Influence du temps de malaxage sur l'indice de pénétrabilité « IP »	112
2.5.2. Influence de la teneur en NR sur l'indice de pénétrabilité « IP »	113
2.6. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur la ductilité du bitume et le module de rigidité	114
2.6.1. Influence du temps de malaxage sur la ductilité	114
2.6.2. Influence de la teneur en NR sur la ductilité	115
2.6.3. Influence de la teneur de la poudrette NR sur le module de rigidité des bitumes	115
2.7. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur le pourcentage d'Asphaltènes des bitumes	117
2.7.1. Influence du temps de malaxage sur le pourcentage d'Asphaltènes	117
2.7.2. Influence de la teneur en NR sur le pourcentage d'Asphaltènes	118
2.8. Etude des bitumes modifiés au vieillissement	119
2.9. Conclusion	121
Chapitre 3 : ETUDE DE L'ENROBE BITUMINEUX	122
3.1. Etude de la formulation	122
3.2. Influence de l'ajout du NR sur les caractéristiques Marshall	124
3.2.1. Nomenclature des matériaux	125
3.2.2. Résultats des essais	125
3.2.3. Conclusion	128
3.3. Etude Fluage - Recouvrance	129
3.3.1. Généralité	129
3.3.2. Appareil utilisé	129
3.3.3. Conditions particulières de l'essai	130
3.3.4. Mode opératoire	130
3.3.5. Définition des paramètres de l'essai	131
3.3.6. Résultats de l'essai de fluage - recouvrance	132
3.3.6.1. Influence de la température	132
3.3.6.2. Influence de la teneur en poudrette de caoutchouc NR	134
3.3.6.3. Influence de la teneur en poudrette et de la température sur les déformations	136
3.3.6.4. Influence de la teneur en poudrette et de la température sur les modules de rigidités des enrobés bitumineux	144
3.3.7. Conclusion	146

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE	147
CONCLUSION GENERALE	148
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	152
ANNEXES	155

LISTE DES FIGURES

Partie 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure 1.1. Schématisation de la composition d'un pétrole brut	22
Figure 1.2. Principe de fabrication du bitume	24
Figure 1.3. Composition des bitumes	25
Figure 1.4. Macrostructure des asphaltènes selon le modèle Yen	26
Figure 1.5. Etat colloïdal des bitumes	26
Figure 1.6. Schématisation de la structure colloïdale	27
Figure 1.7. (a) : Structure colloïdale de type "Sol" (Micelles fortement peptisées) et (b) : structure colloïdale de type "Gel" (Micelles formant un réseau	27
Figure 1.8. Schéma de l'extraction aux solvants sélectifs	29
Figure 1.9. Chromatographie d'adsorption d'après Corbett	30
Figure 1.10. <i>Chromatographie sur gel perméable sur bitumes</i>	30
Figure 1.11. Séparation en groupes génériques par chromatographie IATROSCAN en fonction du temps d'élution	31
Figure 1.12. Spectre infrarouge d'un bitume modifié par un polymère SBS	32
Figure 1.13. Essai de pénétrabilité pour le bitume.	33
Figure 1.14. Détermination du point de ramollissement	33
Figure 1.15. Principe de l'essai de Ductilité	34
Figure 1.16. Principe de l'essai de Température Fraass	35
Figure 1.17. Principe de l'essai RTFOT.	35
Figure 1.18. Principe de l'essai PAV.	36
Figure 1.19. Modèle Maxwell (a) et de Voigt-Kelvin (b).	38
Figure 1.20. Définition de la viscosité.	39
Figure 1.21. Comportement des bitumes.	39
Figure 1.22 : Variation du module de rigidité en fonction du temps d'application de la charge et de la température.	40
Figure 1.23. Classement des essais mécaniques sur le liant.	41
Figure 1.24. Représentation schématique de l'énergie de cohésion et d'adhésion.	42
Figure 1.25. Organigramme général de l'étude de l'adhésivité.	43
Figure 1.26. Classification simplifiée des roches en fonction de la teneur en silice (SiO ₂)	47
Figure 1.27. Constitution d'une structure de chaussée type.	48
Figure 1.28. Schématisation des sollicitations induites par le trafic.	49
Figure 1.29. Schématisation des sollicitations induites par la température.	49
Figure 1.30. Comportement "type" des bétons bitumineux,	50
Figure 1.31. Isothermes du module complexe.	51
Figure 1.32. Module complexe dans l'espace de Black.	52
Figure 1.33. Essais de fluage statique.	52
Figure 1.34. Principe de l'essai Duriez	55

Figure 1.35. Principe de l'essai Marshall	55
Figure 1.36. Principe du compactage à la presse à cisaillement giratoire PCG	56
Figure 1.37. Droite de compactage PCG	56
Figure 1.38. Principe de l'essai de compression diamétrale	57
Figure 1.39. Principe de l'essai d'orniérage	57
Figure 1.40. Principe de l'essai de traction directe	58
Figure 1.41. Résultats classiques pour l'essai de traction directe sur enrobés	58
Figure 1.42. Principe de l'essai de compression cyclique uniaxial sous confinement	58
Figure 1.43. variation de la déformation relative en fonction du temps	58
Figure 1.44. Représentation des contraintes exercées sur l'éprouvette dans le cas d'un essai de fluage dynamique	59
Figure 1.45. Exemple de courbe de fluage dynamique	59
Figure 1.46. a) Exemple d'isothermes	60
b) Translation isothermes le long de l'axe des temps de charge	
Figure 1.47. Exemple d'une courbe maîtresse à 15°C	60
Figure 1.48. Exemple d'un essai de fatigue	61
Figure 1.49. Essai de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales	61
Figure 1.50. Structure du SBS.	64
Figure 1.51. Schéma d'un pneumatique	68
Figure 1.52. Structures des bitume polymères : a) compatible, b) incompatible.	72
Figure 1.53. Effet de la modification polymère sur la structure colloïdale du bitume.	72
Figure 1.54. Morphologie du bitume polymère en fonction de la teneur en polymère de type SBS.	73
Figure 1.55. Influence de la teneur en polymère sur le taux de gonflement.	74
Figure 1.56. Mécanisme de la dispersion d'un polymère de type SBS dans le bitume.	75
Figure 1.57. Mode de fabrication d'un bitume polymère.	76
Figure 1.58. Microstructure d'un bitume polymère	78
Figure 1.59. Interprétation du processus d'élaboration du bitume caoutchouc.	83
Figure 1.60. La poudrette de caoutchouc sous microscope optique.	84
Figure 1.61. Chaîne de fabrication de bitume caoutchouc non stockable	84
Figure 1.62. Courbe de viscosité en fonction du temps de mélange	85
Figure 1.63. Chaîne de fabrication de bitume caoutchouc stockable – Procédé Beugnet.	85
Figure 1.64. Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction du temps de malaxage.	87
Figure 1.65. Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction du taux de cisaillement au malaxage.	88
Figure 1.66. Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction de la température de malaxage.	88

Partie 2 : ETUDE EXPÉRIMENTALE

Figure 2.1. Courbe granulométrique des fraction 0/3, 3/8, 8/15.	97
Figure 2.2. Variation de la pénétrabilité en fonction de la température	99
Figure 2.3. Résultats du Spectre FTIR du bitume étudié	100
Figure 2.4. La poudrette de caoutchouc NR sous une loupe	100
Figure 2.5. Courbe granulométrique de la poudrette de caoutchouc (NR).	101
Figure 2.6 ; Résultat du Spectre FTIR de la poudrette	102
Figure 2.7, Schéma de l'appareillage servant à fabriquer le bitume caoutchouc	105
Figure 2.8, Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité à 25 °C	106
Figure 2.9, Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité à 25 °C	107
Figure 2.10, Variation de la pénétrabilité en fonction de la teneur en NR courbe (a)] et Variation de la pénétrabilité en fonction la durée de malaxage [courbe (b)].	108
Figure 2.11, Influence du temps de malaxage sur le point de ramollissement TBA	109
Figure 2.12, Influence de la teneur en NR sur le point de ramollissement	110
Figure 2.13, la variation du point de ramollissement en fonction de la teneur en NR courbe (a) et la variation du point de ramollissement en fonction la durée de malaxage courbe (b).	111
Figure 2.14. Variation de la pénétrabilité en fonction de la température en coordonnées semi-logarithmique	112
Figure 2.15, Influence du temps de malaxage sur l'indice de Pénétrabilité « IP ».	112
Figure 2.16, Influence de la teneur en NR sur l'indice de pénétrabilité « IP ».	113
Figure 2.17, Influence du temps de malaxage sur la ductilité à 25 °C.	114
Figure 2.18, Influence de la teneur en NR sur la ductilité à 25 °C.	115
Figure 2.19, Influence de la teneur en NR sur le module de rigidité à 25 °C.	116
Figure 2.20. Procédé de fractionnement du bitume.	117
Figure 2.21. Influence du temps de malaxage sur le pourcentage d'Asphaltènes.	117
Figure 2.22. Influence de la teneur en NR sur le pourcentage d'Asphaltènes.	118
Figure 2.23. Evolution de la pénétrabilité au vieillissement des liants bitumineux.	119
Figure 2.24. Evolution de la température bille et anneau « TBA » au vieillissement des liants bitumineux	120
Figure 2.25. Courbe granulométrique du mélange granulaire et fuseau de référence LCPC des BB 0/14	122
Figure 2.26. Stabilité Marshall en fonction de la teneur en NR.	125
Figure 2.27. Fluage Marshall en fonction de la teneur en NR.	126
Figure 2.28. Quotient Marshall en fonction de la teneur en NR.	126
Figure 2.29. Compacité Marshall en fonction de la teneur en NR.	127
Figure 2.30. Module de rigidité du mélange en fonction de la teneur en NR.	127
Figure 2.31. Appareillage mis au point pour l'essai de fluage – recouvrance.	129
Figure 2.32. Contrainte appliquée et les déformations mesurées	131
Figure 2.33. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume pur.	132
Figure 2.34. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume modifié à 4% de NR.	133

Figure 2.35. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume modifié à 8% de NR.	133
Figure 2.36. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 25 °C.	134
Figure 2.37. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 40 °C.	134
Figure 2.38. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 60 °C.	135
Figure 2.39. Variation de la déformation initiale avec la température.	137
Figure 2.40. Variation de la déformation totale avec la température.	138
Figure 2.41. Variation de la déformation finale avec la température.	139
Figure 2.42. Variation de la déformation réversible avec la température.	140
Figure 2.43. Variation de la déformation permanente avec la température.	141
Figure 2.44. Variation du taux de déformation de fluage.	142
Figure 2.45. Variation du RVE des enrobés bitumineux.	143
Figure 2.46. Variation du module de rigidité initiale en fonction de la température et la teneur en NR.	144
Figure 2.47. Variation du module de rigidité totale en fonction de la température et la teneur en NR.	145

ANNEXES

Figure 1 : (a) réticulation avec un atome unique de soufre, (b) avec plusieurs atomes de soufre.	156
Figure 2. Deux chaînes polymériques liées directement à travers leurs atomes de carbones respectifs.	156
Figure 3. Nomogramme de Van Der Poel.	157

LISTE DES TABLEAUX

Partie 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau 1.1. Différents type de structure des bitumes en fonction de leur composition générique.	28
Tableau 1.2. Les spécifications sur les bitumes routiers.	37
Tableau 1.3. Essais mécaniques sur les liants.	41
Tableau 1.4. Production annuelle des pneus usagés.	67
Tableau 1.5. Constitution moyenne des pneus.	68
Tableau 1.6. Exemples de demi-produits issus des pneumatiques.	69
Tableau 1.7. Réductions de bruit mesurées pour des revêtements en bitume caoutchouc pour plusieurs projets européens.	92

Partie 2 : ETUDE EXPÉRIMENTALE

Tableau 2.1. Provenance des granulats utilisés.	95
Tableau 2.2. Analyse chimique sommaire des différents types de granulats.	95
Tableau 2.3. Classification des granulats.	96
Tableau 2.4. Résultats de l'analyse granulométrique.	96
Tableau 2.5. Caractéristiques des granulats.	97
Tableau 2.6. Caractéristiques du bitume.	98
Tableau 2.7. Densité de la poudrette de caoutchouc [NR].	101
Tableau 2.8. L'analyse granulométrique de la poudrette de caoutchouc [NR].	101
Tableau 2.9. Nomenclature des matériaux en fonction de la teneur en NR.	104
Tableau 2.10. Résultats de la pénétrabilité à 25 °C	106
Tableau 2.11. Exemple de la variation de la pénétrabilité en fonction de la teneur en NR.	108
Tableau 2.12. Exemple de la variation de la pénétrabilité en fonction de la durée de malaxage.	108
Tableau 2.13. Résultats de la Température de bille et anneau « TBA ».	109
Tableau 2.14. Indice de pénétrabilité.	111
Tableau 2.15. Ductilité.	114
Tableau 2.16. Résultats de la mesure du pourcentage d'asphaltènes.	117
Tableau 2.17. Evolution de la pénétrabilité au vieillissement des liants bitumineux.	119
Tableau 2.18. Evolution de la TBA au vieillissement des liants bitumineux.	120
Tableau 2.19. Reclassement des bitume en fonction da la teneur en NR et la durée de malaxage.	121
Tableau 2.20. Composition de la formule utilisée.	123
Tableau 2.21. Résultats de l'essai Marshall du mélange étudié.	124
Tableau 2.22. Nomenclature des matériaux en fonction de la teneur en NR.	125
Tableau 2.23. Caractéristiques mécaniques des enrobés en fonction de la teneur en NR.	125
Tableau 2.24. Les déformations en fonction de la teneur en NR et de la température.	136
Tableau 2.25. Rapport de la déformation initiale à la déformation totale.	142

Tableau 2.26. Variation de la RVE des enrobés bitumineux.	143
Tableau 2.27. Variation des modules de rigidité des enrobés bitumineux en fonction de la teneur en NR et de la température.	144

ANNEXES

Tableau 1. Températures de l'indice de pénétrabilité.	155
Tableau 2. Spécifications des granulats utilisés en technique routière.	155

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Les chaussées sont des structures multicouches qui servent de voies de liaison et permettent la circulation des personnes et des marchandises en assurant la sécurité et le confort des usagers.

Le passage répété des charges roulantes provoque l'apparition de diverses dégradations qui entraînent progressivement la ruine de ces chaussées.

Les chaussées bitumineuses, sous l'effet conjugué du trafic en poids lourds croissant et d'une température élevée, subissent des dégradations de type déformation.

Parmi ces dégradations, l'orniérage est une dégradation de l'enrobé bitumineux par accumulation des déformations permanentes sous le passage répété des véhicules.

La résistance aux déformations permanentes est un paramètre important qui rentre dans la conception des mélanges bitumineux appelé « stabilité », et il se définit comme étant l'aptitude d'un mélange bitumineux à résister aux déformations permanentes excessives sous l'effet des facteurs suivants :

- La charge : importance, fréquence, et vitesse d'application des charges,
- La température : importance et gradient thermique,
- Les granulats : type, forme et dimension,
- Le liant : type et teneur,
- La qualité de la mise en œuvre.

Pour réduire la portée de l'orniérage, diverses techniques ont été utilisées ; parmi lesquelles, la modification des liants avec des polymères qui s'avère être une technique prometteuse. Cette technique permet d'améliorer les performances des liants bitumineux et de réduire la fréquence de réparation des chaussées.

La modification des bitumes peut-être réalisée par les procédés de raffinage (oxydation, désasphaltage, soufflage) ou par ajout d'additifs (polymères, pneus recyclés, produits chimiques et autres).

Le bitume - caoutchouc, produit appartenant à la famille des liants modifiés, est un mélange fabriqué à température élevée, de bitume, et de poudrette de caoutchouc.

La volonté, de plus en plus marquée dans l'industrie routière, de limiter les nuisances sur l'environnement, est traduite au travers de la notion de "durabilité" des infrastructures. Cette nouvelle approche de la rentabilité d'une stratégie fait que, l'amélioration des propriétés et des performances mécaniques, les coûts de mise en place et les nouvelles directives sur l'élimination des déchets industriels, notamment les pneus usagés, sont autant de facteurs qui encouragent un regain d'intérêt pour les matériaux au bitume - caoutchouc.

Dans cette étude nous nous sommes intéressés à la modification d'un bitume 50/70 avec un déchet industriel à base d'un caoutchouc naturel (NR) introduit sous forme de poudrette.

Ce polymère est un déchet industriel sous forme de poudrette qui nous a été proposé par la société Algérienne d'élastomère SAEL (Société d'Application d'ELastomères), pour une utilisation dans le domaine des travaux publics et plus particulièrement dans la géotechnique routière et plus précisément dans la préservation de l'environnement. Cette poudrette est issue de la fabrication des joints des buses hydrauliques.

Ce mémoire est scindé en deux grandes parties à savoir :

La première partie est entièrement consacrée à une étude bibliographique qui porte sur :

- La rhéologie et les propriétés thermomécaniques des bitumes (purs ou modifiés),
- Les différents polymères utilisés pour la modification des bitumes,
- La rhéologie des enrobés bitumineux,
- L'importance du recyclage des déchets industriels dans le domaine routier et son effet positif sur l'environnement.

La deuxième partie présente l'étude expérimentale consacrée à :

- La caractérisation des propriétés physico-chimiques du bitume pur et de la poudrette de caoutchouc utilisés,
- La détermination de l'influence de la teneur en poudrette de caoutchouc, de la durée de malaxage sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du bitume modifié,
- La détermination de l'influence de la teneur en poudrette de caoutchouc sur les caractéristiques Marshall de l'enrobé bitumineux,
- La détermination de l'influence de la température et de la teneur en poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux,

Remarque : Par la suite, la poudrette de caoutchouc sera désignée par les lettres NR (Natural rubber).

Partie 1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

La première partie de ce mémoire est entièrement consacrée à une étude bibliographique sur la rhéologie et les propriétés thermomécaniques des bitumes (purs ou modifiés), et des enrobés bitumineux, afin d'établir le cadre général de cette étude.

Y sont mentionnés les points suivants :

- La rhéologie et les propriétés thermomécaniques des bitumes (purs ou modifiés),
- Aussi, il a été mis en évidence les différents essais relatifs aux bitumes (purs ou modifiés),
- Les différents polymères utilisés pour la modification des bitumes,
- De manière succincte, les phénomènes physico-chimiques rencontrés dans la formation du bitume caoutchouc.
- La rhéologie des enrobés bitumineux ainsi qu' une panoplie d'essais relatifs aux enrobés.
- Nous avons aussi, situé l'importance du recyclage des déchets industriels dans le domaine routiers et son effet positif sur l'environnement.

Chapitre 1 : LE BITUME

Ce chapitre résume les connaissances acquises à ce jour sur les propriétés des matériaux bitumineux afin d'établir le cadre général de cette étude. A cet effet, nous présentons brièvement quelques généralités sur l'origine, la fabrication, la composition, ainsi que la structure des bitumes qui constituent l'exemple de liant hydrocarboné le plus utilisé actuellement.

1.1. Généralités sur les bitumes

Les liants hydrocarbonés qui jouent un rôle important dans la technique routière moderne, sont connus et utilisés par l'homme depuis l'antiquité.

L'utilisation du bitume remonte à la préhistoire et les plus anciens objets humains contenant du bitume connus à ce jour sont vraisemblablement vieux de 180 000 ans [5].

En parallèle avec des applications médicales, le bitume naturel a été employé généralement comme adhésif, en particulier pour le Génie Civil, dans des mortiers ou en tant qu'agent d'imperméabilisation [5].

Il faut cependant remonter à Nabopolassar, roi de Babylone (625-604 av. J.-C.) pour trouver les premières mentions de l'utilisation de bitume pour l'application routière, mais cet usage a disparu pour ne réapparaître qu'au cours du 19^{ième} siècle et finalement évoluer vers nos techniques routières actuelles [5].

1.2. Origines des bitumes

Un liant hydrocarboné est un matériau thermoplastique, c'est-à-dire un matériau qui conserve ses propriétés après chauffage, et dont la consistance varie avec la température.

D'autre part, une propriété fondamentale exigée d'un liant hydrocarboné est son pouvoir adhérent à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, métal, verre [2,6].

Il est insoluble dans l'eau, mais soluble dans de nombreux solvants organiques [6].

D'une façon générale, on distingue trois familles de liants hydrocarbonés à savoir :

- Les liants naturels, qui se trouvent dans la nature et qui sont utilisés depuis des temps très anciens. C'est la 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, de la matière d'origine végétale telle que la lignite, la tourbe.

Dans ce qui suit, on ne s'intéresse qu'au bitume de pétrole, seul utilisé de nos jours en technique routière.

1.3. Fabrication des bitumes

Les bitumes utilisés de nos jours pour le revêtement des routes et certains usages industriels sont fabriqués en raffinerie à partir d'un brut réduit, qui est lui-même issu de la distillation des pétroles bruts [25].

Les pétroles bruts sont des mélanges complexes d'un grand nombre de fractions, souvent difficiles à séparer. Ils sont composés de :

Gaz (GPL : propane et butane)	
Carburants	
Fioul	- domestique - fluide - lourd
Bitume	

Figure 1.1. Schématisation de la composition d'un pétrole brut

Les pétroles bruts varient considérablement en apparence et en consistance suivant le pays d'extraction et même suivant le champ d'où ils sont tirés. Leur couleur varie du brun jaunâtre au noir et leur consistance depuis une viscosité faible jusqu'à celle d'un semi – solide. Leurs différences sont dues aux proportions entrants dans leur composition.

Pour fabriquer des bitumes de spécifications données, la première condition consiste à choisir un pétrole brut suffisamment lourd, autrement dit, celui qui présente après distillation atmosphérique une quantité de résidu (brut réduit) la plus importante. Il est à signaler que sur les 1300 pétroles bruts référencés dans le monde, 10% sont aptes à donner des bitumes respectant les spécifications d'usage [25,5].

Selon les diverses origines de ces pétroles, il a été adopté des méthodes particulières de fabrication pour obtenir des produits bitumineux de qualité.

Il existe quatre méthodes de fabrication des bitumes [6, 25, 5] :

1.3.1. La distillation

C'est un procédé physique d'évaporation des constituants volatils où la phase vapeur est éliminée et condensée, il reste en fond de colonne du bitume. On distingue deux procédés de distillation :

a. Distillation à la pression atmosphérique

C'est une méthode simple mais qui peut nécessiter en fonction de la base à traiter de hautes températures pouvant engendrer des dégradations des produits par surchauffe. Ce procédé n'est utilisé que pour retirer les produits légers (essence, kérosène).

b. Distillation sous vide

Cette opération est nécessaire pour obtenir des produits lourds, donc on commence par la distillation sous pression atmosphérique de brut choisi. Le fond de la colonne est alors envoyé à la distillation sous vide qui consiste à

la séparation des différents constituants en jouant sur les paramètres : débit, pression et température.

La pression réduite qui règne à l'intérieur de la tour est destinée à poursuivre la séparation physique des constituants sans les dégrader thermiquement.

Plus on distille, plus le bitume obtenu est dur et plus sa pénétrabilité est faible.

1.3.2. L'extraction (Désasphaltage)

Ce procédé consiste à fabriquer un bitume par solubilité du fond de la distillation sous vide dans un solvant (le propane et le butane), donc ce procédé est utilisé comme complément de la distillation.

Après Extraction du résidu sous vide, on obtient :

- Un bitume,
- Une base pour lubrifiant de haute qualité.

Les bitumes de désasphaltage sont en général susceptibles à la température.

1.3.3. Le Soufflage

Cette opération consiste à injecter de l'air dans le résidu de la distillation sous vide sous des températures comprises entre 250 et 300°C.

Le but de ce procédé est d'obtenir des bitumes plus durs accompagnés d'une diminution de la susceptibilité à la température

Dans la pratique, on distingue :

- Le semi – soufflage qui consiste à traiter un fond de colonne sous vide, trop mou pour en faire un bitume routier,
- Le soufflage d'une base plus complexe pour obtenir des bitumes industriels très peu susceptibles à la température (utilisés par exemple dans les revêtements de toiture),

1.3.4. Le Craquage

Le craquage est un traitement des fonds de colonne sous vide à des hautes températures comprises entre 450 et 500°C et à des pressions allant de 2 à 25 bar. Dans ces conditions, certaines grosses molécules des fractions lourdes se craquent pour former des molécules plus petites, tandis que les plus stables résistent au traitement. Ces bitumes n'ont pas d'application routière.

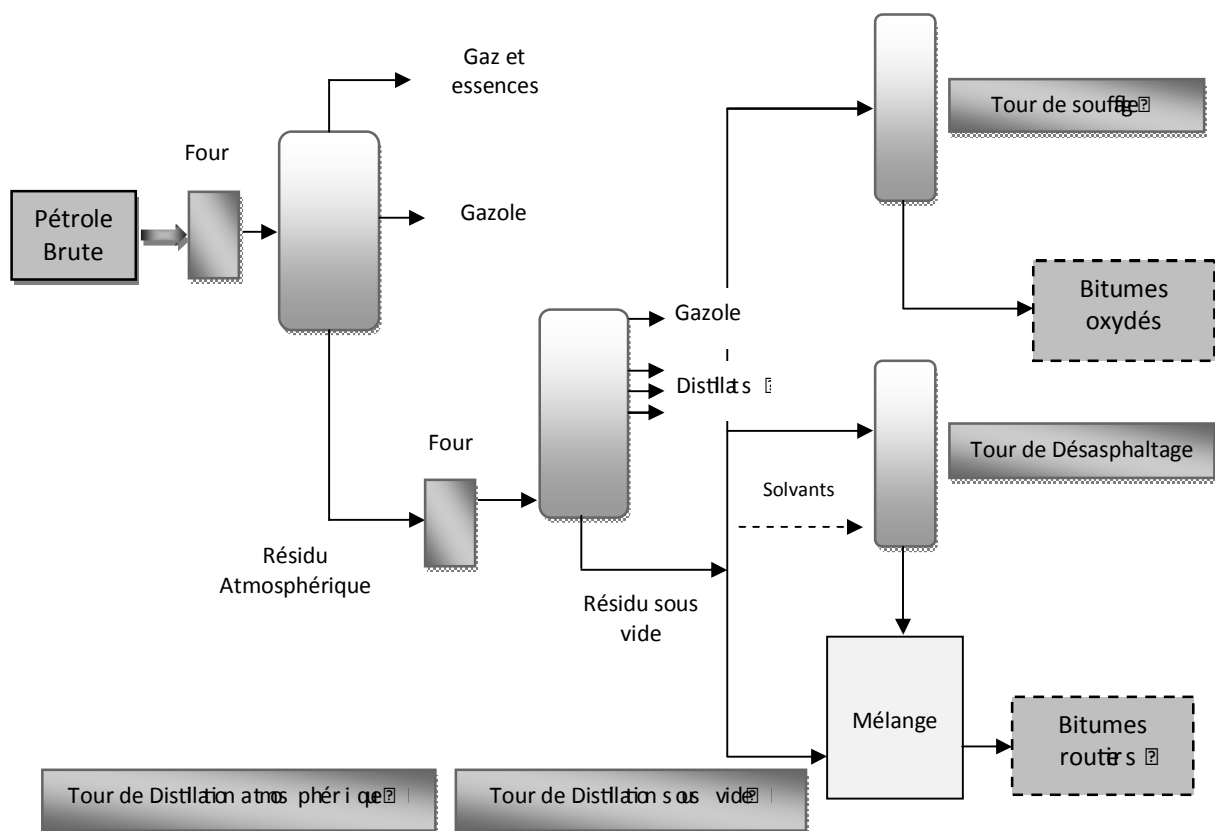


Figure 1.2. Principe de fabrication du bitume [5]

1.4. Composition des bitumes

Issus du traitement des pétroles bruts, les bitumes sont des mélanges complexes de composés hydrocarbonés constitués de carbone (79 à 88% massique) et d'hydrogène (7 à 13%). On note aussi la présence de faibles quantités d'oxygène (2 à 8%) et d'azote (jusqu'à 8%), ainsi que des traces de nombreux métaux (Fer, Nickel,...) [6,2].

La composition élémentaire d'un bitume dépend essentiellement de l'origine de son brut et d'une manière moindre, des techniques de raffinage [3].

La diversité des molécules présentes dans les bitumes rend impossible la détermination de leur composition exacte. Néanmoins il est possible de regrouper ces constituants en grandes familles chimiques [6].

Les premiers travaux sur la chimie du bitume sont dus à Boussingault, qui a séparé une fraction distillable qu'il a nommé « pétroles » (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 ces fractions [3].

Par précipitation avec du n-heptane, on peut séparer les bitumes en deux fractions [1,2] :

- les asphaltènes : fraction insoluble, produit solide apportant au bitume sa cohésion et sa dureté et constituant entre 5 et 20 % du bitume;
- Les maltènes, fraction soluble, produits huileux (molécules moins grosses) dans lesquels baignent les asphaltènes. Les maltènes peuvent être séparées par la chromatographie liquide en trois principales sous familles, soit :

- § Les huiles saturées,
- § Les huiles aromatiques,
- § Les résines.

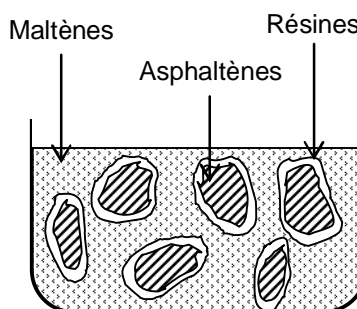


Figure 1.3. Composition des bitumes

On peut cependant attribuer quelques caractéristiques à ces familles :

- D'une manière simplifiée, les saturés ont de faibles masses molaires (autour de 600 g/mol) et comportent un faible pourcentage d'alcane linéaires. 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 [3].

Cette fraction est incolore ou légèrement jaunâtre et sa consistance varie de l'état liquide à l'état pâteux suivant l'origine des bitumes [6].

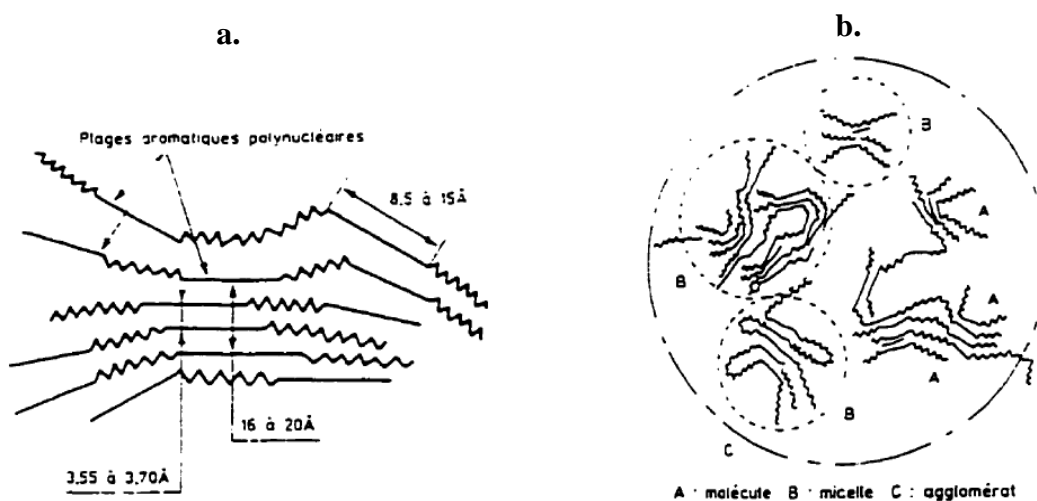
- Les aromatiques sont les fractions présentes en majorité (environ 60 %), leur masse moyenne est généralement autour de 800 g/mol et ils sont peu différents d'une huile minérale de forte viscosité [3].

Ce sont des huiles visqueuses, de couleur rouge brun sombre [6].

- Les résines sont des solides noirs qui fondent par chauffage, (parfois appelées aromatiques polaires), sont peu nombreuses. Leur rôle est de stabiliser la dispersion d'asphaltènes dans la matrice maltènes.
- Les asphaltènes représentent généralement moins de 30 % d'un bitume routier de distillation directe (sous vide), Ils se présentent sous la forme d'un solide noir, cassant, pratiquement insoluble. Leur masse molaire est estimée entre 800-4000 g/mol.

Les asphaltènes ne diffèrent des résines que par leur insolubilité dans un hydrocarbure donné [6].

Selon le modèle de Yen [10], les molécules d'asphaltènes sont dans un état associé soit sous forme de micelles (entité élémentaire de quelques feuillettes de molécules), soit sous forme de paquets de micelles qu'on appelle agglomérats.



(a). Coupe d'un modèle de micelles d'asphaltènes selon Yen
(b). Microstructure des asphaltènes selon Yen

Figure 1.4. Macrostructure des asphaltènes selon le modèle Yen [5]

D'une façon générale, les bitumes sont presque toujours décrits par quatre groupes différents :

Bitume = Asphaltènes + Maltènes (Saturés + Aromatiques + Résines)

1.5. Structure colloïdale du bitume

L'ensemble des asphaltènes et des maltènes forme un système colloïdal constitué par une suspension de micelles d'asphaltènes peptisés par les résines dans un milieu huileux.

En effet, les asphaltènes ont tendance à adsorber la fraction aromatique la plus lourde des maltènes (les résines), ce qui permet leur dispersion dans le mélange huileux (hydrocarbures aromatiques et saturés). On dit qu'il y a peptisation.

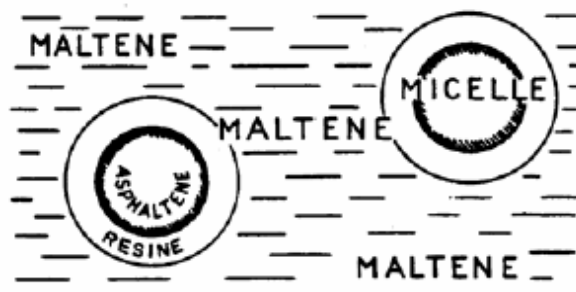


Figure 1.5. Etat colloïdal des bitumes

Si les maltènes contiennent suffisamment d'aromatiques, les micelles sont complètement mobiles au milieu de la phase dispersante : elles sont peptisées. La solution colloïdale est alors à l'état de structure sol (visqueuse) (Figure 1.6).

S'il n'y a pas suffisamment d'aromatiques, les micelles s'attirent mutuellement, deviennent moins mobiles et forment un réseau au milieu de la phase intermicellaire. Cette structure, qui confère au bitume des propriétés élastiques, est désignée sous le nom de structure gel (élastoplastique) (Figure 1.6).

Une structure appelée "sol – gel", correspond aux bitumes intermédiaires.

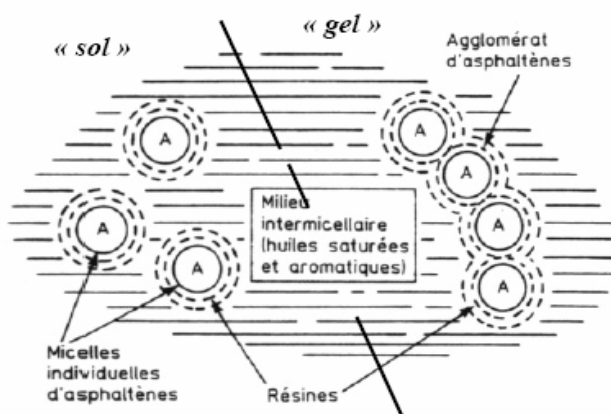


Figure 1.6. Schématisation de la structure colloïdale

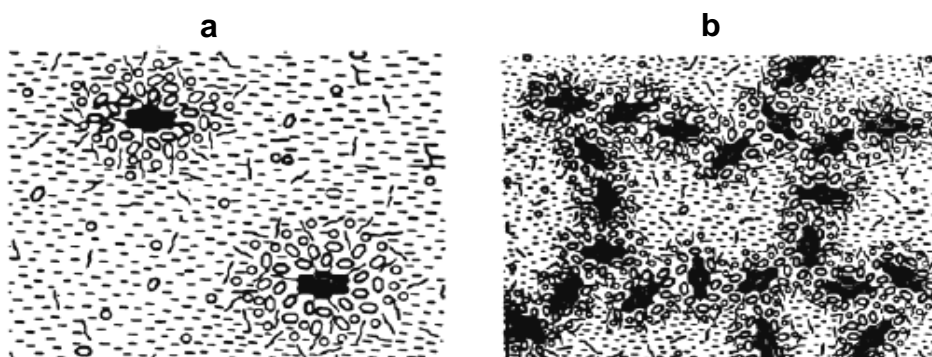


Figure 1.7. (a) : Structure colloïdale de type "Sol" (Micelles fortement peptisées) et (b) : structure colloïdale de type "Gel" (Micelles formant un réseau). [2]

Les structures "sol" ou "gel" prédominent dans le bitume en fonction de l'équilibre entre les précédentes fractions. Cet équilibre dépend en particulier de la proportion en asphaltènes et de l'aromaticité des maltènes (la nature et la masse molaire) qui détermine le pouvoir de solvant des phases huileuses [2].

Gaestel et Coll [4] considèrent trois principaux constituants : les asphaltènes, l'huile à tendance paraffinique et naphénique et le peptisant à caractère aromatique. Ils ont établi une relation entre les principales propriétés rhéologiques des bitumes et l'indice d'instabilité colloïdale « IC ».

Cet indice est un ratio entre les éléments incompatibles encourageant l'état "gel" (asphaltènes et huiles saturées) et les éléments favorisant l'état "sol" par la solubilisation et la peptisation (résines et huiles aromatiques). Il est donné par [2] :

$$IC = \frac{\text{Asphaltènes} + \text{floculant}}{\text{Péptisant} + \text{Solvant}} = \frac{\text{asphaltènes} + \text{saturées}}{\text{résines} + \text{aromatique s}}$$

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

Cet indice prend les valeurs proches de 1 pour un bitume dans un état gel et près de 0.25 dans un état sol.

On peut classer la structure du bitume selon sa composition générique à savoir ;

Tableau 1.1. Différents type de structure des bitumes en fonction de leur composition générique [5,].

Type de structure	Asphaltènes (%)	Résines (%)	Huiles (%)
Gel	> 25	< 24	> 50
Sol	< 18	> 36	< 48
Sol - Gel	21 à 33	30 à 34	45 à 49

Remarque : Dans la construction des routes, on recherche toujours des bitumes qui ont une structure Sol – Gel.

1.6. Caractérisation des bitumes [7, 6, 5, 4,1]

Pour caractériser les bitumes, plusieurs types d'essais peuvent être utilisés. On peut les classer en trois catégories principales :

- Les analyses physico-chimiques.
- Les essais mécaniques.
- Les essais rhéologiques.

1.6.1. Les analyses physico-chimiques

1.6.1.1. Méthodes de séparation des bitumes [1]

Les méthodes de séparation des bitumes sont :

1) Séparation par distillation

Cette méthode permet de concentrer les asphaltènes et de classer les produits en fonction de leur point d'ébullition.

2) Extraction aux solvants sélectifs

La méthode d'extraction consiste à traiter le bitume avec des solvants de polarité croissante qui précipitent des fractions de polarité décroissante.

Le procédé Schweyer et Trader [1] qui est schématisé sur la Figure 1.8, est un exemple typique représentant cette technique :

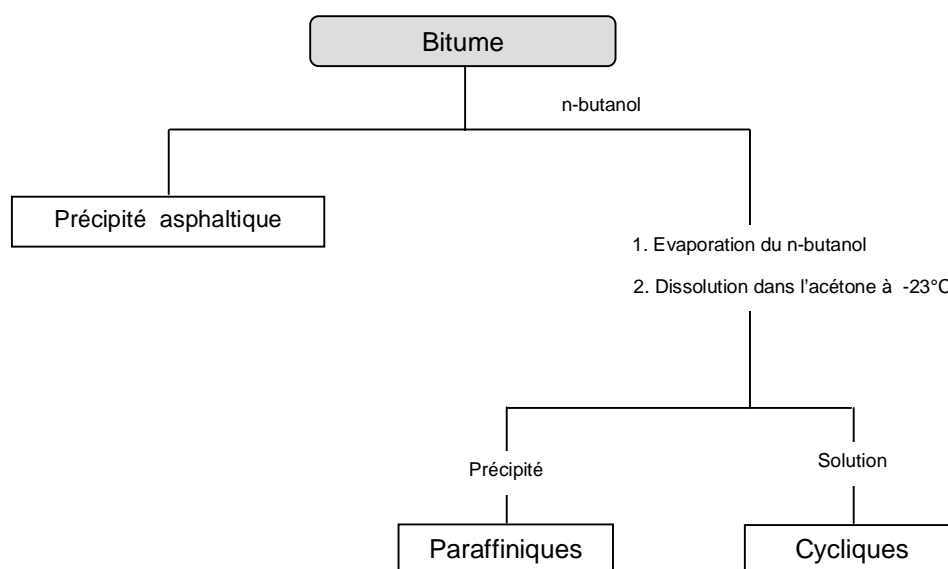


Figure 1.8. Schéma de l'extraction aux solvants sélectifs [1]

3) Chromatographie d'adsorption

Les méthodes chromatographiques sont les techniques les plus utilisées pour la caractérisation chimique des bitumes. Elles sont basées sur l'aptitude du bitume à être séparé en différentes fractions par adsorption sélective.

Le fractionnement par chromatographie est généralement précédé d'une séparation initiale du bitume en asphaltènes et maltènes par précipitation sélective dans des alcanes à faible poids moléculaire tels que le propane, le butane, le pentane, l'hexane et l'heptane.

La procédure de fractionnement mise au point par Corbett [1] est schématisée sur la figure 1.9.

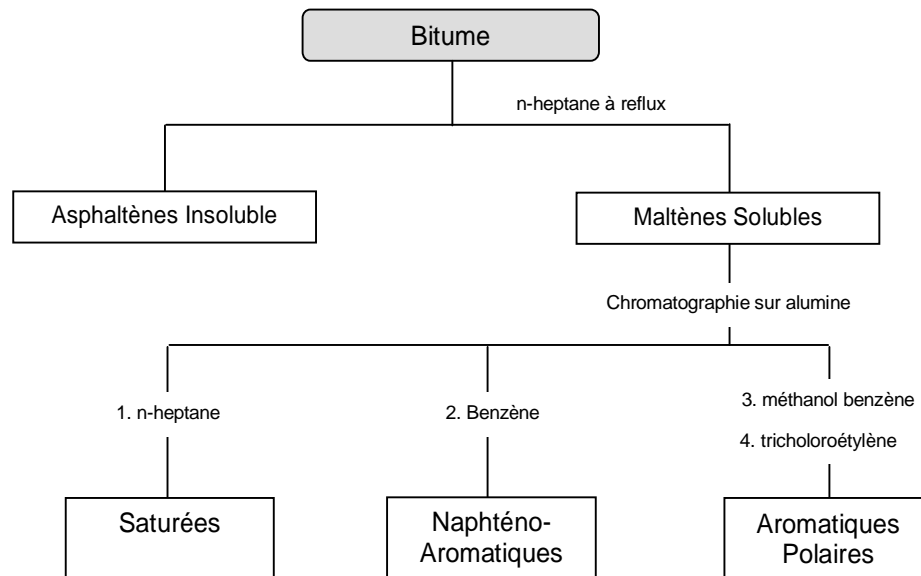


Figure 1.9. Chromatographie d'adsorption d'après Corbett

4) Chromatographie sur Gel Perméable (GPC)

Cette technique est différente des méthodes décrites ci-dessus, car elle est basée sur un fractionnement selon le volume des molécules. La chromatographie par perméation de gel a été utilisée pour analyser la distribution en tailles moléculaires des fractions.

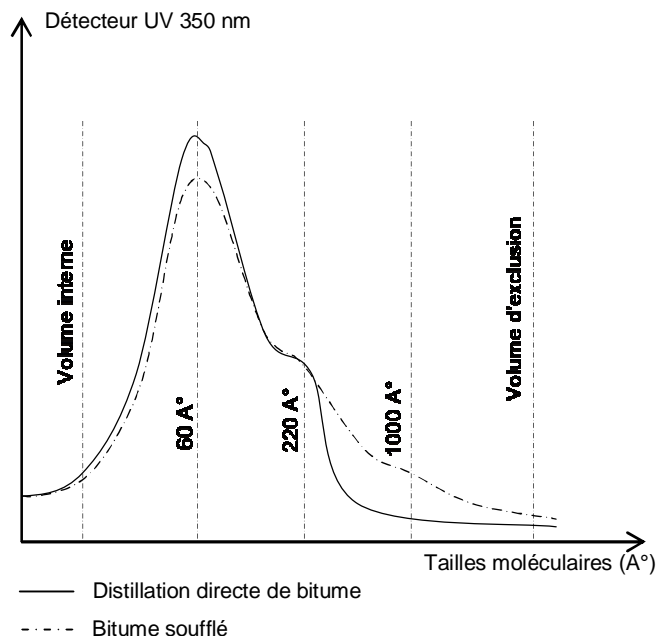


Figure 1.10. Chromatographie sur gel perméable sur bitumes [54]

5) Chromatographie sur baguette de silice (IATROSCAN)

La chromatographie sur baguette de silice (IATROSCAN) est une technique qui est fréquemment utilisée pour déterminer la composition chimique des bitumes. Ce type de chromatographie permet de séparer les bitumes selon les quatre grandes familles de produits représentées précédemment.

Un exemple est montré dans la figure 1.11. Sur cette figure nous avons représenté un spectre issu de la séparation d'un bitume en groupes génériques par chromatographie IATROSCAN.

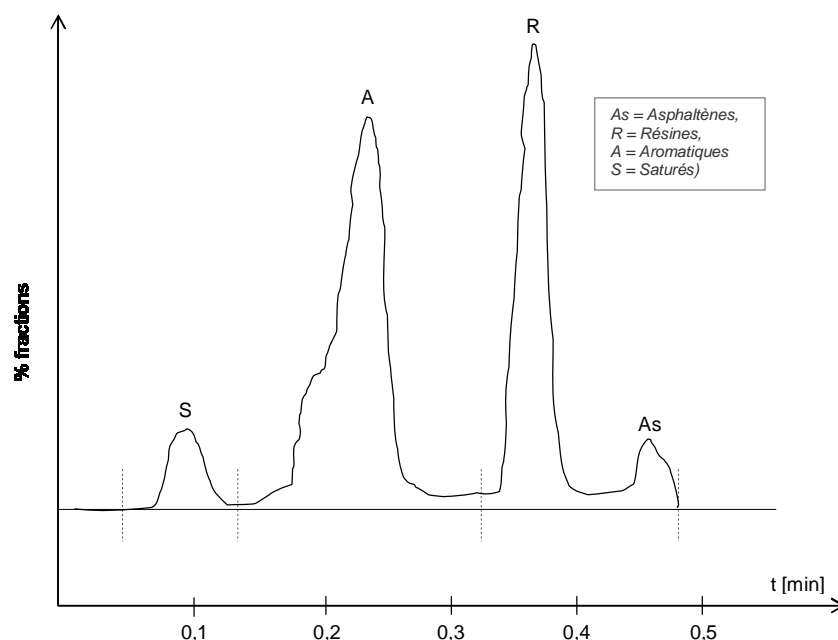


Figure 1.11. Séparation en groupes génériques par chromatographie IATROSCAN en fonction du temps d'élution [53]

1.6.1.2. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformed InfraRed spectroscopy) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé.

Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fonctions chimiques présentes dans le matériau.

Cette technique est utilisée aussi pour détecter et analyser les bandes d'oxydation chimique des bitumes.

Lorsque la longueur d'onde (l'énergie) apportée par le faisceau lumineux est voisine de l'énergie de vibration de la molécule, cette dernière va absorber le rayonnement et on enregistrera une diminution de l'intensité réfléchiée ou transmise.

L'analyse s'effectue à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier qui envoie sur l'échantillon un rayonnement infrarouge et mesure les longueurs d'ondes que le matériau absorbe et les intensités de l'absorption.

Un exemple est montré dans la figure 1.12. Sur cette figure est représenté le spectre infrarouge d'un bitume modifié avec un polymère de type SBS.

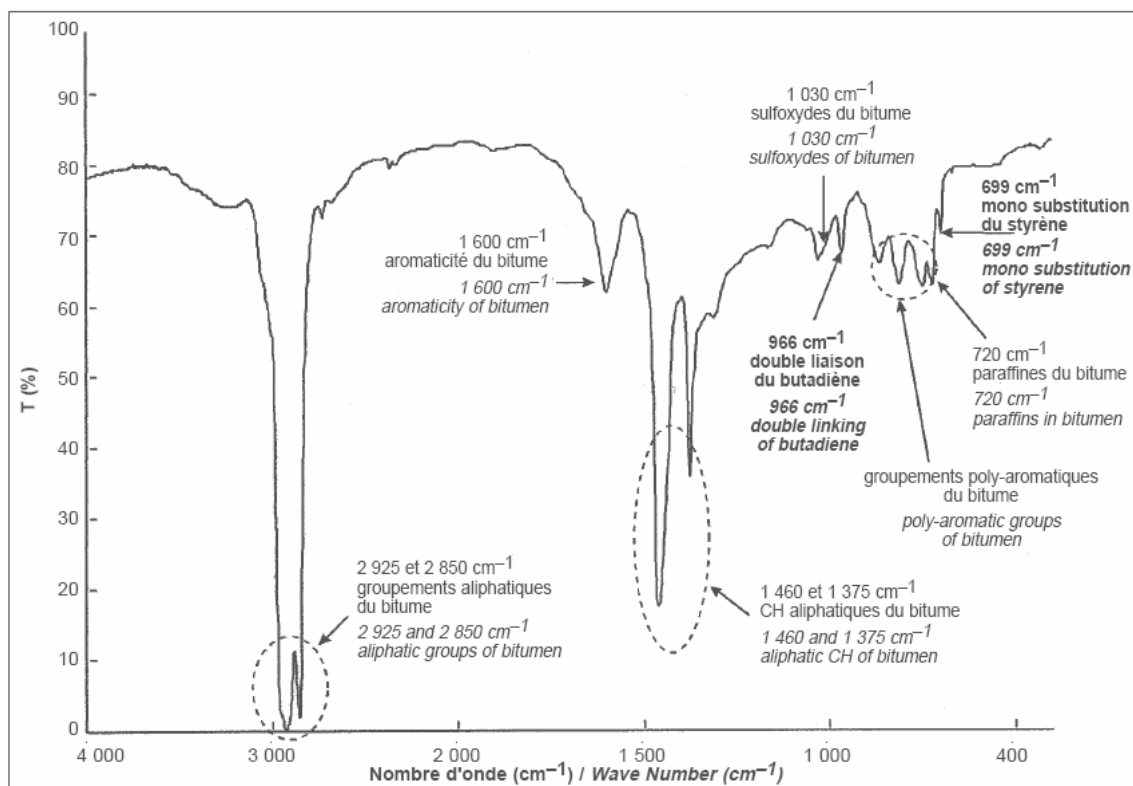


Figure 1.12. Spectre infrarouge d'un bitume modifié par un polymère SBS [53]

1.6.2. Les essais mécaniques

1) Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T 66-004)

La pénétrabilité du bitume représente la mesure de l'enfoncement (exprimé en dixièmes de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g. C'est donc une mesure de la consistance du bitume. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C.

Dans ces conditions, la valeur de pénétration est d'autant plus grande que le bitume est mou,

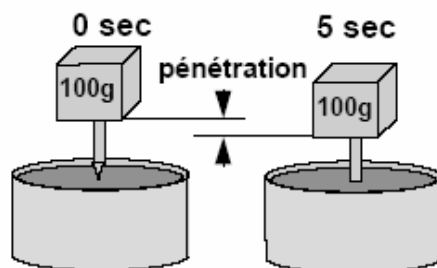


Figure 1.13. Essai de pénétrabilité pour le bitume.

2) Point de ramollissement Bille Anneau (NF T 66-008)

L'essai consiste à déterminer la température (notée TBA) pour laquelle une bille d'acier normalisée traverse un échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique. Il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement.

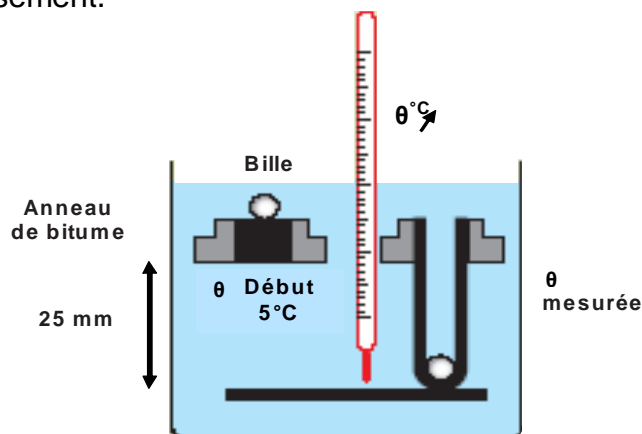


Figure 1.14. Détermination du point de ramollissement

3) Susceptibilité thermique

La susceptibilité thermique des bitumes est définie par l'évolution de la consistance du bitume en fonction de la température.

En 1936, Pfeiffer et Van Doormaal ont montré l'existence d'une relation linéaire entre le logarithme décimal de la pénétration et la température :

$$\log(Pen) = AT + C$$

Où A est la susceptibilité thermique et C une constante.

La valeur de A varie entre 0,015 et 0,06, ce qui montre l'existence de différences considérables en terme de susceptibilité thermique.

La valeur de A est calculée à partir des mesures de pénétration à deux températures T_1 et T_2 à l'aide de la relation suivante:

$$A = \frac{\log [Pen (T_1)] - \log [Pen (T_2)]}{T_1 - T_2}$$

La susceptibilité thermique des bitumes routiers est représentée par un indice appelé indice de pénétrabilité (I_p) exprimé par la relation suivante :

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

L'indice de pénétrabilité peut être évalué par deux méthodes à savoir :

A. La méthode Pfeiffer qui consiste à calculer la valeur de A à partir des mesures de pénétrabilité à 25°C et de la température bille et anneau « TBA » en admettant qu'à cette température la pénétration est de 800 1/10mm.

$$A = \frac{\log(800) - \log(\text{pen.à.}25^\circ\text{C})}{TBA - 25}$$

B. La méthode LCPC consiste à calculer l'indice de pénétrabilité à partir de la détermination de la mesure de la pénétration à cinq températures, ensuite on calcule A qui représente la pente de la droite Log (Pen) = f (T) .

La valeur de l'indice de pénétrabilité varie de -3 pour les bitumes très susceptibles à la température, jusqu'à environ +7 pour les bitumes les moins susceptibles. plus il est élevé en valeur algébrique, moins le bitume est susceptible.

4) Ductilité (NF 66-006)

Cet essai consiste à mesurer l'allongement, à l'instant précis de sa rupture d'une éprouvette de forme déterminée, étirée à une vitesse de 50mm/min, et à une température de 25°C.

La mesure de la ductilité du liant permet de s'assurer de la non fragilité de ce dernier.

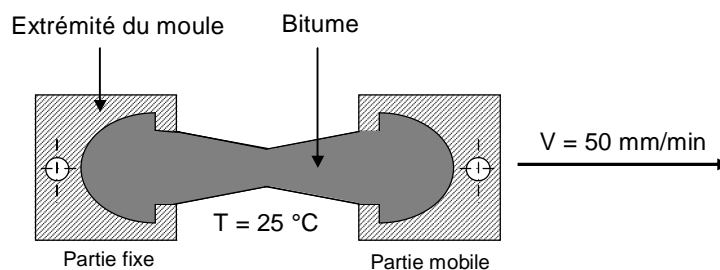


Figure 1.15. Principe de l'essai de Ductilité

5) Température de fragilité FRAASS (NF T 66- 006)

La température de fragilité Fraass correspond à la température à laquelle un film mince de bitume rompt sous l'effet d'une flexion, dans des conditions opératoires de fabrication et d'essai bien définies.

Cet essai caractérise la fragilité du liant à basse température.

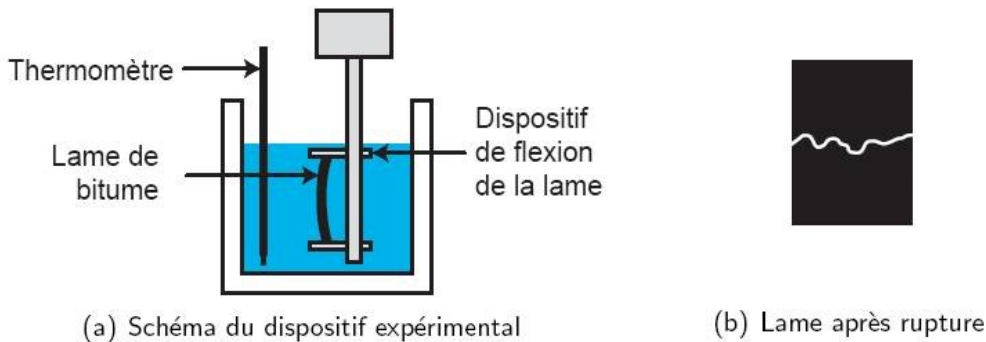


Figure 1.16. Principe de l'essai de Température Fraass [35]

6) Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF T 66- 032)

A l'enrobage, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant. L'oxydation chimique est violente car l'apport énergétique est intense (température et oxygène de l'air).

Le RTFOT permet de simuler l'évolution d'un bitume pendant la fabrication et la mise en place d'un enrobé bitumineux.

L'essai consiste à soumettre le bitume en film mince à une température de 163 °C, en l'exposant à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé.

On mesure ensuite les propriétés habituelles sur le liant vieilli : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après RTFOT, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé bitumineux, que de celles obtenues sur le bitume d'origine.

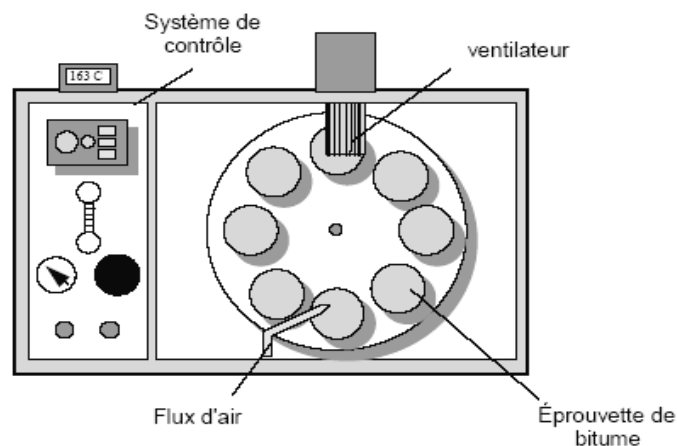


Figure 1.17. Principe de l'essai RTFOT.

7) L'essai PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO PP1)

Cet essai est employé pour permettre de caractériser le vieillissement des bitumes in-situ (après 3 à 5 années de service).

Le résidu de l'essai RTFOT chauffé est versé dans des plateaux métalliques (coupelles contenant environ 50g de liant) qui constituent les éprouvettes de l'essai PAV.

Ces plateaux sont rangés dans un rack qui sera placé dans un récipient dans une enceinte thermique. A la température de l'essai (100°C), une pression d'air de 20 bars est appliquée dans le récipient.

Après une durée de vingt heures, la pression est diminuée lentement (8 à 10 minutes). Les plateaux d'éprouvettes sont placés ensuite dans un four à 163°C pendant 30 minutes.

On mesure alors les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après PAV, sont alors comparées aux valeurs initiales et aux valeurs obtenues après RTFOT. Une schématisation de cet essai est présentée dans la figure 1.18 :

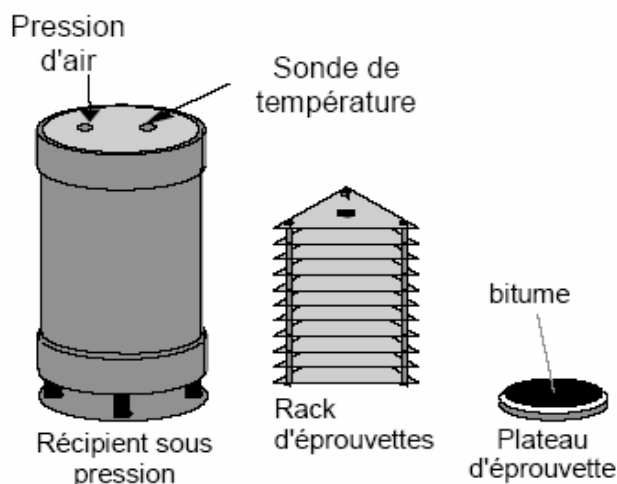


Figure 1.18. Principe de l'essai PAV.

Les valeurs obtenues lors de ces différents essais sont à la base des spécifications sur les bitumes. Ceux-ci sont repartis en « classes » correspondant à une gamme donnée de valeurs de pénétrabilité à 25°C :

- 10/20 bitume dur,
- 20/30 bitume dur,
- 35/50 et 50/70 bitumes semi - durs,
- 70/100 et 160/220 bitumes mous.

Le tableau 1.2 rassemble les classes de bitumes ainsi que leurs spécifications selon la norme NF EN 12591 (Décembre 1999).

Tableau 1.2. Les spécifications sur les bitumes routiers.

Spécifications des bitumes routiers	Unité	Désignation des classes appropriées				
		20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Pénétrabilité à 25 °C	x 0,1 mm	20-30	35-50	50-70	70-100	160-220
Point de ramollissement	°C	55-63	50-58	46-54	43-51	35-43
Point de fragilité Fraass, maximum	°C	-	- 5	- 8	- 10	- 15
Résistance au durcissement RTFOT à 163 °C	%	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Pénétrabilité restante après durcissement, minimum	%	55	53	50	46	37
Point de ramollissement après durcissement, minimum	°C	57	52	48	45	37
Augmentation du point de ramollissement, maximum	°C	8	8	9	9	11

1.6.3. Les essais rhéologiques

La rhéologie est l'étude de la déformation et de l'écoulement des corps sous l'influence des contraintes qui leur sont appliquées.

Cela sert, indirectement à :

- donner des informations sur la structure des bitumes,
- Prévoir le comportement des enrobés bitumineux, car le bitume est sans doute celui qui a l'influence la plus nette sur les propriétés rhéologiques des enrobés.

Les bitumes, en général, ne sont ni des solides élastiques idéaux répondant à la loi de Hooke (la contrainte est alors proportionnelle à la déformation), ni des liquides visqueux idéaux obéissent à la loi de viscosité de Newton (la contrainte de cisaillement est proportionnelle au taux de cisaillement), mais présentent de propriétés combinées de l'un et l'autre en fonction des conditions de sollicitation (temps de charge, température).

Leur comportement viscoélastique est généralement décrit par un modèle rhéologique faisant intervenir des éléments élastiques et purement visqueux [2].

Parmi ces modèles on cite le modèle de Maxwell et le modèle de Voigt-Kelvin. Ces deux modèles sont représentés à la figure (1.19).

Un solide élastique parfait sera symbolisé en rhéologie par un ressort de raideur « E ».

Un solide visqueux newtonien sera symbolisé en rhéologie par un amortisseur de coefficient de viscosité « η ».

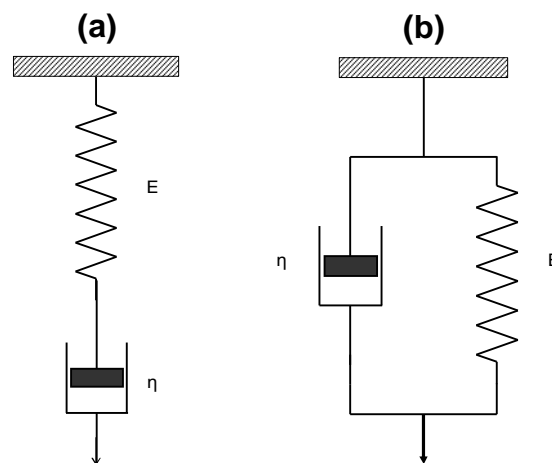


Figure 1.19. Modèle Maxwell (a) et de Voigt-Kelvin (b).

1) viscosité

La viscosité d'un corps fluide est la résistance qu'il offre aux modifications de l'ordonnement de ses molécules par le frottement interne.

La façon la plus simple d'exprimer la viscosité d'un bitume aux températures élevées consiste à mesurer le temps d'écoulement d'une quantité donnée de bitume dans

des conditions normalisées (viscosité cinématique). Elle n'est alors examinée que suivant le seul paramètre température.

Il est parfois nécessaire de faire intervenir, non seulement la température, mais aussi les conditions d'application des contraintes de cisaillement. On obtient dans ce cas la viscosité dynamique, définie suivant la loi de newton, comme suit :

$$\text{Où : } h = \frac{\text{contraint e.de.cisaillemnt}}{\text{taux.de.cisaillemnt}} = \frac{F}{S} \times \frac{e}{v}$$

h : Viscosité dynamique.

Taux de cisaillement = v/e ,

e : épaisseur du bitume entre deux plateaux,

S : surface des plateaux,

F : force,

v : vitesse de glissement des deux plateaux,

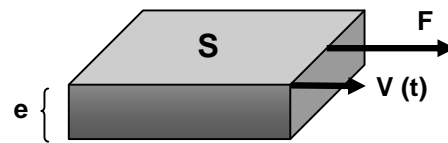


Figure 1.20. Définition de la viscosité.

La viscosité des bitumes diminue quand la température augmente.

Un bitume a un comportement newtonien, pour une température donnée, lorsque sa viscosité est indépendante du taux de cisaillement figure 1.21.a. C'est souvent le cas des bitumes de distillation directe qui correspondent en général à des bitumes de type sol,

Le comportement du bitume est non-newtonien, lorsque à une température donnée, la viscosité varie en fonction du taux de cisaillement figure 1.21.b. C'est le cas des bitumes soufflés, qui correspondent en général à des bitumes de type gel.

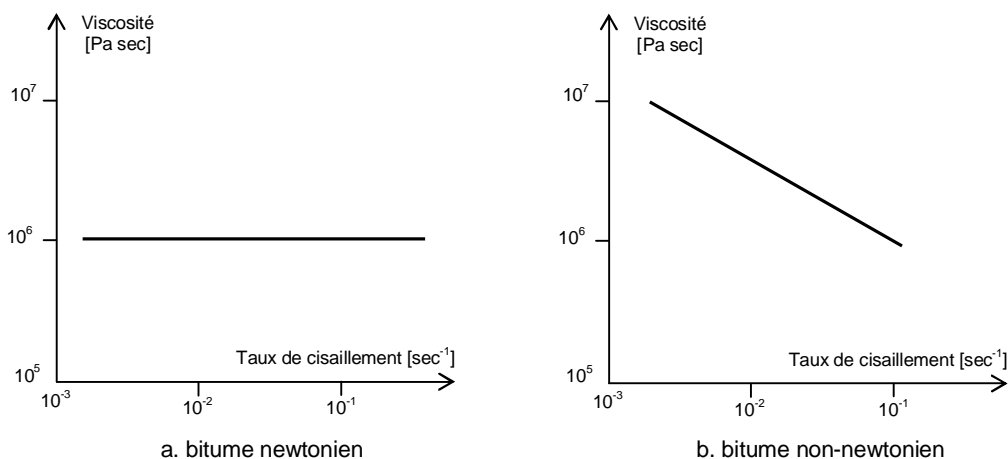


Figure 1.21. Comportement des bitumes.

2) Module de rigidité

Un solide élastique idéal, lorsqu'il est soumis à une force donnée constante, subit une déformation proportionnelle à l'amplitude de cette force. S'il s'agit d'une force longitudinale, le rapport contrainte sur la déformation relative est alors appelé Module

de Young. Celui – ci est constant pour un solide élastique et ne dépend ni de la température ni du temps de charge.

Aux basses températures, le module de rigidité est pratiquement indépendant de la durée d'application de l'effort si celle-ci reste faible. Cela signifie que, dans cette zone, le bitume a un comportement essentiellement élastique.

Avec l'augmentation de la température et du temps de charge, on constate que le module de rigidité décroît et qu'il devient inversement proportionnel au temps. Le bitume présente alors un comportement visqueux.

Pour les temps de charge et les températures intermédiaires, le bitume présente un comportement viscoélastique où le module de rigidité dépend fortement du temps de chargement et de la température considérée.

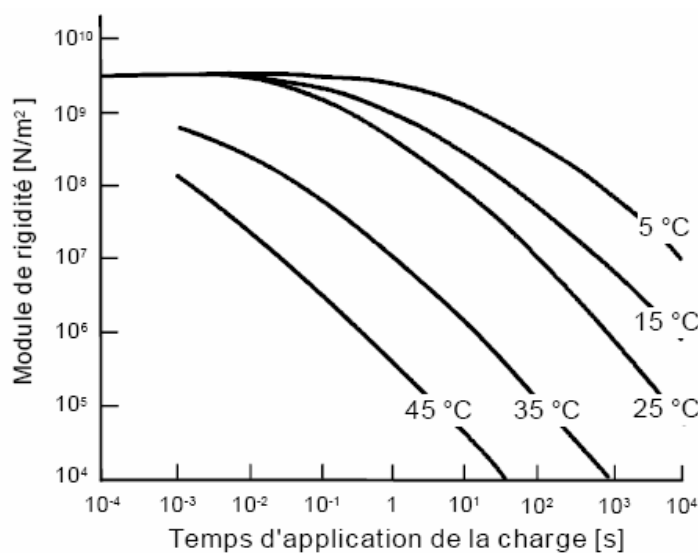


Figure 1.22 : Variation du module de rigidité en fonction du temps d'application de la charge et de la température [2]

Pour une détermination rapide de ce module, Van Der Poel a construit un nomogramme donnant le module de rigidité des bitumes quel que soit la température et le temps de charge à partir de la connaissance des deux caractéristiques : l'indice de pénétrabilité et la température de ramollissement TBA (voir annexe).

3) Programme SHRP

Les essais ont été choisis suite au programme de recherche SHRP (Strategic Highway Research Program), lancé aux Etats Unis en 1988 pour une durée de cinq ans et poursuivi par une deuxième tranche à partir de 1996 sur les liants et enrobés bitumineux. L'objectif poursuivi était de pouvoir relier les caractéristiques des liants mesurés en laboratoire aux performances des liants dans l'enrobé sur chaussées [7].

Quatre essais ont été choisis dans ce programme, ces essais sont présentés dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3. Essais mécaniques sur les liants.

Type de l'essai	But de l'essai
Dynamic Shear Rheometer (DSR) (Rhéomètre de cisaillement dynamique).	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.

Le programme SHRP classe ces essais selon la température de l'enrobé bitumineux et selon le phénomène à étudier. Ce classement est représenté dans la figure [1.23].

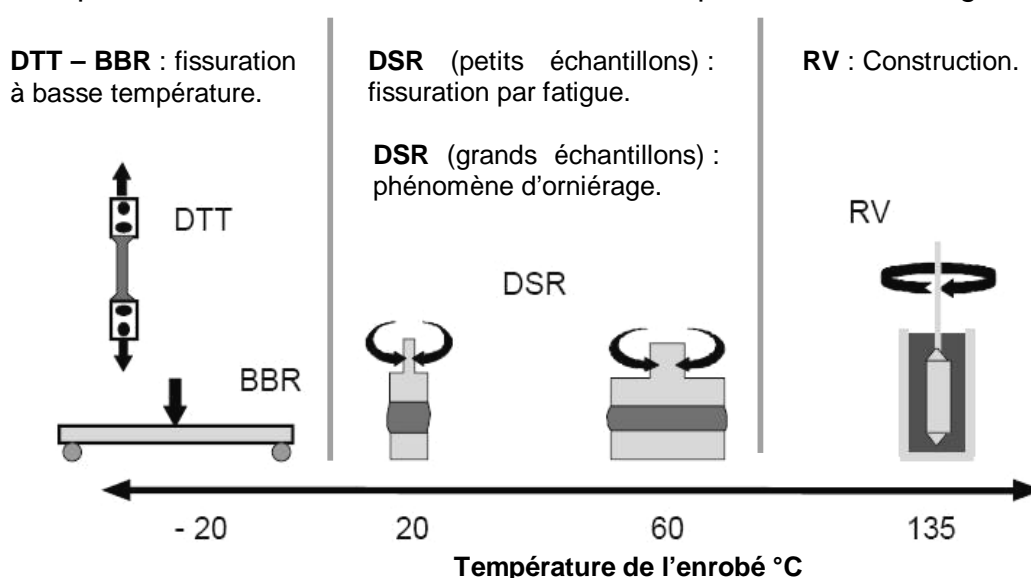


Figure 1.23. Classement des essais mécaniques sur le liant.

Les appareils utilisés pour ces essais sont :

Le rhéomètre à cisaillement dynamique (Dynamic Shear Rheometer : D.S.R.)

Cet appareil permet de mesurer le comportement viscoélastique du liant, c'est à dire la capacité du liant à résister à la fatigue et à l'orniérage dans un enrobé.

Le rhéomètre de flexion de poutre (Bending Beam Rheometer : B.B.R.)

Un processus de charge en traction/compression permet de mesurer le potentiel de fissuration des enrobés bitumineux.

Essai de traction directe (Direct Tension Test : D.T.T)

La mesure de la résistance à la traction du liant à basse température nous permet de s'assurer de la non fragilité du liant. C'est un essai complémentaire au B.B.R.

Le viscosimètre Brookfield

Il sert à mesurer la viscosité du liant à différentes températures.

1.7. Relations entre composition chimique et rhéologie

Les propriétés rhéologiques d'un bitume dépendent de façon importante de sa teneur en asphaltènes et de la masse moléculaire de ces molécules [2].

A température constante, la viscosité du bitume s'accroît lorsque la concentration en asphaltènes augmente dans une même matrice maltène [2].

Lorsque la température augmente, la viscosité diminue en même temps que les associations formées disparaissent. Inversement, lorsque la température décroît, les interactions se produisent et le bitume présente un caractère de plus en plus non – newtonien [2].

En maintenant constante la teneur en asphaltènes dans le bitume et en faisant varier les autres constituants, on constate que :

- l'accroissement de la teneur en aromatiques, pour un rapport maintenu constant de saturés sur résines, a peu d'effet sur la rhéologie,
- l'accroissement de la teneur en saturés, pour un rapport résines sur aromatiques maintenu constant, ramollit le bitume,
- l'addition de résines durcit le bitume, accroît la viscosité mais réduit l'indice de pénétrabilité et la susceptibilité au cisaillement.

1.8. Propriétés adhésives des bitumes [1, 2, 5].

1.8.1. Introduction

Quel que soit l'application du bitume dans la construction ou l'entretien d'une chaussée, l'intégrité du lien bitume – agrégat est essentiel pour assurer la durabilité et le bon comportement du revêtement routier.

En effet, l'importance technologique de la tenue du bitume sur les granulats, notamment en présence d'eau est universellement reconnue en l'on parle couramment de son « adhésivité ».

L'adhésivité (W_a) est l'énergie nécessaire pour rompre l'assemblage liant granulat. L'adhésion est une propriété capitale puisqu'elle permet d'enrober les granulats et de les lier.

La cohésion (W_c) est l'énergie dépensée pour décoller deux granulats unis par un film de bitume.

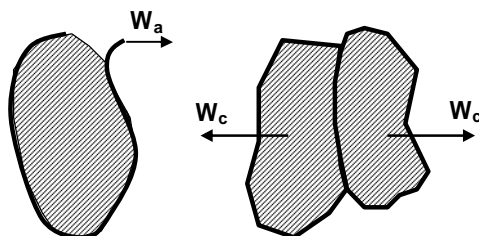


Figure 1.24. Représentation schématique de l'énergie de cohésion et d'adhésion.

1.8.2. Différents types d'adhésivité

On distingue deux types d'adhésivité ; active et passive,

1.8.2.1. L'adhésivité active

L'adhésivité active est l'aptitude d'un bitume à enrober une surface de granulat,

Evaluation de l'adhésivité active

L'essai à la plaque Vialit pratiqué avec des granulats d'humidité connue, permet de tester l'accrochage des granulats au liant.

Cet essai consiste à placer des granulats calibrés, non lavés sur une plaque métallique enduite de liant et à provoquer leur décollement, après une mise en ambiance définie, par un choc normal à la surface de la plaque.

1.8.2.2. L'adhésivité passive

L'adhésivité passive caractérise l'aptitude d'un film de bitume préalablement adsorbé à résister au désenrobage par l'eau,

La vapeur d'eau arrive toujours à pénétrer dans l'épaisseur du bitume, à atteindre la surface granulaire et à réagir avec celle-ci. Au voisinage de cette surface, l'eau pénètre entre le granulat et la couche de bitume et peut ensuite provoquer le désenrobage.

Donc, l'adhésivité passive est liée au temps total que met l'eau pour :

- D'une part, traverser le film de bitume,
- D'autre part, provoquer le désenrobage,

Evaluation de l'adhésivité passive

Le principe général de ces essais est d'enrober à chaud des granulats lavés et secs avec le liant puis d'apprécier visuellement le pourcentage du désenrobage après une immersion statique dans l'eau.

En résumé, voici l'organigramme général de l'étude de l'adhésivité.

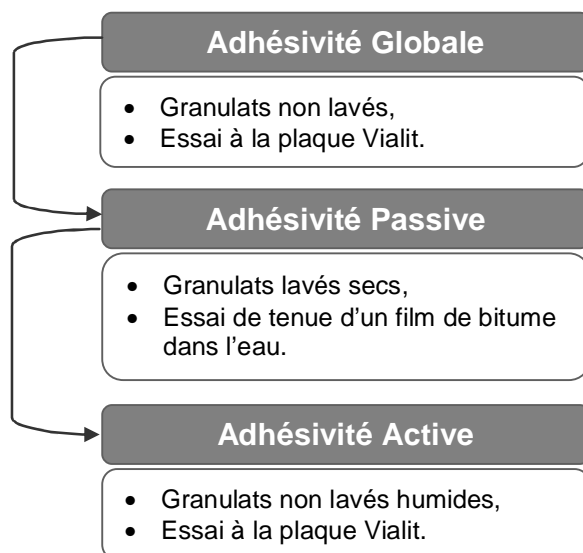


Figure 1.25. Organigramme général de l'étude de l'adhésivité

Remarque : on peut évaluer indirectement l'adhésivité par certains essais mécaniques (Duriez, Marshall) effectués sur des matériaux enrobés. Ces essais permettent d'estimer la tenue à l'eau de l'enrobé par la comparaison de la résistance mécanique de l'éprouvette conservée à sec par rapport à l'éprouvette immergée dans l'eau.

1.9. Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence ce qui suit :

- Le comportement complexe du bitume, qui est un des matériaux de base de l'industrie routière, en effet son comportement physico-chimique est influencé par deux types de paramètres à savoir :
 - Des paramètres internes, tels que son origine, sa composition générique... etc.
 - Des paramètres externes, tels que la température, le taux de vieillissement, la fabrication...etc.
- Les relations complexes qui lient la composition chimique, la structure colloïdale et les caractéristiques physico-chimiques.

Aussi, il a été mis en évidence les différents essais relatifs aux bitumes pouvant être classés comme suit :

- Les analyses physico-chimiques, qui permettent la détermination de la composition générique des bitumes,
- Les essais mécaniques,
- Les essais rhéologiques.

Chapitre 2 : LES ENROBES BITUMINEUX

2.1. Généralités [4, 7, 52]

On appelle enrobé hydrocarboné tout mélange de granulats et de liant hydrocarboné.

Le terme est donc plus général que celui de béton bitumineux puisqu'il inclut les mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume (goudron, liant à base de bitume fluidifié...).

Un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux (5 à 7 % en masse), d'agrégats (de taille varie entre 0 et D) et de fines (passant à 80 μm) – les fines étant également appelées "filler".

Le liant assure la cohésion entre les grains minéraux en les mouillant et les enrobant d'un film continu.

Le squelette granulaire est l'ossature rigide du mélange. La distribution de taille de différents agrégats donne la composition granulométrique du squelette granulaire qui peut être continue ou discontinue selon la destination du mélange et les propriétés visées.

Le filler absorbe une part du liant introduit et forme le mastic qui est plus rigide et moins thermiquement et cinétiquement susceptible que le liant pur.

2.2. Granulats [7, 41],

2.2.1. Familles des granulats

Les granulats se répartissent suivant leur taille moyenne en plusieurs familles : fines, sables et gravillons. Les diamètres minimaux et maximaux de ces familles sont normalisés.

1) les fines

Les fines (passant < à 80 μm) d'un mélange hydrocarboné sont généralement un mélange de fines d'apport en faible proportion et de fines du sable majoritaires.

Les fines d'apport peuvent être issues de roches massives : le filler calcaire est utilisé majoritairement. On rencontre également d'autres matériaux tels que le ciment, la chaux vive, le filler activé (mélange de fines calcaires et de chaux éteinte), la chaux éteinte, les cendres volantes, les fillers de cimenterie et les ardoises.

2) Les sables

Les sables pour enrobés sont les éléments inférieurs à 6,3 mm.

Le sable doit répondre à des qualités bien spécifiques pour garantir des caractéristiques mécaniques acceptables du mélange bitumineux.

Des sables roulés sont aussi utilisés pour améliorer la maniabilité des mélanges.

3) Les gravillons

Les gravillons (d/D) constituent « l'ossature » du mélange hydrocarboné. A ce titre, leur nature, leur angularité, leur forme conditionnent pour partie la stabilité

des mélanges et les caractéristiques de surface des couches de roulement. De plus, la nature minéralogique influe directement sur la formulation du mélange : certains matériaux (basaltes, granites, gneiss) sont plus difficiles à compacter, d'autres présentent un caractère absorbant (laitiers, calcaires dolomitiques) dont il faut tenir compte pour le dosage en liant. La nature minéralogique et la propreté influent également sur l'adhésivité bitume - granulat.

2.2.2. Propriétés des Granulats

1) La granularité

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle conditionne la compacité de l'enrobé bitumineux ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par la vibration de la colonne de tamis.

Pour constituer le squelette granulaire de l'enrobé bitumineux, on mélange les différentes classes granulaires dans une certaine proportion. La distribution de la taille des différents grains (des plus gros au plus petit) constitue la courbe granulométrique du mélange. Celle-ci peut être continue ou discontinue (c'est-à-dire qu'une ou plusieurs fractions granulaires peuvent manquer), selon la destination du mélange et les propriétés visées. Pour exemple, la courbe granulométrique des enrobés drainants est fortement discontinue, ce qui permet d'obtenir une porosité élevée après la mise en place.

2) La forme

La forme d'un élément granulométrique est définie par le coefficient d'aplatissement qui dépend des trois caractéristiques dimensionnelles principales : l'épaisseur, la grosseur et la longueur.

Les granulats plats ne permettent pas de réaliser des bétons très compacts et, par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ces éléments ont tendance à prendre une orientation préférentielle proche de l'horizontale selon leurs plus grandes dimensions, ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

3) L'angularité

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

4) La propreté

Il s'agit de l'absence dans un granulat d'éléments fins indésirable. Ce sont soit des fines plastiques naturelles (argile), soit des fines issues du concassage ou du broyage des roches,

- La présence d'argile autour des grains risque, une fois humide, de leur faire perdre toute stabilité,
- La qualité de l'adhésivité du bitume sur le granulat dépend de la propreté de la surface de chaque granulat ; une faible propreté diminue l'adhésivité du bitume,

5) Résistance à la fragmentation (chocs)

Elle est mesurée par le coefficient « Los Angeles ». Cette mesure est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic.

6) Résistance à l'attrition et à l'usure

L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour objectif de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons entre eux même dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements. Comme l'usure est très influencée par la présence d'eau, l'essai le plus représentatif est le Micro Deval en présence d'eau.

7) La composition et la nature minéralogique

La nature minéralogique des granulats influe essentiellement sur leur mode de rupture lors du concassage, sur leur forme ainsi que sur leur adhésivité avec le bitume,

On distingue les granulats alcalins et les granulats acides ; les premiers étant le calcaire et le marbre, les seconds le granite et le quartzite.

Les propriétés d'un granulat sont en grande partie déterminées par sa teneur en silice (SiO_2). Les granulats qui possèdent des taux élevés de silices (les granulats siliceux) ne présentent généralement pas une bonne adhésivité avec les bitumes.

Par contre, il est reconnu que les granulats alcalins, tels que le calcaire (de faible teneur en silice), adhèrent bien au bitume,

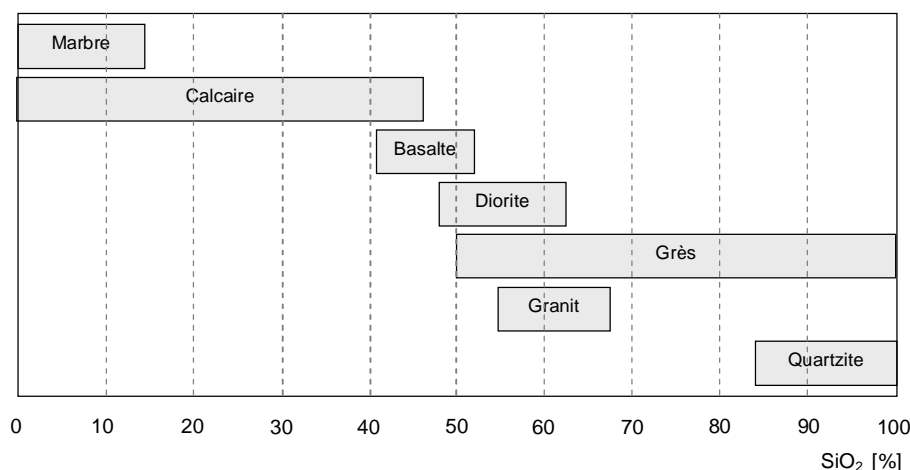


Figure 1.26. Classification simplifiée des roches en fonction de la teneur en silice (SiO_2) [5].

2.3. Les structures de chaussées

2.3.1. Introduction [52]

La chaussée est une structure multicouche constituée de trois parties principales qui ont chacune un rôle bien défini (figure 1.27).

Tout d'abord le sol terrassé ou sol - support est surmonté généralement d'une couche de forme.

L'ensemble sol - couche de forme représente la plate - forme support de la chaussée. La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure la protection du sol - support, permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet d'homogénéiser les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant le sol ou le remblai, et d'améliorer la portance à long terme.

Puis viennent la couche de base et la couche de fondation formant ainsi les couches d'assise. Les couches d'assise apportent à la chaussée la résistance mécanique aux charges verticales induites par le trafic et répartissent les pressions sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible.

Enfin, la couche de surface se compose de la couche de roulement et éventuellement d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise. La couche de surface a deux fonctions. D'une part, elle assure la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations d'eau. D'autre part elle confère aux usagers un confort de conduite d'autant plus satisfaisant que les caractéristiques de surface sont bonnes.

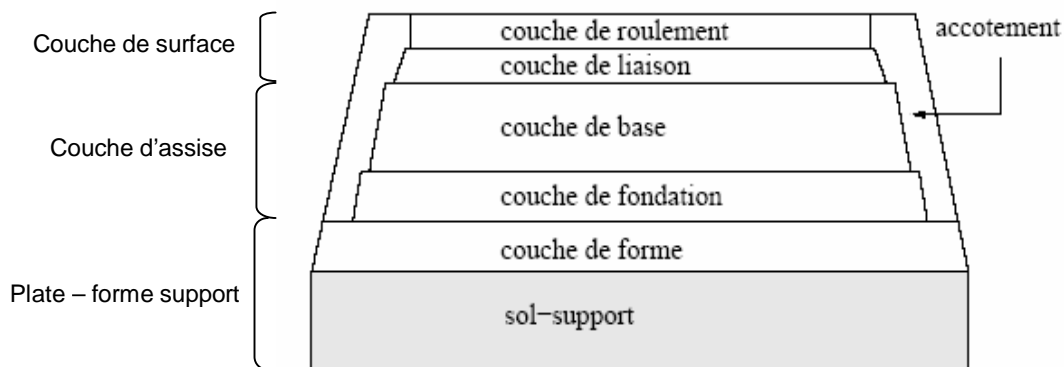


Figure 1.27. Constitution d'une structure de chaussée type.

2.3.2. Influence des actions appliquées à la chaussée

1) Effet du trafic [4, 7, 52]

Chaque couche de chaussée subit des déformations sous l'effet du trafic.

Le calcul des efforts et des déformations qui s'effectue traditionnellement en considérant des multicouches élastiques linéaires isotropes, nécessite, en premier lieu, la connaissance du module de Young et du coefficient de Poisson des matériaux constituant la chaussée.

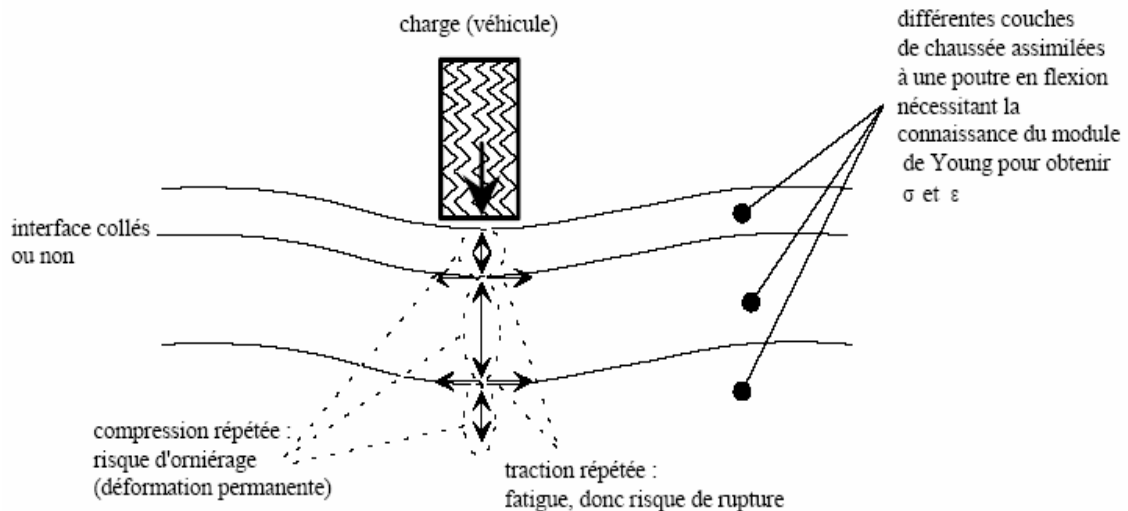


Figure 1.28. Schématisation des sollicitations induites par le trafic [4]

Sous les sollicitations cycliques du trafic, la base des couches structurales subit une traction répétée qui peut créer des microdégradations et entraîner la ruine des couches. Ce phénomène de fatigue peut entraîner des fissures au travers de la chaussée.

Dans le même temps, la partie supérieure de chaque couche est soumise aux efforts de compression répétée qui peuvent entraîner des déformations permanentes induisant un orniérage à la surface de la chaussée.

2) Effet de la température [4,52]

Outre les chargements mécaniques, les chaussées subissent des chargements consécutifs aux variations de la température. Ces variations thermiques entraînent des changements de la rigidité du mélange : à température basse le mélange bitumineux est rigide et fragile tandis qu'à haute température la rigidité du mélange chute et sa ductilité augmente.

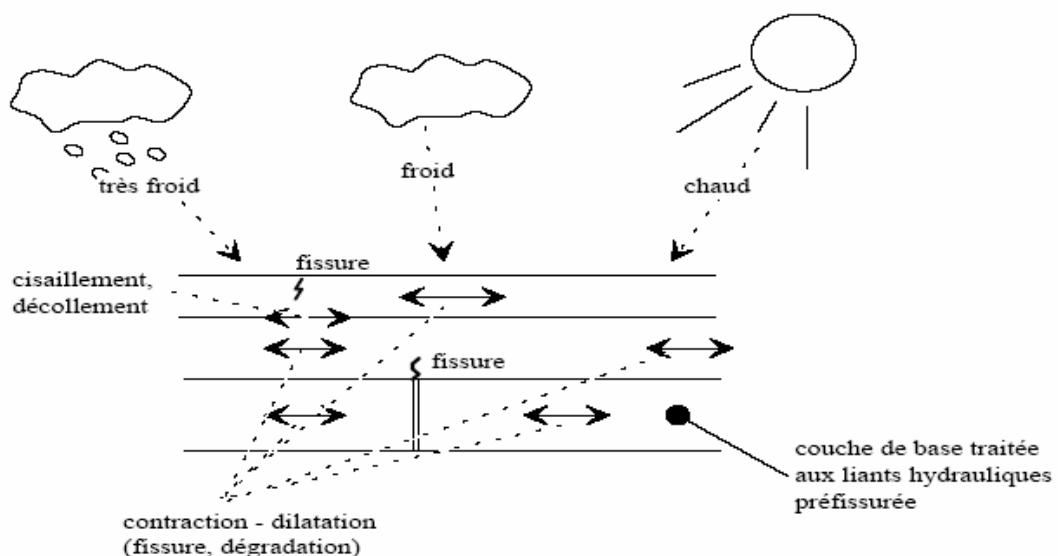


Figure 1.29. Schématisation des sollicitations induites par la température [4].

2.4. Grandes classes de comportement des enrobés bitumineux [4,48].

L'analyse des sollicitations et des dégradations observées sur chaussées, sous l'effet conjugué du trafic et de la température, montre qu'il convient principalement de prendre en compte et de caractériser quatre propriétés thermomécaniques pour les mélanges bitumineux :

- le module (rigidité) et sa dépendance vis-à-vis de la température et du mode de chargement,
- la fatigue,
- l'évolution des déformations permanentes,
- la fissuration et la propagation des fissures à basse température.

Les deux premières propriétés permettent de préciser l'effet structurel et son évolution dans le temps. La troisième est liée à la caractérisation de l'orniérage. La dernière qui fait apparaître des couplages thermo – mécaniques.

Les enrobés bitumineux ont un comportement complexe. La Figure 1.30 permet d'identifier les quatre types de comportement principaux des enrobés bitumineux en considérant l'amplitude de la déformation $|\varepsilon|$ et le nombre de cycles de chargement appliqués N :

- 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 ($< 10^{-4}$), le comportement est considéré viscoélastique linéaire (VEL).
- 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 permanentes sous un grand nombre de cycles de chargements favorisées par une température élevée est le quatrième type de comportement.

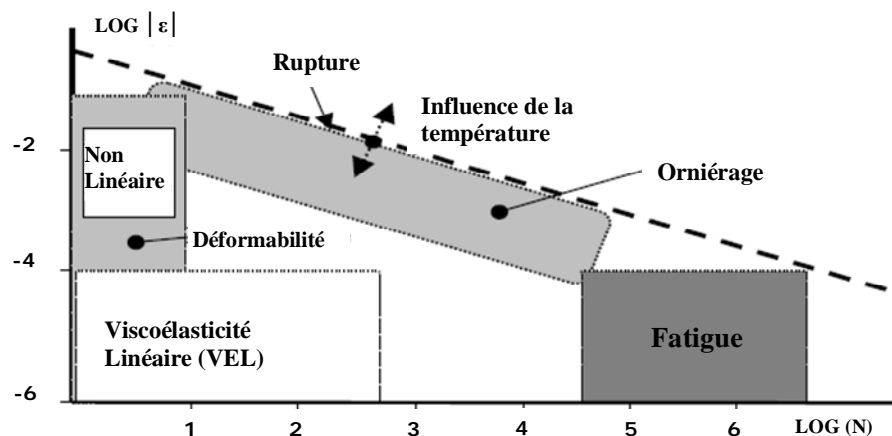


Figure 1.30. Comportement "type" des enrobés bitumineux, (ε) déformation – (N) nombre de chargements [4].

2.5. Caractéristiques et propriétés mécaniques des matériaux bitumineux [52]

Les caractéristiques et les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux varient largement suivant les conditions de formulation, de température et de chargement.

Dans cette section, seules les caractéristiques et propriétés mécaniques ayant des relations avec les phénomènes d'orniérage sont présentées.

L'orniérage désigne de façon générale les phénomènes de déformations permanentes du profil transversal des chaussées, qui apparaissent et croissent sous les effets de la température et du trafic.

2.5.1. Susceptibilité thermique et cinétique

Bien que la quantité de liant bitumineux dans le mélange soit faible par rapport aux composants minéraux, le bitume apporte au mélange la susceptibilité thermique et la susceptibilité cinétique.

La susceptibilité thermique et cinétique du mélange bitumineux se traduisent sous forme d'un changement de ses propriétés mécaniques : le module de rigidité, la résistance aux déformations permanentes...etc.

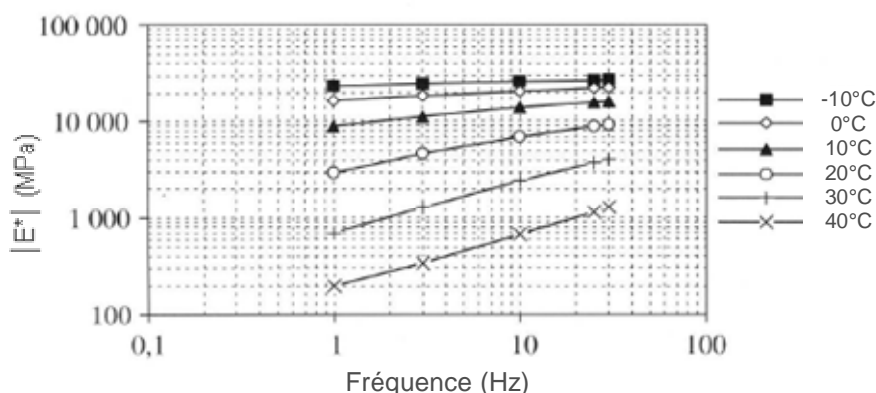


Figure 1.31. Isothermes du module complexe [52]

Dans le domaine fréquentiel, des essais de lois de chargement sinusoïdales mettent en évidence les variations du module de rigidité $|E^*|$ des matériaux bitumineux suivant les températures et les fréquences de chargement.

Ce sont les deux paramètres qui influencent le plus sur la valeur du module de rigidité $|E^*|$. Plus la température et/ou la durée de sollicitation sont élevées plus le module de rigidité est faible (figure 1.31).

L'angle de phase φ , paramètre caractérisant le déphasage entre le chargement fréquentiel et la déformation, varie également avec la température (figure 1.32).

L'angle de phase augmente avec la température jusqu'à une valeur de température palier puis diminue au-delà. Cela peut être expliqué par le fait qu'au-delà d'une certaine température, le bitume devient suffisamment fluide pour ne plus intervenir dans la rigidité du mélange, il joue le rôle de lubrifiant entre des grains minéraux et le comportement tend vers celui d'un matériau granulaire non lié [52].

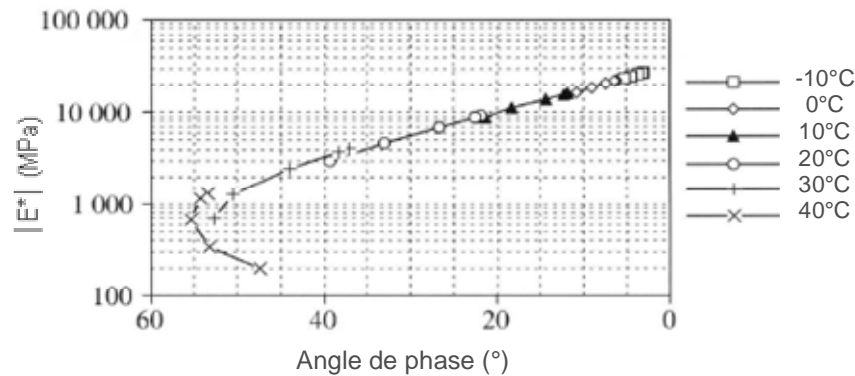


Figure. 1.32. Module complexe dans l'espace de Black [52]

Plus le bitume est dur et plus le module de rigidité du mélange est élevé.

La teneur en liant influence la compacité du mélange, son augmentation conduit à une augmentation du module de rigidité du mélange jusqu'à une valeur optimale et au-delà de cette limite, le module diminue [52].

Il est également observé que la diminution de la teneur en vides va améliorer le mélange avec une rigidité plus élevée et une susceptibilité thermique plus faible [52].

La résistance des matériaux bitumineux à l'orniérage dépend également de la température, c'est-à-dire :

- Aux basses températures, le bitume est rigide. La résistance de cohésion des éléments est alors élevée. Le mastic contribue à rigidifier le mélange, et la résistance du mélange est élevée.
- A température élevée, le bitume devient plus visqueux. La force de cohésion est alors affaiblie. La résistance à la déformation du squelette granulaire ainsi que du mastic est diminuée, le mélange devient beaucoup plus déformable.

2.5.2. Rôle des contraintes de confinement

Les essais de fluage statique à différents niveaux de confinement ont montré une rigidification des matériaux bitumineux sous l'action des pressions de confinement (figure 1.33).

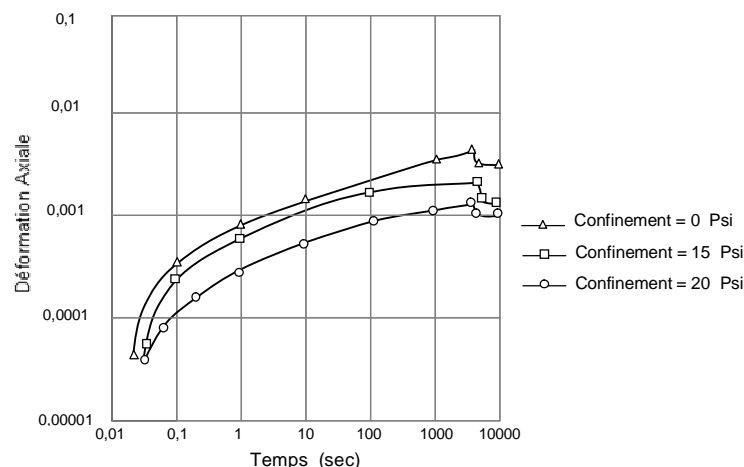


Figure 1.33. Essais de fluage statique [52]

La pression de confinement a tendance à densifier la structure granulaire des matériaux bitumineux et, en conséquence, fait augmenter le module de rigidité et la résistance aux déformations.

2.5.3. Déformations permanentes

1) Mécanisme de formation des déformations permanentes

L'origine des déformations permanentes des matériaux bitumineux est souvent attribuée au seul fluage du liant bitumineux.

Les déformations permanentes proviennent des déformations par fluage, sous les effets du couplage entre température élevée et chargement de longue durée.

2) Déformation visqueuse du liant bitumineux

Sous une température élevée et/ou une longue durée d'application de charge, le liant bitumineux réagit comme un fluide visqueux.

Dans ces conditions, le liant agit comme un agent de lubrification plutôt que de cohésion entre des agrégats, et ceci permet au squelette granulaire de se déformer plastiquement.

Ceci explique la relation importante entre la viscosité du liant et le niveau de déformations permanentes des matériaux bitumineux.

3) Déformation plastique du squelette granulaire : mécanisme de cisaillement

Les charges mécaniques appliquées sur les matériaux bitumineux sont distribuées soit par les contacts entre les granulats, soit par le mastic qui remplit les espaces entre les agrégats.

La résistance des contacts entre les granulats est engendrée par les interblocages entre grains et par la cohésion apportée par le liant.

Lorsque le liant devient plus visqueux et agit comme un lubrifiant, les contacts qui assurent la rigidité du squelette granulaire des matériaux bitumineux deviennent faibles.

En même temps, le mastic est également moins rigide. Le squelette granulaire peut alors se déformer plastiquement suite aux déplacements relatifs des agrégats par translations et/ou rotations.

4) Résistance aux déformations permanentes des matériaux bitumineux

La résistance aux déformations permanentes est un paramètre important d'un matériau bitumineux.

La résistance des mélanges bitumineux dépend naturellement de la cohésion et de l'angle de frottement interne, (Ceci met également en évidence le rôle des contraintes de confinement qui contribuent au frottement interne entre les granulats).

La théorie de Mohr - Coulomb peut permettre d'analyser la résistance des enrobés bitumineux.

La résistance des matériaux est considérée comme une fonction de la cohésion 'C' et de l'angle de frottement interne 'Φ' pour un cas de chargement simple à savoir :

$$t_{\max} = c + s_N \tan f$$

Où :

τ_{\max} est la contrainte de cisaillement admissible.

C est la cohésion.

Φ est l'angle de frottement interne.

σ_N est la contrainte normale (confinement).

Bien que ces conceptions semblent peu utilisées, elles ont été développées dans les années 1940 par McLeod et Smith [52].

McLeod (1948) [52] a proposé une formule de la capacité portante des chaussées bitumineuses en se basant principalement sur la capacité portante des sols avec des modifications et simplifications :

$$V = \frac{4c}{1 - \sin f} \sqrt{\frac{1 + \sin f}{1 - \sin f}}$$

Où V est la charge verticale maximale que la chaussée peut supporter.

Pourtant, cette approche a été abandonnée, suite à des difficultés expérimentales lors de la détermination des paramètres c et Φ des matériaux bitumineux.

Christensen et Bonaquist, (2002) [52] ont proposé une méthode simplifiée pour déterminer c et Φ des mélanges bitumineux par utilisation des résultats des essais de traction indirecte et des essais de compression uniaxiale.

La cohésion et l'angle de frottement sont obtenus par les équations suivantes :

$$\begin{cases} f = \sin^{-1}(a_1) \\ c = \frac{(2 - a_1) s_{UIDT}}{\cos f} \end{cases}$$

$$\text{Avec : } a_1 = \frac{|s_{UUC}| - 4|s_{UIDT}|}{|s_{UUC}| - 2|s_{UIDT}|}$$

Où :

a_1 : paramètre de pente.

σ_{UUC} : la résistance à la compression sans confinement.

σ_{UIDT} : la résistance à la traction indirecte.

2.6. Les essais sur les enrobés bitumineux [41, 47,48].

Parmi les essais de laboratoire utilisés sur les mélanges bitumineux on cite :

1/ essai Duriez :

Cet essai consiste à compacter l'enrobé dans un moule cylindrique par une pression statique à double effet. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à une température de 18°C et une hygrométrie contrôlée, l'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression simple.

Le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec donne la tenue à l'eau du mélange.

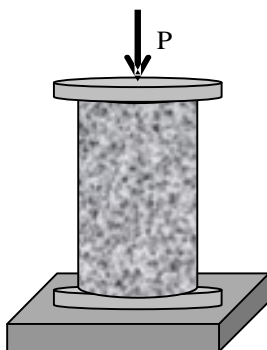


Figure 1.34. Principe de l'essai Duriez

2/ L'essai Marshall :

Les enrobés bitumineux sont compactés dans des moules à l'aide d'une dame en vue de réaliser des éprouvettes cylindriques.

Ces éprouvettes (température : 60°C) sont placées entre les deux mâchoires semi-cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse constante. Au cours de l'essai, la charge et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture.

Cet essai rentre dans la catégorie des essais empiriques à chargement unique qui, vu la complexité des sollicitations engendrées, ne permet pas la détermination d'une propriété intrinsèque du matériau. Il conduit à la détermination directe de deux grandeurs : le fluage (mm) et la stabilité Marshall (kN), deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage.

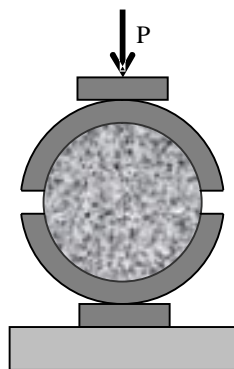


Figure 1.35. Principe de l'essai Marshall

3/ La Presse à Cisaillement Giratoire :

La presse à cisaillement giratoire permet d'étudier l'aptitude au compactage des enrobés hydrocarbonés par l'estimation du pourcentage de vides en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobé.

Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre.

On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression, verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1° (externe) ou $0,82^\circ$ (interne) et soumise à un mouvement circulaire.

Ces différentes actions exercent un compactage. On observe l'augmentation de compacité en fonction du nombre de tours.

ce mode de compactage traduit la relation linéaire qui existe entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur de chantier et le nombre de girations. Alors que la méthode Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de giration. Cette courbe du pourcentage de vides en fonction du nombre de girations décrit la maniabilité du mélange (figure 1.37), qui permet d'exercer une discrimination entre :

- Des mélanges trop maniables, qui auront tendance à présenter des ornières,
- Des mélanges peu maniables, qui seront perméables et peu durables.

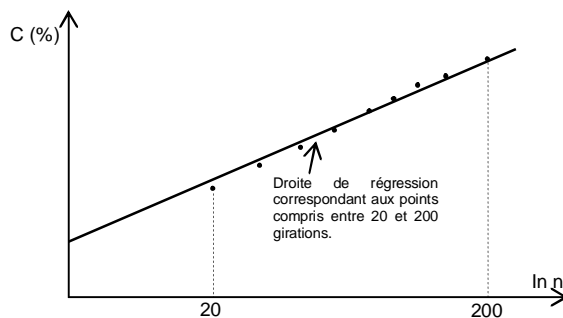


Figure 1.37. Droite de compactage PCG

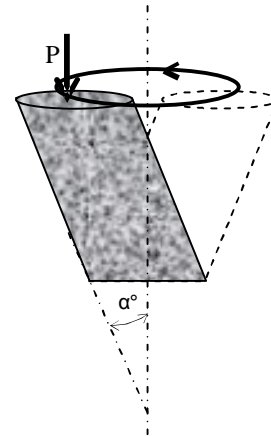


Figure 1.36. Principe du compactage à la presse à cisaillement giratoire PCG

4/ L'essai de compression diamétrale :

Cet essai a pour but d'atteindre un état de traction dans la zone centrale d'un échantillon cylindrique de faible épaisseur. Les grandeurs mesurées au cours de l'essai sont la variation de diamètre de l'éprouvette et la force d'application, à partir desquelles est déduit par calcul le module de déformation et la résistance à la traction du matériau. Il est encore appelé essai de « traction indirecte » ou encore « essai brésilien ».

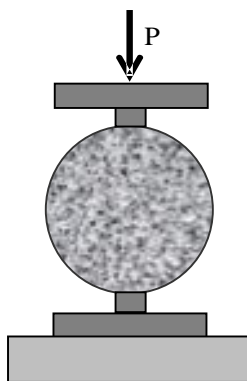


Figure 1.38. Principe de l'essai de compression diamétrale

5/ L'essai d'orniérage :

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

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

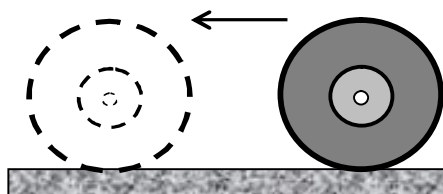


Figure 1.39. Principe de l'essai d'orniérage

6/ L'essai de traction directe :

Il s'agit d'un essai de traction à température constante et à vitesse de déformation constante. Au cours de l'essai, les paramètres mesurés sont la contrainte et la déformation.

La contrainte maximale, encore appelée contrainte de rupture, et la déformation correspondante, donnent directement accès à la résistance en traction du matériau testé, pour les conditions d'essais (température, vitesse) considérées.

On observe classiquement que plus la vitesse de déformation imposée est élevée, plus l'enrobé a un comportement rigide (contrainte maximale plus élevée) et plus l'allongement à la rupture est faible (figure 1.41).

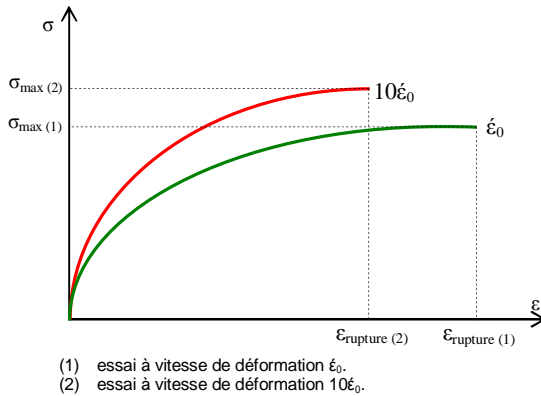


Figure 1.41. Résultats classiques pour l'essai de traction directe sur enrobés [48]

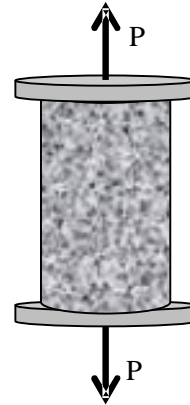


Figure 1.40. Principe de l'essai de traction directe

7/ Essai de fluage statique uniaxial :

L'essai consiste à charger axialement, avec une charge constante des éprouvettes cylindriques d'enrobés afin de déterminer la déformation résultante dans la direction de la charge (figure 1.42).

La déformation relative « ϵ » égale au rapport « $\Delta H/H$ » peut être représenté en fonction du temps (figure 1.43).

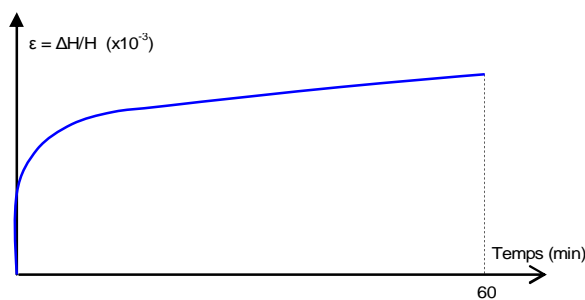


Figure 1.43. variation de la déformation relative en fonction du temps

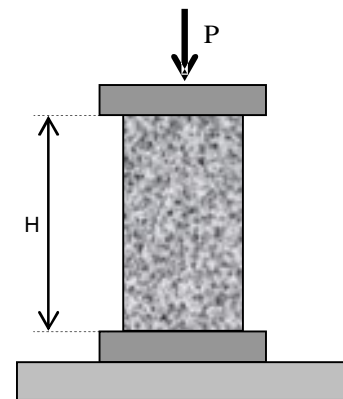


Figure 1.42. Principe de l'essai de compression cyclique uniaxial sous confinement

Les conditions d'essai sont :

- $P = 500\text{N}$; $\sigma = 0,1\text{ MPa}$,
- $T = 40^\circ\text{C}$,
- $t = 1\text{ h}$ (la durée de chargement).

8/ Essai de fluage dynamique :

Cet essai consiste à déterminer la résistance à la déformation d'une éprouvette cyclique de mélanges bitumineux. L'éprouvette est préparée en laboratoire ou extraite de la chaussée.

Une éprouvette cylindrique, maintenue à une température de conditionnement élevée, est placée entre deux pistons de chargement parallèles et plans. L'éprouvette est soumise à une contrainte de confinement « σ_c » à laquelle une contrainte axiale cyclique « $\sigma_a(t)$ » vient se superposer.

$$\text{Avec : } s_a(t) = s_v \cdot (1 + \sin(2p \cdot f \cdot t))$$

Où : - s_v est l'amplitude de la contrainte sinusoïdale.

- f est la fréquence,
- t est le temps,

La contrainte axiale totale qui en résulte, « $\sigma_A(t)$ » est comme suit :

$$s_A(t) = s_c + s_a(t) = s_c + s_v \cdot (1 + \sin(2p \cdot f \cdot t))$$

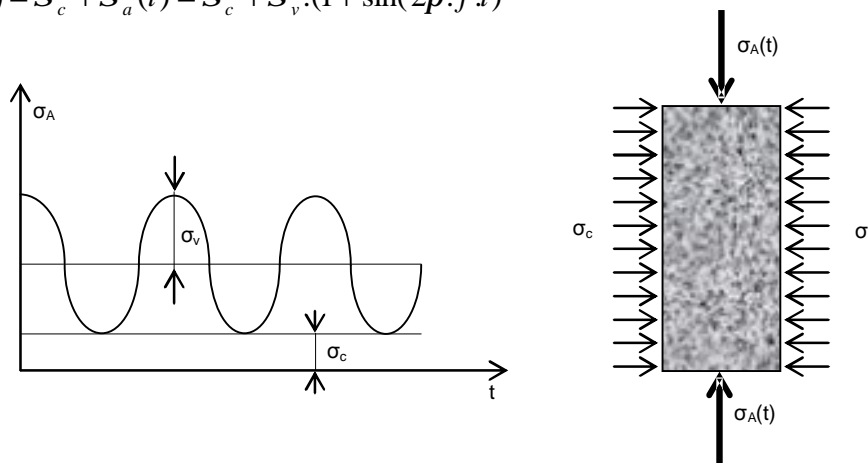


Figure 1.44. Représentation des contraintes exercées sur l'éprouvette dans le cas d'un essai de fluage dynamique

Phase (1) : partie initiale de la courbe de déformation, où la pente de la courbe diminue avec l'augmentation du nombre de cycles de chargement.

Phase (2) : partie intermédiaire de la courbe de déformation, où la pente de la courbe est pratiquement constante et présente un point d'inflexion.

Phase (3) : partie finale de la courbe de déformation, où la pente de la courbe augmente avec l'augmentation du nombre de cycles de chargement.

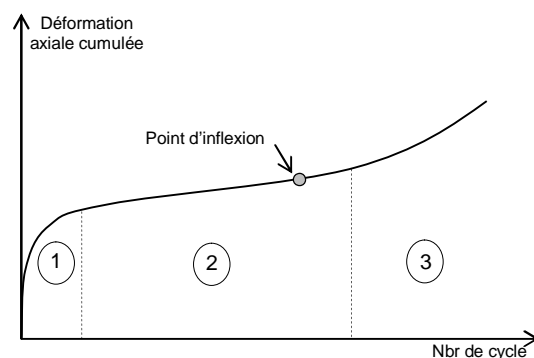


Figure 1.45. Exemple de courbe de fluage dynamique

9/ les essais de module :

La rigidité du mélange est déterminée soit par un essai de module complexe (solicitation sinusoïdale sur éprouvette trapézoïdale) soit par un essai de traction

directe (sur éprouvette cylindrique ou parallélépipédique). La charge est appliquée dans un domaine de petites déformations, en contrôlant le temps ou la fréquence, la température, la loi de chargement.

Le module (rapport de la contrainte à la déformation) est calculé pour chaque essai élémentaire (température, fréquence).

Les valeurs de la rigidité sont présentées graphiquement en échelle logarithmique, sous forme d'isothermes dont la rigidité varie en fonction des temps de charge (figure 1.46.a).

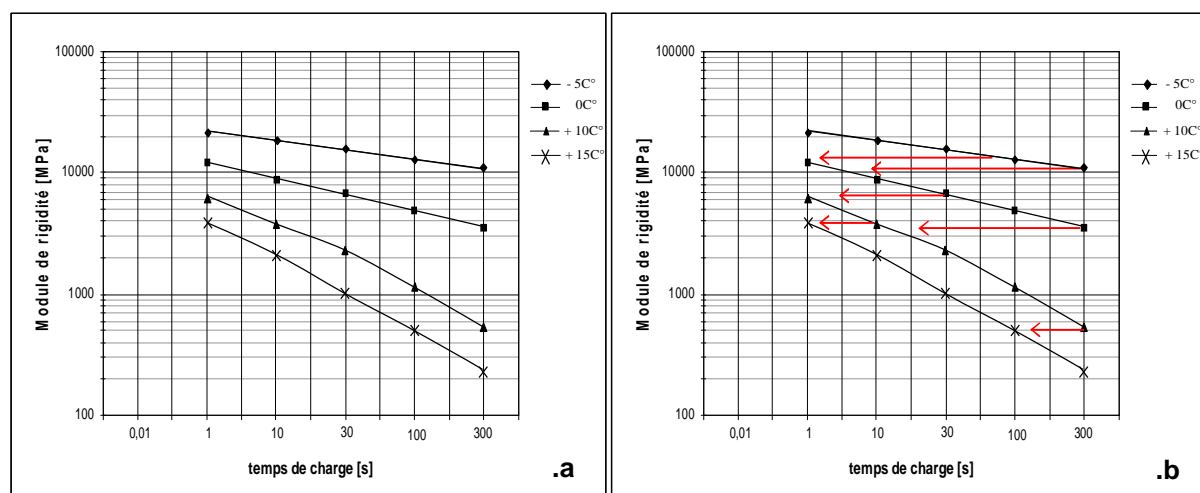


Figure 1.46. a) Exemple d'isothermes [47]

b) Translation isothermes le long de l'axe des temps de charge [47]

L'équivalence temps – température permet de réduire les courbes isothermes en une seule courbe de référence (pour une température de référence) et de définir le module pour une plage de temps de charge (ou fréquences) beaucoup plus vaste que celle des essais (figure 1.47).

La construction de la courbe de référence ou « courbe maîtresse » se fait par des translations parallèles à l'axe des temps de charge (ou fréquences) (figure 1.46.b).

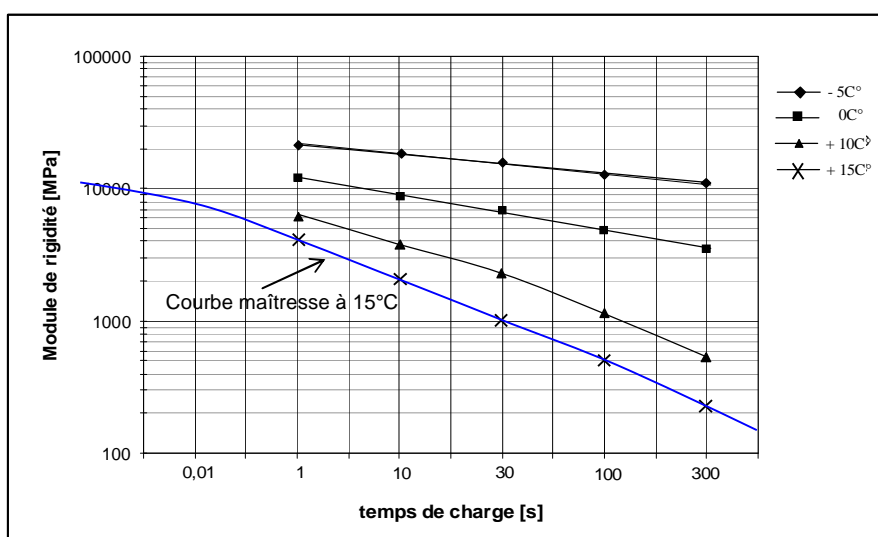


Figure 1.47. Exemple d'une courbe maîtresse à 15°C [47].

10/ Les essais de fatigue :

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

Sur un graphique, les différents couples (niveau de chargement, nombre de cycles jusqu'à l'endommagement), se placent sur une droite de fatigue (figure 1.48).

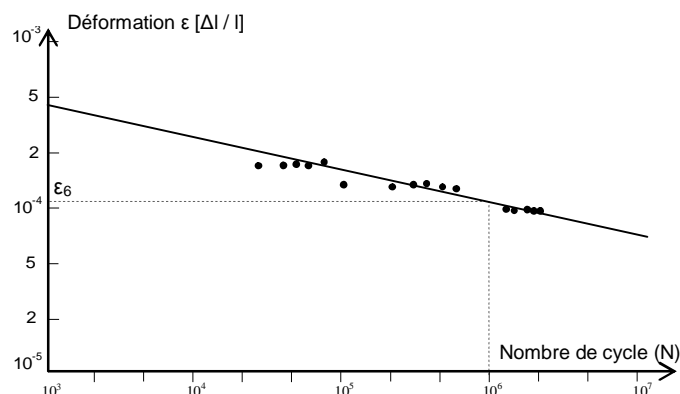


Figure 1.48. Exemple d'un essai de fatigue.

A 10^6 cycles, le seuil de chargement relevé sur la droite est la valeur caractéristique de la résistance en fatigue dite : « ϵ_6 ».



Figure 1.49. Essai de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales [41].

2.7. Conclusion

Dans ce chapitre consacré aux enrobés bitumineux, nous avons eu l'occasion de voir :

- Les grandes classes de comportement des enrobés bitumineux.
- Les caractéristiques et les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux qui varient largement selon les conditions de formulations, de température et de chargement.
- La panoplie des essais relatifs aux enrobés. Ces essais tant classiques que particuliers ont tous pour but fondamental la connaissance du comportement mécanique des enrobés bitumineux afin de pouvoir élaborer des stratégies en matière de structure routière.

Reste à noter que, pour ce qui est de notre pays, seuls les essais classiques (Marshall et Duriez) sont utilisés pour la formulation des enrobés bitumineux.

Chapitre 3 : LES POLYMERES [1, 2, 37].

3.1. Introduction

Devant l'accroissement du trafic et des charges les observations suivantes ont été relevées :

- Le bitume pur ne permet plus à l'enrobé de type traditionnel d'assurer dans tous les cas une résistance suffisante à l'orniérage pour des températures durablement élevées,
- Pour un grade plus dur, s'il apporte à l'enrobé un meilleur comportement à l'orniérage, il accroît à l'inverse les risques de fissuration,
- De même, des 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 qualité mécanique et d'adhésivité.

A cet effet, Pour améliorer les performances de ces liants, on fait donc appel à des techniques de modification.

L'augmentation de l'agressivité du trafic routier et d'autre part les crises pétrolières de 1973 puis de 1979 ont constitué des facteurs essentiels du développement des liants modifiés.

En effet la recherche d'économie sur les travaux de construction a conduit à rechercher des solutions innovantes en particulier dans le domaines de l'entretien des routes avec des revêtements d'épaisseur réduite et une durée de vie plus importante.

Mais c'est à une quarantaine d'années que l'on peut faire remonter l'essor véritable des recherches de produits et procédés permettant de modifier les caractéristiques des bitumes à usages routier.

Aux Etats-Unis, on relève à la fin des années 50, la réalisation d'enrobés avec du bitume modifié par des caoutchoucs incorporés sous forme de latex.

En Europe, et particulièrement en Allemagne, des applications d'enrobés au bitume polymère voient le jour au début des années 70.

En France, la recherche de revêtement adaptés aux tabliers métalliques de pont à dalles aboutit à la mise au point de liants polymères spéciaux avec une première mise en œuvre sur le viaduc de Caronte en 1972.

3.2. Agents modifiants

Pour atteindre les performances préconisées, différents types d'additifs ont été testés. Parmi les additifs qui ont montré leur apport plus ou moins bénéfique sur le comportement rhéologique des bitumes, on rencontre :

- Les polymères thermodurcissables.
- Les polymères thermoplastiques (les élastomères et les plastomères).
- Le latex (caoutchouc naturel NR et les caoutchoucs synthétiques).
- La poudrette de Caoutchouc.

Les polymères sont des substances constituées de grandes molécules formées par la répétition d'un même motif composé d'une ou de plusieurs unités de base.

Au sens large, le terme polymérisation désigne l'ensemble des procédés de formation de chaînes à partir de molécules plus petites (monomères).

On distingue deux types de polymères à savoir :

- Les homopolymères ne sont constitués que d'un seul type de monomère dont le motif se répète dans la molécule;
- Les copolymères sont constitués de plusieurs types de monomères.

3.2.1. Polymères thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables ne ramollissent pas durant le chauffage, ils durcissent de façon irréversible.

En raison de leur coût élevé et de la méthode de leur mise en œuvre, ces produits ne sont pas très utilisés dans le revêtement routier. Mais ils sont utilisés en enduits superficiels aux propriétés fortement antidérapantes.

Les produits les plus connus sont basés sur des résines époxy. Ils sont utilisés en mélange de deux composants dont l'un contient la résine et l'autre un durcissant qui réagit chimiquement pour former une structure forte.

3.2.2. Polymères thermoplastiques

Les polymères thermoplastiques sont caractérisés par le ramollissement durant le chauffage et par le durcissement durant le refroidissement de façon réversible.

Ces produits sont subdivisés en deux familles : les élastomères et les plastomères.

3.2.2.1. Les élastomères

Les polymères thermoplastiques élastomères ont retenu l'attention de l'industrie, car ils joignent les propriétés d'élasticité aux caractéristiques de mise en œuvre des thermoplastiques.

Les élastomères sont des blocs de copolymères sous forme de SBS où « S » représente le polystyrène et « B » le polybutadiène.

Les blocs polysynthétiques sont reliés par une séquence polybutadiénique, d'où leur sigle : S-B-S.

La modification des bitumes par les « SBS » :

- diminue la susceptibilité thermique,
- augmente la cohésion,
- améliore le comportement rhéologique des bitumes.

Un autre élastomère thermoplastique testé dans la modification des bitumes est l'EPDM (éthylène-propylène-diène monomère), obtenu par polymérisation d'un diène, généralement l'éthylolène norbonène avec le copolymère éthylène-propylène.

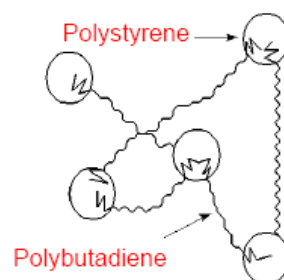


Figure 1.50.
Structure du SBS. [29]

L'EPDM est utilisé dans la construction (membranes des toits et fenêtres) ainsi que sur les côtés des pneus pour limiter leur fissuration. Son excellente résistance électrique lui permet d'être utilisé comme isolant pour câbles à moyenne et haute tension. Sa bonne résistance à l'absorption d'eau, combinée avec sa bonne résistance mécanique, son coût relativement abordable, le prédispose aux applications de joints d'étanchéité dans des conduites d'eau ou dans des radiateurs d'automobiles.

L'addition d'EPDM au bitume :

- Améliore les propriétés viscoélastiques du bitume,
- Augmente la compatibilité et la stabilité du système.

3.2.2.2. Les plastomères

Le polyéthylène (PE), le polypropylène atactique et isotactique (aPP, iPP), le chlorure de polyvinyle (PVC), le polystyrène (PS), l'éthylène acétate de vinyle (EVA) et l'éthylène méthacrylate (EMA) sont les principaux polymères de ce groupe.

Les plastomères s'associent avec le bitume à la température ambiante en augmentant sa viscosité. Cependant, ils ne confèrent pas, d'une manière significative, de déformation élastique au bitume.

Le polyéthylène se disperse mal dans le bitume et risque de provoquer le phénomène de ségrégation.

L'addition d'EVA au bitume :

- Améliore la résistance à la déformation du bitume,
- Augmente sa cohésivité.

3.2.3. Le latex

On distingue trois types de latex qui sont :

3.2.3.1. Caoutchouc naturel (NR) « Naturel Rubber »

Les latex naturels proviennent du latex produit par certains arbres originaires d'Amérique du Sud et d'Asie.

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 [2].

3.2.3.2. Le caoutchouc styrène butadiène (SBR)

Le « styrene butadiene rubber », SBR est un caoutchouc synthétique (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 caoutchouc naturel (NR), le styrene butadiene rubber (SBR) a une faible résistance mécanique qui nécessite le mélange de la gomme brute avec une charge de fillers tels que le noir de carbone pour améliorer la rigidité et la résistance mécanique.

Les autres propriétés chimiques sont similaires à celles du caoutchouc naturel (NR) avec néanmoins une meilleure résistance au vieillissement. Les coûts de production du SBR sont à peu près comparables à ceux du NR [2].

3.2.3.3. Le polychloroprène (CR)

Plus populaire sous l'appellation "Neoprène", 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 caoutchouc naturel (NR), surtout dans le cas des composites vulcanisés. Sa résistance aux solutions acides et basiques est meilleure que celles du NR et du SBR, mais il est plus coûteux.

Les objectifs essentiels d'utilisation du latex sont :

- L'amélioration de l'adhérence,
- L'imperméabilité en couche de roulement ultramine sur un support peu déformé,

3.2.4. Poudrette de Caoutchouc [2,33, 34, 36],

La poudrette de caoutchouc provient essentiellement des pneumatiques usagés non réutilisables, Le stockage aérien non contrôlé des pneus peut constituer une source de nuisances écologiques (esthétique, développement de larves, de moustiques, de rongeurs...) et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et de sécurité.

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

- 385 000 pneus usagés pour l'année 1990,
- 546 000 pneus usagés pour l'année 1995,
- 656 000 pneus usagés pour l'année 2000,
- 1 million de pneus usagés pour l'année 2002.

La production annuelle des pneus usagés en France, Suisse et Tunisie et illustrée dans le tableau 1.4 :

Tableau 1.4. Production annuelle des pneus usagés.

Pays	Production annuelle des pneus usagés	
France	60 millions d'unités	400 000 tonnes
Suisse	-	50 000 tonnes
Tunisie	2 millions d'unités	-
<u>Ratios et Mesures</u> (source ALIAPUR ¹) <ul style="list-style-type: none"> • 1 tonne = 153 pneus VL, = 19 pneus PL. • 1 pneu VL = 6,53 kg, • 1 pneu PL = 53,41 kg, • 1 tonne = 2 m³ broyés. 		

Où VL : Véhicule léger,
PL : Poids Lourd.

Heureusement, les pneus hors d'usage constituent une ressource qui peut être recyclée en produits nouveaux à valeur ajoutée. Leur recyclage bénéficie tant à l'environnement qu'à l'économie et la technologie.

3.2.4.1. Le pneumatique

Les pneus (abréviation de pneumatique) 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.

Le pneu est le seul élément du véhicule qui le lie en mouvement avec le sol. Pour remplir ce rôle, le pneu doit assurer plusieurs fonctions tout en faisant un bon compromis sur une série de paramètres :

- Supporter la charge verticale,
- Assurer un bon frottement avec le sol (motricité, freinage et adhérence dans les courbes),
- Durabilité de la gomme,
- Déformabilité pour épouser les irrégularités du revêtement,
- Efficacité sur sol sec, mouillé, enneigé ou glacé.

Une des premières structures du pneu, appelée "Diagonale", était constituée de plusieurs "nappes" croisées les unes par rapport aux autres (figure 1.51.a). Le problème est que si le pneu favorise une bonne stabilité des flancs, il a tendance en revanche à surchauffer avec la vitesse.

Le pneu à structure "Radiale" est une évolution majeure depuis la création du pneu. La structure radiale est composée d'une nappe dont la disposition est perpendiculaire à la bande de roulement (figure 1.51.b). Elle est chevauchée par une série de nappes croisées à 90° les unes par rapport aux autres, ce qui a pour effet de ne pas transmettre les flexions des flancs à la bande de roulement.

¹ Filière Française de valorisation des pneumatiques usagés, Recherche et Développement.



b) Pneumatique à structure radiale

a) Pneumatique à structure diagonale

Figure 1.51. Schéma d'un pneumatique (source ALIAPUR)

L'avantage de la structure radiale est de limiter le nombre de nappes par rapport à la structure diagonale et ainsi réduire le poids et l'inertie de la roue pour une maniabilité accrue.

3.2.4.2. Composition chimique des pneumatiques

La matière de base du pneumatique est composée principalement d'élastomère naturel (caoutchouc) ou synthétique (copolymère de styrène - butadiène ou autres issus de la pétrochimie) auquel on ajoute des charges (noir de carbone), des plastifiants, des antioxydants et des agents de vulcanisation tels que l'oxyde de zinc ou le soufre.

Sa constitution varie peut entre les pneus tourisme et les pneus poids lourd.

Tableau 1.5. Constitution moyenne des pneus (selon ALIAPUR)

Matériaux	Pneu Tourisme	Pneu Poids lourd
Elastomère	47 %	43 %
Noir de carbone	21.5 %	21 %
Acier	16.5 %	27 %
Textile	5.5 %	-
Oxyde de zinc	1%	2 %
Soufre	1%	1%
Autres	7.5 %	6 %

Quelques caractéristiques générales du pneu sont indiquées ci-dessous (source ALIAPUR) :

- Humidité : < 1 % en poids.
- Métaux lourds : < 0,1 % en poids (excepté pour le Zn).
- Température d'inflammation : 338 ° C.

3.2.4.3. Production de la poudrette de caoutchouc

La fabrication de la poudrette de caoutchouc utilise comme matière première les pneus usagés de véhicules légers, poids lourds et divers engins (travaux publics et agricoles). La quantité de caoutchouc extraite par pneu est en moyenne de 5kg pour les véhicules légers et de 34 kg pour les poids lourds, soit respectivement 80% et 73% de la masse totale du pneu usagé.

La production de la poudrette de caoutchouc passe par plusieurs processus en fonction de la finesse et de la micromorphologie du produit final désirée.

Après séparation de l'armature du talon et éventuellement de quelques nappes de textile, le pneu passe par une série de déchiqueteuses qui le réduisent à des









morceaux de tailles de plus en plus petites. Des tamis montés à la suite des déchiqueteuses réinjectent le refus en amont de la chaîne pour un autre passage.

Tout au long du processus de déchiquetage, des aimants puissants séparent les fibres métalliques mélangées au caoutchouc.

Les morceaux de quelques millimètres de côté sont ensuite passés dans des moulins qui les réduisent à la finesse voulue. Il existe plusieurs méthodes de mouture et l'on peut citer :

- Le broyage à température ambiante est effectué au moyen de granuleurs ou de broyeurs à cylindres.
- Le traitement cryogénique nécessite la congélation du caoutchouc (refroidissement préalable à l'azote liquide LN₂).

Tableau 1.6. Exemples de demi-produits issus des pneumatiques

			
Pneus entiers	Pneus déchiquetés Dimension > 50 mm	Pneus déchiquetés Dimension > 50 mm	Granulats 7/15 mm
			
Granulats 2/7 mm	Granulats 0,5/2 mm	Poudrettes 0/0,5 mm	Poudrette < 50 µm

3.3. Conclusion

Les polymères utilisés actuellement en technique routière sont :

- le copolymère butadiène - styrène (SBS) qui présente un accroissement du module de rigidité et une élévation des températures de ramollissement et d'écoulement du liant (famille des élastomères),
- le copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle (EVA) qui donne une bonne résistance à la fatigue et une stabilité thermique remarquable (famille des plastomères),
- La poudrette de caoutchouc de pneus recyclés qui présente les mêmes améliorations que le SBS à moindre échelle.

On peut tenter de dresser les caractéristiques du polymère thermoplastique «idéal» pour la modification des bitumes. Un tel thermoplastique doit être :

- Solide et élastique à la température ambiante mais doit présenter une faible viscosité aux températures d'enrobage et de mise en oeuvre des bétons bitumineux.
- Compatible avec les bitumes et les granulats, c'est à dire conduire à un mélange homogène présentant de bonnes propriétés adhésives et chimiquement stables aux températures habituelles de mise en oeuvre des enrobés ;
- Non toxique.
- recyclable avec les technologies habituellement utilisées dans le domaine routier.

Chapitre 4 : LES BITUMES POLYMERES

4.1. Introduction

Actuellement, la modification des bitumes par l'emploi d'un agent chimique apparaît comme la meilleure voie pour améliorer les caractéristiques physiques et mécaniques des bitumes et des enrobés bitumineux.

Cette modification consiste à ajouter au bitume un polymère selon les conditions suivantes :

- dans des proportions appropriées en fonction du type de bitume et du type de polymère,
- les paramètres de fabrication du bitume polymère (la température, la vitesse et la durée de malaxage).

4.2. Objectifs de la modification

Les bitumes doivent répondre à un certain nombre de critères qui sont essentiellement des critères mécaniques, et qui doivent garantir aux enrobes correspondants :

- une bonne résistance à la déformation permanente (Orniérage de la partie supérieure de la chaussée à la température de service).
- Une bonne résistance à la fissuration mécanique (fatigue liée au trafic)
- Une bonne résistance à la fissuration thermique résultant des basses températures.

Les liants bitumineux tels que produits dans les raffineries ne possèdent pas les performances requises pour être utilisés dans la construction des routes qui sont de plus en plus soumises à de fortes charges des camions, à un trafic intense et à des conditions climatiques très rigoureuses [1].

Pour augmenter les performances de ces liants, on fait donc appel à des techniques de modification.

L'objectif de la modification est de produire un liant "idéal" qui devrait avoir une cohésion améliorée et une susceptibilité thermique très faible dans toute la plage des températures d'utilisation [12].

Les résistances à la déformation permanente, à la rupture et à la fatigue devraient être importantes, alors que la susceptibilité aux temps de charge devrait être faible. À cet effet, les chercheurs se sont fixés comme objectif de trouver des additifs plus performants et facile à incorporer dans des matrices bitumineuses [1].

4.3. Notions de compatibilité

Comme il est précisé au chapitre précédent, le choix de polymères pour modifier les bitumes est restreint à quelques familles chimiques, essentiellement les plastomères et les élastomères.

Les problèmes majeurs qui se posent durant la préparation et l'utilisation des mélanges bitume polymères (BMP) sont la dispersion du polymère dans le bitume et

la stabilité des mélanges obtenus. La compatibilité des mélanges bitume - polymères dépend non seulement de la composition du pétrole brut à partir duquel le bitume est produit, mais aussi du procédé de fabrication de ce dernier [1].

Donc, la compatibilité est définie habituellement comme la possibilité de réaliser un mélange visuellement homogène. Une destruction de cet équilibre se traduisant par une précipitation des asphaltènes est un ressuage des huiles [9, 11].

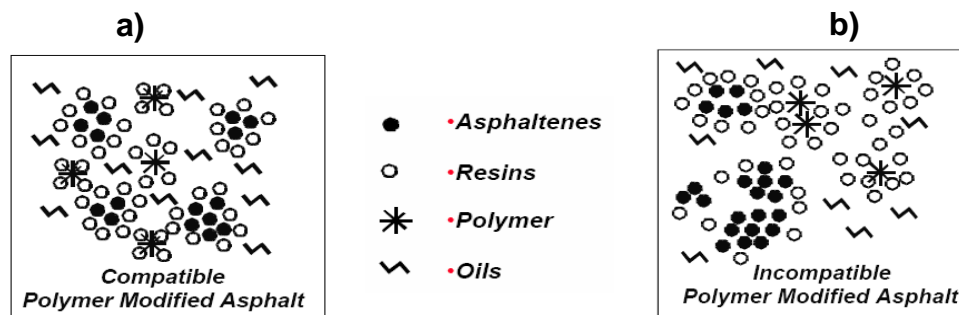


Figure 1.52. Structures des bitume polymères : a) compatible, b) incompatible [29].

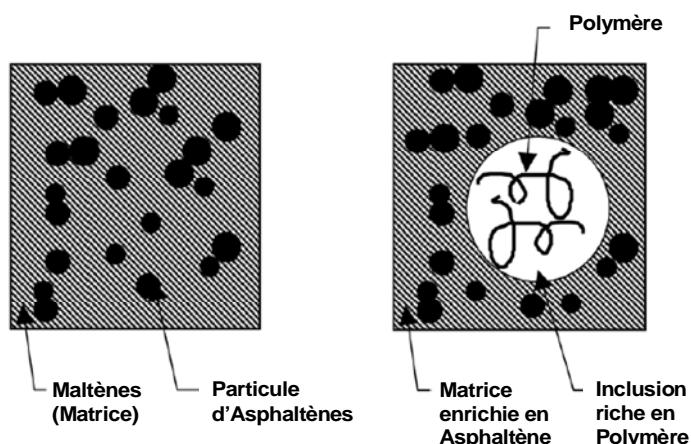


Figure 1.53. Effet de la modification polymère sur la structure colloïdale du bitume : bitume original (gauche) et BMP correspondant avec augmentation de la teneur en Asphaltènes de la matrice (droit).

Le mélange à chaud des bitumes avec des polymères thermoplastiques conduit à un des trois résultats suivants :

- Un mélange hétérogène; le polymère et le bitume sont incompatibles. Les phases se séparent et les performances d'un bitume routier ne sont pas atteintes figure 1.52.b.
- Un mélange homogène; parfaite compatibilité. Dans ce cas, les huiles du bitume recouvrent totalement le polymère et détruisent toutes les interactions intermoléculaires. Le liant est extrêmement stable, mais la modification de ses propriétés d'usage est très faible par rapport à celle du bitume initial. Seule sa viscosité est augmentée. Ceci n'est donc pas le résultat recherché généralement.
- Un mélange micro - homogène constitué de deux phases distinctes finement imbriquées. C'est le cas de la compatibilité recherchée qui permet de confier au bitume des propriétés réellement modifiées. Dans un tel système, le polymère compatible gonfle en absorbant une partie des fractions huileuses du bitume pour former une phase polymère distincte de la phase bitume résiduelle

constituée des fractions lourdes du liant (le restant des huiles, les résines et les asphaltènes) figure 1.52.a.

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 [3] :

- 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.

4.4. Mécanisme de la modification

La modification des propriétés des bitumes par l'addition de polymère est souvent expliquée par le gonflement du polymère par les huiles du bitume [46].

En fait, la mise en oeuvre des méthodes microscopiques, conduit à constater que les bitumes modifiés par des polymères sont généralement, à température ordinaire, des mélanges biphasiques figure 1.54.b :

- Une phase étant constituée par le polymère gonflé par une partie des huiles du bitume,
- L'autre par les constituants du bitume qui sont les résines et les asphaltènes.

Ceci permet une augmentation de la viscosité et le développement du caractère « Gel » du liant. Le polymère gonflé rend donc, même à faible teneur, le bitume plus élastique et plus résistant à l'écoulement [37].

Aux faibles teneurs en polymère, le gonflement de ce dernier par les fractions huileuses les plus légères du bitume contribue à enrichir la phase liant résiduelle en produits lourds, donc en résines et en asphaltènes, avec une augmentation corrélative de l'élasticité et de la résistance à l'écoulement figure 1.54.a. Dans ce cas, le choix du bitume d'origine est prépondérant.

Si on augmente la teneur en polymère, on observe un point d'inversion à partir duquel c'est la phase polymère qui devient la phase continue figure 1.54.c, le passage de cette transition s'accompagnant d'une modification importante des propriétés physiques de l'association, qui tendent alors vers celles du polymère. On constate une diminution de la pénétrabilité et une forte augmentation de la température bille - anneau.

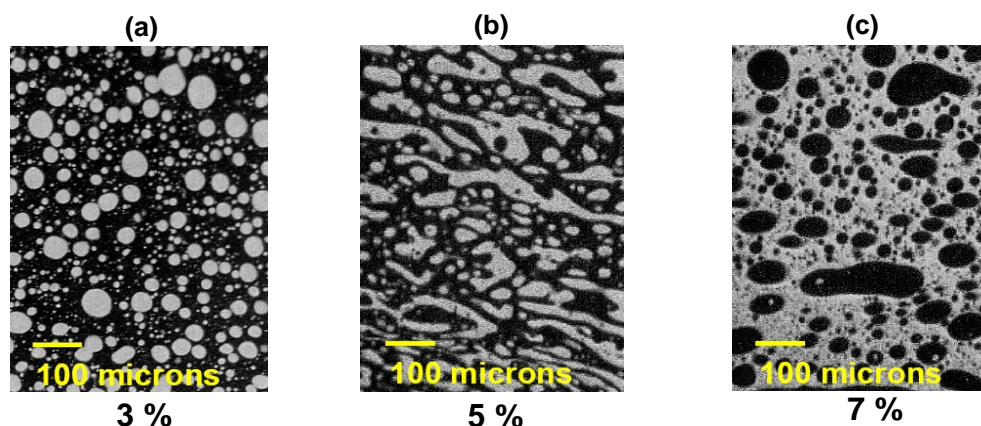


Figure 1.54. Morphologie du bitume polymère en fonction de la teneur en polymère de type SBS [29]

BRION [46] a fait une étude assez approfondie sur ce phénomène de gonflement par des tests de centrifugation lui permettant de déterminer un taux de gonflement.

Il a montré que :

- la composition générique du bitume était sans influence sur le taux de gonflement.
- La composition du polymère joue un rôle minime sur le taux de gonflement.
- Ce taux de gonflement suit une loi linéaire décroissante en fonction de la teneur en polymère [46].

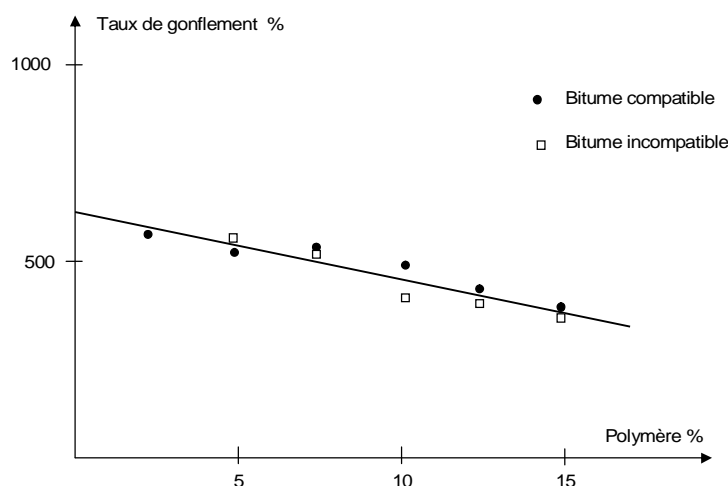


Figure 1.55. Influence de la teneur en polymère sur le taux de gonflement [46].

Un autre facteur influant sur le phénomène de gonflement est le mode de préparation du mélange.

BRION [46] a suivi la cinétique de gonflement où l'étape de gonflement est suivie de la dispersion du polymère.

Les principaux facteurs influençant le taux de dispersion des polymères dans la matrice bitumineuse sont les dimensions des particules de polymère, la température, et le cisaillement appliqué aux mélanges (figure 1.56) [1] :

- **La température** : la vitesse de diffusion du bitume dans les particules de polymères augmente avec la température.
- **La taille des particules** : plus elle sont petites, plus la surface d'échange est importante et plus grande est la vitesse de diffusion du bitume dans les particules.
- **Le cisaillement** : malgré le gonflement, les molécules deviennent d'autant plus mobiles qu'elle ont été rompues (étape 3 et 4).

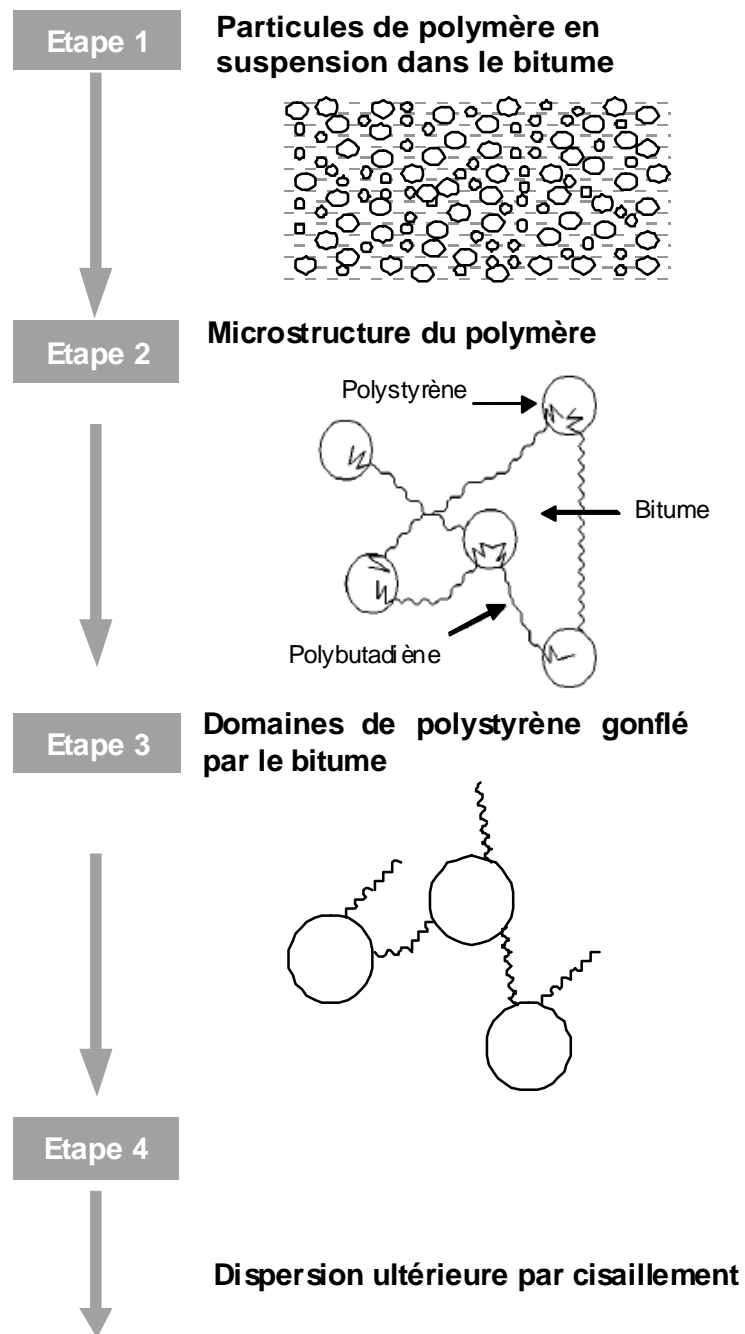


Figure 1.56. Mécanisme de la dispersion d'un polymère de type SBS dans le bitume

4.5. Fabrication des bitumes polymères

Les procédés d'incorporation des polymères les plus utilisés sont :

4.5.1. Procédé humide

Ce procédé consiste à modifier le liant de base par emploi d'un polymère afin de modifier la structure chimique et les propriétés physiques et mécaniques.

Différentes procédures ont été développées pour produire les bitume - polymères. La méthode la plus adoptée au laboratoire ou en usine est basée sur les principes suivants :

- La température de mélange est généralement comprise entre 150°C et 200°C.
- La durée de mélange (agitation mécanique, vitesse de malaxage est de 300 – 400 tr/min) varie de 1 heures à 12 selon le type de polymère.

La durée optimale de mélange est atteinte quand les propriétés désirées du bitume - polymère, telles que le point de ramollissement, la pénétration et la viscosité deviennent constantes.

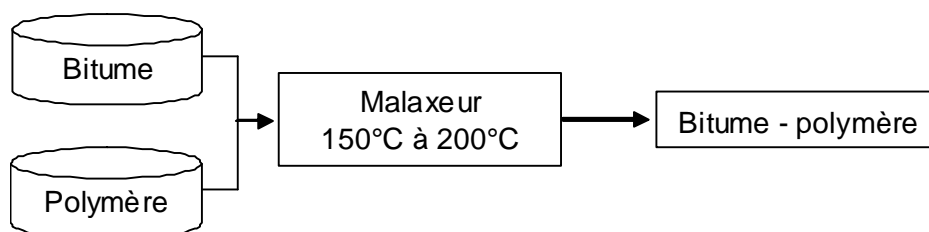


Figure 1.57. Mode de fabrication d'un bitume polymère.

4.5.2. Procédé sec

Cette technique consiste à introduire le polymère directement dans le malaxeur de la centrale d'enrobage avec le bitume et les granulats pour la fabrication de l'enrobé à chaud.

Les polymères utilisés dans ce type de procédé sont les polymères incompatibles avec le bitume. Dans ce cas, ces polymères se recristallisent pendant la phase de refroidissement pour former une dispersion.

Par ailleurs, on peut utiliser par addition directe en centrale des polymères compatibles tels que des élastomères ou des plastomères. Le temps de mise en contact direct entre le polymère et le bitume est ici totalement insuffisant pour assurer le gonflement du polymère par les Maltènes du bitume.

4.6. Caractérisation des bitumes polymères [13]

4.6.1. Analyses physico-chimiques

L'analyse chimique des bitumes polymères peut être effectuée avec les mêmes outils analytiques que pour les bitumes purs, soit : la spectrométrie infrarouge et la chromatographie sur gel perméable.

4.6.2. Indicateurs traditionnels pour la caractérisation des liants modifiés

1) Mesure de la pénétrabilité

La détermination de la pénétrabilité à 25°C ne pose pas de problème pour les bitumes polymères.

2) Détermination du point de ramollissement

Pour les bitumes purs, la TBA est une caractéristique qui a été mise en relation avec le comportement à température élevée des bétons bitumineux, notamment avec la résistance à l'orniérage.

Pour les bitumes polymères ce n'est pas le cas, car avec un bitume modifié instable, on peut avoir des résultats perturbés, à cet effet cet essai ne peut être utilisé que pour contrôler la conformité du produit.

3) Indice de pénétrabilité

Comme pour les bitumes purs, l'indice de pénétrabilité calculé à partir de la détermination de la mesure de la pénétration à cinq températures (IP LCPC) semble bien définir la susceptibilité thermique des liants modifiés.

Le calcul de l'indice de pénétrabilité à partir de la TBA et de la pénétrabilité à 25°C (IP Pfeiffer) doit être interprété avec beaucoup de prudence, car l'hypothèse de Pfeiffer qui est basée sur une pénétration de 800 (1/10 mm) pour la TBA n'est pas vérifiée pour les bitumes polymères.

La valeur de l'indice Pfeiffer peut être utilisée à titre indicatif et comparatif dans une série de liants de la même famille ; mais il faut se garder de l'interpréter en termes de susceptibilité thermique.

4) Point de fragilité Fraass

Le plus souvent, on ne constate qu'une faible différence entre les points de Fraass des liants modifiés et ceux de leur bitume de base : l'évolution de l'intervalle de plasticité entre le bitume de base et le bitume modifié porte souvent de façon unilatérale sur l'augmentation de la TBA.

La mesure du point de fragilité Fraass ne peut être utilisée qu'en tant que contrôle à l'intérieur d'un laboratoire et non interprétée comme un critère d'amélioration du comportement du liant aux basses températures.

5) Durcissement simulé au RTFOT

L'expérimentation effectuée sur le pouvoir prédictif du RTFOT vis-à-vis du durcissement des bitumes purs à l'enrobage a montré que l'essai était pertinent ; il est donc très tentant de vouloir appliquer cet essai aux bitumes polymères.

Cependant, en fonction de la nature des polymères, et de leur teneur, les viscosités des bitumes polymères à la température de l'essai RTFOT ne sont pas équivalentes à celle d'un bitume pur et peuvent se situer dans des domaines très différents d'un liant à l'autre.

Pour cela, beaucoup d'auteurs ont proposé d'adapter la température de l'essai à chaque liant. Mais il faudrait s'assurer que cette élévation de température ne perturbe pas l'essai.

4.6.3. Essais spécifiques aux liants modifiés

1) Stabilité au stockage

Durant le stockage à haute température, le polymère ne doit pas se séparer de la phase bitumineuse et le mélange ne doit pas changer excessivement de consistance [1].

La stabilité au stockage des liants modifiés est une caractéristique d'usage extrêmement importante. Ces Liants étant constitués de deux phases distinctes. Ils sont soumis aux mêmes principes physiques que ceux qui régissent la sédimentation des émulsions de bitume (loi de Stokes) [1].

Cette caractéristique est mesurée à l'aide de l'essai dit « essai de décantation ».

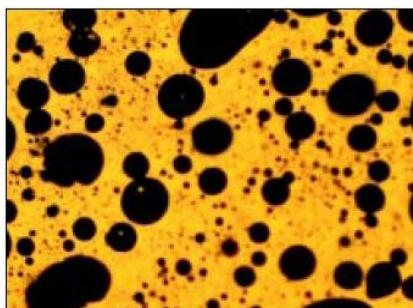
Le principe de cet essai est de maintenir un tube contenant le liant en position verticale pendant un temps déterminé, de le refroidir brusquement et de procéder au découpage en trois parties égales après avoir enlevé la pellicule d'aluminium. La séparation éventuelle des phases est appréciée par la détermination de certaines caractéristiques (en premier lieu la TBA) sur les parties supérieures et inférieures.

En conclusion, cet essai sera utile aux formateurs et aux applicateurs car il donne des indications très précieuses sur les précautions à prendre lors de stockage et du transport des bitumes polymères [13].

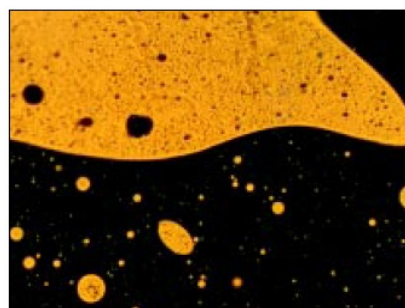
2) Observation microscopique [13].

La microscopie optique d'épifluorescence est très utile pour les liants biphasiques résultant de l'incorporation de polymères tels que les SBS et les EVA dans les bitumes.

Elle est basée sur le principe que les polymères gonflés par certains composants des bitumes auxquels ils sont ajoutés sont fluorescents lorsqu'ils sont éclairés par une lumière UV : ils réémettent une lumière jaune - vert alors que le bitume lui-même reste noir, (figure 1.58).



Bitume modifié avec 7% d'EVA.



Bitume modifié avec 7% de SBS,

Figure 1.58. Microstructure d'un bitume polymère [31]

4.7. Domaines d'application des bitumes polymères

4.7.1. Les enduits superficiels [15]

Dans le domaine des enduits superficiels, la modification des liants par des polymères vise trois objectifs principaux :

- améliorer les possibilités de déformation à froid et le comportement à chaud afin de réduire les risques d'arrachement et de ressuage.
- Augmenter la cohésion, et ceci sur une plage de températures la plus large possible, afin de supporter les trafics les plus agressifs dans des conditions climatiques les plus sévères.
- Améliorer le comportement au jeune âge de l'enduit superficiel par l'obtention rapide d'une cohésion élevée.

Les différents types de liants modifiés pour enduits superficiels sont les émulsions de bitumes et les bitumes fluxés.

1) Les émulsions de bitume

Elles se décomposent également en deux familles :

- Les émulsions latex

Elles font appel à un simple mélange d'une émulsion de bitume non modifié et d'une émulsion de polymère (latex).

L'industrie routière utilise principalement du latex de polychloroprène et de caoutchouc SBR.

- Les émulsions de liants préalablement modifiés

Ces produits nécessitent des unités plus complexes dotées, d'une part, des moyen d'obtention du liant modifié de base (malaxeurs et éventuellement broyeurs) et d'autre part du matériel permettant d'émulsifier ce liant qui est généralement très visqueux.

Les polymères utilisés sont les SBS ou EVA.

2) Les bitumes fluxés

Les bitumes fluxés sont obtenus à partir du mélange à chaud du polymère, soit avec un bitume qui sera ensuite fluxé, soit avec un fluxant pour constituer une solution mère qui servira à fluxer un bitume pur.

Les polymères utilisés en général sont la famille des SBS ou des EVA,

4.7.2. Enrobés minces [16, 39, 42]

Dans les années 80, le développement et l'industrialisation de bitumes modifiés par des polymères et l'emploi d'additifs était intimement lié à la mise au point de nouvelles formules d'enrobés bitumineux de couches de surface en faible épaisseur, offrant de meilleures performances (qualité d'usage, durabilité).

La recherche de solutions d'entretien de surface en couche la plus mince possible, et adaptées au climat et aux trafics lourds élevés, a conduit au développement des techniques suivantes :

1) Les bétons bitumineux minces (BBM)

Grâce aux bitumes modifiés les BBM sont utilisés sur des supports dégradés et déformables, ce qui n'était pas réalisable durablement avec un bitume pur.

Leur épaisseur de mise en œuvre est de 2,5 à 5 cm.

2) Les bétons bitumineux très minces (BBTM) et ultramine (BBUM)

Le BBTM et le BBUM trouvent leurs origines en Europe. Ils ont été développés afin d'améliorer les caractéristiques de surface des chaussées en bon état structurel de la façon la plus économique possible. Ils peuvent être utilisés sur tout type de chaussée revêtue pour corriger les surfaces présentant des déficiences de texture, telles que la glissance, les ornières modérées, le désenrobage, la micro-fissuration et l'arrachement.

L'emploi de bitumes modifiés ou l'ajout de fibres à l'intérieur de ces enrobés est également très répandu puisque ces ajouts renforcent la cohésion au sein du béton bitumineux.

La condition primordiale d'utilisation de ce type de revêtement est d'avoir une structure de chaussée stable et solide puisque la performance de ces revêtements est étroitement liée à la qualité du support.

Leurs épaisseurs respectives vont de 1 à 1,5 cm pour les ultra - minces et de 1,5 à 2,5 cm pour les très minces. Les BBUM sont généralement coulés à froid tandis que les BBTM peuvent être coulés à froid ou posés à chaud.

4.7.3. Enrobés drainants [17]

L'enrobé drainant est un mélange à granularité fortement discontinue se composant de gravillons, pauvre en sable et filler. Il est fabriqué, mis en œuvre et compacté à chaud généralement en 4 cm d'épaisseur.

Le pourcentage de vides (de l'ordre de 20 %) et la forme des vides sont tels que les eaux pluviales peuvent circuler dans les vides communicants.

Les objectifs de l'emploi des bitumes modifiés dans les enrobés drainants sont :

- A la mise en œuvre, une forte viscosité conduira à fixer plus de liant.
- Pendant sa durée de service, l'amélioration des caractéristiques du liant va dans le sens d'une plus grande durabilité des revêtements.

4.7.4. Enrobés à haut module en liants modifiés [18]

Une réflexion s'est engagée dont l'objectif est de trouver un matériau qui tout en conservant une très bonne tenue en fatigue, analogue à celle des bétons bitumineux classiques, puisse avoir un module de rigidité aussi élevé que possible, du même ordre de grandeur que celui des graves hydrauliques.

Cet objectif est obtenu :

- En utilisant des liants extrêmement durs,
- En formulant des enrobés très compacts grâce à des teneurs en liant élevées.

Pour les enrobés à module élevé des couches d'assise, on constate que l'on obtient les mêmes performances pour tous les enrobés quelque soient le liant et les ajouts utilisés, en notant toutefois (ce qui n'est pas surprenant) que plus le bitume de base utilisé pour le mélange sera dur, meilleures seront les performances de l'enrobé.

4.7.5. Chapes d'étanchéité, membranes antifissures [19]

On distingue trois domaines qui sont :

1) colmatage des fissures

Le but de cette technique est :

- imperméabilisation de la structure dans la plupart des cas (sur fissures de retrait thermique),
- résistance élastique aux futurs cycles de retrait thermique.

L'utilisation du bitume modifié est systématique. La teneur en élastomère ou plastomère est plus importante que pour les bitumes utilisés pour les enrobés.

2) Procédés Géotextiles (antifissures)

Ce procédé est constitué d'un couple de composants : le géotextile et le bitume.

A teneur en liant égale, pour un même géotextile, l'efficacité est de 30 % supérieure pour le bitume modifié par rapport au bitume pur.

3) Chape d'étanchéité

3.1) Etanchéité d'ouvrage d'art

Le pourcentage d'élastomère est très supérieur (de l'ordre de 10 à 12 %) et le type est différent de celui utilisé pour la route.

Le liant modifié apporte par rapport au bitume classique trois avantages essentiels :

- Une meilleure tenue au froid,
- Une meilleure résistance au vieillissement.

- Une meilleure adhérence au support.

3.2) Etanchéité des ouvrages hydrauliques et autres

Certaines membranes bitumineuses armées (GMBA) ont un liant à base de bitume élastomère.

La présence de ce type de liant apporte :

- Une meilleure résistance au poinçonnement hydraulique,
- Une meilleure résistance à la pénétrabilité des racines
- Et un meilleur vieillissement dans le temps.

4.8. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modification des bitumes par des polymères, afin d'aboutir à un liant "idéal" qui devrait avoir une cohésion améliorée et une susceptibilité thermique très faible dans toute la plage des températures d'utilisation.

Ces bitumes polymères doivent garantir aux enrobés bitumineux une amélioration de ses performances en terme de :

- résistance à la déformation permanente (Orniérage de la partie supérieure de la chaussée à la température de service).
- résistance à la fissuration mécanique (fatigue liée au trafic)
- résistance à la fissuration thermique résultant des basses températures.

Tout en s'assurant de :

- La compatibilité entre le bitume et le polymère,
- la teneur optimale en polymère,
- Les conditions de fabrication du bitume polymère (la température de fabrication, le temps et l'énergie de malaxage)

En plus de ces éléments, on a donné les principaux essais utilisés pour l'évaluation de la qualité de ces produits composites ainsi que leurs domaines d'utilisation.

Chapitre 5 : LES BITUMES CAOUTCHOUCS

5.1 Introduction

Depuis les années 1950, on a assisté à plusieurs tentatives d'incorporation de caoutchouc de pneu dans les chaussées. D'autres expériences plus anciennes ont tenté d'incorporer du caoutchouc naturel au bitume (Grande-Bretagne, 1840) dans le but de transmettre une partie de sa flexibilité à la structure [2].

L'avantage d'utiliser du caoutchouc dans les enrobés se situe sur le plan environnemental, car il constitue un débouché pour les pneus usés recyclés.

5.2. Procédés de fabrication [2]

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

5.2.1 Procédé humide : Wet Process

Le procédé humide consiste à modifier le bitume pur avec la poudrette de caoutchouc à très haute température, avec ajout possible d'huiles aromatiques ou de polymères. Le résultat est un liant souvent référencé par le terme « bitume caoutchouc » [2].

Les recherches ont montré que les propriétés des mélanges bitume caoutchouc dépendent énormément de la nature du caoutchouc, de sa finesse et de sa concentration, du temps de malaxage et sa température, et enfin de l'énergie de malaxage.

Le processus physico-chimique d'interaction caoutchouc bitume est évidemment complexe.

L'effet conjugué de la température élevée et des l'huiles du mélange permet le gonflement des particules de caoutchouc. Ces particules gonflées donnent naissance à un gel bitume – caoutchouc, figure 1.59 et figure 1.60.

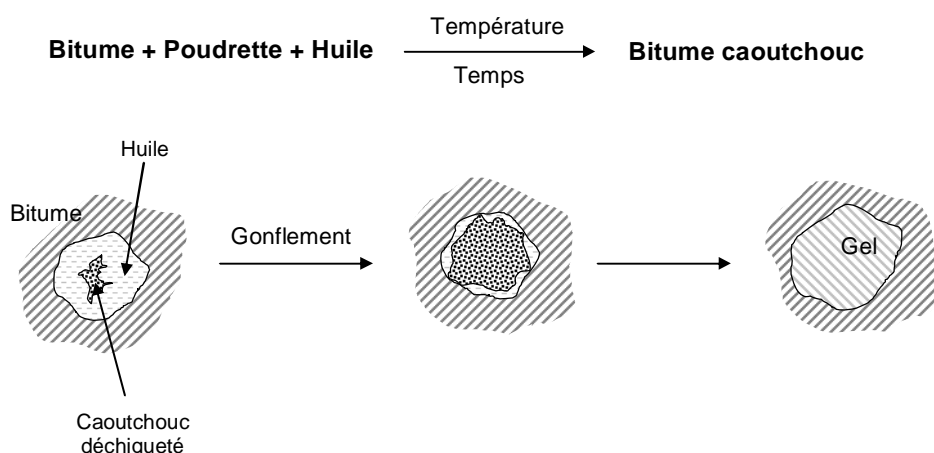


Figure 1.59. Interprétation du processus d'élaboration du bitume caoutchouc.

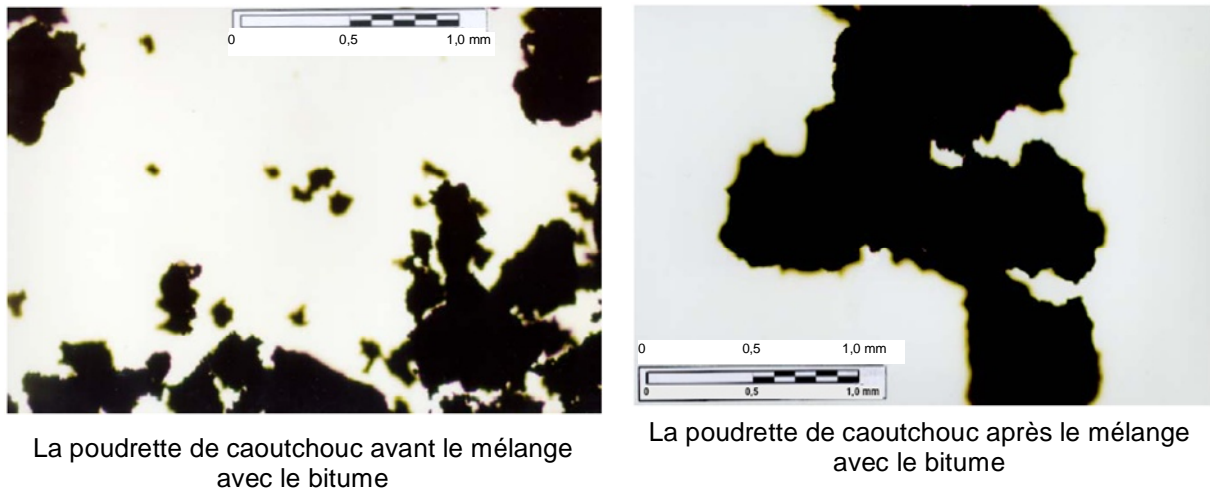


Figure 1.60. La poudrette de caoutchouc sous microscope optique [43].

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.

A) Bitume caoutchouc non stockable

En général, le liant modifié est composé de poudrette de caoutchouc, de bitume et d'huile aromatique destinée à fluxer le bitume et à le rendre plus réactif vis-à-vis de la poudrette.

La poudrette de caoutchouc est composée, à parts égales, de caoutchouc naturel et caoutchouc synthétique. En pratique, on combine 50% de pneus de voitures (80% de caoutchouc synthétique et 20% de caoutchouc naturel) avec 50% de pneus de camions (20% de caoutchouc synthétique et 80% de caoutchouc naturel.)

La fabrication du mélange s'effectue à une température variant entre 170 et 220°C. L'ordre d'introduction des composants est indiqué sur la figure 1.38.

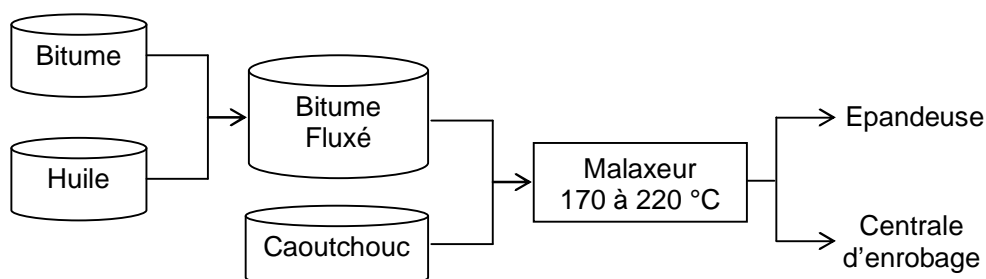


Figure 1.61. Chaîne de fabrication de bitume caoutchouc non stockable [2].

Pendant la fabrication, la viscosité du mélange passe par un maximum bien marqué. Ce maximum est probablement le résultat de la compétition entre une cinétique de gonflement et une cinétique de dévulcanisation du caoutchouc, engendrant respectivement une augmentation et une diminution de la viscosité.

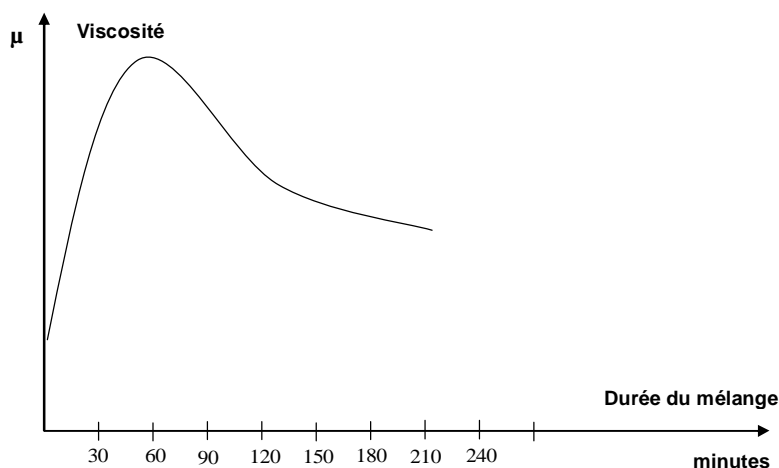


Figure 1.62. Courbe de viscosité en fonction du temps de mélange [23].

B) Bitume caoutchouc stockable

Les procédés de fabrication de bitume caoutchouc stockable ont été développés pour assurer une stabilité durant une plus grande période, allant jusqu'à deux semaines.

Parmi les procédés de fabrication les plus utilisés, on trouve Le procédé Beugnet [2] qui consiste à mélanger 85 à 90% de bitume de distillation directe 160/220, 8 à 12% de poudrette de caoutchouc et 2 à 3% d'huile lourde et d'un élastomère synthétique. Le mélange est porté à une température de 175 à 185°C puis agité pendant 2 heures.

Le liant est ensuite stocké dans une enceinte, sans agitation, à 160°C. Au moment de son utilisation, il est chauffé à 180°C. Le procédé est schématisé sur la figure suivante.

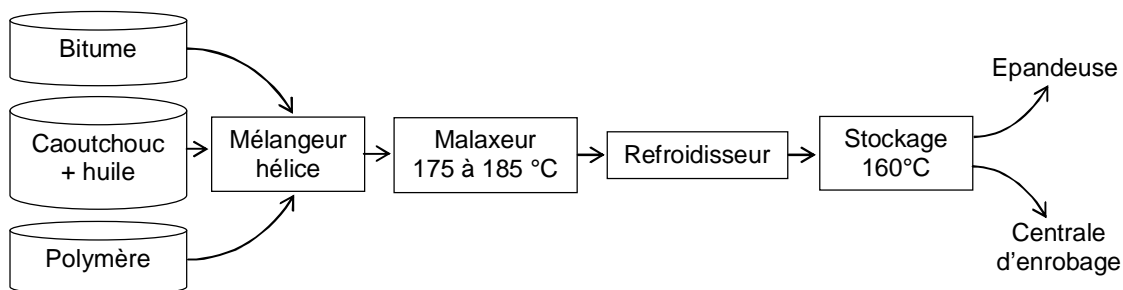


Figure 1.63. Chaîne de fabrication de bitume caoutchouc stockable [2] – Procédé Beugnet.

5.2.2 Procédé sec : Dry Process

Le procédé sec consiste à introduire directement dans le malaxeur pour enrobés à chaud, des granulats de caoutchouc ne dépassant pas 2 mm de diamètre, à raison de 10 à 12 kg/tonne d'enrobé [2].

Toutefois, il existe quelques procédés qui adoptent des distributions granulométriques différentes, parfois discontinues :

Le procédé PlusRise [2] utilise des granulats de caoutchouc grossiers (2 - 6 mm) et une fraction fine de la poudrette de caoutchouc. La teneur en liant varie ici de 7.5 à 9%.

Le procédé Colsoft [2] de l'entreprise Colas introduit la poudrette de caoutchouc de granularité 0 – 1,5 mm en remplacement d'une partie de la fraction sableuse, soit 2 à 3% en poids.

Le caoutchouc étant mis en contact du bitume à température et à durée plus faibles que dans le procédé humide, la réaction entre le bitume et le caoutchouc est moins poussée. Seules les particules fines et l'interface des particules grossières peuvent former des liaisons particulières (sorte de bitume caoutchouc).

5.3. Influence des paramètres de fabrication sur les caractéristiques physico-chimiques du bitume - caoutchouc [2]

Plusieurs études ont tenté d'identifier les paramètres de fabrication/composition qui influent de manière significative sur les propriétés rhéologiques du bitume caoutchouc. Ces paramètres ont été résumés dans une synthèse réalisée au Etats-Unis [2].

Les performances du bitume caoutchouc sont améliorées selon les critères SHRP par l'augmentation du taux de dissolution du caoutchouc dans le bitume. Selon (Billiter, Chun et al. 1997; Billiter, Davison et al. 1997) [2], la dissolution est meilleure pour des particules plus fines.

La nature du bitume a aussi un effet déterminant sur l'interaction bitume/caoutchouc. Le bitume combiné à une huile aromatique présente de meilleurs résultats. Cette interaction accrue est confirmée par le fait que les huiles aromatiques sont souvent utilisées dans la fabrication du caoutchouc, du fait de leur compatibilité avec ce dernier.

Le temps de malaxage augmente la dissolution du caoutchouc jusqu'à un certain degré. En effet, après 2 à 6 heures de réaction, le taux de caoutchouc dissous représente 30 à 40% de la masse initiale et n'augmente plus avec le temps (Billiter, Chun et al. 1997; Billiter, Davison et al. 1997) [2] (figure 1.64).

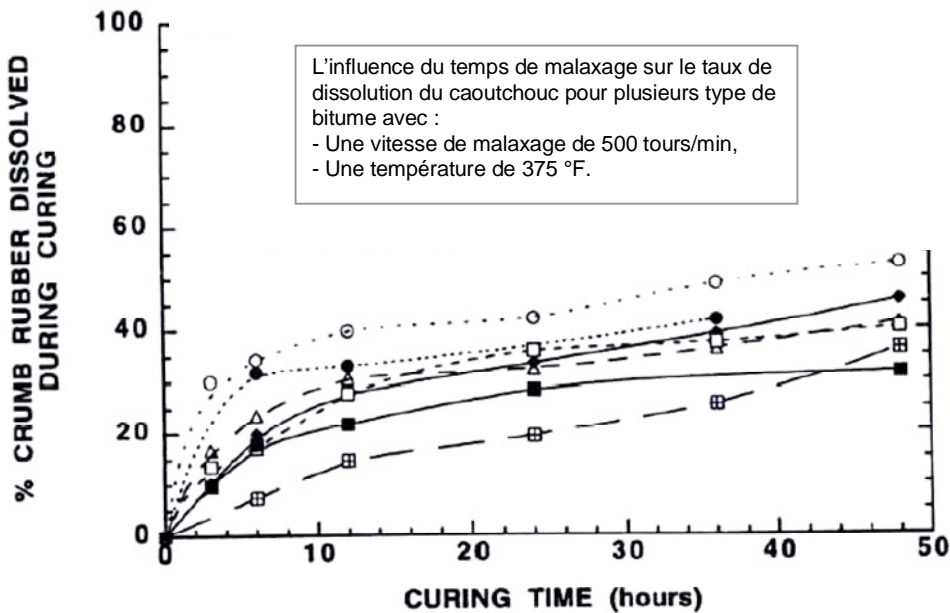


Figure 1.64. Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction du temps de malaxage [2].

La vitesse de cisaillement due au malaxage a aussi une incidence très significative sur l'interaction bitume/caoutchouc. Le même taux de dissolution est obtenu en 2 - 3 heures à 1550 tours/min qu'en 48 heures à 500 tours/min (figure 1.65).

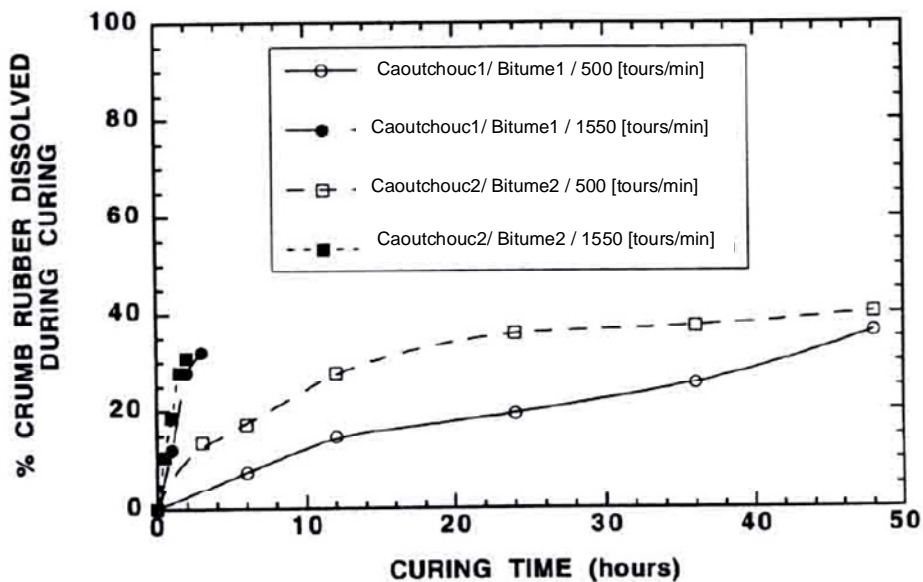


Figure 1.65. Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction du taux de cisaillement au malaxage [2].

Une température de malaxage plus élevée réduit énormément le temps de réaction à taux de dissolution constant (figure 1.66) Cette amélioration de l'interaction peut être expliquée par la diminution de la viscosité du bitume qui augmente le transfert de masse entre les deux composants [2].

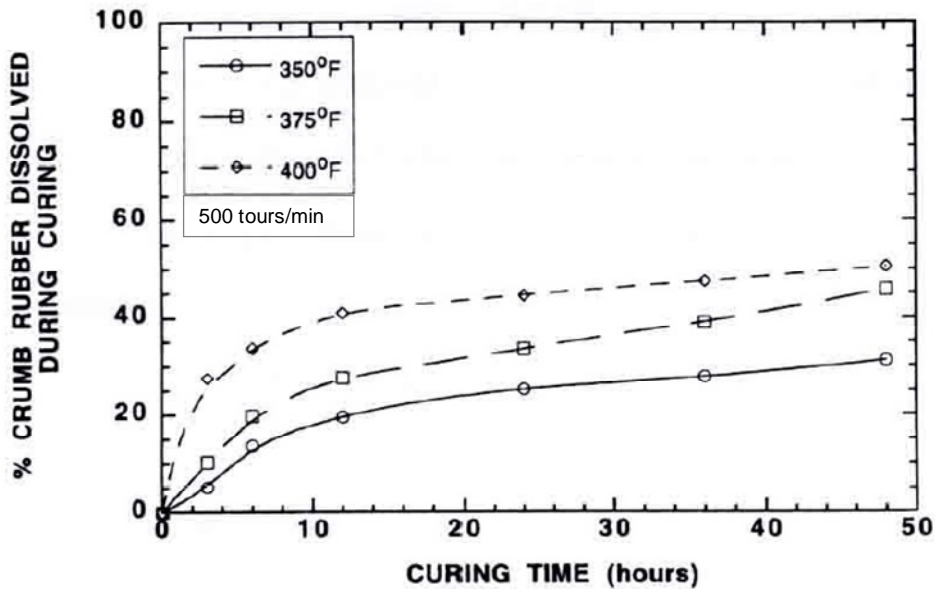


Figure 1.66. Dissolution du caoutchouc dans le bitume en fonction de la température de malaxage [2].

5.4. Applications du bitume – caoutchouc dans le domaine routier

5.4.1. Colmatages des fissures [2]

Les utilisations du bitume caoutchouc pour le remplissage des joints et le colmatage des fissures sont très répandues aux USA. Les propriétés de ces produits 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,
- Elasticité et déformabilité aux basses températures pour prévenir la fissuration,
- Résistance aux effets environnementaux : air, eau, ozone, UV 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.

5.4.2. Enduits 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.

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.

5.4.3. Enrobé bitumineux à chaud

Les enrobés bitumineux à chaud contenant du caoutchouc, que ce soit avec le procédé sec ou humide, ont été 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 (sec et humide) ont permis de proposer des formulations d'enrobés bitumineux à chaud.

Des recommandations de formulation sont données pour 3 catégories de climats [2] :

1) Climat chaud : Le critère de formulation prédominant est l'orniérage et il convient de suivre les recommandations suivantes :

- Appliquer l'enrobé caoutchouté dans les couches minces de surface et non dans les couches structurelles avec une épaisseur minimale de 2,6 cm,
- Utiliser les bitumes de même classe que ceux utilisés pour un enrobé classique,
- Utiliser des agrégats rugueux avec un maximum de 9% de filler,
- Incorporer 3% en poids de caoutchouc de granularité moyenne (60% d'éléments grossiers et 40% d'éléments fins),
- S'assurer que le module de rigidité mesuré à 10Hz et 25°C est supérieur à 2068 MPa,
- Température de malaxage entre 175°C et 190°C, température de pose entre 140°C et 150°C.
- Mélanger les agrégats et le caoutchouc avant l'ajout du bitume.
- Effectuer des essais de fluage à 25°C et 40°C, avec comme critère d'orniérage limite fixé à 1,3 cm,
- Recommencer la formulation si le critère d'orniérage n'est pas satisfait. Incorporer éventuellement des poudres de caoutchouc plus fines.
- Vérifier enfin la performance en fatigue.

2) Climat modéré (température ambiante maximale de 40°C) : Les chaussées sont sollicitées par un trafic lourd, et le critère de formulation dominant est la fatigue :

- Appliquer l'enrobé caoutchouté avec des épaisseurs minimales de 3,8 cm, en utilisant les bitumes de même classe que ceux utilisés pour un enrobé classique,

- Choisir une courbe granulométrique légèrement discontinue,
- Incorporer 3% en poids de caoutchouc de granularité grossière (80% d'éléments grossiers et 20% d'éléments fins),
- Température de malaxage entre 160°C et 175°C, température de pose entre 150°C et 160°C,
- S'assurer que le module de rigidité mesuré à 10Hz et 25°C soit supérieur à 1724 MPa,
- Sélectionner la formule préliminaire sur la base d'une teneur en vides de 3%,
- Vérifier le comportement à la fatigue pour les conditions de température et de trafic prévues.

3) Climat froid (température ambiante minimale de -18°C) : la réponse à basse température de l'enrobé gouverne le choix de la formule initiale :

- Appliquer l'enrobé caoutchouté avec des épaisseurs minimales de 3,8 cm comme couche de surface ou couche de base,
- Utiliser les bitumes de même classe que ceux utilisés pour un enrobé classique,
- Choisir une courbe granulométrique légèrement discontinue,
- Incorporer 3% en poids de caoutchouc de granularité grossière (80% d'éléments grossiers et 20% d'éléments fins),
- Température de malaxage entre 150°C et 165°C, température de pose entre 130°C et 150°C,
- S'assurer que le module de rigidité mesuré à 10Hz et 25°C soit supérieur à 1240 MPa,

5.4.4. Emulsions

Il est possible d'émulsifier le bitume caoutchouc (procédé humide) à condition d'utiliser des poudrettes de caoutchouc très fines [2]. 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.

5.5. Conclusion

Dans ce chapitre consacré aux bitumes caoutchoucs, nous avons eu l'occasion de voir les différents procédés de fabrication des ces produits.

Le comportement de ces bitumes est influencé d'une part par le type, la finesse et la teneur en poudrette de caoutchouc qui rentre dans la modification du bitume, et d'autre part par le mode de fabrication du bitume - caoutchouc à savoir ; l'énergie et la température de malaxage.

Aussi, il a été mis en évidence les différentes applications du bitume – caoutchouc dans le domaine routier ainsi que les recommandations sur les méthodes de formulation des enrobés bitumineux à chaud selon la catégorie de climat à savoir :

- Climat chaud : le critère de formulation prédominant est l'orniérage,
- Climat modéré : la température ambiante maximale est de 40°C. Les chaussées sont sollicitées par un trafic lourd, et le critère de formulation dominant est la fatigue.
- Climat froid : la température ambiante minimale est de -18°C. le critère de formulation prédominant est la fissuration thermique résultant des basses températures.

CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Afin de rehausser les caractéristiques des bitumes traditionnels qui ne répondent plus aux normes actuelles, la poudre de caoutchouc s'avère être un agent de modification efficace. La réussite de cette modification est conditionnée par des paramètres de fabrication (la teneur en poudre, la température de malaxage, l'énergie de malaxage).

En plus de l'amélioration des caractéristiques des liants bitumineux qui se répercuteront sur la durabilité des structures bitumineuses, l'environnement sera ainsi préservé par la valorisation des déchets industriels.

Donc le domaine routier pourrait contribuer à la préservation de l'environnement d'une part par le recyclage d'une quantité importante des déchets industriels notamment les pneumatiques et d'autre part par la réduction du bruit de roulement en utilisant les bitumes caoutchoucs.

La poudre de caoutchouc joue également un rôle important dans la fabrication d'enrobés antibruit.

Les recherches ont montré que la réduction du bruit, par rapport à l'ancienne couche de roulement, est très significative (l'ordre de 4 à 7 dB (A)) pour les enrobés ouverts avec des inclusions de caoutchouc.

L'amélioration des performances acoustiques provient de l'effet d'absorption des ondes de chocs du pneu en mouvement par :

- La porosité de l'enrobé bitumineux,
- Les particules du caoutchouc.

Tableau 1.7. Réductions de bruit mesurées pour des revêtements en bitume caoutchouc pour plusieurs projets européens.

Pays	Année	Réduction du bruit
Belgique	1981	8 -10 dB
Royaume uni	1998	projet en cours
France	1984	2 - 5 dB
Allemagne	1980	3 dB
Autriche	1988	3 dB
Hollande	1988	2.5 dB

L'étude bibliographique a aussi permis de mettre en évidence des aspects phénoménologiques importants du comportement des matériaux bitumineux à savoir :

- Les susceptibilités thermique et cinétique expriment l'influence de la température et du temps de sollicitation sur le comportement des matériaux bitumineux.

- L'influence de la température se manifeste à travers des changements des propriétés mécaniques : la rigidité et la résistance.
- L'influence du temps se traduit par la durée de sollicitation et de la vitesse (fréquence) de sollicitation.
- L'apparition des déformations permanentes est provoquée par des déformations plastiques du squelette granulaire de type translation/rotation relatives des grains, accompagnées par des déformations visqueuses de type fluage du liant enrobant les particules.

Partie 2

ETUDE EXPÉRIMENTALE

La deuxième partie présente La partie expérimentale. Elle aborde les principaux résultats d'essais, avec discussion et critique sur les valeurs obtenues.

Cette partie consiste en :

- La présentation des composants de base rentrant dans la constitution des matériaux étudiés soit les granulats, le bitume et la poudrette de caoutchouc.
- La caractérisation des propriétés physico-chimiques et mécaniques du bitume pur et modifié,
- La caractérisation des propriétés physico-chimiques de la poudrette de caoutchouc utilisée,
- La détermination de l'influence de la teneur en poudrette de caoutchouc, la durée de malaxage sur les propriétés physico-chimiques et mécaniques du bitume modifié,
- La détermination de l'influence de la teneur en poudrette de caoutchouc sur les caractéristiques Marshall de l'enrobé bitumineux.
- La détermination de l'influence de la température et de la teneur en poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux.

Chapitre 1 : LES MATERIAUX D'ETUDE

Dans cette partie, il a été procédé à la définition et l'identification des composants de base rentrant dans la constitution des matériaux étudiés soit les granulats, le bitume et la poudrette de caoutchouc.

Pour chaque composant, des essais physiques, chimiques et mécaniques ont été réalisés permettant de caractériser les matériaux et de les classer selon une normalisation.

1.1. LES GRANULATS

1.1.1. Origine des granulats

Les granulats retenus dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des bétons bitumineux destinés aux couches de roulement.

Les trois fractions utilisées sont données dans le tableau 2.1, ainsi que leurs origines,

Tableau 2.1. Provenance des granulats utilisés.

Matériau	carrières	Entreprise d'exploitation
Fraction 0/3 (calcaire)	Keddara (wilaya de Bouira)	EPTP Alger
Fractions 3/8 et 8/15 (basaltes)	Cap Djinet (wilaya de Boumerdes)	SONATRO

1.1.2. Analyse chimique sommaire

Les résultats de l'analyse chimique sont récapitulés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Analyse chimique sommaire des différents types de granulats.

Constituants (%)	Sable 0/3	3/8 et 8/15
Insolubles (SiO ₂ +Silicate)	8.00	68.92
Oxyde de fer et d'Al (Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃)	6.44	16.11
Gypses (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	Néant	Néant
Chlorures (NaCl)	0,58	0,88
Carbonates (CaCO ₃)	76,62	8,55
Anhydride carbonique CO ₂ ↑	33,45	3,73
Perte au feu « PF »	36.81	4.27
Eau de constitution	3.36	0.54

Les granulats analysés sont classée comme suit, [XP P 94-011, (1999)],

Tableau 2.3. Classification des granulats.

Teneur en carbonate (%)	Classification
< 10	Non calcaire
70 à 90	fortement calcaire

L'analyse chimique sommaire révèle que le sable de la carrière de Keddara est constitué d'un pourcentage élevé de carbonates (76,62% de CaCO_3) ce qui montre que c'est un sable fortement carbonaté, donc c'est un sable calcaire.

Notons que par sa nature calcaire, le sable présente une excellente adhésivité et une bonne tenue à l'eau avec les liants hydrocarbonés.

Par contre le gravier issu de la carrière de Cap Djinet (3/8 et 8/15) présente un faible pourcentage de carbonate (8,55% de CaCO_3) et un pourcentage élevé en Insolubles (SiO_2 +Silicate) représentés par la silice avec un pourcentage avoisinant les 69 %. Donc c'est un matériau siliceux.

1.1.3. Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4. Résultats de l'analyse granulométrique.

Tamis [mm]	Fractions		
	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
25	100	100	100
20	100	100	100
16	100	100	98,98
12,5	100	100	88,98
10	100	99,88	42,72
8	100	99,25	13,21
6,3	100	75,34	0,81
5	99,1	35,5	0,20
4	98	15,03	0,14
3,15	97	2,65	0
2	84,4	0,5	0
1	54,8	0,2	0
0,63	40,45	0	0
0,315	28	0	0
0,2	22,35	0	0
0,1	16,15	0	0
0,08	15,15	0	0

Ce qui nous permet de tracer les courbes de chaque fraction granulaire comme indiqué sur la figure 2.1.

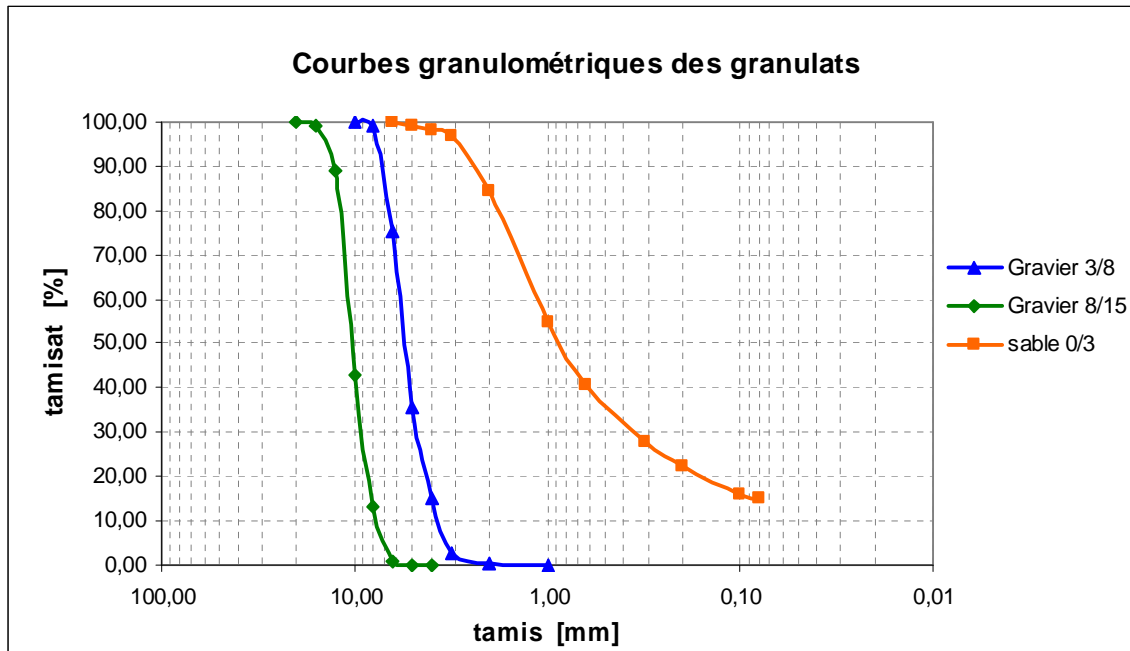


Figure 2.1. Courbe granulométrique des fraction 0/3, 3/8, 8/15.

Nous remarquerons que les trois classes granulaires présentent une granulométrie continue.

1.1.4. Caractéristiques des granulats

Les résultats sont donnés par le tableau 2.5 :

Tableau 2.5. Caractéristiques des granulats.

Essai	Référence	0/3	3/8	8/15	Qualité	
Poids spécifique [t/m^3]	-	2,68	2,72	2,74	-	
Propreté superficielle [%]	NF P 18-591	-	1,56	1,21	$\leq 2\%$	Propre
LA [%]	NF P 18-573	-	14	14,5	≤ 20	Bon
MDE [%]	NF P 18-572	-	18	13,5	$\leq 20\%$	Bon à moyen
Equivalent de sable à 10 % de fin [%]	NF P 18-597	72	-	-	$\geq 60\%$	Sable propre

En résumé, on constate que notre choix des matériaux granulaires est acceptable. Les matériaux présentent de bonnes caractéristiques intrinsèques et de fabrication et de ce fait, les spécifications sont respectées.

1.2. BITUME

Le bitume est la variable essentielle de cette étude. Le bitume retenu pour cette étude est sélectionné selon le critère de richesse en huiles aromatiques qui ont une affinité avec le caoutchouc.

Pour cela, l'expérimentation a été effectuée avec un bitume 50/70 mis à notre disposition par le Groupe Total.

Les analyses que nous avons effectuées sur le bitume pur sont :

- La pénétrabilité à l'aiguille NF T66-004,
- Le point de ramollissement bille et anneau « TBA » NF T66-008,
- L'indice de pénétrabilité à cinq températures méthode LCPC,
- La ductilité. NF T66-004,
- Le pourcentage d'Asphaltènes
- Le FTIR (Fourier Transformed InfraRed spectroscopy).

1.2.1. Caractéristiques du bitume

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bitume de base sont résumées dans le tableau 2.6,

Tableau 2.6. Caractéristiques du 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 » (méthode LCPC)		0,31	-
% Asphaltènes (%)		18,54	30 ²
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

Les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du bitume pur étudié concordent avec les spécifications préconisées dans la norme NF EN 12591 « Spécifications des bitumes routiers » pour la classe 50/70.

² Selon la littérature

1.2.2. Susceptibilité thermique

La susceptibilité thermique du bitume pur est estimée à partir de la variation de la pénétrabilité en fonction de la température selon la méthode LCPC. Pour cela, on effectue des essais de pénétrabilité à différentes températures afin de voir son évolution.

Pour notre grade de bitume, les températures suivantes sont préconisées : 15, 20, 25, 30 et 35°C.

Les résultats des essais sont représentés dans la figure 2.2.

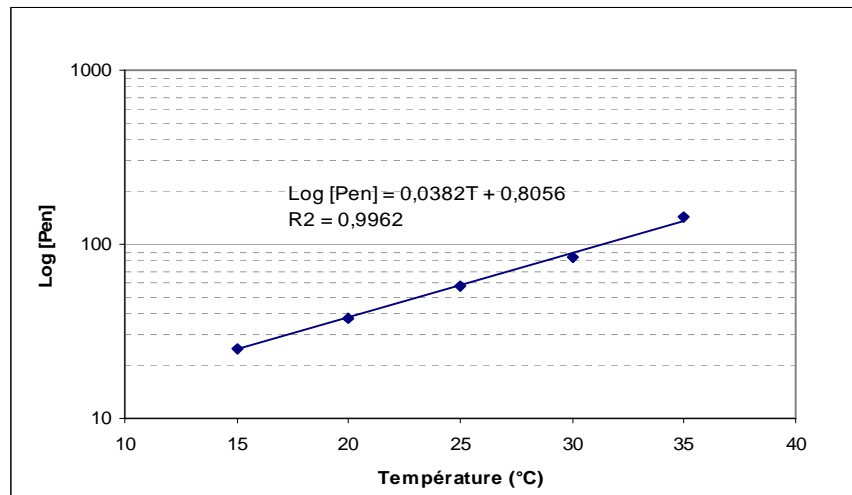


Figure 2.2. Variation de la pénétrabilité en fonction de la température

Cette courbe montre qu'il existe une variation linéaire en coordonnées semi-logarithmiques entre la pénétrabilité et la température.

La susceptibilité thermique du bitume est estimée par le coefficient A qui représente la pente de la droite $\text{log [Pen]} = 0,0382 \times T + 0,8056$.

Donc le bitume utilisé dans la présente étude est un bitume routier car la valeur de « A » qui est égale à 0,0382 est comprise entre 0,015 et 0,06 (intervalle des bitumes routiers).

1.2.3. Caractérisation du bitume par FTIR

La Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier (ou FTIR : Fourier Transformed InfraRed spectroscopy) est basée sur l'absorption d'un rayonnement infrarouge par le matériau analysé. Elle permet via la détection des vibrations caractéristiques des liaisons chimiques, d'effectuer l'analyse des fractions chimiques présentes dans le matériau.

Cette technique est utilisée pour détecter et analyser les bandes d'oxydation chimique des bitumes.

Dans le but d'identifier les groupements présents dans la structure chimique du bitume, l'analyse spectroscopique d'absorption dans l'infrarouge a été réalisée sur des pastilles de poudre de KBr, l'échantillon est solvâté en hexane puis analysé sous forme de goutte en sandwich entre deux pastilles de KBr.

L'analyse est effectuée en utilisant un spectromètre IRTF de marque Shimadzu type 8400 avec une résolution de 2 cm^{-1} et 60 balayages entre 4000 et 400 cm^{-1} .

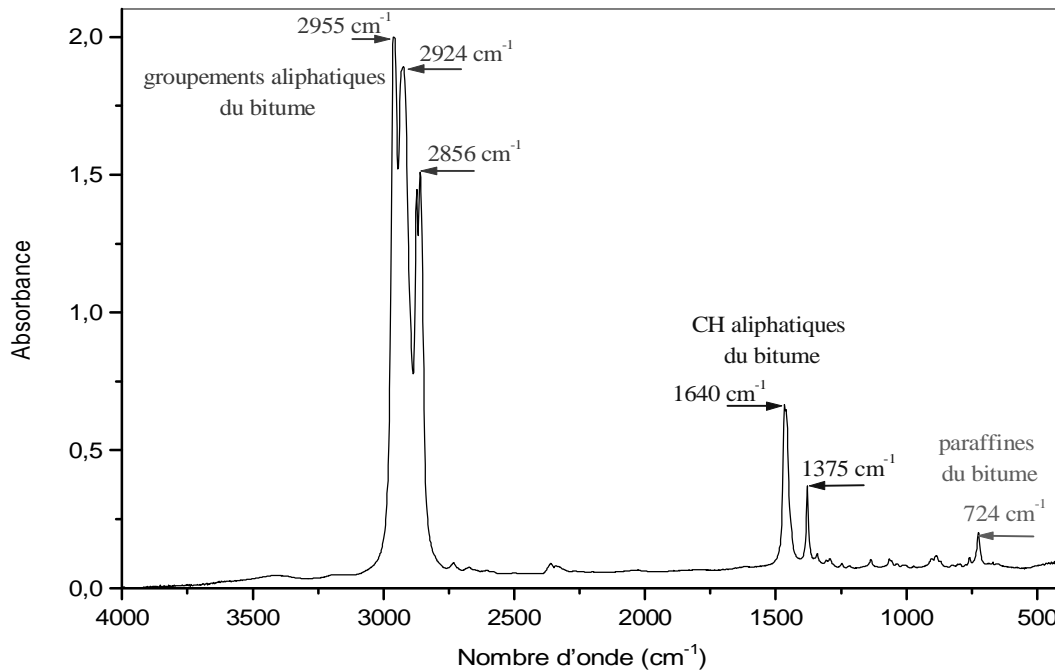


Figure 2.3. Résultats du Spectre FTIR du bitume étudié

L'analyse du spectre montre la présence de trois types de groupement à savoir :

- Groupement aliphatique se déforment de 2955 à 2856 cm^{-1} .
- CH aliphatique se déforment de 1640 à 1375 cm^{-1} .
- Groupement paraffines se déforment à 724 cm^{-1} .

1.3. 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'Elastomères » avec une granulométrie de $0 - 1\text{ mm}$. Cette poudre est issue de la fabrication des joints des buses hydrauliques.



Figure 2.4. La poudre de caoutchouc NR sous une loupe.

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.

1.3.1. Caractéristiques de la poudrette

Les résultats des essais effectués sur la poudrette de caoutchouc sont montrés dans les tableaux 2.7 et 2.8.

La densité de la poudrette est mesurée par rapport à l'éthanol dont la densité est de 0,79 gr/ml.

Tableau 2.7. Densité de la poudrette de caoutchouc [NR].

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

Tableau 2.8. L'analyse granulométrique de la poudrette de caoutchouc [NR].

Tamis (μm)	passants cumulés (%)
2000	100
1000	99
630	86,8
500	74
315	44,8
125	4,8
80	0

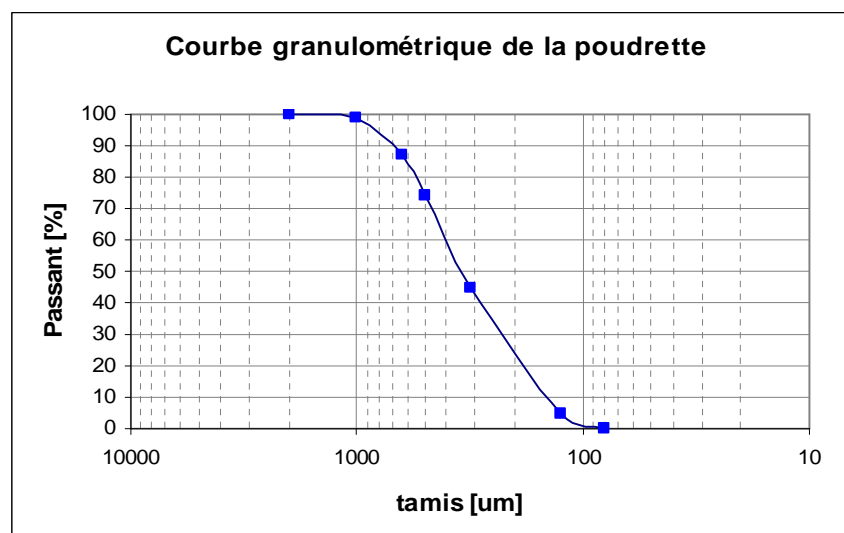


Figure 2.5. Courbe granulométrique de la poudrette de caoutchouc (NR).

L'analyse granulométrique montre que la poudre de caoutchouc (NR) est constituée de grains inférieurs à 1 mm.

Nous remarquerons aussi que la poudre de caoutchouc présente une granulométrie continue.

1.3.2. Caractérisation du NR par FTIR

L'analyse spectroscopique d'absorption a été réalisée sur la poudre 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,

Le spectre obtenu pour la poudre de caoutchouc est représenté dans la figure 2.6.

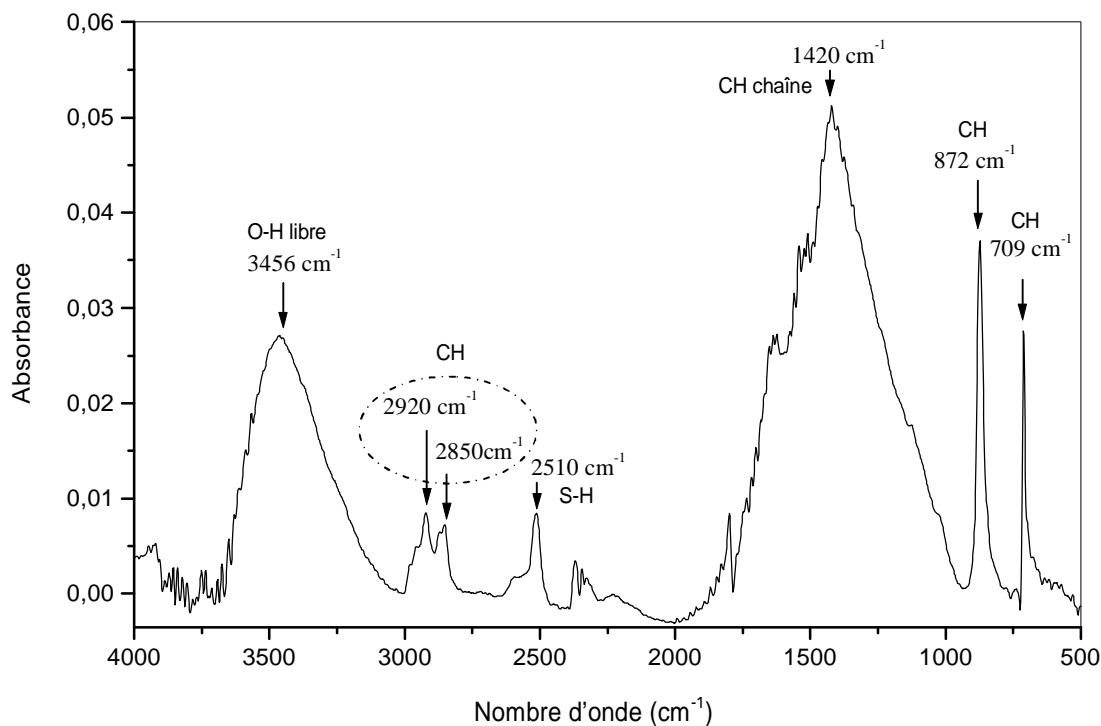


Figure 2.6. Résultat du Spectre FTIR de la poudre de caoutchouc [NR]

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} , $2950\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$, 872 cm^{-1} et 709 cm^{-1} ces groupements sont ceux d'une chaîne macromoléculaire (polymère),
- La bande 2510 cm^{-1} élongation 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.

Chapitre 2 : LE BITUME MODIFIE

L'objectif de cette partie est d'étudier d'une part l'influence de la modification sur les performances du bitume et d'autre part de déterminer les paramètres de fabrication du bitume caoutchouc à savoir :

- La durée de malaxage,
- La teneur optimale en poudrette de caoutchouc (NR),

Pour ce faire, nous avons réalisé les essais suivants :

- La pénétrabilité à l'aiguille NF T66-004,
- Le point de ramollissement bille et anneau « TBA » NF T66-008,
- L'indice de pénétrabilité à cinq températures méthode LCPC,
- La ductilité. NF T66-004,
- La mesure du pourcentage d'asphaltènes
- Le module de rigidité estimé d'après le nomogramme de Van Der Poel,

2.1. Nomenclature des matériaux

Afin d'identifier rapidement et efficacement les composants de base et les différents matériaux obtenus après la fabrication du bitume caoutchouc, on adopte la nomenclature suivante :

Tableau 2.9, Nomenclature des matériaux en fonction de la teneur en NR.

Bitume 50/70 « B »					
% NR	0	2	4	6	8
Référence	B (0)	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)

2.2. Fabrication du bitume caoutchouc

2.2.1. Principe et matériels

La fabrication du bitume caoutchouc est une opération nécessitant un contrôle strict de tous les facteurs influant sur 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.

Nous adoptons les paramètres de fabrication suivants :

- Température du mélange : 170 +5 °C, (selon la littérature),
- Vitesse de malaxage : 600 tr/min, (selon la littérature).
- Hélice de 5 cm de diamètre fixée à environ 5 mm du fond du récipient,
- Récipient en fer blanc de 11cm de diamètre contenant environ 450g 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%.

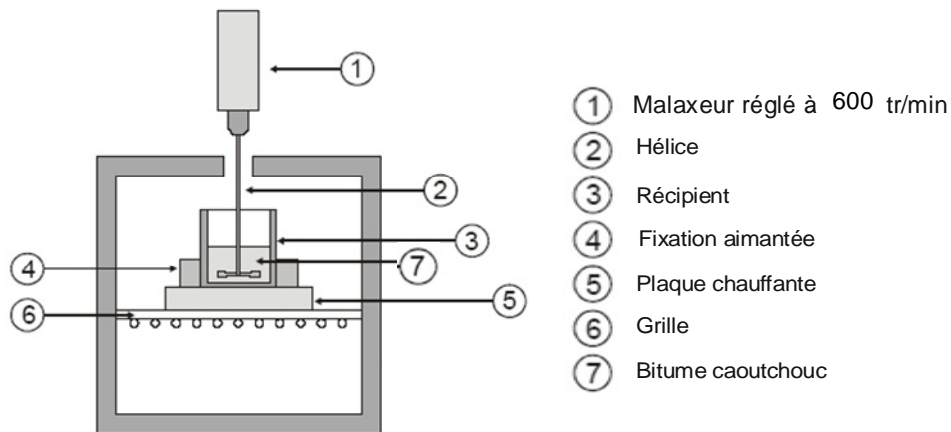


Figure 2.7. Schéma de l'appareillage servant à fabriquer le bitume caoutchouc

2.2.2. Mode opératoire

Pour la fabrication, nous adoptons le protocole suivant :

- Préchauffer le bitume à 170°C sur la plaque chauffante. La température est atteinte dans le bitume au bout de 60 min.
- Préparer la masse de la poudre de caoutchouc nécessaire et la chauffer pendant 2 à 3 minutes à la température de malaxage,
- Incorporer progressivement la poudre de caoutchouc dans le récipient de bitume en homogénéisant le mélange avec l'hélice chauffée,
- Installer le dispositif de la figure (2.7) et régler la plaque chauffante de telle sorte à maintenir la température du mélange bitume caoutchouc à 170°C,
- Mettre en marche le malaxeur à une vitesse de malaxage de 600 tr/min,
- Arrêter le malaxeur après le temps de malaxage fixé, à savoir 1h, 2h, 3h, 4h.
- Le récipient est vidé immédiatement, on procède à la mesure des caractéristiques physiques et mécaniques des bitumes modifiés.

2.3. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur la pénétrabilité du bitume

Les résultats de la pénétrabilité en fonction de la durée de malaxage et de la teneur en poudrette de caoutchouc sont rassemblés dans le tableau 2.10.

Tableau 2.10, Résultats de la pénétrabilité à 25 °C.

Heures (h)	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)			
	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)
Bitume pur	60,00	60,00	60,00	60,00
1	44,50	40,00	38,33	35,75
2	39,67	37,16	36,00	34,33
3	36,67	35,16	34,50	33,66
4	23,83	21,16	30,00	26,00

2.3.1. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité

Les résultats d'évolution de la pénétrabilité sont représentés sur la figure 2.8;

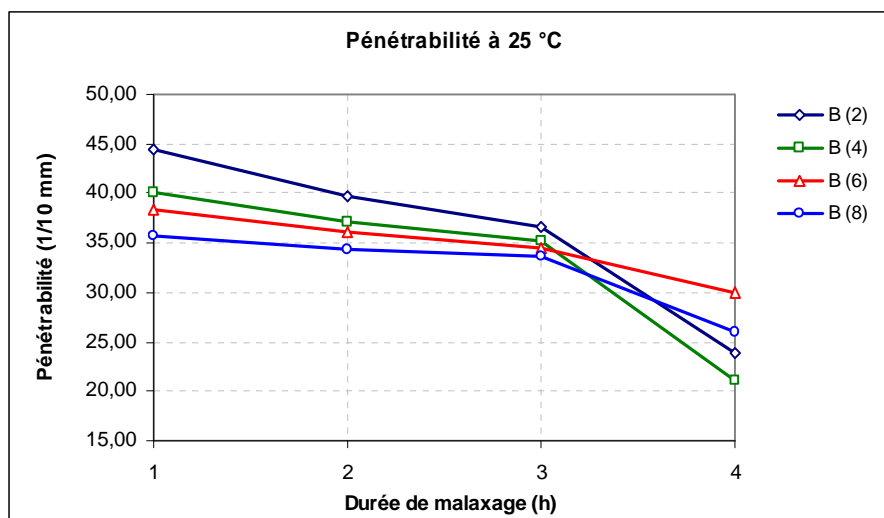


Figure 2.8. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité à 25 °C

On remarque que pour toutes les teneurs, les courbes présentent en général la même allure avec la présence de trois paliers à savoir ;

- Entre le début de malaxage et 1 heure ; la diminution de la pénétrabilité est très rapide,
- Entre 1 heure et 3 heures ; une stabilisation de la pénétrabilité,
- Entre 3 heures et 4 heures ; une diminution rapide pour B (2) et B (4) et une légère diminution pour B (6) et B (8),

Au bout de 4 heures de malaxage, les pénétrabilités de B (2) et B (4) sont inférieures aux pénétrabilités de B (6) et B (8),

Les courbes ci-dessus montrent que la pénétrabilité diminue avec l'augmentation du temps de malaxage, et cela pour toutes les teneurs en poudrette.

2.3.2. Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité

Les résultats d'évolution de la pénétrabilité en fonction de la teneur en poudre sont représentés sur la figure 2.9,

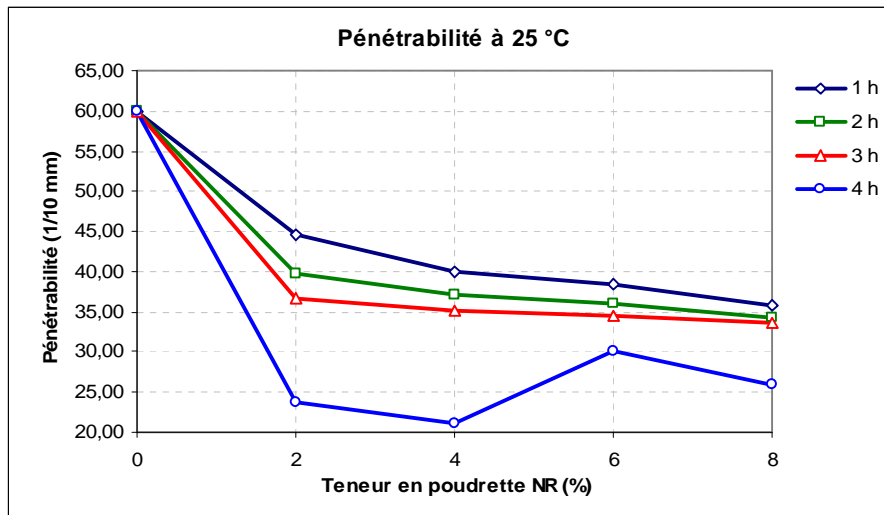


Figure 2.9. Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité à 25 °C

Toutes les courbes présentent les mêmes allures à l'exception de la courbe correspondant à 4 heures de malaxage où on remarque une diminution importante de la pénétrabilité à 2% de NR et à 4 % de NR.

La pénétrabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en poudre.

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

Les résultats de la variation de la pénétrabilité des bitumes modifiés par rapport à leur bitume de base et avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc sont représentés dans la figure 2.10.

Le rapport de variation de la pénétrabilité, pour une teneur en NR [NR%] et un temps de malaxage [t] donnés, est calculé à la base de la formule suivante :

$$\text{Rapport de variation Pen (NR\%, t) [\%]} = \frac{\text{Pén(NR\%, t)}}{\text{Pén du bitume pur}} \times 100$$

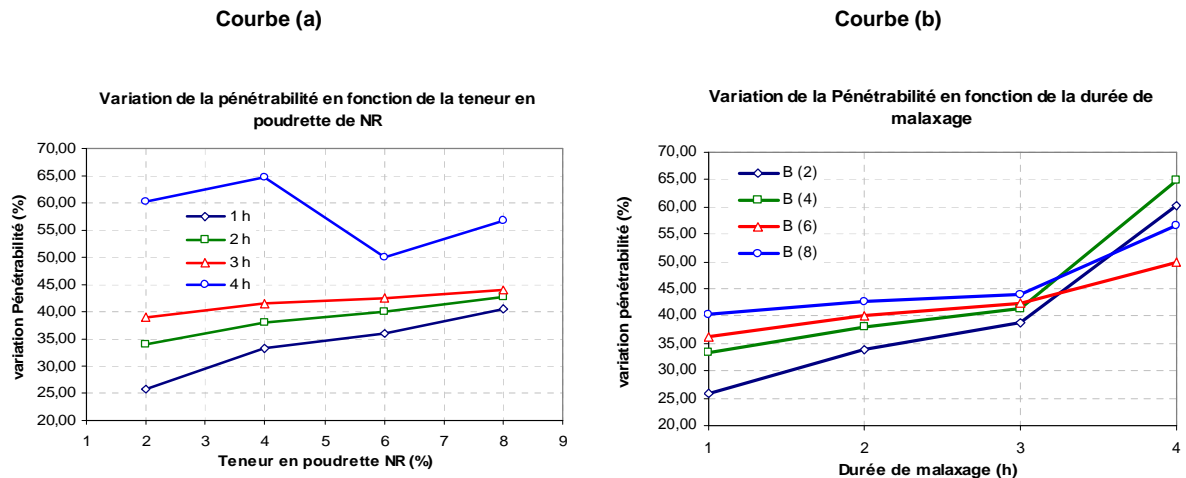


Figure 2.10, Variation de la pénétrabilité en fonction de la teneur en NR [courbe (a)]
et variation de la pénétrabilité en fonction la durée de malaxage [courbe (b)]

Les courbes de la figure 2.10 représentent ces variations et montrent que :

- Plus on augmente la teneur en poudre plus l'écart entre les courbes 4h, 3h, 2h, et 1h diminue (figure 2.10.a). Une quantité importante de poudre nécessite une énergie de malaxage plus importante donc une durée de malaxage plus importante.

Exemple :

Tableau 2.11, Exemple de la variation de la pénétrabilité
en fonction de la teneur en NR.

Teneur NR (%)	Variation à 1 heure (%)	Variation à 3 heures (%)	Différence des deux variations
2	25,83	38,88	13,05
8	40,42	43,9	3,48

- Plus on augmente la durée de malaxage plus l'écart entre les courbes B(2), B(4), B(6) et B(8) diminue (figure 2.10.b).

Exemple :

Tableau 2.12, Exemple de la variation de la pénétrabilité
en fonction de la durée de malaxage.

Heures	Variation à 2% de NR (%)	Variation à 8% de NR (%)	Différence des deux variations
1	25,83	40,42	14,59
3	38,88	43,9	5,02

2.4. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur la température bille et anneau du bitume

Les résultats de la pénétrabilité en fonction de la durée de malaxage et de la teneur en poudrette de caoutchouc sont rassemblés dans le tableau 2.13.

Tableau 2.13, Résultats de la Température de bille et anneau « TBA ».

Heures (h)	Température TBA (°C)			
	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)
Bitume pur	49,85	49,85	49,85	49,85
1	54,4	55	55,55	59,45
2	53	54,25	57,6	59,65
3	54,2	56,25	61,16	61,2
4	65	66,5	59,95	64,4

2.4.1. Influence du temps de malaxage sur la température bille et anneau

Les résultats d'évolution de la température bille et anneau « TBA » en fonction de la durée de malaxage sont représentés sur la figure 2.11.

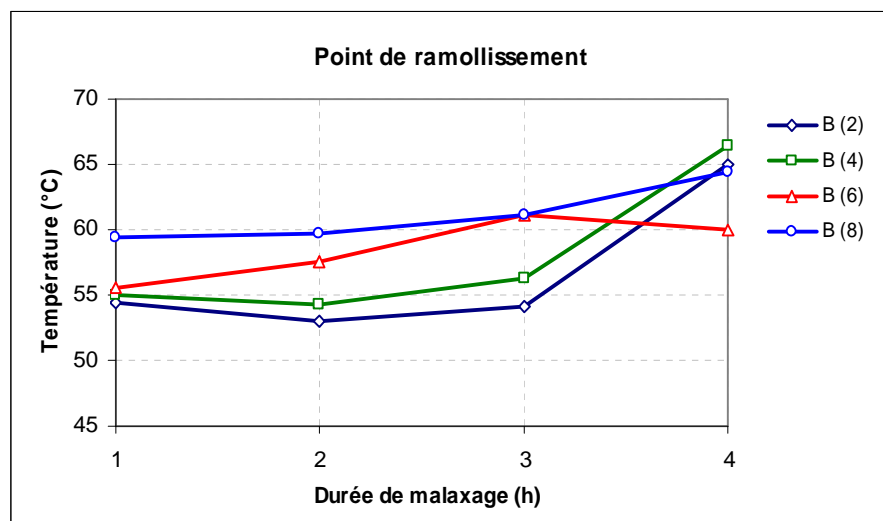


Figure 2.11, Influence du temps de malaxage sur le point de ramollissement TBA

On remarque que :

- Pour les bitume B (2), B (4) et B (8), il existe trois intervalles à savoir :
 - § L'intervalle de 0 à 1 heure : l'ajout du NR a augmenté rapidement le point de ramollissement,
 - § L'intervalle de 1 à 3 heure : le point de ramollissement est quasi stable,
 - § L'intervalle de 3 à 4 heure : une augmentation rapide du point de ramollissement,
- Pour le bitume B (6) on remarque qu'il y a une augmentation du point de ramollissement jusqu'à 3 heures, et après on remarque une stabilisation,

- A 4 heures, les points de ramollissement des bitumes B(2) et B(4) sont supérieurs à ceux des bitumes B (6) et B (8).

Le point de ramollissement croit en général avec l'augmentation du temps de malaxage,

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

Les résultats de la température bille et anneau en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc sont représentés sur la figure 2.12.

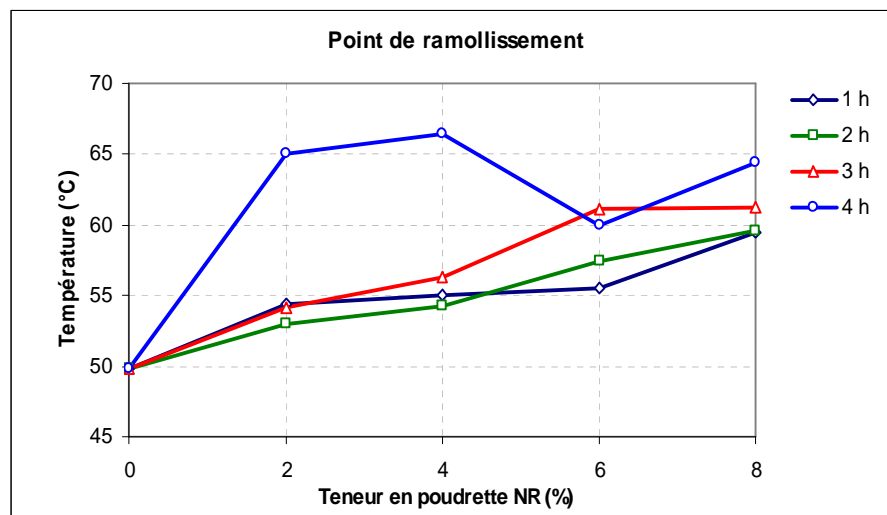


Figure 2.12, Influence de la teneur en NR sur le point de ramollissement

D'après la figure 2.12 on remarque que :

- Les courbes présentent les mêmes allures pour 1h, 2h, et 3h de malaxage,
- Pour la courbe correspondant à 4 heures de malaxage, l'évolution du point de ramollissement présente la même allure de celle de la courbe correspondant à 4 heures de malaxage de la pénétrabilité.

Le point de ramollissement augmente avec la teneur en poudre de caoutchouc,

2.4.3. Variation du point de ramollissement du bitume modifié par rapport au bitume pur

Les résultats de la variation de la température bille et anneau des bitumes modifiés avec leur bitume de base et avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc sont représentés dans la figure (2.13).

La variation du point de ramollissement pour une teneur en NR [NR%] et un temps de malaxage [t] donnés, est calculé à la base de la formule suivante :

$$\text{Variation TBA}[\text{NR}\%,t](^{\circ}\text{C}) = \text{TBA}[\text{NR}\%,T] - \text{TBA}[\text{pur}]$$

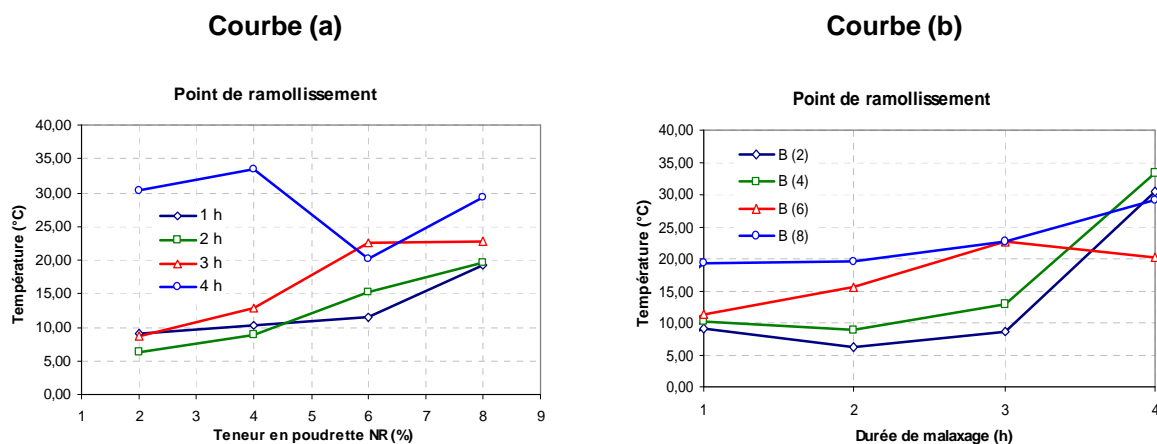


Figure 2.13, La variation du point de ramollissement en fonction de la teneur en NR courbe (a) et la variation du point de ramollissement en fonction la durée de malaxage courbe (b).

D'après les courbes de la figure 2.13 on remarque que :

- A 2% de NR on remarque que les courbes de 1h, 2h et 3h sont proches. Si on augmente la teneur en poudre l'écart entre les trois courbes augmente.
- On remarque que pour la courbe correspondant à 4 heures de malaxage, le taux de variation du point de ramollissement présente la même allure de celle de la courbe correspondant à 4 heures du taux de la pénétrabilité.

En augmentant la teneur en NR, la variation du point de ramollissement augmente.

2.5. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur la susceptibilité thermique des bitumes

La susceptibilité des bitumes modifiés à la température, est caractérisée par la même méthode utilisée pour les bitumes purs, c'est-à-dire, par « l'indice de pénétrabilité IP ». Nous avons utilisé la méthode LCPC dite « à 5 températures ».

Les résultats de l'indice de pénétrabilité en fonction de la durée de malaxage et de la teneur en poudre de caoutchouc sont rassemblés dans le tableau 2.14;

Tableau 2.14. Indice de pénétrabilité.

Heures (h)	Indice de Pénétrabilité (LCPC)			
	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)
Bitume pur	0,31	0,31	0,31	0,31
1	0,45	0,49	0,77	1,21
2	0,60	0,70	0,83	1,28
3	0,83	0,97	1,03	1,39
4	1,61	1,74	1,19	1,49
Heures (h)	A (la pente de la droite $\log [Pen] = AT+B$)			
Bitume pur	0,0382	0,0382	0,0382	0,0382
1	0,0374	0,0372	0,0357	0,0335
2	0,0336	0,0361	0,0354	0,0332
3	0,0354	0,0347	0,0344	0,0327
4	0,0317	0,0311	0,0366	0,0322

Exemple :

La susceptibilité thermique, basée sur l'essai de pénétrabilité à différentes températures (15, 20, 25, 30 et 35 °C) pour 2 heures de malaxage, est représentée par la figure 2.14.

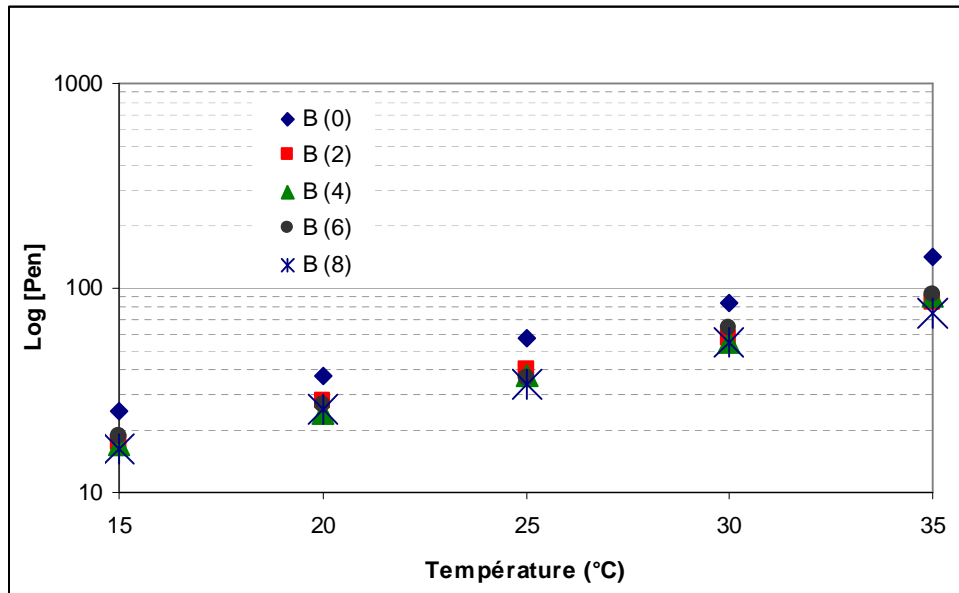


Figure 2.14. Variation de la pénétrabilité en fonction de la température en coordonnées semi-logarithmique

La figure 2.14 montre qu'il existe, pour toutes les teneurs en poudre, une variation linéaire en coordonnées semi-logarithmiques entre la pénétrabilité et la température.

2.5.1. Influence du temps de malaxage sur l'indice de pénétrabilité « IP »

Les résultats d'évolution de l'indice de pénétrabilité en fonction de la durée de malaxage sont représentés sur la figure 2.15.

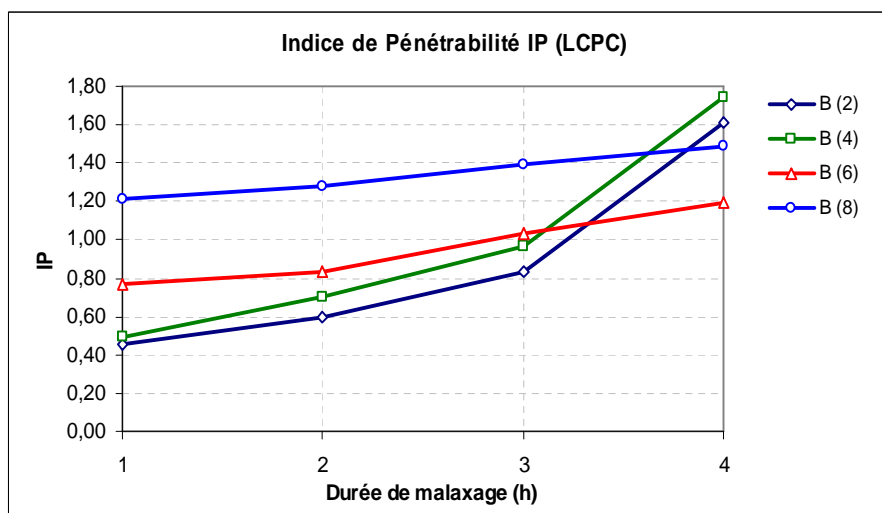


Figure 2.15. Influence du temps de malaxage sur l'indice de Pénétrabilité « IP »

Les courbes de la figure 2.15 montrent que l'indice de Pénétrabilité croît avec l'augmentation du temps de malaxage.

On remarque qu'à 4 heures de malaxage l'indice de pénétrabilité de B (2) et de B (4) sont supérieurs à ceux de B (6) et de B (8).

La susceptibilité thermique diminue avec l'augmentation de la durée de malaxage.

2.5.2. Influence de la teneur en NR sur l'indice de pénétrabilité « IP »

Les résultats d'évolution de l'indice de pénétrabilité en fonction de la teneur en poudre de caoutchouc NR sont représentés sur la figure suivante ;

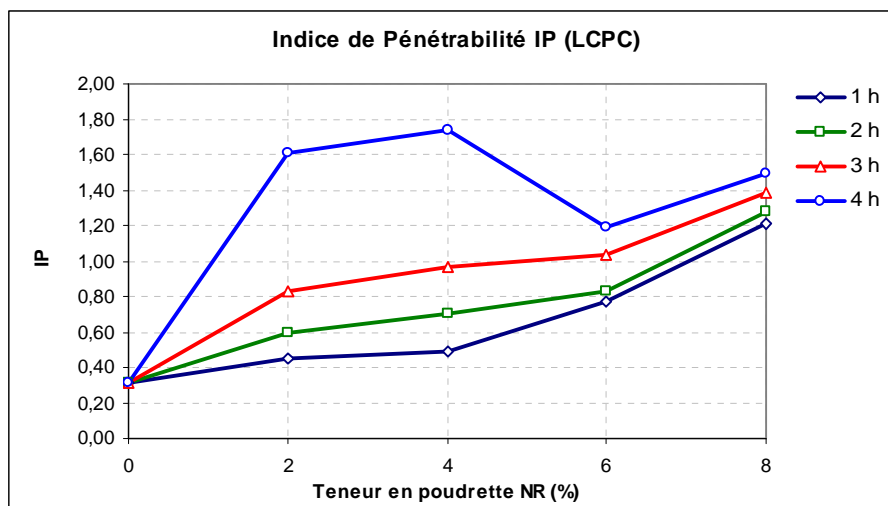


Figure 2.16. Influence de la teneur en NR sur l'indice de pénétrabilité « IP »

D'après la figure 2.16 on remarque :

- Les courbes présentent les mêmes allures pour 1h, 2h, et 3h.
- On remarque que la courbe correspondant à 4 heures de malaxage présente la même allure de celle de la courbe correspondant à 4 heures de la pénétrabilité et du point de ramollissement.
- L'indice de pénétrabilité augmente avec la teneur en poudre de caoutchouc.
- La susceptibilité thermique diminue avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc.

Les résultats de cette partie montrent que :

- Les valeurs de A sont comprises entre 0,015 et 0,06 (intervalle des bitumes routiers).
- La susceptibilité diminue avec l'augmentation de la teneur en poudre.
- Pour une teneur en poudre donnée, la susceptibilité diminue avec l'augmentation de la durée de malaxage.

2.6. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur la ductilité du bitume et le module de rigidité

Les résultats de la ductilité à 25°C en fonction de la durée de malaxage et de la teneur en poudrette de caoutchouc sont rassemblés dans le tableau 2.15.

Tableau 2.15. Ductilité.

Heures (h)	Ductilité à 25 °C (cm)			
	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)
Bitume pur	139	139	139	139
1	19,5	29,5	25,3	22,5
2	20,3	30	24,5	16,5
3	22,5	22,3	21,4	14,7
4	11,5	9,65	19	9,7

2.6.1. Influence du temps de malaxage sur la ductilité

L'allongement de l'éprouvette de bitume à 25 °C en fonction de la durée de malaxage est donné par la figure 2.17.

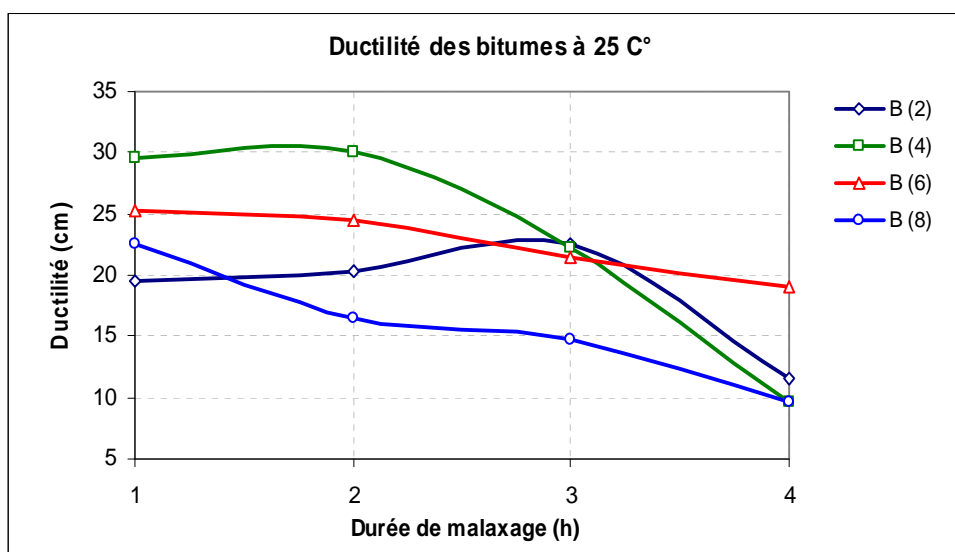


Figure 2.17. Influence du temps de malaxage sur la ductilité à 25 °C

La figure 2.17 montre ce qui suit :

- L'intervalle entre 1 heure et 2 heures : l'allure des courbes est quasi stable sauf pour le bitume B (8) où on remarque une diminution de la ductilité,
- L'intervalle entre 2 heures et 4 heures : on remarque une diminution de la ductilité sauf pour le bitume B (6) qui a connu une augmentation de la ductilité à 3 heures, ensuite elle diminue,
- Le bitume qui a donné une meilleure ductilité est le bitume B (4), avec une durée de malaxage de deux heures, ensuite le B(6) à 2 heures, et après c'est le B (2) à 3 heures et le B (8) à 1 heure,

2.6.2. Influence de la teneur en NR sur la ductilité

La figure 2.18 montre la comparaison entre les résultats de l'allongement des bitumes modifiés,

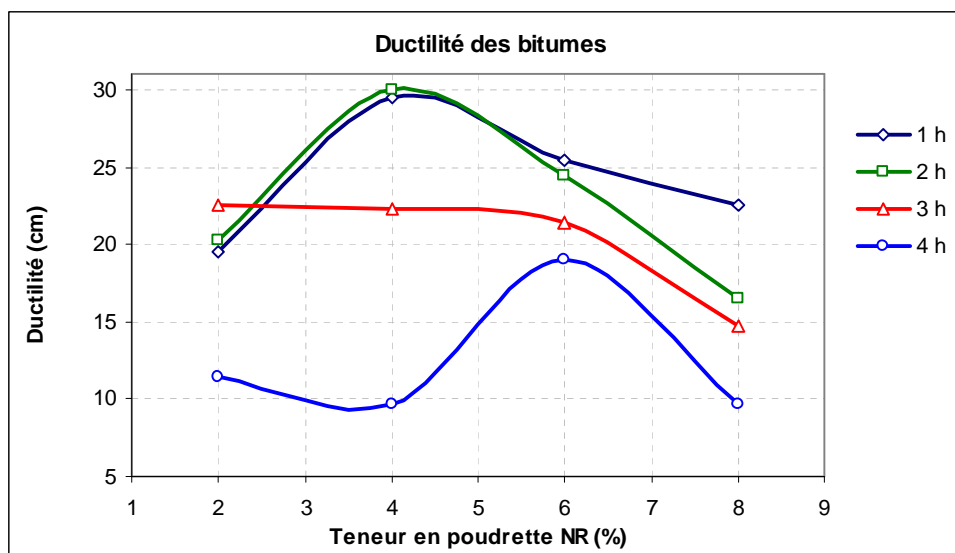


Figure 2.18, Influence de la teneur en NR sur la ductilité à 25 °C

D'après la figure 2.18 on constate :

- Les courbes de 1 heures et 2 heures de malaxage présentent les mêmes allures,
- On constate que à 4 % de poudre et à 2 heures de malaxage on a la ductilité maximale du bitume modifié,

2.6.3. Influence de la teneur de la poudre NR sur le module de rigidité des bitumes

Les modules de rigidité des bitumes sont obtenus avec le nomogramme de Van der Poel.

Van der Poel a mis au point un nomogramme qui permet la prévision du module de rigidité du bitume S_b pour n'importe quel couple fréquence – température à partir de la connaissance des deux caractéristiques de l'indice de pénétrabilité et du point de ramollissement.

Les modules sont déterminés à partir du couple :

- Fréquence = 50 HZ,
- Température = 25 °C,

Les résultats sont représentés dans la figure 2.19.

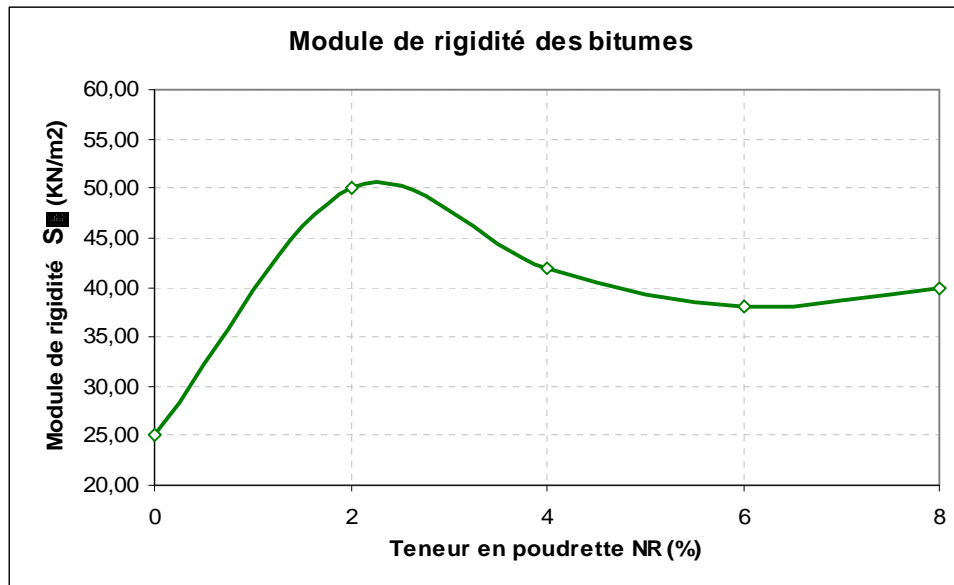


Figure 2.19, Influence de la teneur en NR sur le module de rigidité à 25 °C

D'après la figure 2.19 on remarque que le module de rigidité augmente pour 2% par rapport au bitume pur, ensuite il diminue pour 4% par le caractère caoutchouteux de la matière, et il stabilise pour 6% et 8 % (matrice caoutchouc),

Si on compare ces résultats avec la ductilité pour deux heures de malaxage on remarque que :

- A 2% le bitume a une ductilité faible parce qu'il présente un module de rigidité élevé,
- A 4% le bitume a une ductilité plus importante qu'à 2%, car il a un module faible par rapport à ce dernier, donc le B (4) est plus flexible par rapport au B (2),
- A 6% et 8%, soit :
 - § Les matériaux sont hétérogènes, donc ils nécessitent plus d'énergie de malaxage, pour cela ils ont des ductilités faibles.
 - § Soit, par ce que pour ces deux pourcentages on est passé à une phase caoutchouc, donc ce sont les caractéristiques du caoutchouc.

Heukelom (1975) [49] a montré que la ductilité n'est fonction que du module de rigidité du matériau indépendamment de l'origine, du type ou de la catégorie du bitume. D'autres auteurs relient le comportement ductile du bitume à sa composition chimique (Chambard et al. 2003) [49] : une forte teneur en résines accroît le caractère ductile tandis que la présence de paraffines en quantité suffisante (> 5%) ou une trop grande hétérogénéité le réduit.

2.7. Influence du temps de malaxage et de la teneur en NR sur le pourcentage d'Asphaltènes des bitumes

Le fractionnement en asphaltènes et maltènes est effectué par précipitation sélective dans le n-heptane de faible poids moléculaire.

La procédure de fractionnement est schématisée sur la figure 2.20.

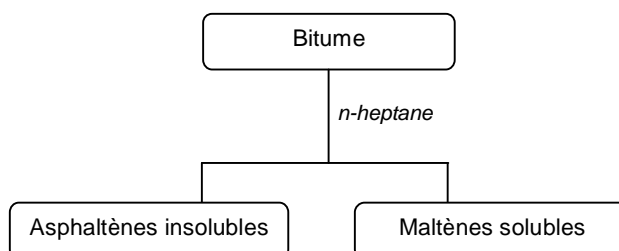


Figure 2.20. Procédé de fractionnement du bitume

Dans cette partie nous avons étudié l'évolution des Asphaltènes des bitumes modifiés en fonction de la durée de malaxage et la teneur en poudre de caoutchouc, les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 2.16.

Tableau 2.16. Résultats de la mesure du pourcentage d'asphaltènes.

Heures (h)	Pourcentage d'Asphaltènes			
	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)
Bitume pur	18,54	18,54	18,54	18,54
1	20,20	20,88	21,28	25,82
2	24,24	25,47	26,42	32,77
3	32,00	32,51	34,60	39,50
4	34,35	36,95	39,47	41,00

2.7.1. Influence du temps de malaxage sur le pourcentage d'Asphaltènes

La figure suivante montre l'évolution du pourcentage d'Asphaltènes du bitume pur et des bitumes modifiés pour chaque temps de malaxage.

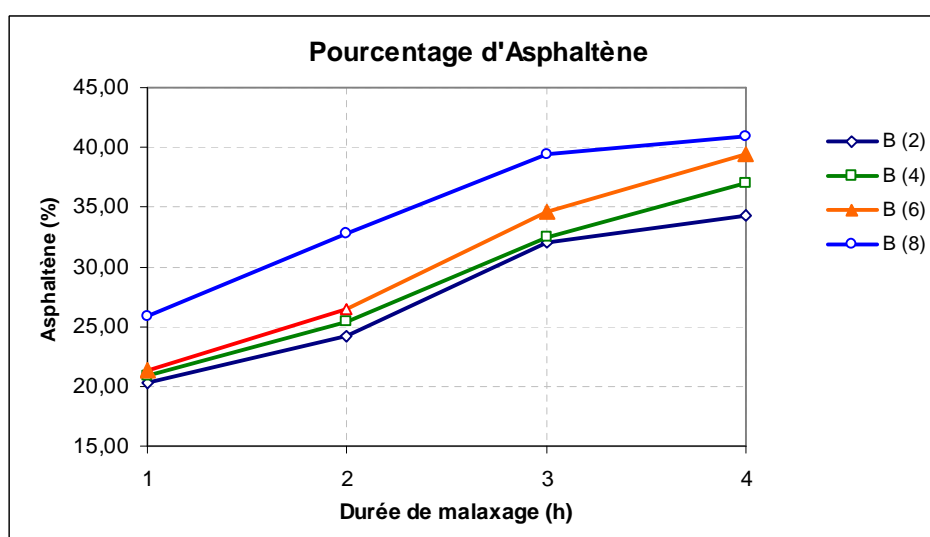


Figure 2.21. Influence du temps de malaxage sur le pourcentage d'Asphaltènes

D'après la figure précédente on remarque :

- Les courbes présentent les mêmes allures,
- Le pourcentage en Asphaltènes augmente avec l'augmentation du temps de malaxage,
- L'écart entre le pourcentage d'Asphaltènes des bitumes modifiés augmente avec l'augmentation de la durée de malaxage,

2.7.2. Influence de la teneur en NR sur le pourcentage d'Asphaltènes

La figure 2.22 montre la comparaison entre les résultats du pourcentage d'Asphaltènes des bitumes modifiés.

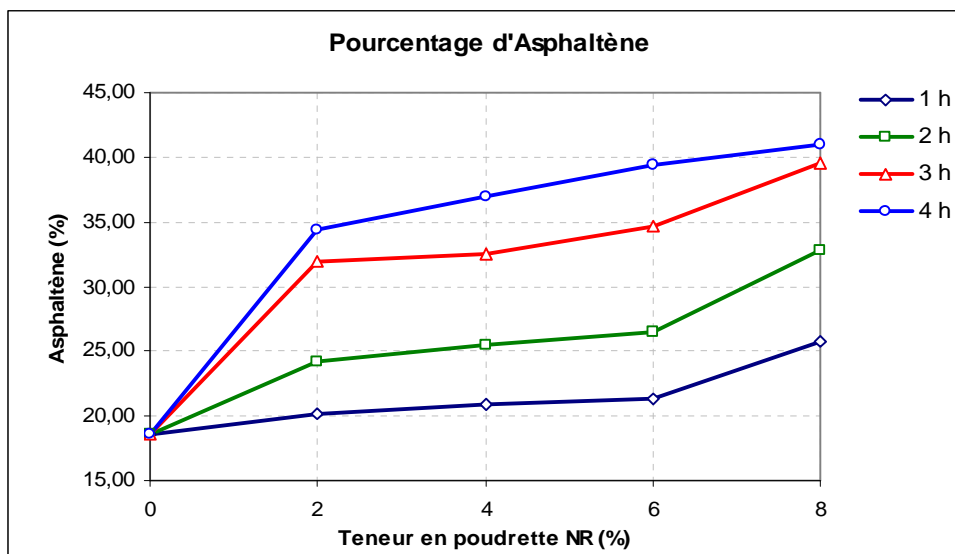


Figure 2.22. Influence de la teneur en NR sur le pourcentage d'Asphaltènes

D'après la figure 2.22 on remarque qu'il existe trois paliers à savoir :

- Entre 0% et 2% de NR : on remarque une augmentation rapide du taux d'asphaltènes, due à l'absorption des huiles aromatiques,
- Entre 2% et 6% de NR : une légère stabilité du pourcentage d'asphaltènes pour les courbes de 1 heure, 2 heures et 3 heures,
- Entre 6% et 8% de NR : on remarque une augmentation rapide du pourcentage d'Asphaltènes,

On remarque aussi :

- Les courbes présentent les mêmes allures.
- Le pourcentage d'asphaltènes augmente avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc.
- L'écart entre le pourcentage d'Asphaltènes des bitumes modifiés augmente avec l'augmentation de la teneur en poudre de caoutchouc.
- L'augmentation du pourcentage d'Asphaltènes est plus rapide pour 3 heures et 4 heures par rapport à 1 heure et 2 heures.

En résumé, le pourcentage d'asphaltènes augmente avec la teneur en poudrette de caoutchouc. Ceci est dû à l'effet absorbant du **NR** des huiles présentes dans le bitume se traduisant par une transformation d'une partie des résines en asphaltènes.

2.8. Etude des bitumes modifiés au vieillissement

Afin d'apprécier le vieillissement des bitumes lors de la fabrication des enrobés bitumineux en centrale d'enrobage, un essai a été mis au point : le Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT),

Nous avons testé donc le vieillissement avec le RTFOT des liants bitumineux modifiés à 0%, 2%, 4%, 6% et 8% et cela pour deux heures de malaxage,

1) Pénétrabilité

Les résultats sont donnés par le tableau 2.17 et schématisés par la figure 2.23.

Tableau 2.17. Evolution de la pénétrabilité au vieillissement des liants bitumineux.

Bitume	B (0)	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)
Pénétrabilité à 25 °C					
avant RTFOT [1/10mm]	60	39,67	37,16	36	34,33
après RTFOT [1/10mm]	35	22,5	24	24	23
Pénétrabilité restante [%]	58,33	56,7	64,6	66,7	67,0

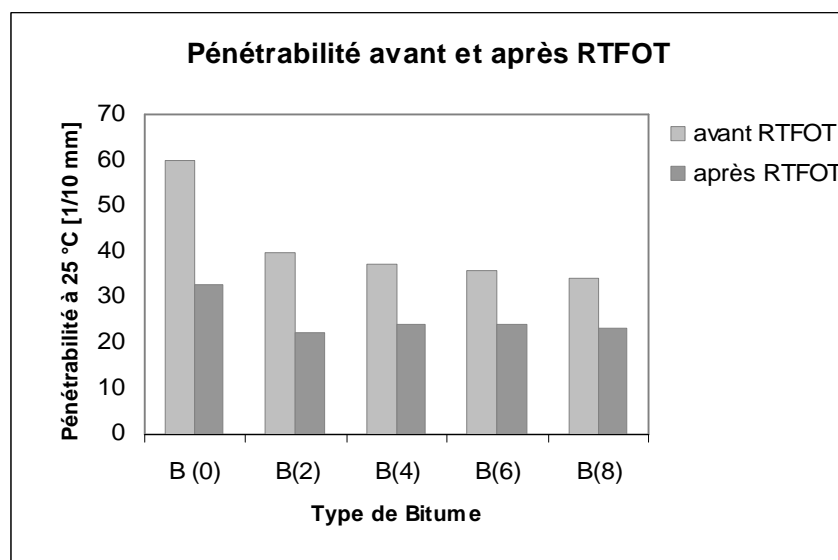


Figure 2.23. Evolution de la pénétrabilité au vieillissement des liants bitumineux

Nous constatons d'après la figure 2.23 que :

- La pénétrabilité des bitumes (pur et modifiés) diminue après RTFOT,
- La pénétrabilité restante augmente avec l'augmentation de la teneur en NR,
- La pénétrabilité des bitumes modifiés après RTFOT est quasi stable,
- La modification du bitume avec du NR diminue le taux de vieillissement des bitumes.

2) Température bille et anneau « TBA »

Les résultats sont données par le tableau 2.18 et schématisés par la figure 2.24.

Tableau 2.18. Evolution de la TBA au vieillissement des liants bitumineux,

Bitume	B (0)	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)
TBA (°C)					
avant RTFOT [°C]	49,85	53	54,25	57,5	59,65
après RTFOT [°C]	57,8	67,8	67,6	67,85	66,6
Δ TBA (°C)	8,0	14,8	13,4	10,4	7,0

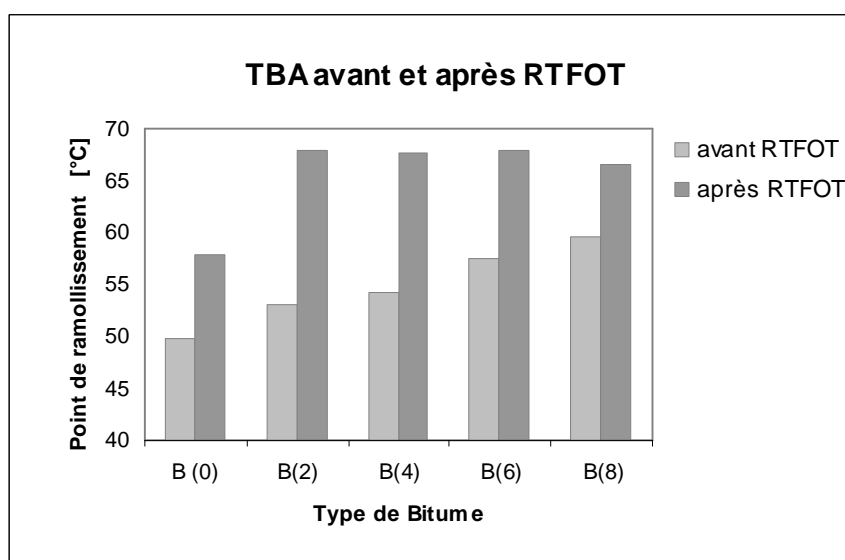


Figure 2.24. Evolution de la température bille et anneau « TBA » au vieillissement des liants bitumineux

Nous remarquons que :

- La température bille et anneau « TBA » des bitumes (pur et modifiés) augmente après RTFOT,
- La température bille et anneau augmente d'une façon considérable par rapport à celle de bitume pur,
- La température bille anneau des bitumes modifiés après RTFOT est quasi stable,
- L'augmentation de la température bille et anneau diminue avec l'augmentation de la teneur en NR,

D'après cette partie, il ressort que tous les bitumes subissent un vieillissement après l'essai RTFOT, ce vieillissement se traduit par :

- Une diminution de la pénétrabilité.
- Une augmentation de la température bille et anneau.

2.9. Conclusion

L'utilisation du déchet du caoutchouc naturel (NR) comme modifiant des liants bitumineux a apporté une amélioration sur les performances de la consistance du bitume pur,

Cette amélioration est traduite par :

- La diminution de la pénétrabilité,
- L'augmentation du point de ramollissement,
- La diminution de la susceptibilité thermique,
- L'augmentation du module de rigidité du bitume,
- La diminution du taux de vieillissement,

Pour ce qui concerne la ductilité, on remarque une diminution de cette dernière,

Le reclassement des bitumes modifiés résultants par rapport aux normes, en fonction du temps de malaxage et de la teneur en NR sont regroupés dans le tableau 2.19;

Tableau 2.19. Reclassement des bitumes en fonction de la teneur en NR et la durée de malaxage.

Heures (h)	Classe du bitume modifié			
	B (2)	B (4)	B (6)	B (8)
0	50/70	50/70	50/70	50/70
1	35/50	35/50	35/50	35/50
2	35/50	35/50	35/50	35/50
3	35/50	35/50	20/30	20/30
4	20/30	20/30	20/30	20/30

D'après le tableau 2.19, on remarque qu'après la modification on reste, pour tous les bitumes modifiés, dans le domaine des bitumes routiers.

Cette partie montre que l'ajout de 4% de NR engendre des performances tout à fait intéressantes au niveau des températures élevées, la susceptibilité thermique, le module de rigidité et la ductilité.

Aussi, on constate que le temps de malaxage de deux heures a donné de bons résultats, et donc pour des raisons technico-économique, pour le reste des essais le temps de malaxage retenue est de deux heures.

Chapitre 3 : ETUDE DE L'ENROBE BITUMINEUX

L'enrobé bitumineux est un mélange de granulats minéraux et de liant hydrocarboné dosé dans des proportions convenables. C'est aussi un corps hétérogène auquel le bitume confère un caractère visqueux.

3.1. Etude de la formulation

L'étude de la formulation des enrobés bitumineux consiste à chercher la teneur optimale en liant pour assurer un certain seuil de stabilité, de compacité, de résistance à l'eau (désenrobage) et au fluage. Une étude de formulation consiste à :

- Choisir un mélange granulaire composé des trois fractions granulométriques (0/3, 3/8 et le 8/15) s'insérant parfaitement dans un fuseau de référence (fuseau SETRA / 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,

a) Courbe granulométrique du mélange

Nous avons opté pour un mélange granulaire de trois fractions, la courbe granulométrique du mélange est représentée dans la figure 2.25,

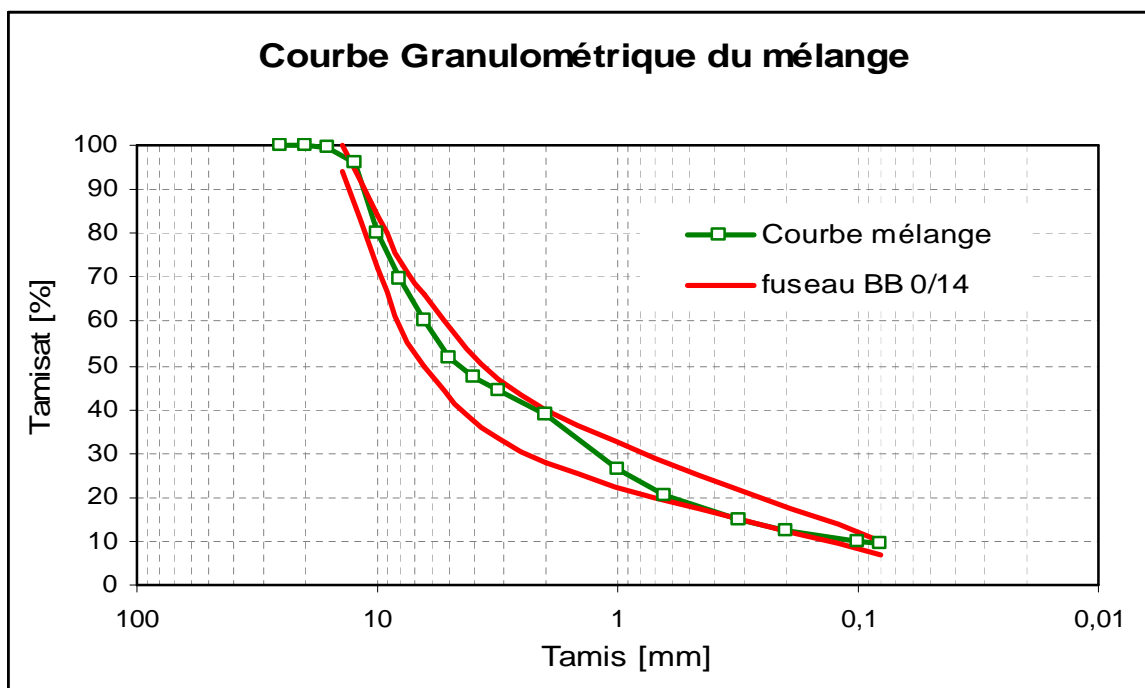


Figure 2.25. Courbe granulométrique du mélange granulaire et fuseau de référence LCPC des BB 0/14

Remarque : le sable 0/3 a été corrigé avec 7,4 % de fines (ajout de fines de la même nature que le sable en broyant le sable lui-même),

On remarque que la courbe granulométrique s'insère bien dans le fuseau de référence préconisé en Algérie pour les bétons bitumineux semi - grenus 0/14.

b) Teneur en liant optimale

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats (Fontana et al. 1998), notée Σ et exprimée en m^2/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 :

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f$$

Avec :

G : des éléments supérieurs à 6.3 mm,

S : des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm,

s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm,

f : des éléments inférieurs à 0.08 mm,

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

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

Avec : P : teneur en liant (%)

α : coefficient destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats « MVR_g ». Si celle-ci diffère de 2.65 t/m³, on utilise la formule suivante :

$$a = \frac{2.65}{MVR_g}$$

Σ : surface spécifique des granulats (m^2/kg),

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats richesse (k varie pour un enrobé bitumineux 0/14 de 3,45 à 3,9),

L'étude de formulation des bétons bitumineux a donnée les résultats qui sont regroupés dans le tableau 2.20 :

Tableau 2.20. Composition de la formule utilisée.

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
% du mélange	45	20	35
Teneur en liant (%)	6,00		

c) Résultats de l'essai Marshall

Les résultats de formulation de l'essai Marshall (NF P 98-251-2) sont donnés dans le tableau 2.21 :

Tableau 2.21. Résultats de l'essai Marshall du mélange étudié.

	Résultats	Spécifications
Stabilité Marshall (N)	1328,19	> 800
Fluage Marshall (1/10 mm)	35	20 – 40
Densité apparente (g/cm ³)	2,36	/
Compacité (%)	95,55	92 – 97
% vides résiduels	4,45	/
Quotient Marshall	379,48	/

3.2. Influence de l'ajout du NR sur les caractéristiques Marshall

L'objectif de cette partie est d'étudier l'évolution des caractéristiques Marshall avec la teneur en poudrette de caoutchouc naturel NR,

Les essais Marshall fournissent des indications sur les caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux fabriqués avec des bitumes modifiés,

Les bitumes utilisés dans cette partie sont modifiés avec du NR à 2%, 4%, 6% et 8%,

La formulation de l'enrobé fabriqué avec du bitume modifié est gardée tel que celle du béton bitumineux ordinaire, c'est-à-dire 6,00 % du bitume modifié,

Dans cette partie on a étudié aussi l'évolution du module de rigidité du mélange obtenu avec la méthode de prévision de Heukelom et Klomp (Laboratoire Shell)

A la suite des essais portant sur des mélanges hydrocarbonés, Van der Poel est arrivé à la conclusion que le module de rigidité du mélange dépend en ordre principal du module de bitume et de la concentration volumique en granulats C_v exprimée comme suit :

$$C_v = \frac{V_g}{V_g + V_b}$$

Avec :

V_g : Volume des granulats.

V_b : Volume du bitume.

Ces travaux poursuivis par Heukelom et Klomp, ont conduit à exprimer le module de rigidité d'un mélange sous la forme suivante :

$$|E^*| = S_b \left[1 + \frac{2,5}{n} \times \frac{C_v}{1 - C_v} \right]^n$$

$$\text{Avec : } n = 0,83 \cdot \log \left(\frac{4 \times 10^4}{S_b} \right)$$

S_b est le module de rigidité du bitume tiré du nomogramme de Van der Poel (en MN/m²),

On voit immédiatement que ce procédé permet de prévoir les modules d'une très grande variété de compositions.

Les essais qui ont conduit à ces conclusions ont été effectués sur des mélanges possédant un pourcentage de vides toujours voisin de 3%; or ce facteur influence fortement la valeur du module de l'enrobé.

Pour pallier à cette lacune, Fijn Van Draat et Sommer proposent de remplacer la concentration volumique des granulats par une valeur corrigée en fonction du pourcentage de vide n :

$$C'_v = \frac{C_v}{\left[1 + \frac{(n-3)}{100}\right]}$$

3.2.1. Nomenclature des matériaux

Afin d'identifier rapidement les différents matériaux obtenus après la fabrication de l'enrobé bitumineux modifié, on adopte la nomenclature suivante :

Tableau 2.22. Nomenclature des matériaux en fonction de la teneur en NR.

% NR	Bétons Bitumineux				
	0	2	4	6	8
Référence	BB (0)	BB (2)	BB (4)	BB (6)	BB (8)

3.2.2. Résultats des essais

Les résultats sont donnés par le tableau suivant ;

Tableau 2.23. Caractéristiques mécaniques des enrobés en fonction de la teneur en NR.

Bétons bitumineux	Stabilité (kg)	Fluage (mm)	Quotient (Kg/mm)	Compacité (%)	module de rigidité (Mpa)
BB (0)	1328,19	3,50	379,48	95,55	3253,53
BB (2)	1168,67	3,37	493,11	96,94	6121,54
BB (4)	1338,55	2,42	553,88	97,17	5568,15
BB (6)	1272,29	2,40	530,86	98,79	5243,65
BB (8)	1384,42	2,29	604,55	98,79	5407,79

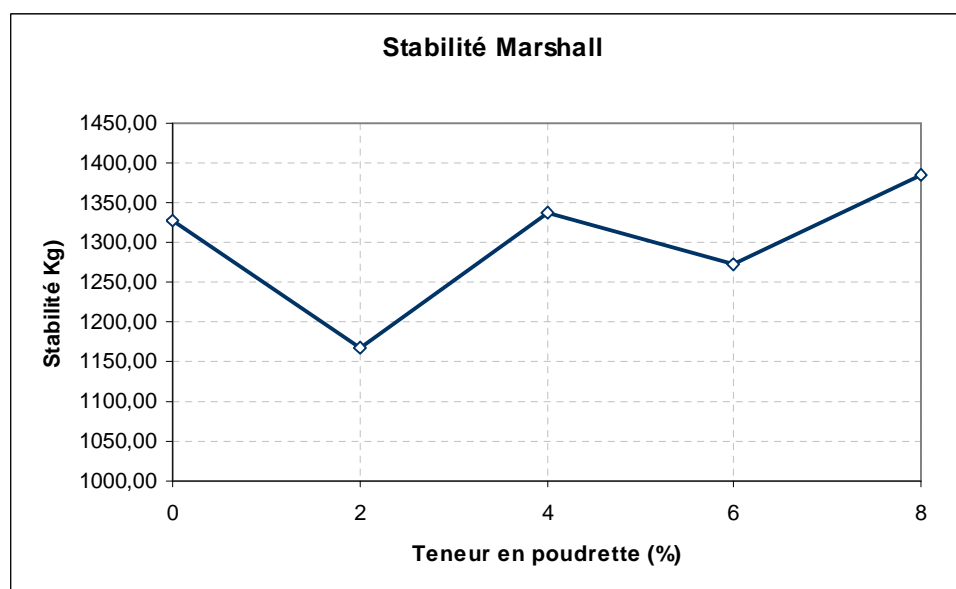


Figure 2.26. Stabilité Marshall en fonction de la teneur en NR

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

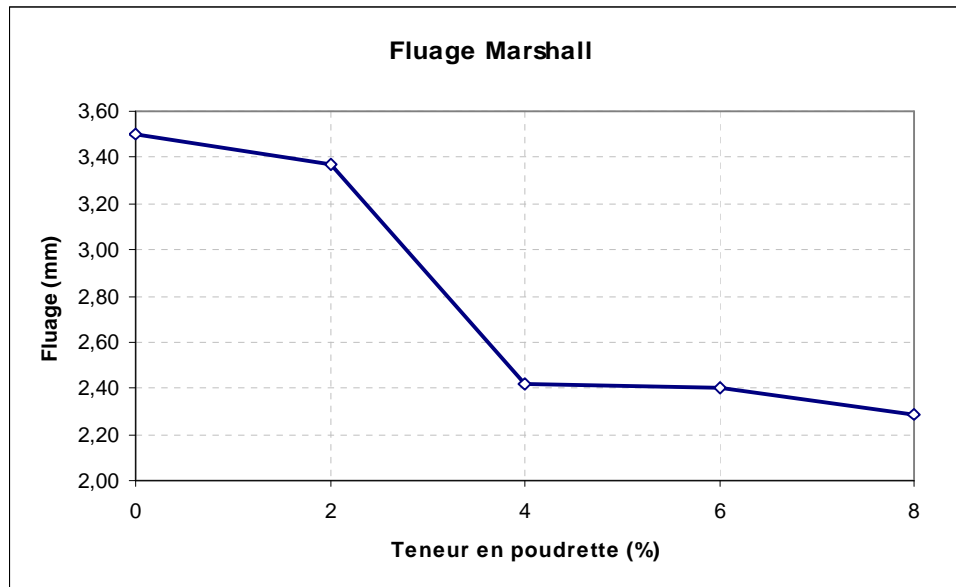


Figure 2.27. Fluage Marshall en fonction de la teneur en NR

La courbe de fluage Marshall diminue légèrement à 2%, puis elle diminue rapidement à 4%, ensuite on remarque une courbe quasi stable pour 4%, 6% et 8% de NR,

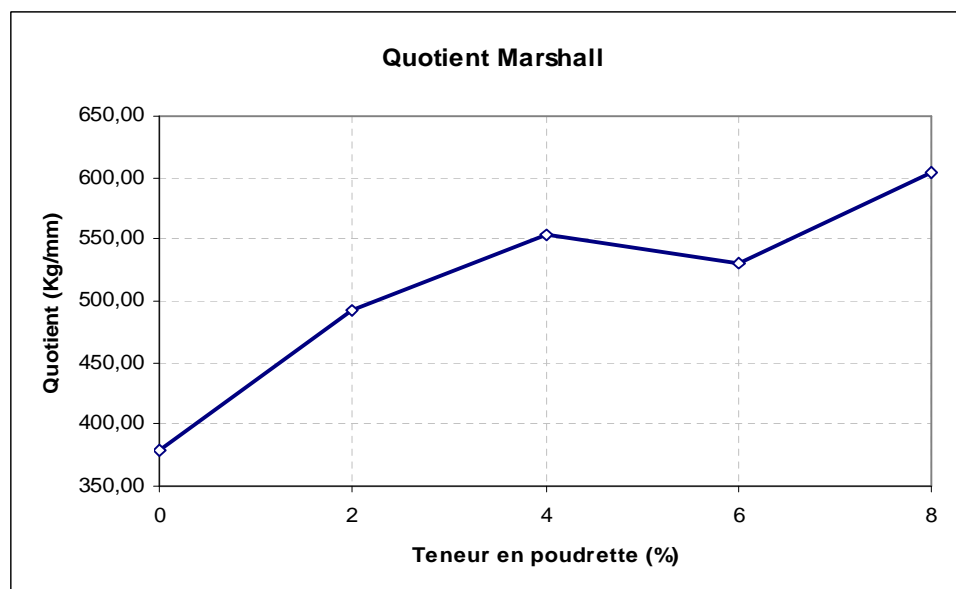


Figure 2.28. Quotient Marshall en fonction de la teneur en NR

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.

La courbe du Quotient Marshall augmente jusqu'à la teneur 4%, puis on remarque une diminution du quotient à 6%, ensuite elle augmente à 8% de NR pour donner la valeur maximale du quotient Marshall.

Donc les enrobés BB(4) et BB(8) sont les plus résistants aux déformations permanentes.

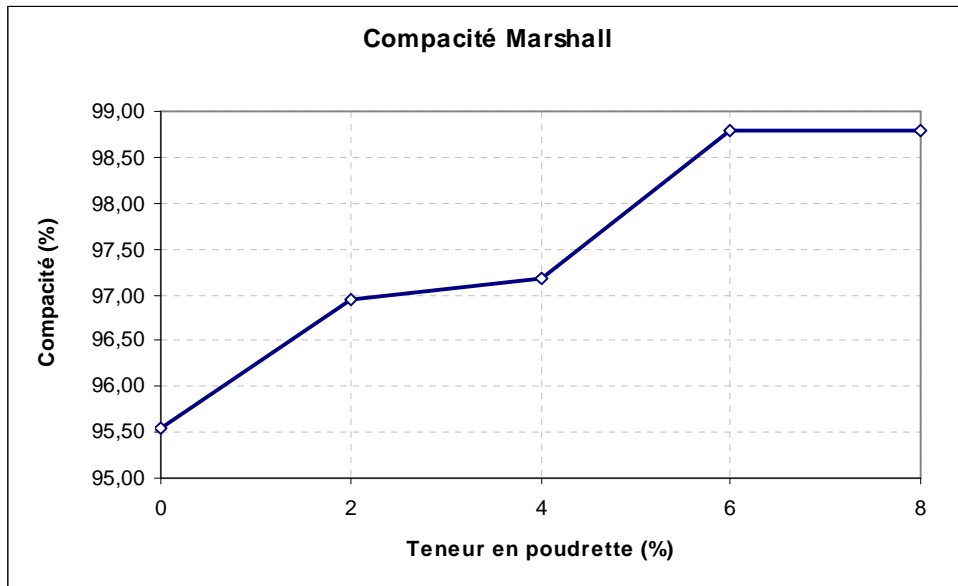


Figure 2.29. Compacité Marshall en fonction de la teneur en NR

La courbe de la compacité Marshall augmente jusqu'à 6%, puis elle se stabilise. La modification du bitume par le NR améliore les compacités de l'enrobé bitumineux.

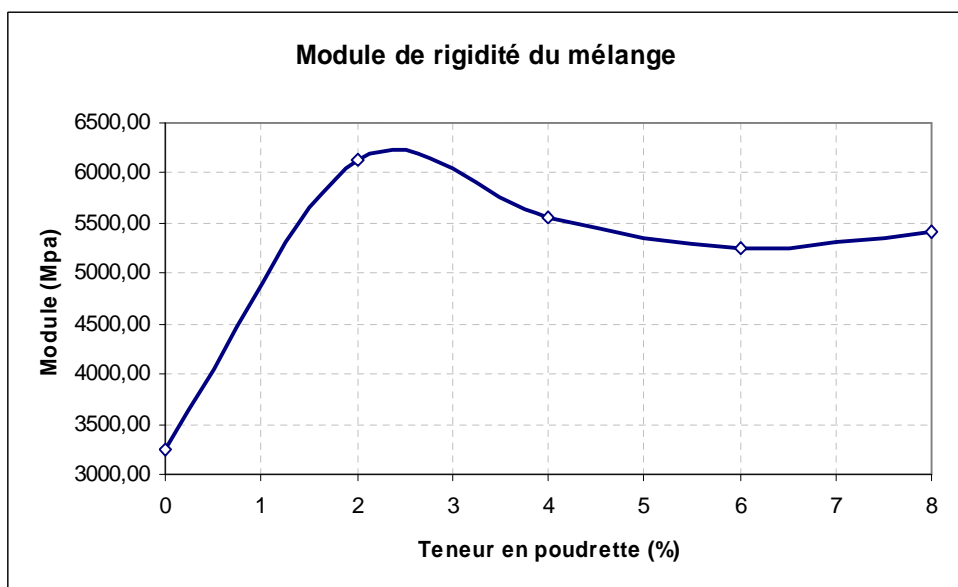


Figure 2.30. Module de rigidité du mélange en fonction de la teneur en NR

La courbe du module de rigidité du mélange présente la même allure que celle du module de rigidité du bitume en fonction de la teneur en NR. Le module maximum est à 2% de NR, puis il diminue pour se stabiliser à 6% et 8% de NR, mais généralement, ce n'est pas la plus grande rigidité qui est recherchée mais plutôt des enrobés souples afin d'éviter le problème de fissuration,

3.2.3. Conclusion

D'après les résultats des essais effectués, nous remarquons que les bétons bitumineux modifiés à 4% et 8% donnent de meilleures performance mécaniques par rapport aux autres bétons bitumineux,

Pour la suite du travail, on va étudier le fluage statique des enrobés bitumineux fabriqués avec du bitume modifié à 4% et 8%, pour :

- Etudier l'influence de la modification du bitume sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux,
- Déterminer la teneur optimale en poudrette de caoutchouc par rapport aux déformations permanentes,

3.3. Etude Fluage - Recouvrance

3.3.1. Généralité

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

Le fluage est 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», 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 [54].

Cette méthode d'essai détermine la résistance à la déformation permanente d'une éprouvette cylindrique d'un mélange bitumineux par une compression simple sous un chargement constant et sans confinement.

3.3.2. Appareil utilisé

Plusieurs types d'appareils ont été utilisés pour effectuer l'essai de fluage statique. Ces appareils doivent permettre d'appliquer une force constante durant l'essai, quelles que soient les caractéristiques de l'éprouvette.

Dans ce cadre, un appareillage d'essai de fluage statique a été élaboré et développé au laboratoire des routes et aérodromes de la Faculté de Génie Civil de l'USTHB.

L'appareil normalement utilisé pour mesurer la consolidation des sols est conçu par la société de fabrication des matériels d'essais Contrôls. Cet appareil, a été utilisé pour caractériser le fluage statique des enrobés bitumineux.

L'appareillage développé est représenté par la figure 2.31.



Figure 2.31. Appareillage mis au point pour l'essai de fluage - recouvrance

Cet appareil est constitué d'un bac à eau fabriqué en métal galvanisé a été fixé sur le plateau inférieur, le bac à eau est relié grâce à une tuyauterie spéciale à un bain – marie muni d'une pompe hydraulique haute pression. Le bain – marie, la pompe hydraulique et le bac à eau forment tous les trois un circuit fermé pour l'eau qui conserve une hauteur et une température constantes dans le bac pendant l'essai.

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

La contrainte appliquée sur l'éprouvette est déterminée à partir de la relation suivante :

$$s_0 = \frac{113,33 \times M}{S}$$

Avec :

σ_0 : contrainte de compression appliquée sur l'éprouvette.

M : masse utilisée.

S : surface chargée de l'éprouvette.

3.3.3. Conditions particulières de l'essai

Les conditions particulières de l'essai sont établies selon la norme anglaise BS 598. Ces conditions sont aussi confirmées par Ugé et Van de Loo, Zawadzki et Hushek et Pigois [54].

- Mélanges testés : béton bitumineux modifié au teneurs 0%, 4% et 8% de NR.
- Températures de l'essai : +25°C, +40°C, +60°C.
- Type d'éprouvettes utilisées : Eprouvettes Marshall.
- Contrainte de compression appliquée : $\sigma_0 = 0,14$ MPa, est située dans le domaine élastique linéaire [0,05 et 0,15 MPa] (Ugé et al, 1974) [54].
- Ecart maximum d'épaisseur toléré suivant plusieurs génératrices : 0,1mm.
- Temps de conservation des éprouvettes : vingt quatre heures après la fabrication, l'éprouvette est mise dans une enceinte thermostatique pendant quatre heures à la température de l'essai,
- Intervalles des lectures : l'enregistrement des déformations s'effectue à l'aide d'un ordinateur grâce à un système d'acquisition de données toutes les cinq secondes durant deux heures,
 - Temps de chargement : 1 h.
 - Temps de déchargement : 1 h.

3.3.4. Mode opératoire

L'application de la charge se fait par l'intermédiaire de deux plateaux maintenus parallèles 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, nous la plaçons entre les deux plaques métalliques dans le bain-marie porté préalablement à la même température, et nous faisons 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.

3.3.5. Définition des paramètres de l'essai

Les valeurs à déterminer sont :

1/ La contrainte appliquée, ainsi que les composantes de la déformation mesurées durant l'essai sont représentées par la figure 2.32 où :

- § ϵ_{totale} : déformation totale enregistrée après 1h de chargement.
- § $\epsilon_{\text{initiale}}$: déformation initiale enregistrée après 15s de chargement.
- § ϵ_{finale} : déformation finale complémentaire.
- § ϵ_{irr} : déformation irréversible ou permanente.
- § ϵ_{rev} : déformation réversible.
- § σ_0 étant la contrainte de compression appliquée sur l'éprouvette.

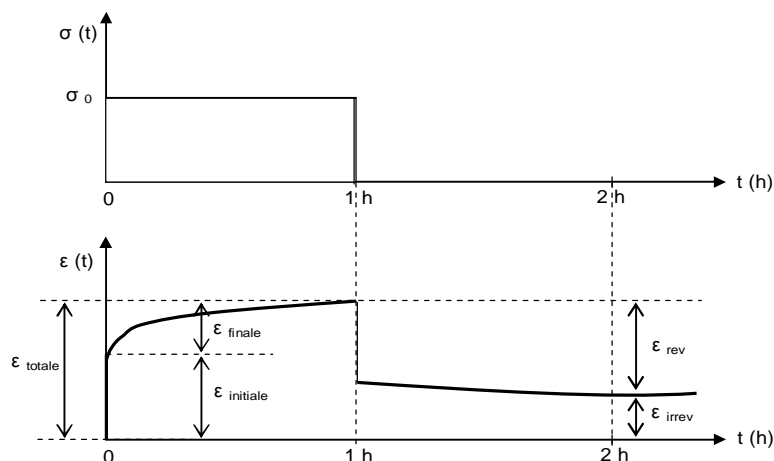


Figure 2.32. Contrainte appliquée et les déformations mesurées

2/ Les déformations durant l'essai sont calculées par l'expression suivante :

$$e(t, T) = \frac{\Delta h}{h_0} \times 1000 \quad [\text{‰}]$$

Avec :

- § $\epsilon(t, T)$: déformation axiale de l'éprouvette durant le temps de chargement (t) en secondes à la température (T) en °C.
- § h_0 : hauteur initiale de l'éprouvette.
- § Δh : déformation axiale (changement de distance entre les surfaces chargées).

3/ le module de rigidité en fluage statique est donné par :

$$S_M(t,T) = \frac{S_0}{e(t,T)} \quad [\text{MPa}]$$

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

4/ Le quotient de la déformation réversible après 1h de déchargement et la déformation totale après 1h de chargement, (valeur du recouvrement viscoélastiques) est donné par :

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

RVE est le recouvrement viscoélastique.

5/ le rapport de la déformation initiale à la déformation totale est donné par la relation suivante :

$$\text{Variation } .def = \frac{e_{init}(t)}{e_{Tot}(T)} \times 100 \quad [\%]$$

3.3.6. Résultats de l'essai de fluage - recouvrance

3.3.6.1. Influence de la température

Les figures suivantes montrent l'influence de la température sur le comportement des enrobés au fluage - recouvrance,

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

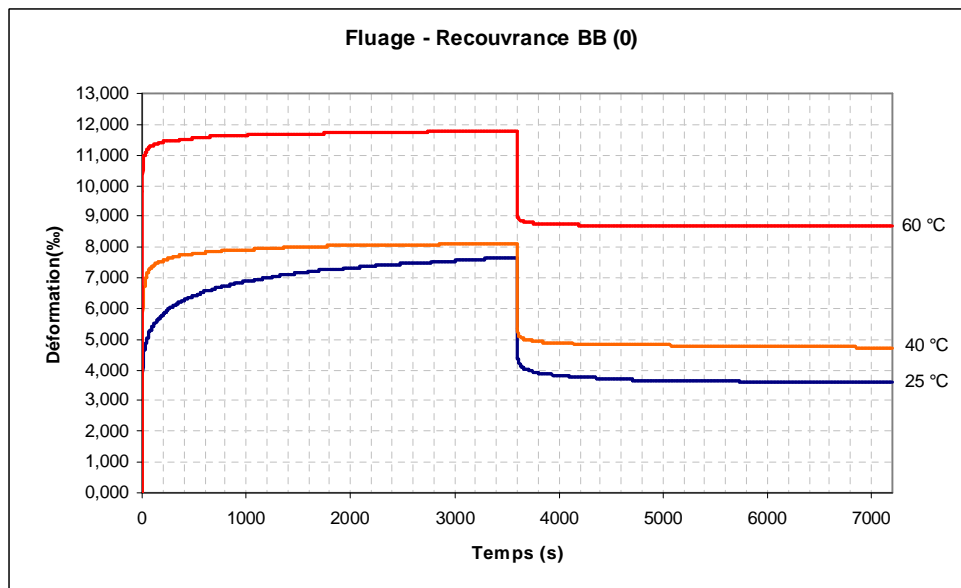


Figure 2.33. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume pur

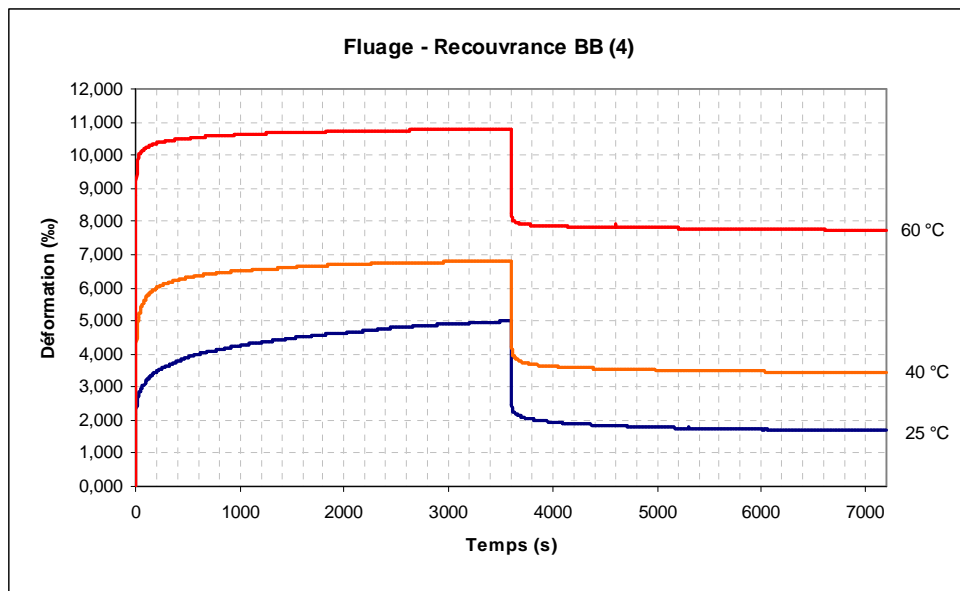


Figure 2.34. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume modifié à 4% de NR

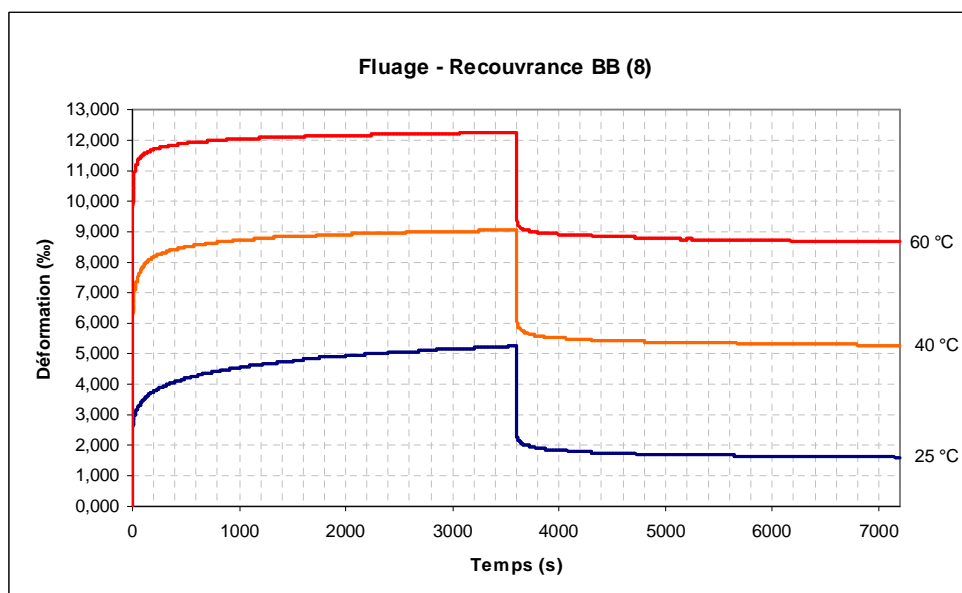


Figure 2.35. Influence de la température sur le fluage des enrobés à base du bitume modifié à 8% de NR

D'après les résultats représentés dans les figures précédentes on remarque que :

- Les courbes obtenues montrent que l'évolution de la déformation en fonction du temps et de la température présentent les même allures,
- Plus la température augmente, plus les déformations sont élevées,
- Plus la température augmente, plus les vitesses de déformation (de fluage et de recouvrance) augmentent,
- Plus on augmente la teneur en poudre de caoutchouc NR, plus l'écart entre les déformations à 25 °C et 40 °C augmente,

- Pour toutes les températures on remarque une déformation permanente (irréversible),

Donc, 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 poudre de caoutchouc NR,

3.3.6.2. Influence de la teneur en poudre de caoutchouc NR

Les figures suivantes montrent l'influence de la teneur en poudre de caoutchouc NR sur le comportement des enrobés au fluage - recouvrance,

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

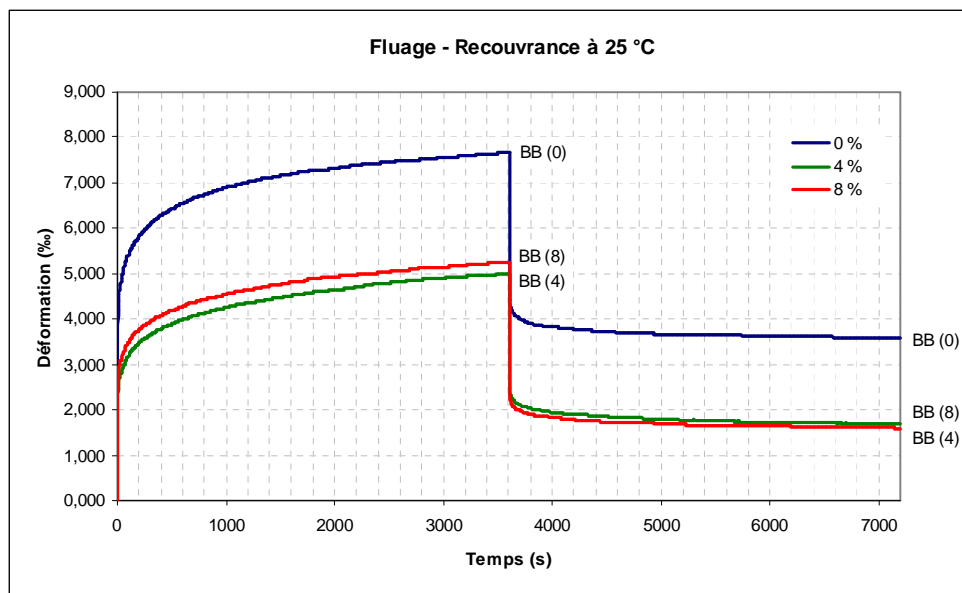


Figure 2.36. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 25 °C

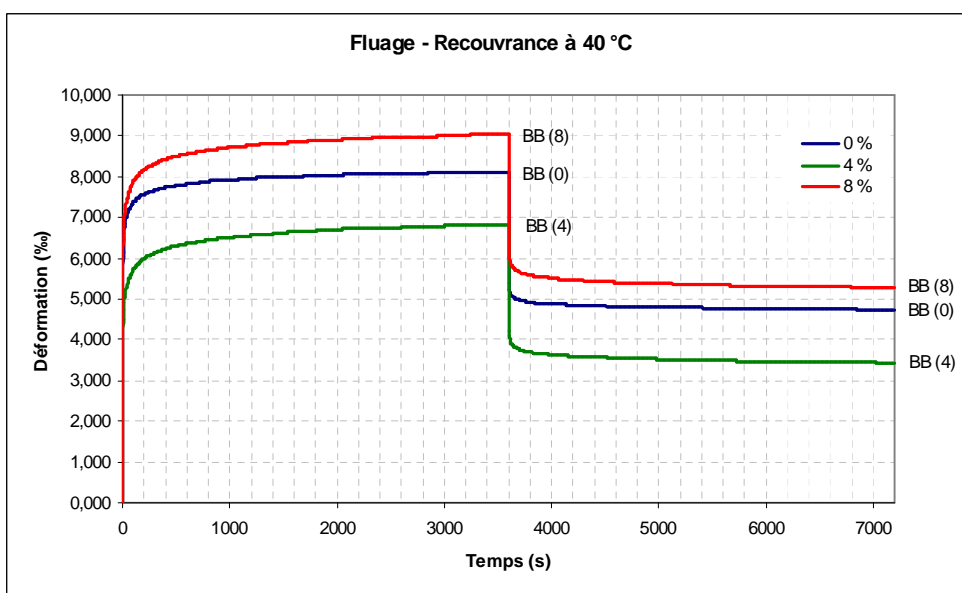


Figure 2.37. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 40 °C

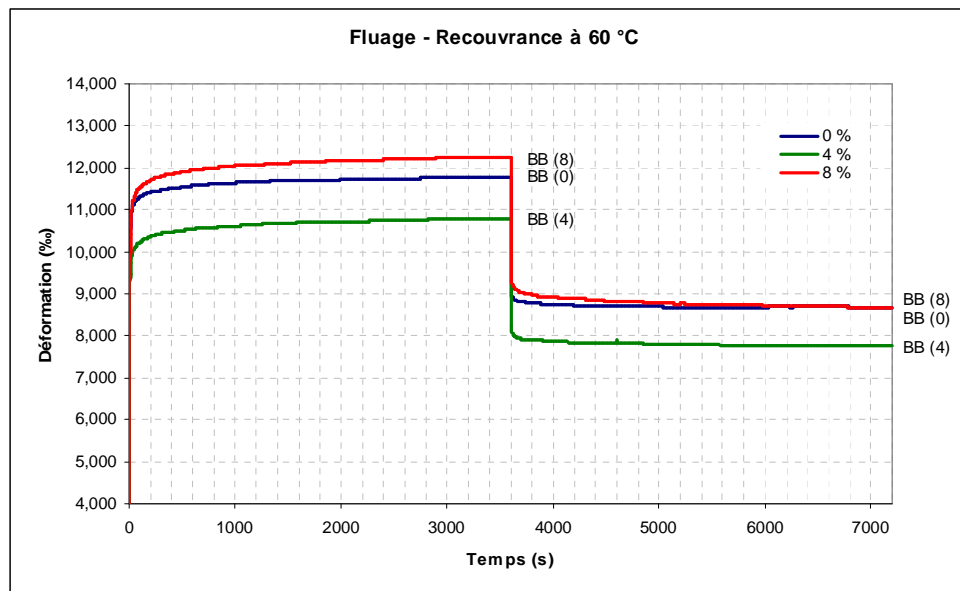


Figure 2.38. Influence de la de teneur en NR sur le fluage des enrobés à 60 °C

D'après les résultats représentés dans les figures précédentes on remarque que :

- Les courbes obtenues montrent que l'évolution de la déformation en fonction du temps et de la teneur en NR, présentent les même allures,
- Pour les essais à 25 °C on remarque :
 - § Les béton bitumineux à base de bitume pur [BB (0)] donnent les déformations les plus élevées,
 - § Les bétons bitumineux à base de bitume modifié à 8% de NR [BB (8)] et à 4% [BB (4)] donnent un comportement quasi similaire,
 - § La courbe de fluage de BB (8) est supérieure par rapport à la courbe de fluage de BB (4), par contre pour la partie recouvrance on remarque l'inverse c'est-à-dire que la courbe BB (4) est supérieure, ce phénomène est due à l'élasticité du caoutchouc,
 - § La vitesse de déformation (fluage et recouvrance) pour le béton BB (0) est plus importante que celles des bétons BB (4) est BB (8),
 - § Le béton BB (4) donne le meilleur comportement au fluage – recouvrance,
- Pour les essais à 40 °C on remarque :
 - § Les béton bitumineux à base de bitume modifié à 8% [BB (8)] donnent les déformations les plus élevées,
 - § Les béton bitumineux à base de bitume modifié à 4% [BB (4)] donnent les déformations les plus faibles,
 - § Le béton BB (4) donne le meilleur comportement au fluage – recouvrance,
 - § On remarque que l'écart entre les courbes de fluage du BB (0) et BB (8) est plus important par rapport à l'écart entre les courbes de recouvrance des deux béton, c'est l'effet du caoutchouc NR sur le comportement du béton bitumineux traduit par une augmentation de l'élasticité du béton BB (8).

- Pour les essais à 60 °C on remarque :
 - § Les béton bitumineux à base de bitume modifié à 8% [BB (8)] donnent les déformations les plus élevées,
 - § Les béton bitumineux à base de bitume modifié à 4% [BB (4)] donnent les déformations les plus faibles,
 - § On remarque un écart entre les courbes de fluage du BB (0) et BB (8), par contre pour la partie recouvrance les deux courbes sont quasi superposées, donc on confirme ce qui est dit dans les essais à 40 °C que le béton BB (8) présente un domaine élastique plus important que ce du BB (0), c'est l'effet de la poudrette de caoutchouc sur l'élasticité du mélange,

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

3.3.6.3. Influence de la teneur en poudrette et de la température sur les déformations

Les courbes de l'essai de fluage statique en compression simple, nous permettent d'évaluer le comportement rhéologique des mélanges.

Les résultats obtenus à partir des essais de fluage – recouvrance sur les bétons bitumineux sont donnés dans le tableau 2.24.

Tableau 2.24. Les déformations en fonction de la teneur en NR et de la température.

Température (°C)	Déformation (‰)	Bétons bitumineux		
		BB (0)	BB (4)	BB (8)
25	ϵ_{rev}	4,06	3,31	3,65
	ϵ_{irr}	3,59	1,68	1,59
	ϵ_{final}	3,27	2,44	2,42
	ϵ_{init}	4,38	2,56	2,83
	ϵ_{tot}	7,65	5,00	5,24
40	ϵ_{rev}	3,38	3,38	3,79
	ϵ_{irr}	4,74	3,44	5,27
	ϵ_{final}	1,68	2,08	2,31
	ϵ_{init}	6,44	4,74	6,75
	ϵ_{tot}	8,12	6,82	9,06
60	ϵ_{rev}	3,09	3,05	3,59
	ϵ_{irr}	8,69	7,74	8,67
	ϵ_{final}	0,95	1,07	1,52
	ϵ_{init}	10,83	9,72	10,74
	ϵ_{tot}	11,78	10,79	12,26

1) Déformation initiale

Les variations des déformations initiales enregistrées après quinze secondes de chargement en fonction de la teneur en NR et de la température, sont illustrées dans la figure 2.39.

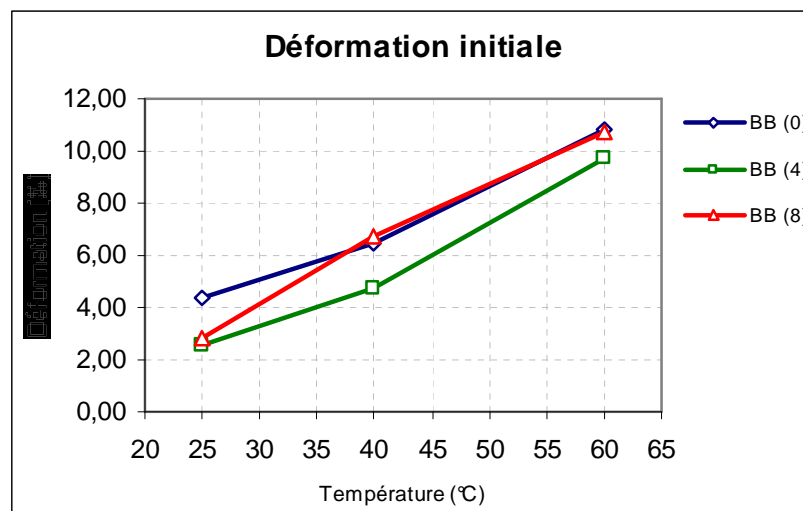


Figure 2.39. Variation de la déformation initiale avec la température

D'après la figure précédente on constate :

- Plus la température augmente, plus les déformations sont élevées,
- Le béton à base de bitume modifié à 4% de NR [BB (4)] présente les déformations les plus faibles,
- Le béton BB(8) à 25 °C présente une déformation initiale proche de celle du BB (4), mais pour 40 et 60 °C cette déformation a connu une augmentation importante où la courbe est proche de celle du béton BB (0),

Donc le béton bitumineux à base de bitume modifié à 4% de NR [BB (4)] est le plus résistant au chargement à courte durée,

2) Déformation totale

Les variations des déformations totales enregistrées après une heure de chargement en fonction de la teneur en NR et de la température, sont représentées dans la figure 2.40.

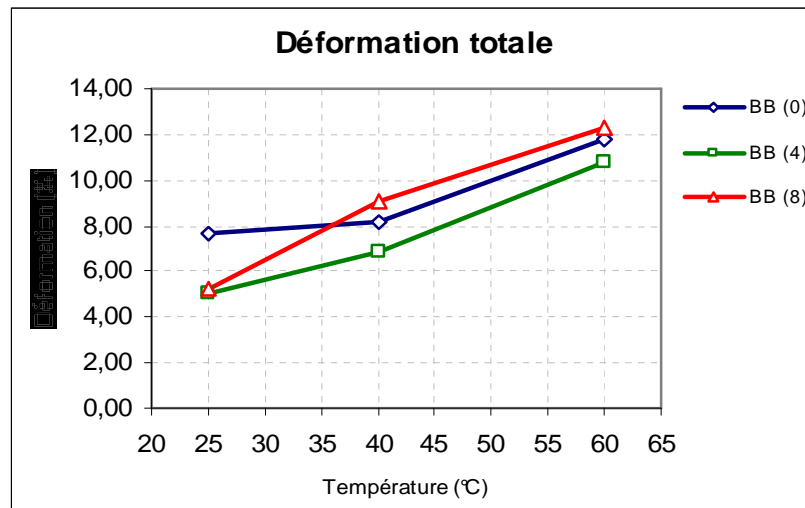


Figure 2.40. Variation de la déformation totale avec la température

On constate que :

- Les déformations totales augmentent avec la température pour tous les enrobés testés,
- Le béton bitumineux à base de bitume modifié à 4% donne les déformations totales les plus faibles,
- Le béton BB(8) à 25 °C présente une déformation totale proche de celle du BB (4), mais pour 40 et 60 °C cette déformation a connu une augmentation importante où la courbe est supérieure de celle du béton BB (0).

Donc le béton bitumineux à base de bitume modifié à 4% de NR [BB (4)] est le plus résistant au chargement à longue durée.

3) Déformation finale

Les variations des déformations finales en fonction de la teneur en NR et de la température, sont représentées dans la figure 2.41.

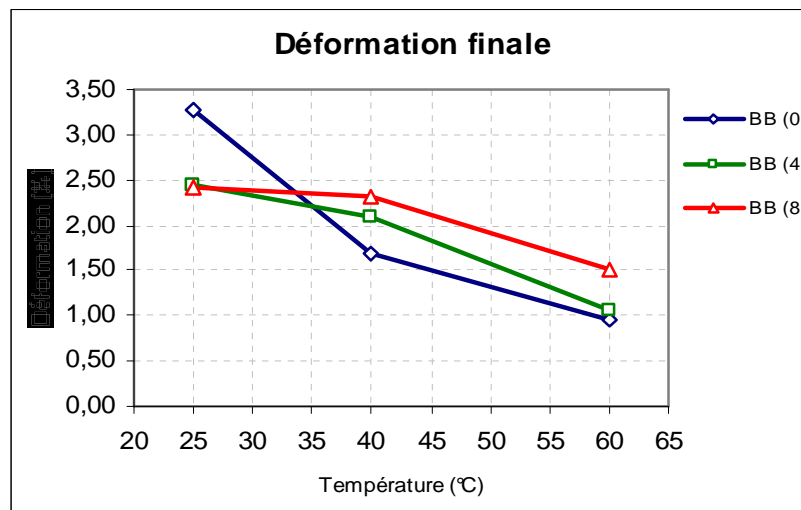


Figure 2.41. Variation de la déformation finale avec la température

Nous constatons à partir de la figure 2.41 que :

- Pour les températures d'essais croissantes, la déformation finale des enrobés bitumineux testés diminue,
- A 25 °C les bétons BB (4) et BB (8) présentent des déformations finales inférieures à celle du BB (0),
- Par contre pour 40 °C et 60 °C, le béton bitumineux à base du bitume pur présente des déformations finales inférieures à celles des autres mélanges bitumineux,

Donc à température élevée, le caoutchouc NR joue le rôle d'un retardateur de déformation des bétons bitumineux modifiés.

4) Déformation réversible

Les variations des déformations réversibles en fonction de la teneur en NR et de la température, sont représentées dans la figure 2.42.

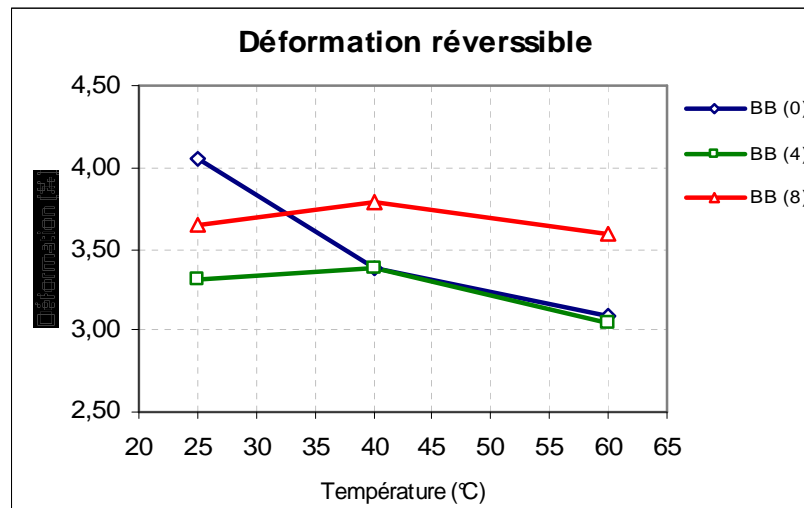


Figure 2.42. Variation de la déformation réversible avec la température

On remarque que

- A 25°C, le béton bitumineux BB (0) présente la déformation élastique la plus élevée,
- Les courbes de BB (4) et BB (8) présentent les mêmes allures, où on remarque une augmentation des déformations à 40°C, puis elles diminuent pour 60°C,
- A température élevée, la teneur en NR augmente les déformations élastiques,

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

5) Déformation permanente

Les variations des déformations permanentes en fonction de la teneur en NR et de la température, sont représentées dans la figure 2.43;

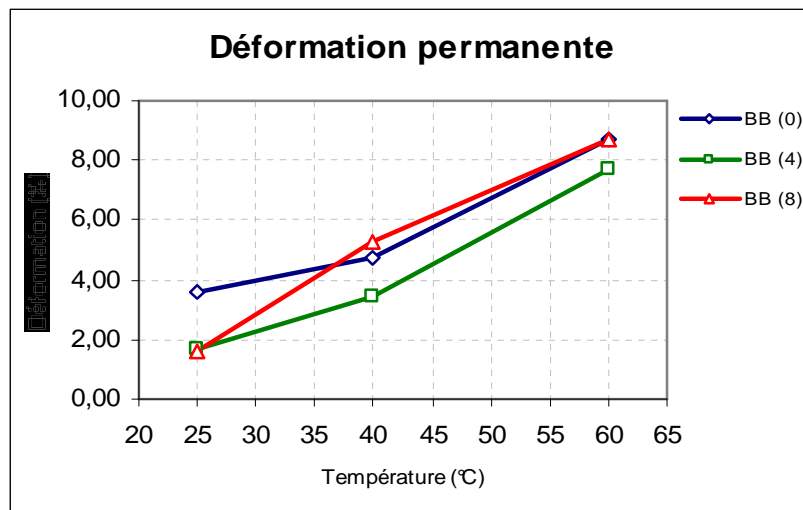


Figure 2.43. Variation de la déformation permanente avec la température

Pour les déformations permanentes nous constatons

- Après déchargement, les déformation permanentes pour tous les enrobés bitumineux testés, augmentent avec la température,
- Le béton bitumineux BB (4) présente les déformations permanentes les plus faibles,
- A 25 °C, les déformations irréversibles diminuent en passant d'un mélange à base de bitume pur à celui d'un enrobé à base de bitume modifié,
- A 40 °C et 60 °C, le béton BB (8) présente les mêmes déformation à celles du béton ordinaire BB (0),

Donc le béton bitumineux à base de bitume modifié à 4% de NR [BB (4)] est le plus résistant à l'orniérage,

6) Taux de déformation de fluage

Le taux de déformation de fluage est le rapport de la déformation initiale à la déformation totale. Cet taux de déformation est un indicateur d'évaluation de :

- La résistance de l'enrobé à l'orniérage.
- La capacité d'un enrobé à retarder la déformation de fluage.

Les résultats du calcul du rapport de la déformation initiale à la déformation totale sont donnés dans le tableau 2.25.

Tableau 2.25. Rapport de la déformation initiale à la déformation totale.

Températures (°C)	Bétons bitumineux		
	BB (0)	BB (4)	BB (8)
25	57,26	51,21	53,92
40	79,29	69,47	74,48
60	91,94	90,09	87,59

Les résultats du tableau 2.25 sont représentés dans la figure suivante ;

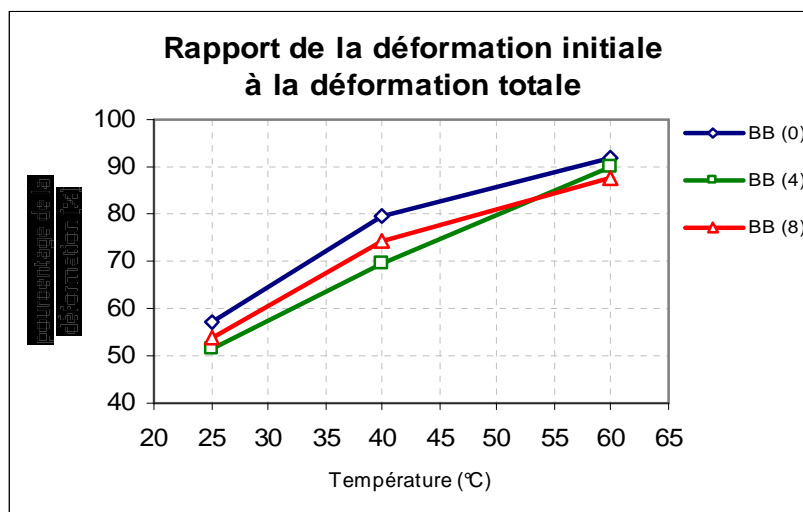


Figure 2.44. Variation du taux de déformation de fluage

On constate :

- Pour tous les enrobés bitumineux testés, le rapport de la déformation initiale à la déformation finale augmente avec la température,
- A 25 °C, pour tous les enrobés, les 50 % de la déformation ont lieu principalement dans la phase initiale c'est-à-dire dans les quinze premières secondes,
- A 40 °C, la déformation initiale dépasse les 70 % de la déformation totale, et ce pour tous les mélanges,
- A 60 °C, la déformation initiale dépasse les 85 % de la déformation totale, et ce pour tous les mélanges,

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 poudrette de caoutchouc de NR améliore la résistance aux déformations de fluage.

On constate aussi que le caoutchouc naturel NR est un retardateur de déformation de fluage, donc les enrobés à base de bitume modifié avec du NR sont des enrobés plus frottant par rapport aux enrobés à base de bitume pur.

7) Variation du recouvrement viscoélastique (RVE)

On rappelle que le recouvrement viscoélastique est défini par le quotient de la déformation réversible après une heure de déchargement et la déformation totale après une heure de chargement,

Nous présentons les résultats obtenus pour le recouvrement viscoélastique (RVE) dans le tableau 2.26.

Tableau 2.26. Variation De la RVE des enrobés bitumineux.

Température (°C)	Bétons bitumineux		
	BB (0)	BB (4)	BB (8)
25	53,05	66,33	69,58
40	41,62	49,55	41,84
60	26,23	28,25	29,27

Les résultats du tableau [2.26] sont illustrés dans la figure [2.45] ;

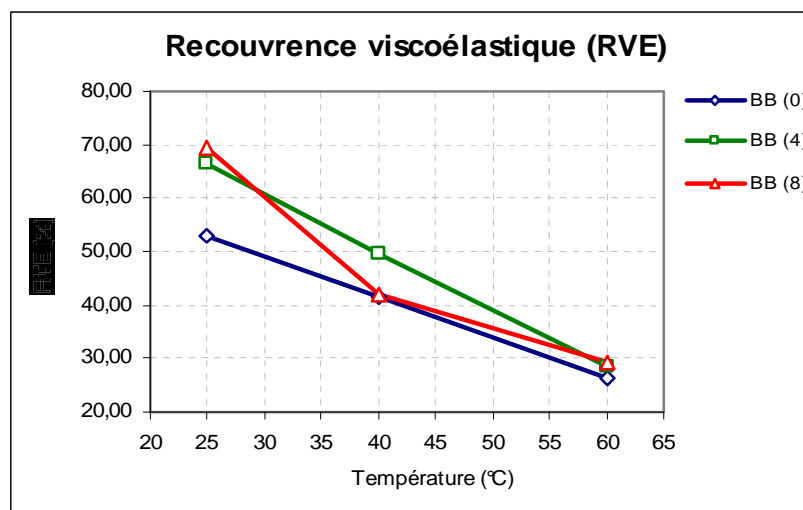


Figure 2.45. Variation du RVE des enrobés bitumineux

De la figure 2.45 on constate :

- Pour tous les mélanges bitumineux testés, le recouvrement viscoélastique diminue lorsque la température augmente, ce qui implique l'augmentation de la déformation permanente avec la température,
- Les valeurs du recouvrement viscoélastique de l'enrobé à base de bitume pur sont les plus faibles,
- L'écart du recouvrement viscoélastique entre les enrobés à base de bitume modifié et les enrobés à base de bitume pur diminue avec la température,
- L'enrobé à base de bitume modifié à 4% présente le meilleur recouvrement viscoélastique en fonction de la température.

Donc la modification des bitumes apporte une amélioration des enrobés résultants vis-à-vis leurs comportement viscoélastique, et elle diminue les déformations permanentes,

3.3.6.4. Influence de la teneur en poudrette et de la température sur les modules de rigidités des enrobés bitumineux

Les résultats des modules de rigidité obtenus à partir des essais de fluage – recouvrance sur les bétons bitumineux sont donnés dans le tableau 2.27.

Tableau 2.27. Variation des modules de rigidité des enrobés bitumineux en fonction de la teneur en NR et de la température.

Température (°C)	Module de rigidité initiale (MPa)			Module de rigidité totale (MPa)		
	BB (0)	BB (4)	BB (8)	BB (0)	BB (4)	BB (8)
25	31,96	54,71	49,53	18,30	28,02	26,71
40	21,74	29,53	20,76	17,24	20,52	15,46
60	12,93	14,40	13,04	11,89	12,97	11,42

1) le module de rigidité initial

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 2.46.

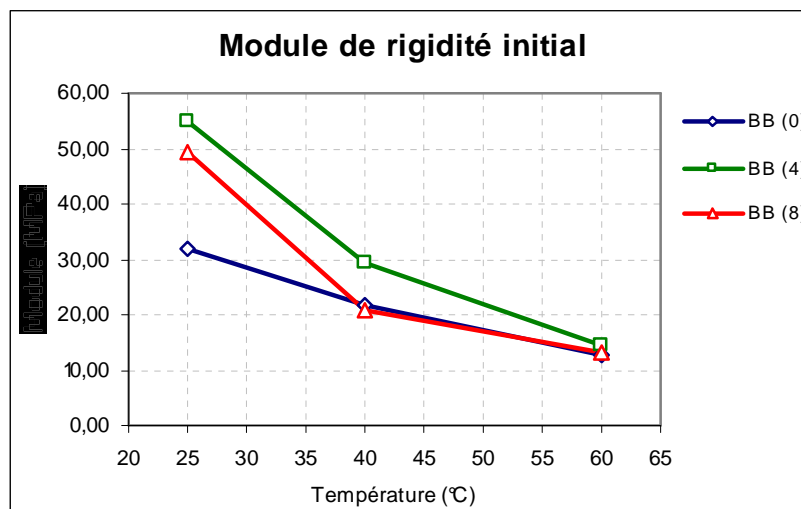


Figure 2.46. Variation du module de rigidité initiale en fonction de la température et la teneur en NR

La variation du module de rigidité initial montre que ;

- le module de rigidité initiale diminue avec l'augmentation de la température,
- les variations du module de rigidité initial sont inversement proportionnelles à celles des déformations initiales,
- le module de rigidité de l'enrobé bitumineux à base de bitume modifié à 4% est le plus élevé.

- l'écart entre les modules de rigidité des mélanges diminue avec l'augmentation de la température,
- On remarque que la modification du bitume à 8% de NR donne des enrobés bitumineux qui ont à 40 et 60 °C des modules de rigidité proche à ceux de l'enrobé bitumineux à base de bitume pur,

Globalement, la modification des bitume apporte une amélioration des mélanges bitumineux vis-à-vis le module de rigidité. Et le béton bitumineux BB(4) présente le module de rigidité initial le plus élevé.

2) le module de rigidité total

Les modules de rigidité correspondant aux déformations totales mesurées après une heure de chargement sous l'effet de la température et la teneur en NR, sont représentés sur la figure 2.47 ;

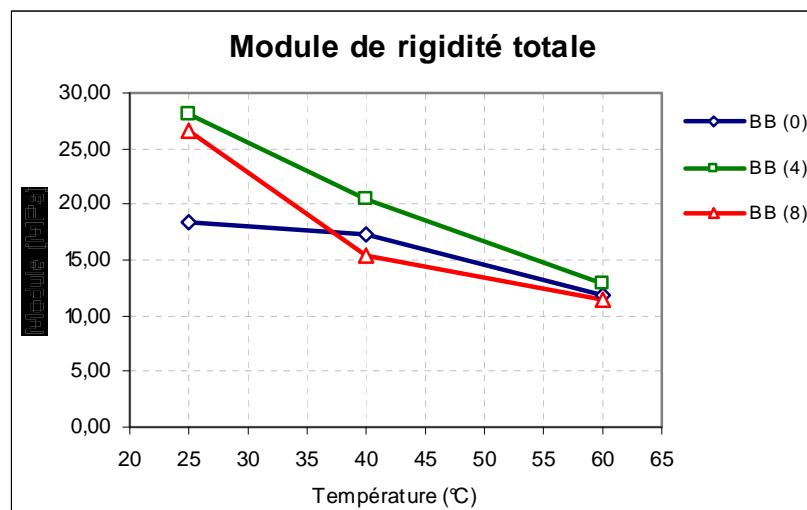


Figure 2.47. Variation du module de rigidité totale en fonction de la température et la teneur en NR

Les variations des modules de rigidité initial montre que ;

- le module de rigidité totale diminue avec l'augmentation de la température,
- les variations du module de rigidité initiale sont inversement proportionnelles à celles des déformations totales,
- le module de rigidité de l'enrobé bitumineux à base de bitume modifié à 4% est le plus élevé,
- l'écart entre les modules de rigidité des mélanges diminue avec l'augmentation de la température,
- on remarque que la modification du bitume à 8% de NR donne des enrobés bitumineux qui ont des modules de rigidité les plus faibles à 40 et 60 °C,

Globalement, la modification des bitume apporte une amélioration des mélanges bitumineux vis-à-vis le module de rigidité. Et le béton bitumineux BB (4) présente le module de rigidité total le plus élevé.

3.3.7. Conclusion

Les résultats obtenus suite aux essais de fluage statique en compression simple, nous permettent d'évaluer les caractéristiques rhéologique des enrobés bitumineux testés à savoir :

- les déformations initiales et le module de rigidité initial,
- les déformations totales et le module de rigidité total,
- les déformations permanentes,
- le recouvrement viscoélastique (RVE),
- la variation de la déformation initiale et finale par rapport à la déformation totale,

Et d'après ces essais nous constatons que :

- Tous les enrobés testés présentent les mêmes courbes.
- Tous les enrobés testés présentent une déformation permanente irréversible après l'essai de recouvrance.
- Globalement, La modification a permis d'une part de réduire les déformations notamment les déformations permanentes et d'autre part d'augmenter la recouvrance viscoélastique.
- A 15 secondes, la modification a permis d'atténuer les déformations de fluage aux différentes températures.
- La modification des bitumes a apporté aussi une augmentation des modules de rigidité des mélanges.
- Les meilleurs résultats ont été obtenus pour les mélanges à 4% de NR.
- Les essais de fluage ont permis de mettre en évidence le caractère viscoplastique de tous les mélanges étudiés aux conditions énumérées plus haut.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Dans cette partie nous nous sommes intéressés à la modification d'un bitume 50/70 avec une poudrette de caoutchouc (déchet industriel) à base d'un caoutchouc naturel (NR). Cette poudrette n'est pas biodégradable.

Les conditions de la modification sont :

- Durée de malaxage : deux heures,
- Température de malaxage : de 170 à 175°C,
- Vitesse de malaxage : 600 tr/min.

En finalité, il ressort que l'utilisation du caoutchouc naturel (NR) comme modifiant améliore les performances du bitume et des l'enrobés bitumineux résultants. Nous avons abouti aux observations suivantes :

- La modification du bitume par le caoutchouc naturel (NR) a changé les caractéristiques physico-chimiques du bitume. Ce changement est induit par :
 - § L'augmentation du pourcentage d'asphaltènes,
 - § La diminution de la pénétrabilité,
 - § La diminution de la ductilité,
 - § La diminution de la susceptibilité,

Pour le mélange bitumineux on constate :

- Une amélioration des caractéristiques Marshall, où on remarque une augmentation du quotient Marshall qui peut être un bon indicateur pour la résistance aux déformations permanentes.
- La modification du bitume avec du NR a freiné la vitesse de déformation initiale mesurée à 15 s.
- Le fluage et la recourence étudiés, montrent également qu'à 4% de NR le béton bitumineux présente le meilleur comportement.
- Tous les enrobés bitumineux présentent des déformations permanentes
- La modification du bitume avec du NR diminue les déformations permanentes de l'enrobé bitumineux, donc une meilleure résistance au fluage.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les dégradations des chaussées sont dues à l'action conjuguée du trafic de véhicules et du climat et se manifestent selon trois modes principaux d'altération : l'orniérage, la fatigue, et la fissuration.

L'optimisation des structures de chaussée est obtenue à deux niveaux :

- Optimisation de la qualité de chaque matériau vis-à-vis des critères d'orniérage, de fissuration, de résistance à la fatigue, mais aussi vis-à-vis de sa mise en oeuvre et de son coût.
- Optimisation de l'ensemble de la structure avec le dimensionnement des épaisseurs de couche en fonction des caractéristiques mécaniques des matériaux employés.

Plusieurs études ont montré que le comportement du béton bitumineux dépend essentiellement du comportement du bitume, pour cette raison notre travail consiste à la modification du bitume par un déchet industriel 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 l'influence de la modification des bitumes avec la poudrette de caoutchouc (déchet industriel) à base de caoutchouc naturel (NR) d'une part sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des mélanges bitume – caoutchouc et d'autre part l'influence de ces derniers sur le comportement rhéologique au fluage statique des enrobés bitumineux résultants.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire a été scindé en deux grandes parties à savoir :

- Une étude bibliographique sur le bitumes classique, le bitume modifiés et les enrobés bitumineux, ainsi que l'état de l'art dans ce domaine de recherche.
- Une étude expérimentale, a été réalisée au niveau du Laboratoire de Route et Aéroports de la faculté de Génie Civil de l'USTHB (Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene), cette partie comportait trois parties à savoir :
 - § Une étude du bitume modifié.
 - § Une étude Marshall de l'enrobe modifié.
 - § Une étude de Fluage statique en compression simple des enrobés modifiés.

A la lumière des résultats présentés dans ce mémoire, les conclusions suivantes sont tirées :

1) Etude de bitume

- § La durée de malaxage optimale pour avoir un mélange de bitume - caoutchouc performant est de deux heures, si on augmente la durée on remarque une fragilité du mélange.
- § La modification du bitume avec du caoutchouc naturel NR améliore les propriétés du bitume notamment la susceptibilité thermique, le point de ramollissement et la pénétrabilité.
- § La modification du bitume augmente son module de rigidité.

2) Etude Marshall

- § La compacité augmente avec l'augmentation de la teneur en poudrette de caoutchouc NR.
- § les enrobés bitumineux BB (8) et BB (4) donnent les meilleures stabilité, fluage et résistance aux déformations permanentes par rapport aux autres mélanges.
- § La modification du bitume augmente le module de rigidité de l'enrobé bitumineux résultants par rapport à l'enrobé ordinaire.

3) Etude de fluage statique

- § Une augmentation de la température se traduit par l'augmentation des déformations permanentes.
- § Une augmentation de la température se traduit par une diminution des déformations élastiques.
- § La modification du bitume a permis d'atténuer les déformations de fluage aux différentes températures notamment les déformations initiales à 15 secondes.
- § Comme il y a toujours un seuil à tous les phénomènes, l'excès du modifiant mène à un comportement fragile, ce qui est le cas par 8 % de NR.
- § Le béton bitumineux modifié à 4% de NR donne de meilleures performances rhéologiques vis-à-vis le fluage (déformations permanentes, recouvrance viscoélastique, modules de rigidité) et cela pour toutes les températures.

Donc le béton bitumineux modifié à 4% de NR donne l'épaisseur la plus économique des couches de chaussées routières, ce qui mène à une réduction de quantité et de coût.

Les perspectives envisageables de notre travail de mémoire s'élaborent selon les points suivants :

- § Réaliser des essais chimiques sur les bitumes modifiés, tels que la chromatographie, pour mieux expliquer les phénomènes de réaction entre le polymère et le bitume.
- § Réaliser des essais de centrifugation sur le bitume modifié afin de déterminer le taux de gonflement de la poudrette de caoutchouc.
- § Etudier la variation de la viscosité en fonction de la teneur en poudrette de caoutchouc.
- § Réaliser des essais de module complexe en fonction de la température sur les mélanges bitumineux modifiés.
- § Associer au caoutchouc naturel NR des huiles aromatiques pour voir les performances de ce matériau.
- § Réaliser des planches d'essais avec des enrobés modifiés sur des routes (du nord, hauts plateaux et du sud) pour voir le comportement réel du mélange et l'évolution des caractéristiques mécanique et rhéologiques des mélanges sous l'effet du trafic et du climat.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] O. SOLOMATNIKOVA (AVRIL 1998), « COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE ET PROPRIETES COHESIVES ET ADHESIVES DES LIANTS BITUMINEUX », Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès sciences, UNIVERSITÉ LAVAL, FACULTÉ DES SCIENCES ET GÉNIE, CANADA.
- [2] M. OULD-HENIA (2005), « MODELISATION ET PREDICTION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES MELANGES BITUME CAOUTCHOUC », Thèse de Doctorat, ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE (génie civil).
- [3] D. LESUEUR (septembre 2002), « LA RHEOLOGIE DES BITUMES : PRINCIPES ET MODIFICATION », Eurovia Management – polo de Emulsiones, Rhéologie, Vol.2, 1-30.
- [4] F. OLARD (2003), « COMPORTEMENT THERMOMÉCANIQUE DES ENROBÉS BITUMINEUX À BASSES TEMPÉRATURES Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé », Thèse de Doctorat, ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE LYON (génie civil).
- [5] K. AIT MOKHTAR, (1994) « INFLUENCE DE L'AFFINITE LIANT HYDROCARBONE GRANULAT SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MELANGES HYDROCARBONES » Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene institut de génie civil.
- [6] Shell Bitumes (1991), « BITUMES TECHNIQUES ET UTILISATIONS ».
- [7] H. BAAJ (2002), « COMPORTEMENT A LA FATIGUE DES MATERIAUX GRANULAIRES TRAITES AUX LIANTS HYDROCARBONES ». Thèse de Doctorat, ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE LYON (génie civil).
- [8] BULLETIN D'INFORMATION TECHNIQUE, (septembre 2000), « ENROBES MODIFIES AU CAOUTCHOUC », vol. 5, n°9.
- [9] B. BRULE et BRION, (1986). « ASSOCIATION BITUME - POLYMERES, RELATION ENTRE LA COMPOSITION, LA STRUCTURE ET LES PROPRIETES ». Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 145, pp. 45-52.
- [10] G. RAMOND, and C. SUCH (1990). « BITUMES ET BITUMES MODIFIES - RELATIONS STRUCTURES, PROPRIETES, COMPOSITION. » Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées 168: pp 65-87.
- [11] J. BONNOT et F. PERW (1986). « MATERIAUX BITUMINEUX SPECIAUX ». Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 144, pp.65-71.
- [12] B. BRULE , (1993). « LES BITUME – POLYMERES : NOTIONS DE BASE ». Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aérodomes, 711, pp. 18.
- [13] F. MIGLIORI, F. DURRIEU, G. RAMOND. (1993). « ESSAIS DE LABORATOIRE APPLICABLES AUX BITUMES MODIFIES PAR DES POLYMERES », Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aérodomes, 711, pp. 23.
- [13] Y. CHARGROS, (1993). « IMPORTANCE DES BITUMES MODIFIES DANS LES COUCHES DE SURFACE DES CHAUSSEES », Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aérodomes, 711, pp. 31.
- [14] J.-C. VANISCOTE, (1993). « LES ENDUITS SUPERFICIELS A LIANTS MODIFIES », Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aérodomes, 711, pp. 32.
- [15] P.-C. GROZ, (1993). « BITUMES MODIFIES ET ENROBES MINCES », Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aérodomes, 711, pp. 34.
- [16] B. EAURE, (1993). « LES ENROBES DRAINANTS », Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aérodomes, 711, pp. 36.

- [17] **A. MARSOT, (1993).** « **ENROBES A HAUT MODULE ET LIANTS MODIFIES** », Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, 711, pp. 39.
- [18] **F. CHAIGNON, (1993),** « **CHAPES D'ETANCHEITE, MEMBRANES ANTIFISSURES** », Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, 711, pp. 42.
- [19] **C. ROUSSEL and J.-C. DELEURENCE (1985).** « **ENROBES DRAINANTS AU BITUME CAOUTCHOUC, RUE SOLFERINO A LILLE.** » Revue Générale des Routes et des Aérodrômes 618: pp 71-76.
- [20] **F. HADRZYNSKI and C. SUCH (1998).** « **MODELISATION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES BITUMES POLYMERES - LE MODELE AUTO-COHERENT.** » Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées 214 (mars - avril) : pp 3-18.
- [21] **J.-P. SERFASS, (1983).** « **FABRICATION, UTILISATION ET COMPORTEMENT DES BITUMES - CAOUTCHOUC FLEXOCHAPE.** » Revue Générale des Routes et des Aérodrômes 602 : pp 51-56.
- [22] **B. ECKMANN, M. PLAINDOUX. (1983).** « **LIANTS BITUME - CAOUTCHOUC FLEXOCHAPE, ETUDES DE LABORATOIRE** », Revue Générale des Routes et des Aérodrômes 602 : pp 45-50.
- [23] **H. SPIELMANN, C. ROBILLARD, A. SAINTON. (1996).** « **UN ENROBE DENSE ANTIBRUIT AU LIANT BITUME - CAOUTCHOUC DANS LA VILLE DE NICE** », Revue Générale des Routes et des Aérodrômes hors série 2-1996 : pp 71-72.
- [24] « **RECOMMANDATIONS SUR L'UTILISATION DES BITUMES ET DES ENROBES BITUMINEUX A CHAUD** » (2004), Ministère des Travaux Publics, Algérie.
- [25] **M. MOUTON, (1987),** « **LES POLYMERES** », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, direction de la formation continue et de l'action internationale, n° 3541.
- [26] **SERVICE TECHNIQUE DES BASES AÉRIENNES, (1999),** « **TECHNIQUES ANTI-REMONTÉES DES FISSURES Guide d'emploi en chaussées aéronautiques** ».
- [27] **WERKE GMBH & CO. KG, DIVISION TECHNOLOGIE DES PROCÉDES, JANKE & KUNKEI,** « **FABRICATION CONTINUE DE BITUME MODIFIÉ PAR POLYMERÉ (BMP) POUR LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE** »
- [28] **G. AIREY, (October 2006),** « **Performance of Polymer Modified Bitumens : Emphasis on the UK Market**», University of Nottingham, United Kingdom, Norwegian Asphalt Association Annual Conference, 10th October 2006, Oslo, Norway
- [29] **S. EMERY and O'CONNELL,** «**DEVELOPMENT OF A HIGH PERFORMANCE SBS MODIFIED BINDER FOR PRODUCTION**».
- [30] **DANISH ROAD INSTITUTE, Report 92 (1999),** « **THE STRUCTURE OF POLYMER MODIFIED BINDERS AND CORRESPONDING ASPHALT MIXTURES**».
- [31] **P.E. JOHN DUVAL (2006),** « **BENEFITS OF MODIFIED ASPHALTS**», Oregon Asphalt Conference March 8, 2006.
- [32] « **RECYCLAGE DES PNEUS HORS D'USAGE AU CANADA La transformation des pneus hors d'usage en produits à valeur ajoutée** ».
- [33] **OFEFP OFFICE FEDERAL DE L'ENVIRONNEMENT DES FORETS ET DU PAYSAGE,** (décembre 2003), «**AIDE A L'EXECUTION RELATIVE A L'ENTREPOSAGE, AU TRAITEMENT ET A LA VALORISATION DES PNEUS USAGES**».
- [34] **S. MAILLARD (2005),** « **FISSURATION ET AUTOREPARATION DES LIANTS BITUMINEUX – APPORT DE L'ESSAI DE RUPTURE LOCALE REPETEE SUR BITUME** » Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.
- [35] Journée scientifique sur la valorisation des pneus usagés et les déchets plastiques dans le domaine des travaux publics (2005). Sous le haut patronage du Ministère des Travaux Publics (MTP).

- [36] K. BENSEBAA (2003), « ETUDE RHEOLOGIQUE DES LIANTS MODIFIES, IMPACT DU VIEILLISSEMENT INTEGRANT LA DEMARCHE, HAUTE QUALITE ENVIRONNEMENTALE » Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, faculté de génie civil.
- [37] NOTE D'INFORMATION Juin 1997 « ENROBES DRAINANTS ».
- [38] BULLETIN D'INFORMATION TECHNIQUE 1999 « LES REVETEMENTS BITUMINEUX ULTRAMINCES ».
- [39] BULLETIN D'INFORMATION TECHNIQUE 2000 « ENROBES MODIFIES AU CAOUTCHOUC ».
- [40] GROUPE DE TRAVAIL RST, SOUS LA DIRECTION DE J.L.DELORME, (2005) « FORMULATION DES ENROBES A CHAUD » Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud, Laboratoire Central des Pont et Chaussées.
- [41] CERIU INFRASTRUCTURES, (2002) « LES REVETEMENTS TRES MINCES ET ULTRAMINCES DEMYSTIFIES » Bulletin d'information du Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines, Vol. 9 No 6.
- [42] L. MOMM and R. SALINI, (2000) « STUDY OF RECYCLED TYRE RUBBER IN ASPHALT CONCRETE MIXTURES », ARTIGO PUBLICADO NO, asphalt rubber 2000, Vilamoura – Portugal, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [43] BITUMEN.INFO, Juin 2005 numéro spécial – 1, « GENESE, CONSTITUTION ET CARACTERISTIQUES DU BITUME ».
- [44] Expo – Doc, (Mai 2000) « LE SON DANS TOUS SES ETATS », CCSTI de Laval LE SON.
- [45] Anne DONNY, (1991) « LIANTS BITUMES – POLYMERES DE LA FABRICATION A LA MISE EN ŒUVRE EN ENROBES », études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, série chaussées CR15.
- [46] NORMES EUROPEENNES « METHODES D'ESSAI POUR MELANGE HYDROCARBONE A CHAUD ».
- [47] B-J DONGMO, (2005) « CARACTERISATION DES DEFORMATIONS D'ORNIERAGE DES CHAUSSEES BITUMINEUSES », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.
- [48] S. MAILLARD, 2005 « FISSURATION ET AUTOREPARATION DES LIANTS BITUMINEUX – APPORT DE L'ESSAI DE RUPTURE LOCALE REPETEE SUR BITUME » Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes.
- [49] T. LORINO, « AUTOPSIE D'UNE CHAUSSÉE » Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Centre de Nantes,
- [50] Quang Dat TRAN, (2004), « MODELE SIMPLIFIE POUR LES CHAUSSEES FISSUREES MULTICOUCHES » Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [51] D-T NGUYEN, (2006) « PREDICTION DES DEFORMATIONS PERMANENTES DES COUCHES DE SURFACE DES CHAUSSEES BITUMINEUSES » Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [52] ASSOCIATION MONDIALE DE LA ROUTE AIPCR, 1999 « LES LIANTS MODIFIÉS, LES LIANTS AVEC ADDITIFS ET LES BITUMES SPÉCIAUX » N° 303.
- [53] S. HADDADI, (2007) « INFLUENCE DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC SUR LE COMPORTEMENT AU FLUAGE DES ENROBÉS BITUMINEUX » Thèse de Doctorat, Université des sciences et de la Technologie Houari Boumediène, Faculté de Génie Civil.
- [54] K. AIT MOKHTAR, S. SAOULA, N. LARADI (mai 2005) « AMELIORATION DES PERFORMANCES DES ENROBES BITUMINEUX PAR LA MODIFICATION A BASE DE POLYMERE » Congrès International sur la réhabilitation des constructions et Développement Durable, mai 2005 Alger.

[55] S. SAOULA, K. AIT MOKHTAR, S. HADDADI, E. GHORBEL (novembre 2008) « PREDICTION DES RISQUES D'ORNIERAGE DES ENROBES BITUMINEUX A TRAVERS L'ETUDE DES CARACTERISTIQUES RHEOLOGIQUES DES BITUMES » Colloque International sur la Caractérisation et la modélisation des matériaux et structures 16-18 novembre 2008, Tizi Ouzou, Algérie.

[56] S. SAOULA, K. Ait MOKHTAR, S. HADDADI, E. GHORBEL (2008) « IMPROVEMENT OF THE STABILITY OF A MODIFIED COVERING WITHIN EVA » International Journal of Applied Engineering Research.

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
50/70	20 - 25 – 30 – 35 – 40
70/100	15 – 20 - 25 – 30 – 35
80/100	10 - 15 – 20 - 25 – 30

2/ Spécifications des granulats utilisés en technique routière

Tableau 2. Spécifications des granulats utilisés en technique routière.

Micro Deval (MDE)	Los Angeles (LA)	Qualité
MDE < 13	LA ≤ 15	Très bon
13 ≤ MDE < 20	15 ≤ LA < 20	Bon à Moyen
20 ≤ MDE < 25	20 ≤ LA < 30	Moyen à Faible
MDE ≥ 30	LA ≥ 30	Médiocre

3/ La vulcanisation [2]

Le caoutchouc non - vulcanisé est une masse de longues chaînes polymériques enchevêtrées semblables à des spaghettis. L'étirement de cette masse provoque, à un certain degré, le désenchevêtrement et le glissement des chaînes les unes par rapport aux autres. La suppression de la sollicitation fait en sorte que le matériau se rétracte et que les chaînes s'enchevêtrent de nouveau.

La vulcanisation consiste à augmenter considérablement l'élasticité du matériau en verrouillant les chaînes les unes par rapport aux autres, ce qui réduit, voire élimine, le glissement plus ou moins à long terme des chaînes polymériques. On dit que le polymère est réticulé. Ce procédé permet d'obtenir une masse dimensionnellement stable et résistante à la chaleur.

A) La vulcanisation à base de soufre

Il s'agit du premier procédé de réticulation des polymères ainsi que du plus répandu. L'agent de réticulation : le soufre, abondant et peu onéreux, permet de lier les chaînes polymériques au niveau des liaisons doubles des carbones. Les élastomères tel que le NR ou le SBR nécessitent seulement une petite quantité de liaisons pour conférer au produit de bonnes propriétés, mais cette structure implique la présence d'une grande quantité de liaisons doubles sensibles aux attaques de l'oxygène, de l'ozone ou de la chaleur.

Une plus grande quantité de soufre permet d'obtenir un caoutchouc appelé "ébonite" qui se caractérise par plus de réticulations. L'ébonite est moins élastique que le caoutchouc conventionnel et moins sensible aux attaques susmentionnées.

Des agents accélérateurs de réticulation sont ajoutés en plus des atomes de soufre libres afin d'accélérer le processus de cure et mettre à disposition des polymères d'autres atomes de soufre présents au sein de leur molécule. Suivant la proportion des différents "donneurs" de soufre, on peut obtenir des produits finaux montrant une meilleure élasticité, une meilleure résistance à la fatigue ou une solidité plus optimale. En règle générale, la prédominance des atomes libres de soufre favorise les réticulations contenant plusieurs atomes en série de soufre, ce qui confère au produit vulcanisé une meilleure résistance à la fatigue et une meilleure élasticité au détriment de la solidité. Cette dernière est donc favorisée par du soufre issu d'accélérateurs de réticulation.

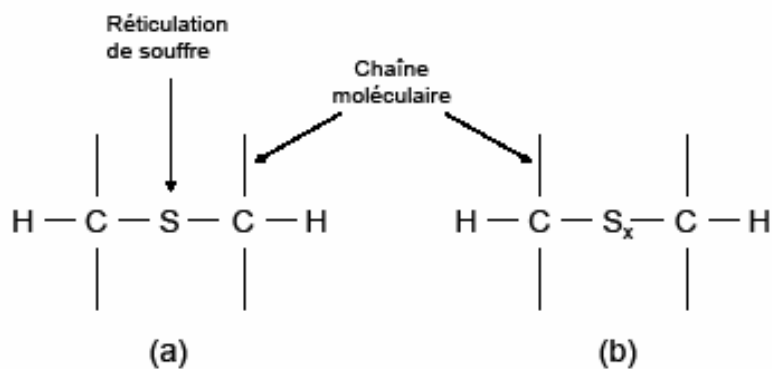


Figure 1. (a) réticulation avec un atome unique de soufre, (b) avec plusieurs atomes de soufre.

B) Les peroxydes

Il s'agit d'une autre classe d'agents de réticulation qui ne nécessitent pas la réactivité de la double liaison ni l'utilisation des accélérateurs de cure. Les peroxydes réagissent avec les élastomères en supprimant des atomes d'hydrogène de la chaîne polymérique, créant ainsi des radicaux libres très réactifs et qui se lient entre eux avec une liaison carbone – carbone plus solide que la liaison soufre – carbone et thermiquement plus stable. La réticulation aux peroxydes confère au caoutchouc une meilleure résistance à la compression, au détriment de la résistance à la fatigue et à la traction. Ce procédé permet de vulcaniser des élastomères ne disposant pas d'assez de liaisons doubles.

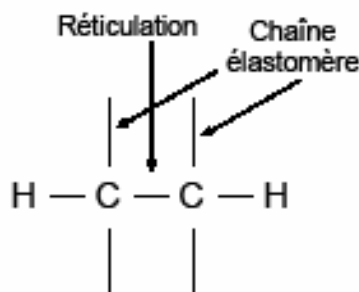


Figure 2. Deux chaînes polymériques liées directement à travers leur atome de carbones respectifs.

4/ Nomogramme de Van Der Poel

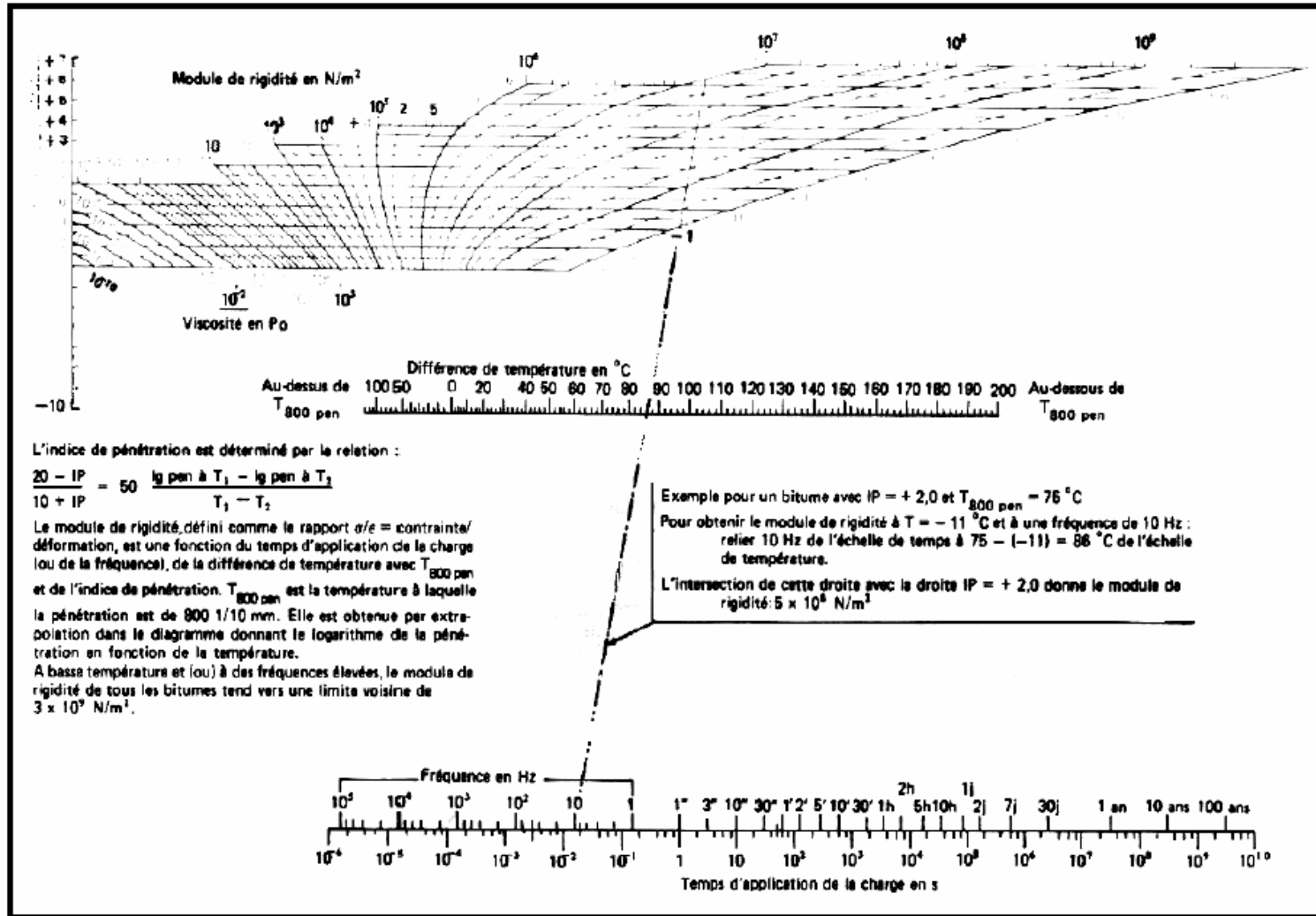


Figure 3. Nomogramme de Van Der Poel.