

Direction Post-Graduation & Recherche Scientifique

# Mémoire de Magister

Option : Matériaux - Structures

**NOUALI Mohamed**

Ingénieur d'Etat en Travaux Publics

Diplômé de l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

Intitulé

ANALYSE D'UNE POSSIBILITE DE VALORISATION DES DECHETS DE SACHETS  
PLASTIQUES DANS L'AMELIORATION DES CARACTERISTIQUES DES ENROBES  
BITUMINEUX

Soutenu publiquement le 21/01/2016 devant le jury composé de :

M. TAKI	MCA, ENSTP	Président
Z. DERRICHE	Professeur, ENSTP	Directeur de mémoire
S. HADDADI	Professeur, USTHB	Examineur
B. GUETTACHE	Docteur, ENSTP	Examineur
A. BADAOU	Docteur, ENSTP	Examineur
GUELLATI	Dir, Laboratoire, CTPP	Invité

# Remerciements

Mes premiers remerciements vont à la directrice de ce mémoire, madame DERRICHE Zohra, professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, pour m'avoir proposé ce sujet particulièrement intéressant et pratique. Je lui exprime ma plus profonde gratitude pour son soutien, sa compréhension, ainsi que pour les judicieux conseils prodigués tout au long de la réalisation de ce travail de recherche.

Je me dois de signaler l'aide chaleureuse et inestimable, sans laquelle ce travail de recherche n'aurait pas été possible. J'ai nommé monsieur SI-TAYEB Said, directeur du Laboratoire Central des Matériaux (LCM, Cosider TP). Je le remercie profondément pour m'avoir accueilli dans son laboratoire et conseillé dans mes débuts et pour les discussions stimulantes et intéressantes que nous avons eues tout au long de ce travail.

Je remercie les membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et le temps qu'ils ont bien voulu consacrer à la lecture de cette thèse.

Je remercie tout particulièrement le professeur HADDADI Smail, pour ses précieux conseils concernant l'utilisation de l'huile de vidange en tant qu'extender-oil.

Je tiens également à remercier tous mes collègues du LCM qui m'ont apporté leur aide et leur soutien lors de la réalisation de ce mémoire. Je pense principalement à D.BEKAYA, I. BELGERASSE, H. ZAHOUANI, et S. BOUDRA, qui grâce à leur aide ce projet de recherche a été réalisé.

J'en profite aussi pour saluer très, très chaleureusement toute l'équipe du Laboratoire Travaux Publics ingénierie des Transports & Environnement (LTPiTE), je désire remercier particulièrement Mlle MOHRI Rachida.

J'aimerais exprimer ma profonde gratitude envers celles et ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Enfin, je ne remercierai jamais assez ma famille pour leur encouragement, leur soutien, leur patience et leur compréhension.

A vous tous et à ceux que j'aurais très injustement oubliés, merci.

## المخلص

الهدف من هذه الدراسة هو تقيم نفايات الأكياس البلاستيكية من أجل تحسين الخصائص الفيزيائية، الكيميائية والميكانيكية للزفت. من أجل تحسين زيادة التوافق بين الزفت والبلاستيك، جربنا زيت المحركات المستعملة. تثبت النتائج المحصل عليها زيادات واضحة في السلوك الريولوجي للزفت المعدل. في الواقع، انخفاض في قابلية الاختراق، ارتفاع في درجة انصهار الزفت، مع انخفاض في معدل التلف.

وقد أظهرت الاختبارات الميكانيكية التي أجريت على الاسفلت المصنوع من الزفت المعدل أن خصائص الاسفلت تحسنت باستخدام الزفت-بلاستيك. في الواقع، انخفاض في نسبة الفراغ، وزيادة في مقاومة الماء ومعامل الصلابة.

أبرزت الدراسة، أنه على الرغم من استخدام زيت المحركات بقي الزفت المعدل بالبلاستيك يعاني من مشكلة عدم الاستقرار في التخزين والتي تتطلب جهود بحث إضافية من أجل حلها.

**الكلمات-المفتاح:** الزفت، الزفت المعدل، الأكياس البلاستيكية، زيت التفريغ، LDPE

## Résumé

Dans la présente étude, on analyse la faisabilité de valorisation de déchets plastiques de sachets pour améliorer les propriétés physiques, chimiques et mécaniques d'un bitume standard. Dans l'option d'améliorer la compatibilité du bitume et du plastique on teste aussi un "assouplissant" : une huile de vidange moteur.

On teste, en outre les répercussions de la modification du bitume avec le plastique de sachets sur les performances d'un enrobé fabriqué à base de ce bitume ainsi modifié.

Les résultats obtenus montrent que l'incorporation de pourcentages de plastique au bitume apporte une nette amélioration des propriétés rhéologiques du bitume modifié.

En effet, apprécié comparativement au cas du bitume standard, la pénétrabilité du bitume-plastique diminue, son point de ramollissement augmente, sa susceptibilité thermique et son taux de vieillissement diminuent.

Les essais mécaniques réalisés sur un béton bitumineux fabriqué à base de ce bitume-plastique ont montré que les performances de l'enrobé sont avantageusement améliorées.

Le pourcentage des vides de l'enrobé diminue, la tenue à l'eau est améliorée et le module de rigidité augmente de façon substantielle.

L'étude a permis de mettre en évidence néanmoins que malgré l'utilisation d'une huile de vidange, le bitume plastique souffre du problème de l'instabilité au stockage ce qui appelle d'autres efforts de recherche pour le régler.

**Mots-clefs :** bitume, bitume modifié, sachet plastique, huile de vidange, LDPE.

## **Abstract**

The present study is about recycling waste plastic bags, for the improvement of the physical, chemical and mechanical properties of a standard bitumen. In order to improve the plastic-bitumen compatibility, waste engine oil was used as an extender-oil.

The mechanical performance of the modified bitumen is studied. The behaviour of an asphalt mix that uses the plastic modified bitumen as a binder is also addressed.

Results obtained showed a clear improvement of the rheological behaviour of the modified bitumen, penetrability decreases, softening point increases, and thermal susceptibility, rate of ageing decreased.

Mechanical tests carried out on a plastic-bitumen mix showed a substantial gain in the performance of the bituminous mix: void content decreases, water resistance and modulus increase.

The study made it possible to highlight nevertheless that in spite of the use of engine oil the plastic bitumen suffers from the problem of storage stability, which calls for further research efforts to be solved.

**Key- words:** bitumen, modified bitumen, plastic bags, waste engine oil, LDPE.

# SOMMAIRE

LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
LISTE DES FIGURES.....	XII
INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>Partie 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>Chapitre I : Les enrobés bitumineux</b>	
I.1.Généralités sur les enrobés bitumineux .....	4
I.1.1. Effet du trafic.....	4
I.1.2. Effet de la température .....	5
I.2.Constituants des matériaux bitumineux.....	5
I.2.1. Bitume .....	6
I.2.1.1. Généralités sur les bitumes .....	6
I.2.1.2. Fabrication des bitumes .....	7
I.2.1.3. Composition chimique et structure des bitumes .....	9
I.2.1.4. Structure colloïdale du bitume .....	9
I.2.1.5. Caractérisation des bitumes.....	12
I.2.1.5.1. Analyses physico-chimiques .....	12
I.2.1.5.2. Essais mécaniques.....	12
I.2.1.5.3. Essais rhéologiques.....	18
I.2.2. Granulats.....	22
I.2.2.1. Généralités sur les granulats.....	22
I.2.2.2. Caractéristiques des granulats .....	23
I.2.2.3. Propriétés adhésives et cohésives .....	26
I.3.Comportement des enrobés bitumineux .....	27
I.4.Essais sur les enrobés bitumineux .....	30
I.4.1. Essai à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) .....	30
I.4.2. Essai de la tenue à l'eau (Duriez) .....	31
I.4.3. Essai Marshall.....	31
I.4.4. Essai d'orniérage .....	32
I.4.5. Essais de module .....	32
I.4.5.1. Essai de traction directe .....	33
I.4.5.2. Essai de traction indirecte (compression diamétrale).....	33
I.4.5.3. Essai de Module complexe .....	34
I.4.6. Essai de fatigue (flexion en deux points) .....	34
I.5. Conclusion.....	35

## **Chapitre II : La modification des mélanges bitumineux**

II.1.Introduction .....	36
II.2.Objectifs de la modification .....	36
II.3.Généralités sur les polymères.....	37
II.3.1. Structure des polymères.....	38
II.3.1.1. Polymères linéaires.....	38
II.3.1.2. Polymères ramifiés .....	38
II.3.1.3. Polymères réticulés.....	39
II.3.1.4. Polymères amorphes et polymères cristallisés.....	39
II.3.2. Principaux groupes de polymères.....	39
II.3.2.1. Polymères thermoplastiques.....	40
II.3.2.2. Polymères thermodurcissable.....	40
II.3.2.3. Caoutchoucs naturels et synthétiques .....	41
II.3.2.4. Caoutchoucs thermoplastiques.....	41
II.4.Procédés de la modification des mélanges bitumineux.....	41
II.4.1. Enrobé modifié par la méthode sèche .....	41
II.4.2. Enrobé modifié par la méthode humide (Bitume modifié).....	42
II.5.Bitume modifié.....	42
II.5.1. Facteurs influençant les propriétés des bitumes modifiés .....	42
II.5.1.1. Caractéristiques des polymères .....	42
II.5.1.2. Caractéristiques des bitumes .....	42
II.5.2. Compatibilité des bitumes et des polymères .....	43
II.5.3. Mécanisme de la modification.....	44
II.6.Caractérisation des bitumes polymères .....	46
II.6.1. Analyses physico-chimiques .....	46
II.6.2. Mesure de la pénétrabilité.....	46
II.6.3. Détermination du point de ramollissement.....	46
II.6.4. Indice de pénétrabilité .....	46
II.6.5. Point de fragilité Fraass .....	47
II.6.6. Durcissement simulé au RTFOT .....	47
II.6.7. Essais spécifiques aux liants modifiés.....	47
II.6.7.1. Stabilité au stockage.....	47
II.6.7.2. Observation microscopique (Microscopie de fluorescence) .....	48
II.6.7.3. Essai force-ductilité .....	49
II.7.Domains d'emploi des bitumes modifiés .....	49
II.8.Evolution des bétons bitumineux .....	50
II.8.1. Bétons bitumineux (BBSG).....	50

II.8.2. Bétons Bitumineux à Module Elevé (BBME).....	50
II.9.Conclusion.....	51
<b>Chapitre III : Amélioration des enrobés bitumineux par l’ajout de sachets en plastiques.</b>	
III.1.Introduction.....	52
III.2.Déchets plastiques.....	52
III.2.1. Plastique.....	52
III.2.2. Déchet.....	52
III.3.Recyclage des déchets.....	53
III.3.1. Procédés de recyclage.....	53
III.4.Valorisation des déchets dans le domaine routier.....	53
III.4.1. Pneus usagés.....	54
III.4.1.1. Introduction.....	54
III.4.1.2. Procédés de fabrication d’enrobés contenant de la poudrette de caoutchouc.....	54
III.4.1.3. Influence des paramètres de fabrication sur les caractéristiques physico-chimiques du bitume - caoutchouc.....	55
III.4.1.4. Interaction bitume- caoutchouc.....	56
III.4.1.5. Recyclage de l'enrobé contenant du caoutchouc.....	56
III.4.1.6. Avantages des bitumes caoutchouc.....	57
III.4.2. Valorisation des sachets plastiques.....	57
III.4.2.1. Compatibilité entre le bitume et LDPE.....	62
<b>Partie 2 : ETUDE EXPÉRIMENTALE</b>	
<b>Chapitre IV : Modification du bitume</b>	
IV.1 Introduction.....	65
IV.2 Matériaux et méthodes expérimentales.....	65
IV.2.1 Matériaux.....	65
IV.2.1.1 Bitume.....	65
IV.2.1.2 Caractérisation de plastique de sachets.....	65
IV.2.2. Définition des conditions expérimentales de la modification du bitume ....	66
IV.2.2.1. Influence de la taille des particules de sachets sur la modification du bitume.....	67
IV.2.2.2. Influence du temps de malaxage sur la modification du bitume.....	68
IV.2.2.3. Influence de l’énergie de cisaillement sur la modification du bitume....	70
IV.2.2.4. Conditions de la modification.....	75
IV.3. Modification du bitume.....	75
IV.3.1. Influence de la teneur en plastique sur le bitume.....	75

IV.3.2. Influence de l'ajout d'une huile au bitume-plastique .....	84
IV.3.2.1. Composition moyenne d'une huile usagée .....	84
IV.3.2.2. Influence de l'huile de vidange sur le bitume pur .....	85
IV.3.2.3. Modification du bitume-huile de vidange par l'ajout de plastique.....	87
IV.3.2.4. Influence du teneur en plastique sur le bitume + 2% huile de vidange	91
IV.4. Conclusion .....	100
<b>Chapitre V. L'enrobé bitumineux modifié par l'ajout de sachets en plastique.</b>	
V.1. Introduction .....	101
V.2. Méthode de formulation française pour les enrobés .....	101
V.3. Etude de formulation.....	101
V.4. Formulation de l'enrobé type BB 0/14 .....	102
V.4.1. Matériaux d'étude .....	102
V.4.1.1. Granulats .....	102
V.4.1.2. Caractéristiques du bitume.....	104
V.4.2. Courbe granulométrique du mélange .....	105
V.4.3. Teneur en liant .....	105
V.4.4. Mesure de la masse volumique réelle (MVR) .....	106
V.4.5. Mode opératoire de malaxage en laboratoire selon la norme 12697-35. ....	106
V.4.6. Essai PCG selon la norme 12697-31.....	107
V.4.6.2. Calcul de la compacité .....	109
V.4.7. Essai de la tenue à l'eau selon la norme 12697-12 .....	109
V.4.8. Essai de Module de rigidité selon la norme EN 12697-26 .....	110
V.5. Etude de l'enrobé modifié.....	111
V.5.1. Enrobé modifié par bitume-plastique.....	111
V.5.2. Enrobé modifié par bitume-plastique (Compactage à 180 °C).....	116
V.5.3. Enrobé modifié par bitume-huile-plastique à 160 °C .....	120
V.6. Conclusion .....	125
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....	126
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	128

## LISTE DES FIGURES

### Partie 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure I.1. Schématisation des sollicitations induites par le trafic dans une chaussée. .4	4
Figure I.2. Schématisation des sollicitations induites par la température.....5	5
Figure I.3. Schématisation de la structure d'un enrobé bitumineux .....6	6
Figure I.4. Principe de fabrication des bitumes .....8	8
Figure.I.5. Compositions chimique des bitumes..... 10	10
Figure I.6. Macrostructure des Asphaltènes selon Yen . ..... 10	10
Figure I.7. Schématisation de la structure colloïdale du bitume ..... 11	11
Figure I.8. Schéma de séparation chimique des constituants du bitume..... 13	13
Figure I.9. Principe de l'essai de pénétrabilité pour le bitume. .... 14	14
Figure I.10. Détermination du point de ramollissement du bitume. .... 14	14
Figure I.11. Principe de l'essai de ductilité du bitume ..... 15	15
Figure I.12. Principe de l'essai de température de fragilité FRAASS. .... 16	16
Figure I.13. Principe de l'essai RTFOT..... 16	16
Figure I.14. Principe de l'essai PAV. .... 17	17
Figure I.15. Classement des essais mécaniques du programme SHRP. .... 19	19
Figure I.16. Viscosité des bitumes (a. comportement newtonien, b. comportement non newtonien).....20	20
Figure I.17. Variation du module de rigidité en fonction du temps d'application de la charge et de la température. ....20	20
Figure I.18. Nomographe de Van der Poel pour la détermination du module de rigidité d'un bitume ..... 22	22
Figure I.19. Paramètres de forme des granulats.....24	24
Figure I.20. Représentation schématique de l'énergie d'adhésion, bitume-gravillon...26	26
Figure I.21. Représentation schématique de l'énergie de cohésion. ....27	27
Figure I.22. Courbe de WÖHLER .....29	29
Figure I.23. Comportement "type" des bétons bitumineux, ( $\epsilon$ ) déformation – (N) nombre de chargements .....29	29
Figure I.24. Principe du compactage à la presse à cisaillement giratoire PCG ..... 31	31
Figure I.25. Principe de l'essai Duriez.....31	31
Figure I.26. Principe de l'essai Marshall .....32	32
Figure I.27. Principe de l'essai d'orniérage .....32	32
Figure I.28. Résultats classiques pour l'essai de traction directe sur enrobé .....33	33
Figure I.29. Principe de l'essai de compression diamétrale.....33	33
Figure I.30. Principe de l'essai de module complexe. ....34	34

Figure I.31. Principe de l'essai de fatigue.....	35
Figure II.1. Polymères linéaires (a: homopolymère, b: copolymère statistique, c: copolymère alterné, d: copolymère séquencé).....	38
Figure II.2. Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b). .....	38
Figure II.3. Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.....	39
Figure II.4. Représentation schématique d'un polymère semi-cristallisé.....	39
Figure II.5. Structures des bitume polymères : a) compatible, b) incompatible .....	44
Figure II.6. Influence de la teneur en polymère sur le taux de gonflement .....	45
Figure II.7. Mécanisme de la dispersion d'un polymère de type SBS dans le bitume	45
Figure II.8. Microstructure d'un bitume polymère .....	48
Figure. II.9. Courbes de l'essai ductilité-force pour certains bitumes modifiés .....	49
Figure III.1. Interprétation du processus d'élaboration du bitume caoutchouc .....	55
Figure III.2. Effets de l'addition de déchets plastiques dans les enrobés .....	58
Figure III.3. Point de ramollissement en fonction de % polymère. ....	63
Figure III.4. Ductilité en fonction de % polymère.....	63
<b>Partie 2 : ETUDE EXPÉRIMENTALE</b>	
Figure IV.1. Structure chimique du plastique de sachets (LDPE).....	66
Figure IV.2. La taille de particule de plastique de sachets (2-5 mm). ....	67
Figure IV.3. Les caractéristiques du bitume-plastique en fonction de la taille des particules de plastique.....	68
Figure IV.4. Variation de la pénétrabilité en fonction du temps de malaxage .....	68
Figure IV.5. La variation du point de ramollissement en fonction du temps de malaxage. ....	69
Figure IV.6. Variation de la ductilité en fonction du temps de malaxage. ....	70
Figure IV.7. La variation de la pénétrabilité pour deux énergies de cisaillement. ....	71
Figure IV.8. Variation du point de ramollissement pour deux énergies de cisaillement .....	72
Figure IV.9. Variation de la ductilité en fonction d'énergie de cisaillement.....	73
Figure IV.10. Variation de la susceptibilité thermique en fonction de l'énergie de cisaillement. ....	74
Figure IV.11. Variation de l'indice de pénétrabilité en fonction de l'énergie de cisaillement. ....	75
Figure IV.12. La variation de pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique.....	76
Figure IV.13. La variation du point de ramollissement en fonction de la teneur en plastique .....	77
Figure IV.14. Variation de la susceptibilité thermique en fonction de la teneur en plastique. ....	78
Figure IV.15. La variation de la ductilité en fonction de la teneur en plastique.....	79

Figure IV.16. Résultats de pénétrabilité après RTFOT .....	80
Figure IV.17. Résultats du point de ramollissement après RTFOT.....	80
Figure IV.18. Module de rigidité estimé à 15 °C en fonction du teneur en plastique. 82	
Figure IV.19. Module de rigidité estimé à 25 °C en fonction du teneur en plastique. 82	
Figure IV.20. Essai de stabilité au stockage. ....	83
Figure IV.21. Composition moyenne d'une huile usagée.....	84
Figure IV.22. Variation de la pénétrabilité en fonction du teneur en huile de vidange au bitume pur. ....	85
Figure IV.23. Variation du point de ramollissement en fonction du teneur en huile de vidange.....	86
Figure IV.24. Variation de la ductilité en fonction de la teneur en huile de vidange. .87	
Figure IV.25. Chaîne de fabrication du bitume-polymère. ....	88
Figure IV.26. Variation de la pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique et la teneur en huile.....	88
Figure IV.27. Différence de la pénétrabilité entre le bitume-huile et le bitume-plastique .....	89
Figure IV.28. La variation de point de ramollissement en fonction de la teneur en plastique et de la teneur en huile.....	90
Figure IV.29. Variation du point de ramollissement entre le bitume-huile et bitume-plastique .....	91
Figure IV.30. Variation de la pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique .....	92
Figure IV.31. Variation de la température bille-anneau en fonction de la teneur en plastique .....	93
Figure IV.32. Résultats de la susceptibilité thermique en fonction du teneur en plastique .....	93
Figure IV.33. Variation de la ductilité en fonction de la teneur en plastique .....	94
Figure IV.34. Résultats de pénétrabilité après RTFOT .....	95
Figure IV.35. Résultats du point de ramollissement après RTFOT.....	96
Figure IV.36. Module de rigidité estimé à 15 °C en fonction du teneur en plastique.97	
Figure IV.37. Module de rigidité estimé à 25 °C en fonction du teneur en plastique.98	
Figure IV.38. Module de rigidité estimé à 15 °C en fonction du teneur en plastique.98	
Figure IV.39. Module de rigidité estimé à 25 °C en fonction du teneur en plastique.99	
Figure IV.40. Essai de stabilité au stockage (partie supérieure).....	99
Figure V.1. Résumé des niveaux de l'épreuve de formulation LCPC.....	102
Figure V.2. Les courbes granulométriques de trois fractions granulaires. ....	104
Figure V.3. Courbe granulométrique du mélange granulaire. ....	105
Figure V.4. Pourcentage de vide du BB en fonction du nombre de giration. ....	108
Figure V.5. Evolution de la masse volumique en fonction du nombre de girations..	109

Figure V.6. Principe de l'essai de traction indirecte. ....	110
Figure V.7. Evolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations .	112
Figure V.8. Pourcentage de vide à 10 girations en fonction du bitume utilisé. ....	112
Figure V.9. Pourcentage de vide à 80 girations en fonction du bitume utilisé. ....	113
Figure V.10. L'évolution de la masse volumique en fonction du nombre de girations. .....	113
Figure V.11. Résultats de la compacité .....	114
Figure V.12. Résultats de module de rigidité pour les trois enrobés. ....	115
Figure V.13. Les gains apportés par le bitume-plastique sur le module de rigidité ..	116
Figure V.14. Variation du pourcentage de vides en fonction des deux températures de compactage. ....	117
Figure V.15. Pourcentage de vide à 10, et 80 girations pour les deux températures de compactage. ....	118
Figure V.16. Evolution de la masse volumique du mélange pour les deux températures de compactage.....	118
Figure V.17. Résultats de la compacité du BB modifié par 0.7% plastique.....	119
Figure V.18. Résultats de module de rigidité pour les deux températures de compactage. ....	120
Figure V.19. Evolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations. .....	121
Figure V.20. Pourcentage de vide à 10 girations en fonction du bitume utilisé.....	122
Figure V.21. Pourcentage de vide à 10 girations en fonction du bitume utilisé.....	122
Figure V.22. Evolution de la masse volumique en fonction du nombre de girations. .....	123
Figure V.23. Résultats de la compacité. ....	123
Figure V.24. Résultats de module de rigidité pour les trois enrobés .....	124

## LISTE DES TABLEAUX

### Partie 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Tableau I.1. Différents type de structures des bitumes en fonction de leur composition générique.....	11
Tableau I.2. Les spécifications des bitumes routiers. ....	18
Tableau I.3. Essais mécaniques du programme SHRP.....	19
Tableau I.4. Spécification de l'essai MDE.....	25
Tableau I.5. Spécification de Los Angeles.....	25
Tableau I.6. Interprétation de l'essai de polissage des granulats.....	26
Tableau I.7 Le comportement des enrobés bitumineux.....	29
Tableau II.1. Exemples des polymères usuels.....	37
Tableau II.2. Les propriétés des bétons bitumineux.....	50
Tableau II.3. Les propriétés des bétons bitumineux à module élevé.....	51
Tableau III.1 Résistance à la compression en fonction du teneur et type de polymères.....	59
Tableau. III.2. Les propriétés thermiques de quelque polymère.....	61

### Partie 2 : ETUDE EXPÉRIMENTALE

Tableau IV.1. Caractéristiques du bitume utilisé.....	65
Tableau IV.2. Caractéristiques du LDPE (sachets plastiques).....	66
Tableau IV.3. Les caractéristiques du bitume-plastique en fonction de la taille des particules de plastique.....	67
Tableau IV.4. Résultats de la pénétrabilité en fonction du temps de malaxage.....	68
Tableau IV.5. Résultats du point de ramollissement en fonction du temps de malaxage.....	69
Tableau IV.6. Résultats de la ductilité en fonction du temps de malaxage.....	70
Tableau IV.7. Résultats de pénétrabilité pour deux énergies de cisaillement.....	71
Tableau IV.8. Résultats du point de ramollissement pour deux énergies de cisaillement.....	71
Tableau IV.9. Résultats de ductilité en fonction d'énergie de cisaillement.....	72
Tableau IV.10. La susceptibilité thermique et l'indice de pénétrabilité en fonction de l'énergie de cisaillement.....	74
Tableau IV.11. Résultats de pénétrabilité en fonction de la teneur en plastiques.....	76
Tableau IV.12. Résultats de point de ramollissement en fonction de la teneur en plastique.....	77
Tableau IV.13. Résultats de la susceptibilité thermique.....	78
Tableau IV.14. Résultats de la ductilité en fonction de la teneur en plastique.....	78
Tableau IV.15. Résultats de pénétrabilité après RTFOT.....	79

Tableau IV.16. Résultats du point de ramollissement après RTFOT .....	80
Tableau IV.17. Module de rigidité en fonction de la teneur en plastique.....	81
Tableau IV.18. Les résultats de l'essai de stabilité au stockage. ....	83
Tableau IV.19. Résultats de la pénétrabilité en fonction du teneur en huile de vidange. .....	85
Tableau IV.20. Résultats du point de ramollissement en fonction du teneur en huile de vidange.....	86
Tableau IV.21. Résultats de la ductilité en fonction de la teneur en huile de vidange. .....	87
Tableau IV.22. Résultats de la pénétrabilité fonction de la teneur en plastique et teneur en huile.....	88
Tableau IV.23. Différence de la pénétrabilité entre le bitume-huile et le bitume- plastique.....	89
Tableau IV.24. Résultats du point de ramollissement en fonction du teneur en plastique et teneur en huile. ....	90
Tableau IV.25. Variation du point de ramollissement entre le bitume-huile et bitume- plastique .....	90
Tableau IV.26. Résultats de la pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique .....	91
Tableau IV.27. Résultats de la température bille anneau en fonction de la teneur en plastique.....	92
Tableau IV.28. Résultats de la susceptibilité thermique en fonction de la teneur en plastique .....	93
Tableau IV.29. Résultats de la ductilité en fonction de la teneur en plastique .....	94
Tableau IV.30. Résultats de pénétrabilité après RTFOT .....	95
Tableau IV.31. Résultats du point de ramollissement après RTFOT .....	96
Tableau IV.32. Module de rigidité des bitumes-huile-plastique en fonction du teneur en plastique. ....	97
Tableau IV.33. Les résultats de l'essai de stabilité au stockage. ....	99
Tableau V.1. Analyse chimique sommaire de granulats.....	103
Tableau V.2. Résultats de l'analyse granulométrique. ....	103
Tableau V.3. Caractérisation des trois classes granulaire.....	104
Tableau V.4. Pourcentages pondéraux des différentes classes .....	105
Tableau V.5. Détermination de la teneur en liant. ....	106
Tableau V.6. La masse volumique.....	106
Tableau V.7. Résultats de l'essai PCG. ....	108
Tableau V.8. Compacité du mélange étudié. ....	109
Tableau V.9. Les résultats de l'essai de la tenue à l'eau.....	110
Tableau V.10. Résultats de module de rigidité.....	111

Tableau V.11. Résultats de l'essai PCG pour les deux teneurs en plastique. ....	111
Tableau V.12. Résultats de la compacité .....	114
Tableau V.13. Les résultats de l'essai de la tenue à l'eau.....	115
Tableau V.14. Résultats de module de rigidité pour les trois enrobés.....	115
Tableau V.15. Les gains apportés par le bitume-plastique sur le module de rigidité	116
Tableau V.16. Les résultats de l'essai PCG pour les deux températures de compactage. ....	117
Tableau V.17. Résultats de la compacité du BB modifié par 0.7% plastique. ....	119
Tableau V.18. Résultats de module de rigidité pour les deux températures de compactage. ....	119
Tableau V.19. Résultats de l'essai PCG pour les deux teneurs en plastique. ....	121
Tableau V.20. Résultats de la compacité. ....	123
Tableau V.21. Les résultats de l'essai de la tenue à l'eau.....	124
Tableau V.22. Résultats du module de rigidité.....	124

# INTRODUCTION GENERALE

La croissance économique de l'Algérie a engendré un développement très important des infrastructures de transport. Ce développement a touché toutes les régions du pays, même les zones à climat spécifique, telles que les régions sahariennes chaudes ou à climat continental et les régions froides. Cependant, les aspects de l'adéquation du dimensionnement et du choix des matériaux routiers adaptés à chacune de ces régions, restent pratiquement limités. Il suffit d'observer la surface de certaines chaussées pour constater qu'elles sont parfois le siège de graves dégradations dès les premières années de leur mise en service. Ce phénomène s'est en plus aggravé par l'intensification du trafic et des charges supportées par les structures de chaussée.

Pour réduire l'importance de ces dégradations (orniérage), diverses techniques ont été utilisées ; parmi lesquelles, la modification des liants avec des polymères qui s'est avérée être une technique prometteuse. Cette technique permet d'améliorer les performances des liants bitumineux et de réduire la fréquence de réparation des chaussées qui participe à l'épuisement des matériaux de construction. La modification des bitumes peut-être réalisée par plusieurs additifs (polymères, pneus recyclés, produits chimiques et autres).

Par ailleurs, la production croissante de déchets de toutes sortes à l'échelle planétaire requiert la mise en place d'initiatives efficaces afin d'éliminer graduellement ces multiples sources de pollution.

Dans le cadre de la mise en application des principes de développement durable, se manifeste la volonté, de plus en plus marquée, de limiter les nuisances de l'industrie routière sur l'environnement.

La nouvelle approche vise la définition de nouveaux matériaux routiers, ou matériaux routiers modifiés à performances améliorées et qui participent à la réduction des déchets par leur valorisation dans ces matériaux alternatifs.

L'objectif de la présente étude est de démontrer la possibilité de l'amélioration des liants bitumineux classiques par ajout de plastique de sachets.

La pertinence de cette recherche sur la viabilité du bitume-plastique de sachets trouve sa justification dans le taux de production alarmant de notre pays en déchets de sachets de plastique et aussi dans les besoins de développement de ses infrastructures routières (Schéma Directeur Routier horizon 2025).

On mesure dans la première partie de ce travail l'amélioration d'un bitume routier classe 35/50 apportée par sa modification par ajout de déchets de plastique selon la méthode humide.

On met en évidence cette amélioration apportée par ce bitume-plastique dans un enrobé bitumineux de type 0/14. L'amélioration est testée en termes de maniabilité, compacité, tenue à l'eau et enfin de rigidité.

Le travail est rapporté dans un mémoire organisé en deux parties :

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

- La définition et la caractérisation des bitumes et des enrobés bitumineux.
- La définition et la caractérisation des bitumes modifiés.
- Le retour d'expérience 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 modification du bitume 35/50 par les déchets de plastique de sachets.
- Les gains apportés par le bitume-plastique sur l'enrobé bitumineux testé.

Le mémoire se termine par des conclusions et les perspectives à entrevoir pour la suite de cette recherche.

# Partie I

## ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

---

Afin de dresser le cadre général de cette étude, la première partie de ce mémoire est entièrement consacrée à une étude bibliographique sur les enrobés bitumineux et les bitumes (purs ou modifiés), ainsi que sur la valorisation des déchets dans le domaine routiers.

Cette partie contient trois chapitres : Les enrobés bitumineux, la modification des mélanges bitumineux, et la valorisation des déchets dans le domaine routier.

- Le chapitre “les enrobés bitumineux” permet de présenter et discuter les points suivants:
  - La rhéologie et les propriétés thermomécaniques des bitumes, ainsi que les principaux essais pour caractériser les bitumes.
  - Les caractéristiques des granulats utilisés dans les enrobés bitumineux, ainsi que les principaux essais d’identification des granulats.
  - La rhéologie des enrobés bitumineux ainsi que les essais relatifs aux enrobés.
- Le chapitre “la modification des mélanges bitumineux” comporte:
  - Les différents polymères utilisés pour la modification des bitumes.
  - Les objectifs de la modification des mélanges bitumineux.
  - Les mécanismes de la modification des bitumes, ainsi que les différents essais pour caractériser les liants modifiés.
- Le chapitre “Amélioration des enrobés bitumineux par l’ajout de plastique” expose :
  - L’importance du recyclage des déchets dans l’industrie.
  - La valorisation des pneus usés et des déchets de plastique dans les enrobés bitumineux.



**Chapitre I**  
**Les enrobés bitumineux**

## Chapitre I : Les enrobés bitumineux

### I.1. Généralités sur les enrobés bitumineux

Les matériaux bitumineux sont employés principalement dans les couches de surface et d'assise des chaussées routières. Ils subissent l'action conjuguée du trafic routier (agression mécanique) et du climat (température, gel, précipitation).

Les enrobés bitumineux resteront le principal matériau constituant la couche de roulement d'une chaussée, devant résister aux efforts de flexion, compression et cisaillement, liés au trafic routier.

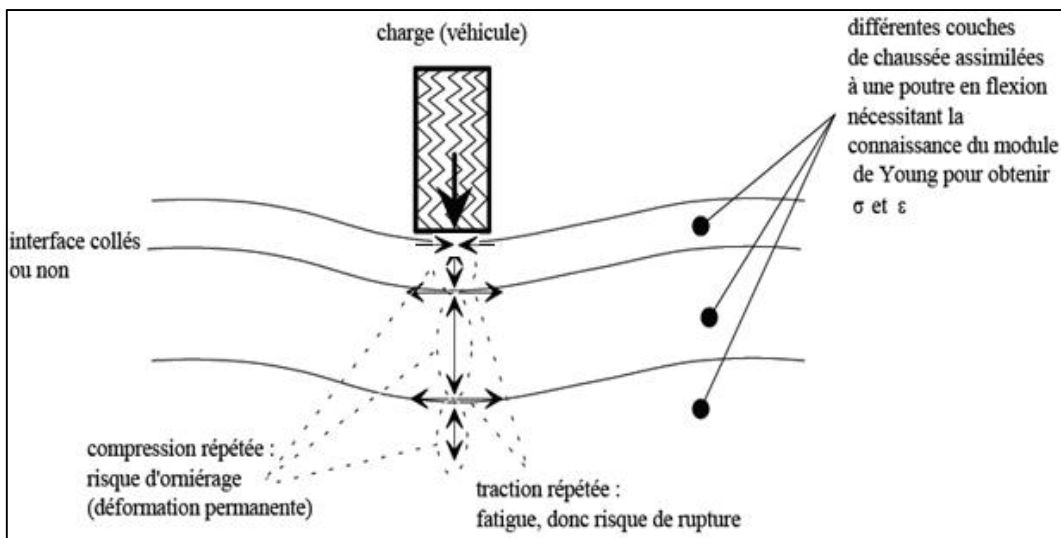
Les propriétés recherchées pour un enrobé bitumineux sont sa compacité après mise en œuvre, son imperméabilité et sa stabilité vis-à-vis du trafic et des intempéries [1].

#### I.1.1. Effet du trafic

Sous l'effet du passage des véhicules, les couches de chaussée sont soumises à des écrasements et des flexions.

Les tractions répétées à la base des couches, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau (phénomène de fatigue).

Les compressions répétées peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. (Figure I.1)



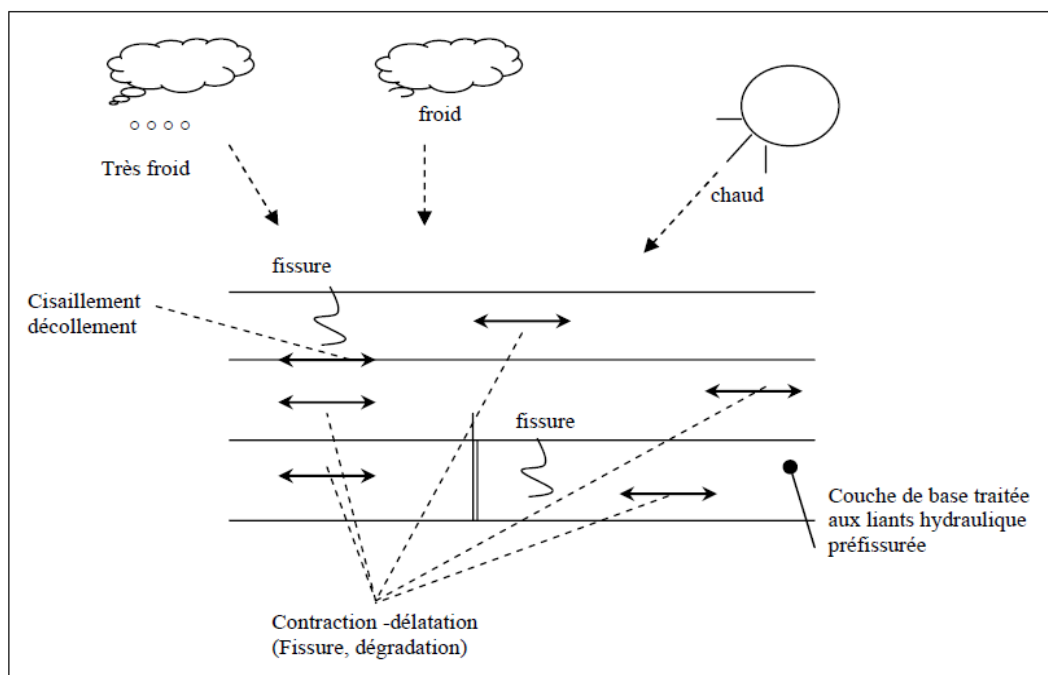
**Figure I.1.** Schématisation des sollicitations induites par le trafic dans une chaussée.

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 et éventuellement du coefficient de Poisson du matériau (pour résoudre le problème considéré comme élastique).

### I.1.2. Effet de la température

La température a deux effets mécaniques principaux outre le vieillissement du matériau [2] :

- ❖ Changement de la rigidité (module) du matériau dû au caractère thermo-susceptible du mélange bitumineux et plus particulièrement du liant hydrocarboné ;
- ❖ Création de contraintes et de déformations au sein du matériau, en raison des dilatations-contractions thermiques, qui peuvent provoquer et faire se propager des fissures avec les cycles thermiques, surtout à basse température (les couches traitées aux liants hydrauliques sont sujettes quant à elles aux retraits thermique et de prise) ; (Figure I.2).



**Figure I.2.** Schématisation des sollicitations induites par la température

On doit donc exiger des enrobés de qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température [3]:

- ❖ La stabilité : la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température,
- ❖ La flexibilité: soit l'aptitude à supporter sans fissures thermiques sous l'influence des basses températures.

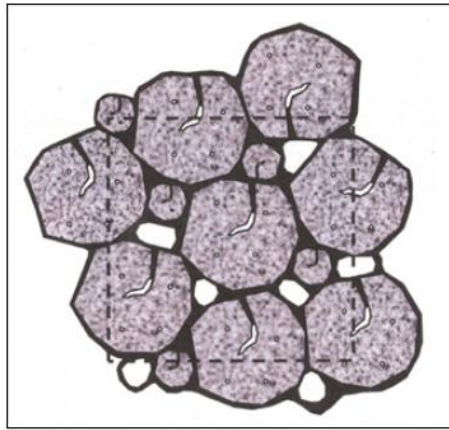
### I.2. Constituants des matériaux bitumineux

Les enrobés bitumineux sont des mélanges composés d'environ 3 à 5% de bitume et de 95 à 97% de granulats et contiennent en leur sein une certaine proportion de vides.

Di Benedetto et Corté (2004) précisent que ce sont des mélanges en proportions bien définies de gravillons, de sables et de filler avec un liant bitumineux et éventuellement des additifs [cité dans 1], (Figure I.3).

Selon Doucet et Coll (2000), le mélange de ces deux phases donne un matériau viscoélastique ayant un comportement linéaire à faibles déformations et un comportement non-linéaire à fortes déformations [cité dans 4].

Les granulats qui ont un comportement élastique forment le squelette de l'enrobé tandis que le bitume, qui a un comportement viscoélastique, assure la cohésion de l'enrobé.



**Figure I.3.** Schématisation de la structure d'un enrobé bitumineux :  
Granulats (gris) – Liant (noir) – Vides (blanc) [1].

## I.2.1. Bitume

### I.2.1.1. Généralités sur les bitumes

Le bitume appartient à la famille des liants hydrocarbonés.

Les liants hydrocarbonés, qui jouent un rôle important dans la technique routière moderne, sont connus et utilisés depuis longtemps.

D'après Roberts et al (1991), le bitume naturel est l'un des plus anciens matériaux de construction. Il était déjà utilisé par les Sumériens (6000 av. J.-C.), par d'anciennes cultures de l'Inde (3000 av. J.-C.) et par les Égyptiens (2600 av. J.-C.) [cité dans 5].

Selon Lelièvre (1994), les bitumes naturels et les asphaltes ont été déjà utilisés en 3800 avant J.C. dans la vallée de l'Euphrate en Mésopotamie (actuellement Irak) [cité dans 6].

Un liant hydrocarboné est un matériau thermoplastique qui peut conserver ses propriétés après chauffage et adhérer à la majorité des matériaux. Il est insoluble dans l'eau mais soluble dans de nombreux solvants organiques (n-heptane, n-butanol, acétone...).

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés :

- Les liants naturels obtenus par broyage des roches asphaltiques qui sont dénommées Asphalte.

- Les bitumes qui sont obtenus par raffinage de résidus de pétrole brut.
- Les goudrons qui proviennent de la pyrogénéation à l'abri de l'air de la matière d'origine végétale.

En technique routière on n'utilise que les bitumes de pétrole brut.

Le bitume enrobe le squelette granulaire et confère la cohésion et l'imperméabilité des enrobés. Il contribue également à la rigidité et à la résistance aux déformations des enrobés bitumineux.

Selon Langlois et Coll (2001), le bitume doit avoir une cohésion minimale à haute température sinon il y aura de l'orniérage et du désenrobage et, le bitume doit garder une certaine élasticité à basse température sinon il se fissurera [cité dans 4].

### **I.2.1.2. Fabrication des bitumes**

Dans la fabrication des bitumes de spécifications données, il faut choisir un pétrole brut suffisamment lourd ; celui qui présente après distillation à la pression atmosphérique une quantité de résidus la plus importante. On connaît quatre méthodes de fabrication des bitumes, telles que présentées ci-après.

#### **I.2.1.2.1. Distillation**

C'est un procédé physique d'évaporation des constituants volatils où la phase vapeur est éliminée et condensée [7]. On distingue deux types de distillation :

##### **a) Distillation à la pression atmosphérique**

Ce mode de raffinage consiste à chauffer en continu par passage dans un four, le brut préalablement décanté et dessalé. Ce brut, porté à une température voisine de 340 °C, est envoyé dans une colonne de fractionnement maintenue à la pression atmosphérique. Le produit récupéré en fond de tour est le brut réduit.

Ce procédé est utilisé pour retirer les produits légers (essence, kérosène).

##### **b) Distillation sous vide**

A ce stade, le brut réduit provenant de la distillation atmosphérique est, après réchauffage aux alentours de 400 °C, envoyé dans une colonne où règne une pression réduite. Il est possible, dans ce type d'unité, de fabriquer directement toutes les classes de bitumes du 160/220 au 20/30 en fonction de l'importance du vide utilisé. Plus le vide utilisé est important plus le bitume est dur.

#### **I.2.1.2.2. Extraction (Désasphaltage)**

Le désasphaltage au solvant est employé comme un complément dans le raffinage des "bruts à huile". Il est le plus souvent pratiqué sur le fond de distillation sous-vide.

Les bitumes de désasphaltage sont en général susceptibles à la température et présentent une faible pénétrabilité. Ils sont obtenus par solubilité de fond de la distillation sous vide dans un solvant (le propane ou le butane). Le bitume ainsi obtenu est appelé bitume PPA (Propan-Precipited-Asphalt).

**I.2.1.2.3. Soufflage**

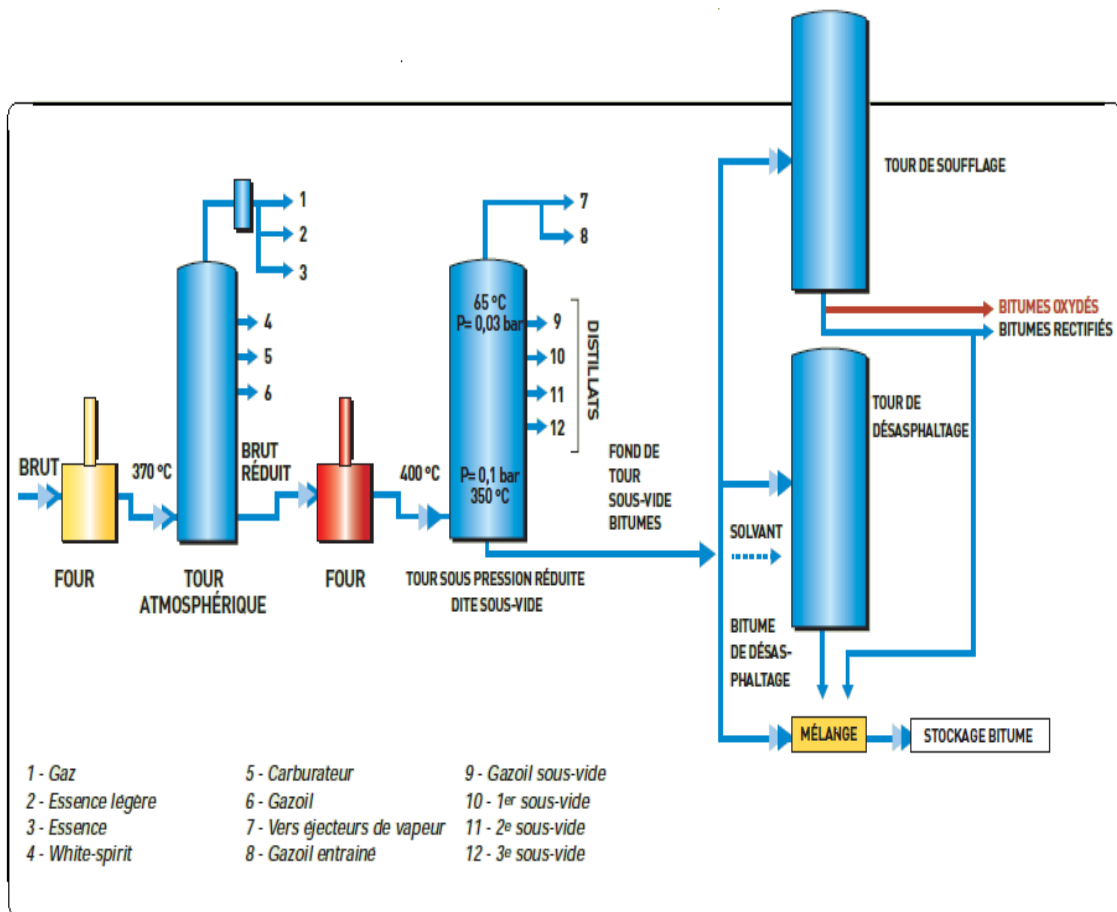
Ce procédé consiste à oxyder les résidus sous vide par soufflage d'air chaud à 250 °C pour obtenir des bitumes plus durs accompagnés d'une diminution de la susceptibilité thermique [3]. Dans la pratique on distingue :

- ❖ Le semi – soufflage : traiter un fond de colonne sous vide, trop mou pour en faire un bitume routier.
- ❖ Le soufflage : traiter une base plus complexe pour obtenir des bitumes industriels très peu susceptibles à la température.

En pratique le procédé de soufflage a été graduellement abandonné en raison de la plus grande fragilité des bitumes et de la susceptibilité plus élevée au vieillissement.

**I.2.1.2.4. Craquage**

Ce procédé consiste à craquer les grosses molécules des fractions lourdes pour former des fractions plus petites. On traite le fond de la colonne sous vide à des hautes températures comprises entre 450 et 500°C et à des pressions allant de 2 à 25 bars. Ces bitumes n'ont pas d'application routière.



**Figure I.4.** Principe de fabrication des bitumes

### I.2.1.3. Composition chimique et structure des bitumes

Les principaux constituants du bitume sont le carbone (79 à 88%) et l'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 (Fe, Ni, Mg, Co, ...) [8].

Les bitumes sont des mélanges complexes de composés hydrocarbonés. Ils ont des masses molaires et des structures chimiques variées. Il est possible de regrouper ces constituants en grandes familles chimiques, une fraction distillable, les maltènes et une fraction non-distillable, les asphaltènes.

**Les asphaltènes :** produit solide noir apportant au bitume sa cohésion et sa dureté. Ils représentent généralement moins de 30 % d'un bitume routier de distillation directe (sous vide), pratiquement insoluble. Leur masse molaire est estimée entre 800-4000 g/mol.

**Les maltènes :** la fraction soluble (masse molaire jusqu'à 1250 g/mol), produits huileux dans lesquels baignent les asphaltènes.

Des procédés (par exemple la chromatographie liquide, voir ci-après) permettent de fractionner les maltènes eux-mêmes en d'autres sous-familles:

- Les huiles saturées : Ces fractions sont incolores ou légèrement jaunâtres, dépassent rarement les 5 % massiques du bitume, ont de faibles masses molaires (autour de 600 g/mol).
- Les huiles aromatiques : Ce sont des huiles visqueuses, qui représentent en majorité environ 60 % du bitume. Elles ont une couleur rouge brun sombre, Leur masse molaire est autour de 800 g/mol.
- Les résines : Ce sont des solides noirs, leur rôle est de stabiliser la dispersion d'asphaltènes dans la matrice maltènes.  
Les asphaltènes ne diffèrent des résines que par leur insolubilité dans un hydrocarbure donné.

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 [7], (figure I.5).

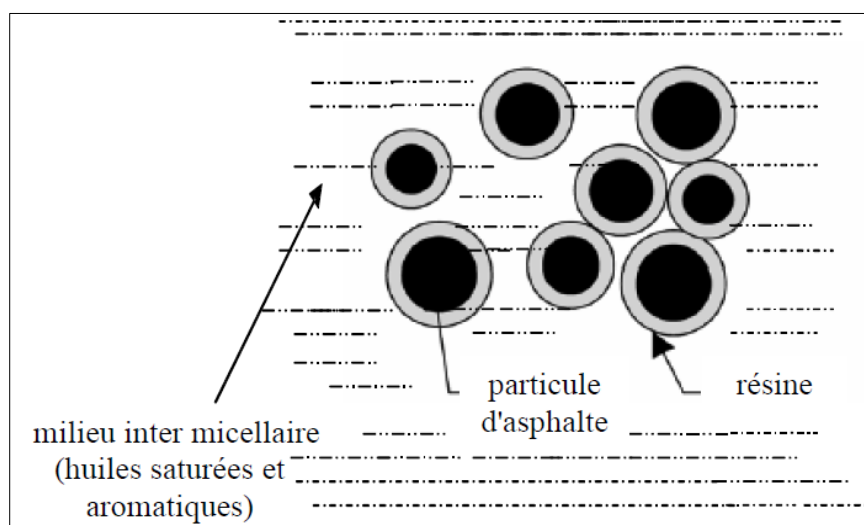
### I.2.1.4. Structure colloïdale du bitume

Nellenstein, a été le premier à proposer en 1924 pour le bitume, une structure colloïdale [cité dans 9].

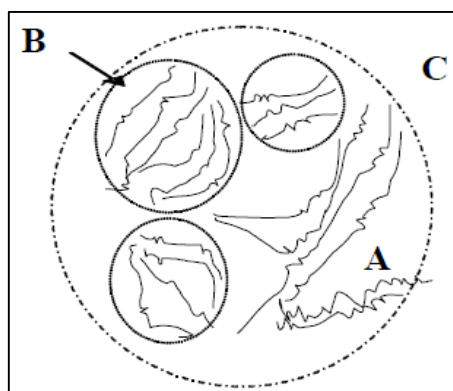
Les bitumes sont des composés thermoplastiques. Ils peuvent se comporter, soit comme des fluides newtoniens, soit comme des fluides non-newtoniens à caractère thixotropique ou pseudo-plastique [6].

En fonction de leur abondance, les molécules d'asphaltènes peuvent exister sous forme de micelles ou sous forme de paquets de micelles qu'on appelle agglomérats.

Le modèle de Yen représente les micelles d'asphaltènes [6], (Figure I.6).



**Figure.I.5.** Compositions chimique des bitumes.



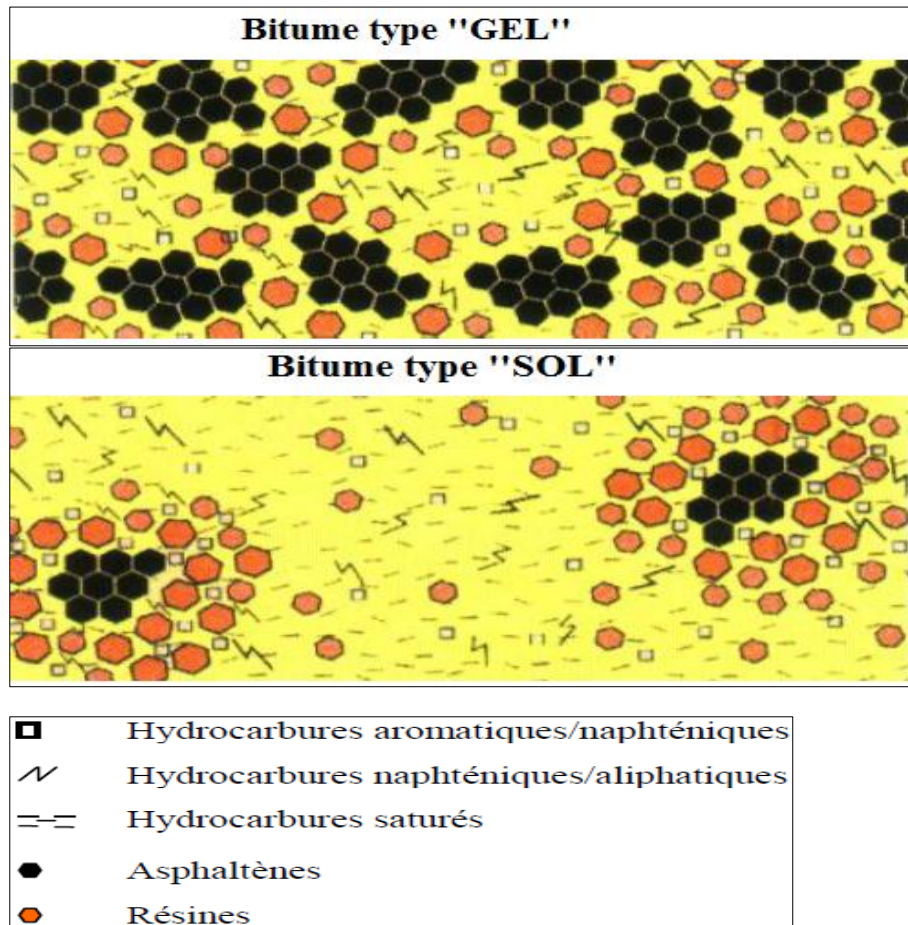
**Figure I.6.** Macrostructure des Asphaltènes selon Yen [6].

**A:** macromolécule, **B:** micelle, **C:** agglomérat

La structure colloïdale des bitumes peut être classée en trois types fondamentaux que Kolbanovskaja [10] a classés en fonction de la teneur relative des divers constituants.

- Structure "GEL" : Caractérisée par l'agglomération des micelles d'asphaltènes formant ainsi un réseau continu dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines. Les bitumes à structure "GEL" sont riches en asphaltènes et ont une phase maltènes pauvre en hydrocarbures aromatiques. Ils ont un comportement ELASTIQUE, (Figure I.7).
- Structure "SOL" : Caractérisée par la peptisation totale des micelles d'asphaltènes, par les résines. On obtient ainsi une solution diluée et bien stabilisée d'asphaltènes dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines. Ceci se rencontre dans les bitumes à phase maltène riche en aromatiques. Ces bitumes ont un comportement VISQUEUX (newtonien), (Figure I.7).
- Structure "SOL-GEL" : Caractérisée par des agrégats de micelles d'asphaltènes baignant dans un milieu dispersant structuré par les résines et

intermédiaire entre structure SOL et structure GEL. La majorité des bitumes routiers ont cette structure. Ils ont un comportement VISCOELASTIQUE.



**Figure I.7.** Schématisation de la structure colloïdale du bitume [9].

Brion 1984, a donné une composition chimique pour chacune des structures [cité dans 9], (Tableau I.1).

**Tableau I.1.** Différents type de structures des bitumes en fonction de leur composition générique.

Type de bitume	% Asphaltènes	% Résines	% Huiles saturées et aromatiques
<b>GEL</b>	>25	24	50
<b>SOL</b>	<18	36	48
<b>SOL-GEL</b>	21 à 23	30 à 34	45 à 49

Gaestel et Coll, ont établi une relation entre les principales propriétés rhéologiques des bitumes et l'indice d'instabilité colloïdale « IC » [cité dans 9].

$$IC = \frac{\text{Asphaltènes} + \text{floculant}}{\text{Péptisant} + \text{Solvant}} = \frac{\text{Asphaltènes} + \text{saturées}}{\text{résines} + \text{aromatiques}}$$

Plus la valeur de l'indice d'instabilité colloïdale est élevée, moins les asphaltènes sont peptisés dans la phase malténique et plus le bitume est de type gel et sa stabilité

colloïdale est médiocre. De même, un bitume avec un faible IC conduit à une structure plus homogène dont l'énergie de cohésion est plus grande [11].

#### **I.2.1.5. Caractérisation des bitumes**

Plusieurs types d'essais peuvent être utilisés pour caractériser les bitumes. Ils sont classés en trois catégories principales :

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

##### **I.2.1.5.1. Analyses physico-chimiques**

Un des objectifs des recherches concernant la caractérisation chimique ou physico-chimique des bitumes est l'établissement de relations entre les paramètres de composition, leur structure colloïdale et leurs propriétés technologiques [12]. Le fractionnement du bitume en entités aussi définies que possible permet de juger de l'influence relative des différentes fractions sur le comportement rhéologique du liant.

De nombreuses méthodes de séparation des bitumes en leurs principales familles ont été mises au point, en particulier par les laboratoires pétroliers. Ces méthodes comportent généralement deux étapes [13]:

- La première consiste à isoler les constituants les plus polaires, les asphaltènes, par précipitation à l'aide d'un hydrocarbure saturé de poids moléculaire faible, le plus utilisé étant l'heptane normal (n-heptane). La partie soluble constitue les "maltènes".
- La seconde étape consiste à séparer les maltènes en trois familles: saturés, aromatiques et résines. La méthode la plus utilisée est la chromatographie sur gel de silice ou d'alumine (Figure I.8). Le pourcentage de différentes familles dépend de l'origine, du mode de fabrication et du grade de bitume étudié.

Les principales méthodes utilisées pour caractériser les bitumes sont [13] :

- Précipitation dans des solvants sélectifs ;
- Fractionnement par chromatographie sur colonne ou sur baguette;
- Spectroscopie infrarouge (I.R);
- Diffraction des rayons X;
- L'ultracentrifugation;

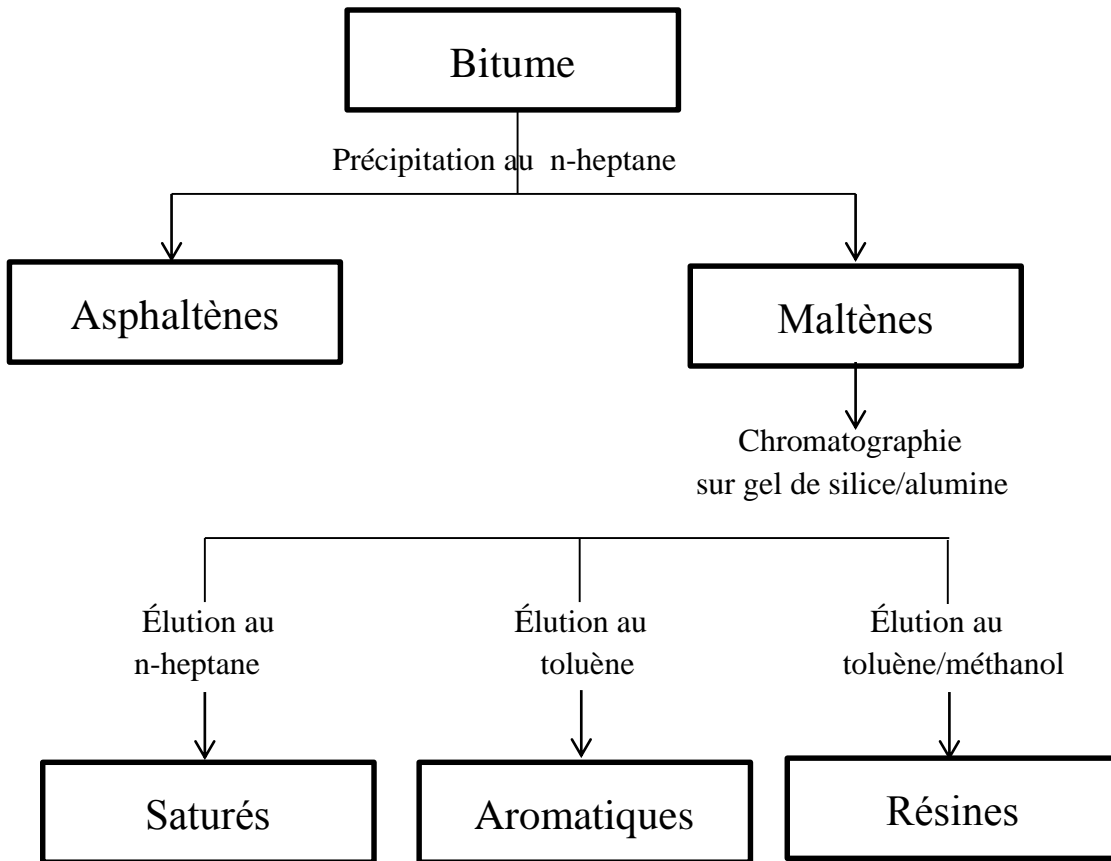
##### **I.2.1.5.2. Essais mécaniques**

Étant donné le changement de la consistance et des propriétés mécaniques en fonction de la température, des essais normalisés ont été mis au point dans chaque domaine de température afin de mesurer les caractéristiques des bitumes:

- dans le domaine fragile (élastique): le point de Fraass;
- dans le domaine viscoélastique: la pénétration à 25 °C;
- au début du domaine fluide: le point de ramollissement (température bille et anneau (T.B.A));

- dans le domaine fluide: la viscosité absolue à 60 °C et la viscosité cinématique à 135 °C.

Ces tests sont toutefois empiriques et ne donnent qu'une image indicative et grossière des propriétés des bitumes.



**Figure I.8.** Schéma de séparation chimique des constituants du bitume (fractionnement SARA) [14].

### 1) Essai de pénétrabilité à l'aiguille [NF EN 1426]

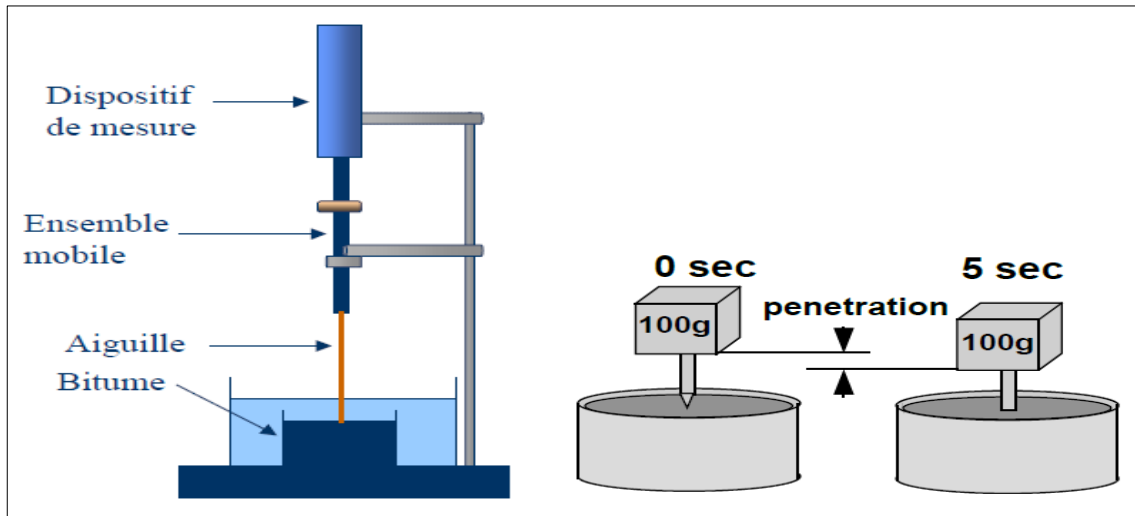
Les classes des bitumes sont définies par leur pénétrabilité à 25°C, la pénétration exprimée en 1/10 mm, d'une aiguille calibrée dans un échantillon de bitume maintenu à température constante sous une charge de 100 g pendant 5 secondes, (Figure I.9).

Les différentes classes correspondant à une gamme donnée de valeurs de pénétrabilité à 25°C :

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

Une des lacunes du test de pénétration est qu'il est limité quant à la plage de températures auxquelles il peut être utilisé (5 - 25 °C). Il n'y a pas de doute que les essais de rhéologie donnent une meilleure idée sur le comportement des bitumes car la plage totale des températures est alors de 60 °C. Cette plage permettra d'observer la

transition entre le bitume à l'état vitreux aux basses températures et le bitume à l'état fluide aux hautes températures [13].

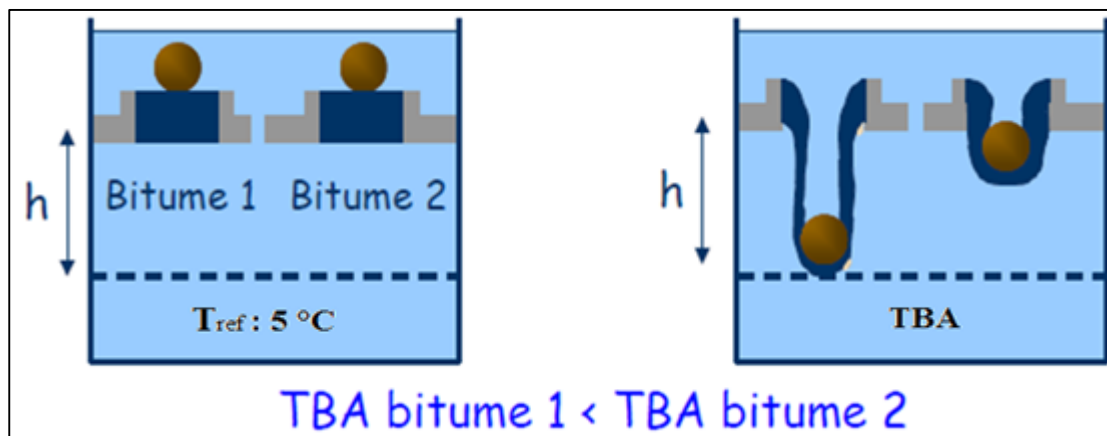


**Figure I.9.** Principe de l'essai de pénétrabilité pour le bitume.

## 2) Point de ramollissement Bille-Anneau [NF EN 1427]

C'est la température (notée TBA) à laquelle une bille d'acier calibrée s'enfonce d'une hauteur définie (25 mm) dans un anneau de bitume, (Figure I.10).

Selon Van der Poel, il s'agit d'une température correspondant à un module de 0,01MPa pour un temps de charge de 0,4s et une pénétration de 800 dixièmes de millimètre [cité dans 15].



**Figure I.10.** Détermination du point de ramollissement du bitume.

## 3) Susceptibilité thermique

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

Pfeiffer et Van Doormaal ont montré en 1936, l'existence d'une relation linéaire entre le logarithme décimal de la pénétration et la température [cité dans 14] :

$$\log(\text{pen}) = AT + C \quad (\text{I.1})$$

Où A est la susceptibilité thermique et C une constante.

La valeur de A est calculée à partir des mesures de pénétration à deux températures T1 et T2, la valeur de A varie entre 0.015 à 0.06.

$$A = \frac{\log[(pen\ T1)] - \log[(pen\ T2)]}{T1 - T2} \quad (I.2)$$

On définit l'indice de pénétabilité **IP**, qui va de -3.0 (bitumes très susceptibles) jusqu'à environ +7.0 (bitumes moins susceptibles) [15].

$$IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (I.3)$$

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

$$A = \frac{\log[(800)] - \log[(pen\ à\ 25°C)]}{TBA - 25} \quad (I.4)$$

- La méthode LCPC consiste à calculer l'indice de pénétabilité 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  $\text{Log}(\text{Pen}) = f(T)$ .

#### 4) Ductilité du bitume [EN 13589]

La mesure de la ductilité permet de s'assurer de la non fragilité du liant. L'essai consiste à mesurer l'allongement d'une éprouvette de forme déterminée, étirée à une vitesse de 50 mm/min, et à une température de 25°C, à l'instant de sa rupture, (Figure I.11).

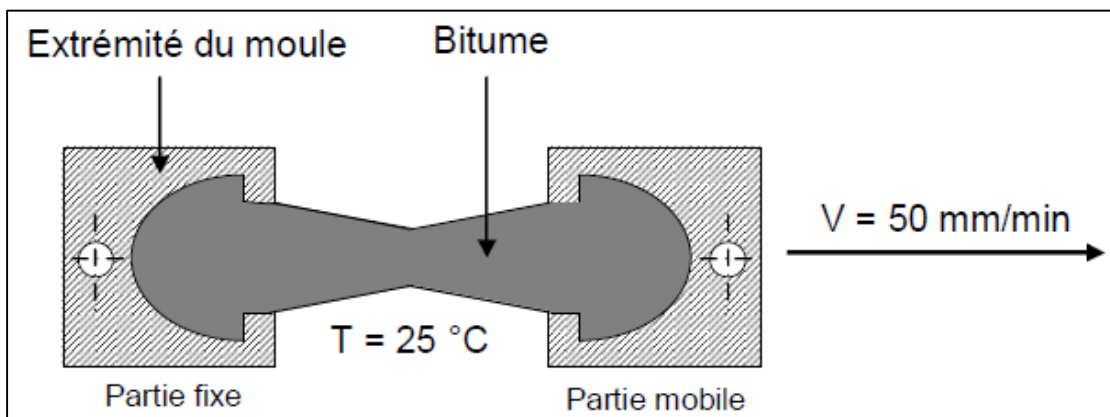
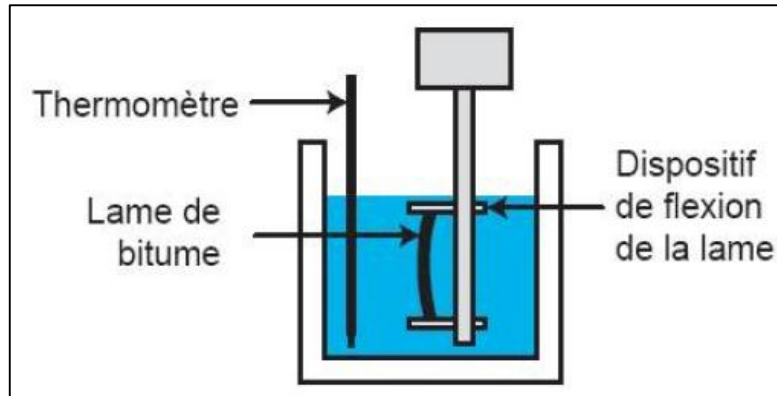


Figure I.11. Principe de l'essai de ductilité du bitume.

#### 5) Température de fragilité FRAASS [EN 12593]

Température à laquelle une pellicule de bitume de 0.5 mm d'épaisseur déposée sur une lame d'acier se fissure lorsqu'elle est soumise à des flexions répétées avec une diminution de 1°C/min [16], (figure I.12).



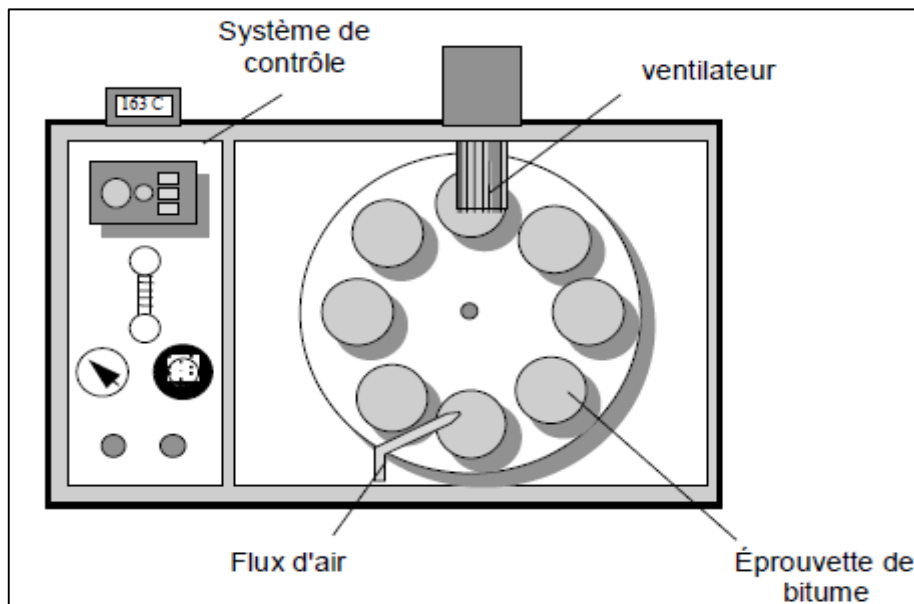
**Figure I.12.** Principe de l'essai de température de fragilité FRAASS.

#### 6) Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" [EN 12607-1]

Le RTFOT permet de caractériser le vieillissement des bitumes pendant la fabrication et la mise en place d'un enrobé bitumineux.

L'essai consiste à soumettre le bitume à une température de 163 °C, en l'exposant à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé, (Figure I.13).

On mesure ensuite la pénétrabilité et la température de ramollissement bille-anneau du liant vieilli dit après RTFOT, qui sont alors comparées aux valeurs initiales dites avant RTFOT.



**Figure I.13.** Principe de l'essai RTFOT.

#### Expression des résultats RTFOT :

On calcule les évolutions des caractéristiques physiques après la procédure de durcissement :

- Pénétrabilité restante à 25 °C en pourcentage :  $\frac{P_2}{P_1} \times 100$
- Variation de la température bille- anneau en °C :  $T_2 - T_1$

- Variation de la masse en % :  $\frac{M_2 - M_1}{M_1 - M_0} \times 100$

Avec

$P_1$  : Pénétrabilité avant durcissement

$P_2$  : Pénétrabilité après durcissement

$T_1$  : température bille- anneau avant durcissement

$T_2$  : température bille- anneau après durcissement

$M_0$  : Masse de la fiole

$M_1$  : Masse de la fiole plus bitume avant durcissement

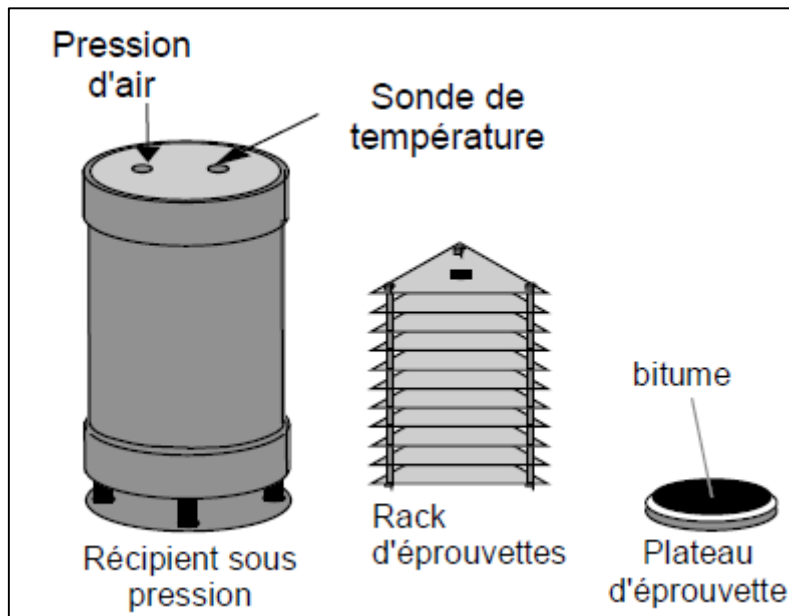
$M_2$  : Masse de la fiole plus bitume après durcissement

### 7) Essai PAV "Pressure Aging Vessel"

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

Les résidus de l'essai RTFOT chauffés et versés dans des plateaux métalliques, sont rangés dans un rack qui sera placé dans un récipient dans une enceinte thermique durant 20 heures à 100 °C et une pression d'air de 20 bars. Après, les plateaux d'éprouvettes sont placés dans un four à 163°C pendant 30 minutes, (Figure I.14).

On mesure ensuite la pénétrabilité et la température de ramollissement bille-anneau du liant vieilli dites après PAV, qui sont alors comparées aux valeurs initiales et après RTFOT.



**Figure I.14.** Principe de l'essai PAV.

Le tableau I.2 résume les spécifications sur les bitumes routiers, selon la norme NF EN 12591 (Décembre 1999).

Tableau I.2. Les spécifications des 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
Ductilité	cm	≥ 25	≥ 60	≥ 80	≥ 100	≥ 100

### I.2.1.5.3. Essais rhéologiques

Le bitume est sans doute celui qui a l'influence la plus nette sur les propriétés rhéologiques des enrobés [3].

Le bitume est un matériau viscoélastique dont les propriétés rhéologiques dépendent essentiellement de la température. Il peut se présenter sous les trois formes suivantes :

- un solide dur, fragile et cassant à basse température et à court temps de charge. Nous sommes alors dans la zone dite élastique.
- un liquide à température élevée et à long temps de charge. Il s'agit dans ce cas de la zone liquide a même quelquefois newtonienne.
- ni solide ni liquide à des températures et des temps de charge moyens. C'est la zone viscoélastique,

En rhéologie, un matériau élastique parfait sera symbolisé par un ressort de raideur «k», un matériau visqueux newtonien par un amortisseur de coefficient de viscosité «  $\eta$  », et un matériau viscoélastique faisant intervenir des éléments élastiques et purement visqueux.

L'une des particularités du programme de recherche américain SHRP (Strategic Highway Research Program) est de déterminer les propriétés des liants dans les conditions de température proches de celles observées in-situ. Cette approche est basée sur des essais en rhéologie dynamique pour caractériser le comportement viscoélastique aux températures hautes et intermédiaires de la chaussée.

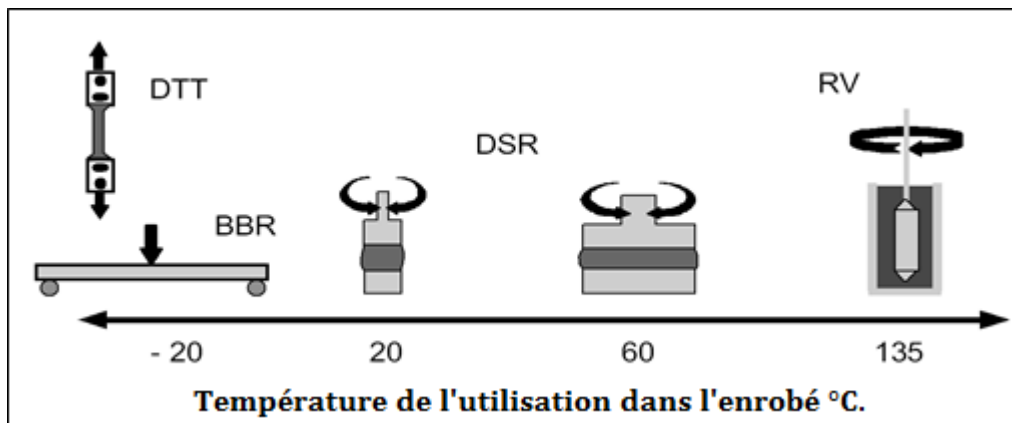
Ce qui a permis de proposer des critères, essentiellement d'origine rhéologique, pour fixer les limites d'utilisation en termes de températures (et de trafic) maximales et minimales admissibles pour un liant donné [17].

Quatre essais ont été choisis dans ce programme, ces essais sont présentés dans le tableau I.3.

**Tableau I.3.** Essais mécaniques du programme SHRP

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'utilisation de l'enrobé bitumineux et selon le phénomène à étudier.



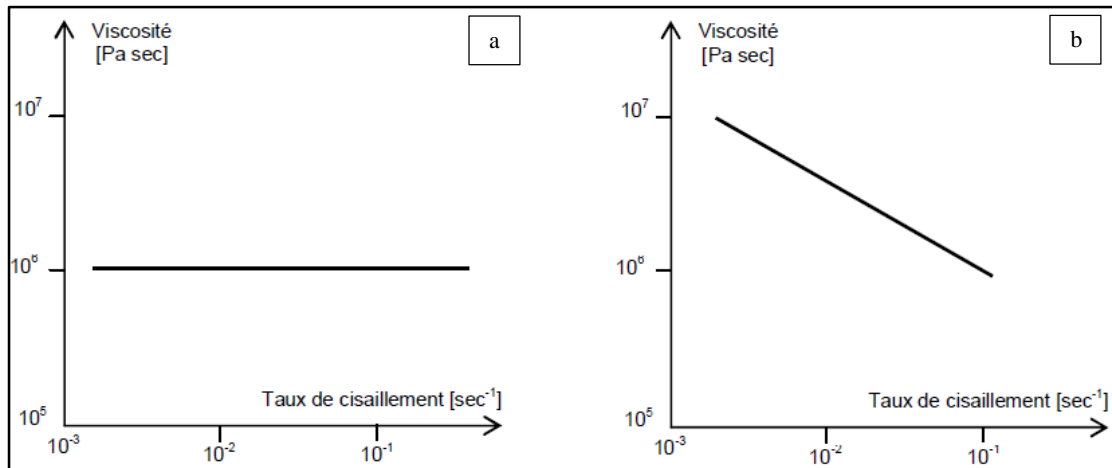
**Figure I.15.** Classement des essais mécaniques du programme SHRP [7].

### 1) Viscosité :

La viscosité d'un corps fluide est la résistance de ses molécules par le frottement interne. Elle est déterminée par la mesure du temps nécessaire à un volume fixé de liquide pour couler à travers le capillaire d'un viscosimètre à capillaire en verre étalonné à une température minutieusement contrôlée.

- viscosité cinématique: est une mesure de la résistance à l'écoulement d'un liquide sous l'effet de la gravité.
- viscosité dynamique : rapport entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse.

Un bitume a un comportement newtonien, lorsque sa viscosité est indépendante du taux de cisaillement. Si sa viscosité varie en fonction du taux de cisaillement le bitume est non-newtonien, (Figure I.16).



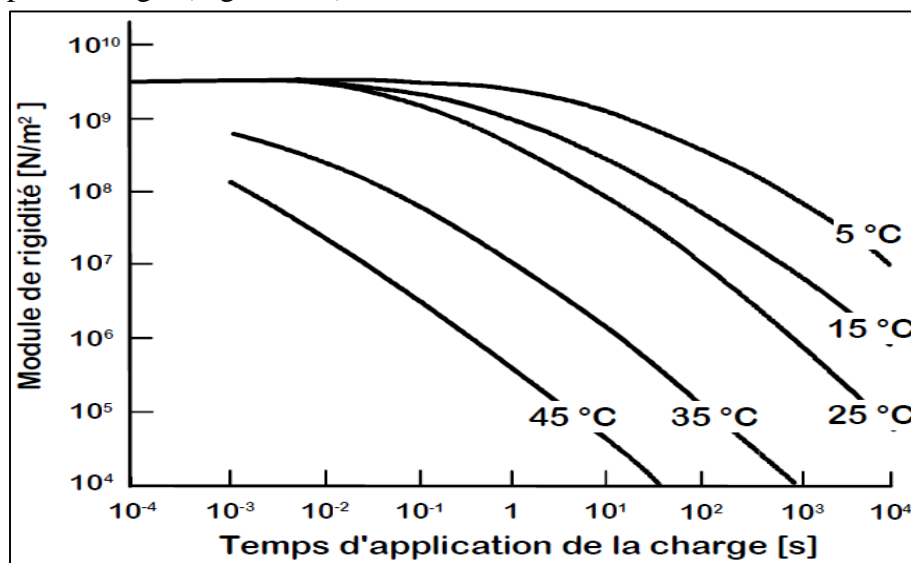
**Figure I.16.** Viscosité des bitumes (a. comportement newtonien, b. comportement non newtonien)

A matrice maltène égale, les deux compositions chimiques des bitumes qui influent sur la viscosité sont les asphaltènes et les résines.

- ❖ A température constante, la viscosité du bitume s'accroît lorsque la concentration en asphaltènes augmente dans une même matrice maltène.
- ❖ L'addition de résines durcit le bitume, accroît la viscosité et réduit l'indice de pénétrabilité et la susceptibilité au cisaillement.

## 2) Module de rigidité

Le module est le rapport de la contrainte à la déformation. Il est calculé pour chaque essai élémentaire. Il dépend étroitement de la température et du temps d'application de la charge. Grâce à l'équivalence temps-température, on trace la courbe maîtresse du module à une température donnée. Cette représentation permet de connaître le comportement du mélange sur un large spectre de temps de charge, (Figure I.17).



**Figure I.17.** Variation du module de rigidité en fonction du temps d'application de la charge et de la température.

➤ **Détermination du module de rigidité selon l'abaque de Van der Poel**

Van der Poel a établi sous forme d'abaques une correspondance entre les essais rhéologiques simples (Pénétrabilité, TBA, température de fragilité Fraass) et les niveaux des modules élastiques et des fréquences de sollicitation.

Van der Poel a constaté que le module de rigidité pouvait être défini en fonction des grandeurs suivantes :

- la consistance du bitume,
- la susceptibilité thermique du bitume,
- le temps de charge pour lequel se fait la détermination du module de rigidité
- la température à laquelle se fait la détermination du module de rigidité.

Le module de rigidité pourrait donc être estimé en introduisant dans le nomographe les informations suivantes :

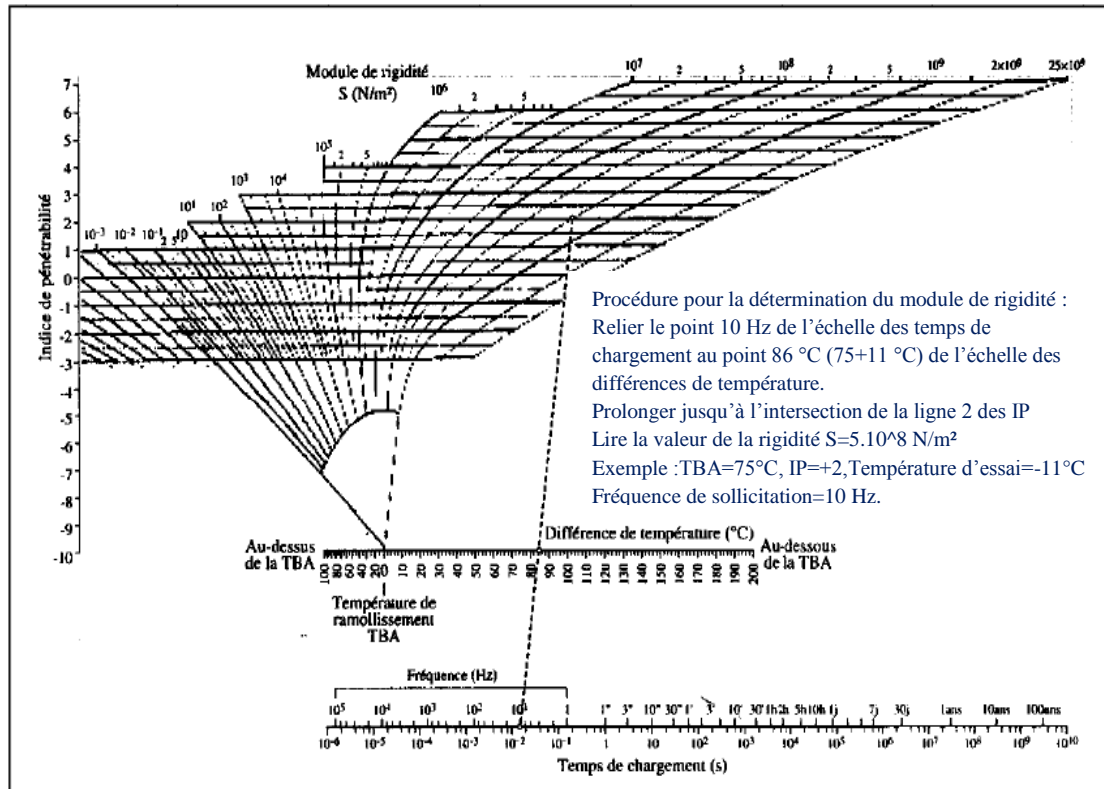
- Température
- Température de ramollissement bille et anneau
- Indice de pénétrabilité (IP)
- la durée d'application de l'effort.

La variation du module de rigidité des bitumes en fonction de ces trois paramètres a été traduite sous forme d'un abaque (figure I.18) d'utilisation très rapide.

Il ne prétend pas indiquer le comportement d'un bitume particulier, mais seulement le comportement moyen d'une variété donnée en fonction de la dureté et de l'indice IP. Ce moyen d'évaluation est utilisé seulement pour les applications routières traditionnelles aux bitumes simples [17] [11].

Les résultats de calcul du module de rigidité des bitumes purs et des bitumes modifiés par EVA à l'aide de nomographe de Van der Poel ont été trouvés similaires aux résultats de module de rigidité mesuré par l'essai de cisaillement dynamique (DSR), lorsque la température d'essai ne dépasse pas 25°C, et pour des faibles pourcentages de polymère (< 5% EVA) [18].

Plus généralement, la précision obtenue dans la détermination du module de rigidité à partir du nomographe est de l'ordre d'un facteur 2 (50%) [17][11].



**Figure I.18.** Nomographe de Van der Poel pour la détermination du module de rigidité d'un bitume [17].

## I.2.2. Granulats

### I.2.2.1. Généralités sur les granulats

Selon Roberts et al. (1991), les matériaux granulaires sont classés en trois groupes selon leur origine géologique : les roches ignées (ou magmatiques), les roches sédimentaires, et les roches métamorphiques [cité dans 5].

Il existe d'autres sources de matériaux granulaires dénommés artificiels, car ils sont des sous-produits de l'industrie [cité dans 5].

D'après Hunter, (2000), les principales caractéristiques des granulats pour l'utilisation dans la construction de routes sont: la ténacité, la résistance aux chocs, la dureté et la propreté [cité dans 5].

Pour la confection des enrobés bitumineux, les granulats les plus utilisés proviennent de la pierre concassée produite dans des carrières.

Les granulats sont répartis en différentes classes granulaires normées qui sont définies par le diamètre minimal et le diamètre maximal du granulat. Ainsi classés en fines, sables, gravillons, cailloux et graves.

Selon Krebs et Walker, (1971), la granulométrie, la résistance à la rupture, la résistance à l'attrition et la forme apportent principalement de la stabilité à l'enrobé. Par contre, la porosité et la nature de la surface du granulat sont importantes pour l'interaction granulat – bitume [cité dans 5].

### Les fines

Les fines (passants  $<$  à  $63 \mu\text{m}$ ) d'un mélange hydrocarboné sont généralement un mélange de fines d'apport en faible proportion et de fines de 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 [19].

### Les sables

Les sables pour enrobés sont des sables concassés. La courbe granulométrique d'un mélange avec un sable et des gravillons de provenances différentes peut alors présenter des anomalies (discontinuité ou bosse) [19].

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

### 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 (basaltes, 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-granat [19].

## I.2.2.2. Caractéristiques des granulats

### I.2.2.2.1. Granulométrie

Le granulat constitue le squelette granulaire de l'enrobé bitumineux pour lui garantir une compacité optimale.

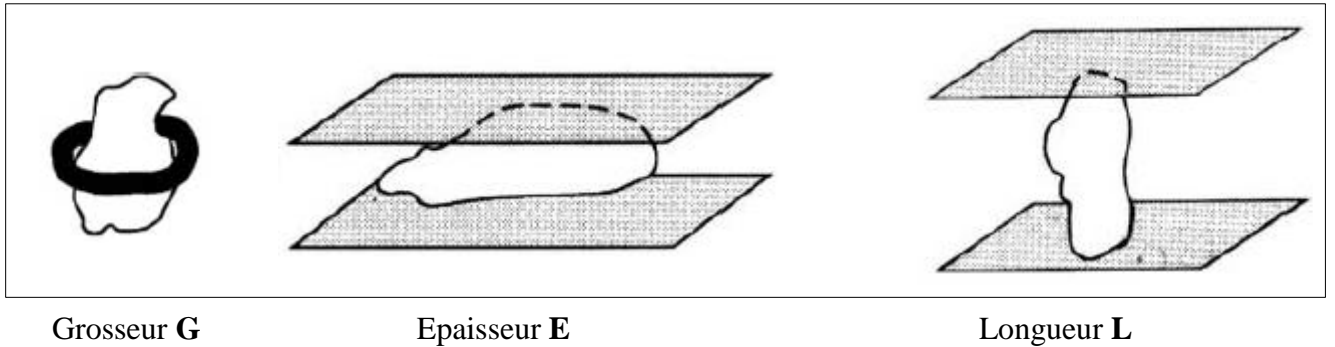
La courbe granulométrique du granulat traduit la répartition pondérale des grains. Elle doit présenter une courbe granulométrique qui doit passer par le fuseau granulométrique standard de l'enrobé à réaliser. Le fuseau est la zone délimitée par deux courbes granulométriques enveloppes.

### I.2.2.2.2. Forme des granulats

La forme des grains joue un rôle important pour les granulats de l'enrobé à réaliser (couche de roulement, couche d'assise), des granulats plats ou allongés réduisent la compacité et la stabilité du squelette granulaire.

La forme est explicitée par le pourcentage d'éléments plats tels que  $G/E > 1,58$ , (Figure I.19).

- ❖ La grosseur  $G$  : est le diamètre d'un anneau, dans lequel le granulat peut passer.
- ❖ L'épaisseur  $E$  : est la distance entre deux plans parallèles, les plus rapprochés possible l'un de l'autre.
- ❖ La longueur  $L$  : est la distance entre deux plans parallèles, les plus éloignés possible l'un de l'autre.



**Figure I.19.** Paramètres de forme des granulats

#### I.2.2.2.3. Angularité des granulats

L'angularité du granulat joue un rôle important. Elle améliore l'adhérence pour les gravillons de la couche de roulement, et améliore la stabilité pour les gravillons des assises de chaussée.

L'angularité est définie par les modes de fabrication du granulat. Elle est explicitée par deux paramètres :

- l'indice de concassage  $I_c$ , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension  $D_{max}$  du granulat élaboré.
- le rapport de concassage  $R_c$ , rapport entre  $d_{min}$  du matériau soumis au concassage et  $D_{max}$  du granulat obtenu.

#### I.2.2.2.4. Propreté

La qualité de l'adhésivité du bitume sur le granulat dépend de la propreté de la surface de chaque granulat ; une faible propreté diminue l'adhésivité du bitume.

La propreté est l'absence des éléments fins indésirables dans un granulat. Elle est mesurée par l'essai d'équivalent de sable et par l'essai au bleu de méthylène.

#### I.2.2.2.5. Composition et la nature minéralogique

La nature minéralogique des granulats influe sur leur adhésivité avec le bitume.

Les granulats qui possèdent des taux élevés de silices (les granulats siliceux) ne présentent généralement pas une bonne adhésivité contrairement aux granulats alcalins qui adhèrent mieux au bitume.

#### I.2.2.2.6. Résistance de la matrice rocheuse des granulats

##### 1) Susceptibilité à l'usure

Permet 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. Elle est mesurée par le Micro Deval en présence d'eau. Les critères de qualité concernant l'attrition sont donnés dans le tableau I.4.

**Tableau I.4.** Spécification de l'essai MDE

<b>MDE</b>	<b>Appréciations</b>
≤ 13	Très bon à bon
13 à 20	Bon a moyen
20 à 25	Moyen à faible
>25	Médiocre

### 2) Résistance à la fragmentation (chocs)

L'essai Los Angeles mesure la résistance à la fragmentation d'un granulat. Cet essai permet d'évaluer la performance d'un matériau soumis à des sollicitations comme le compactage, le transport, la mise en œuvre. Les critères de qualité concernant la fragmentation sont donnés dans le tableau I.5.

**Tableau I.5.** Spécification de Los Angeles

<b>LA</b>	<b>Appréciations</b>
≤ 15	Très bon à bon
15 à 25	Bon a moyen
25 à 30	Moyen à faible
>30	Médiocre

### 3) Résistance au polissage

L'essai permet de mesurer rapidement la résistance au polissage accéléré des granulats sous l'effet du trafic; c'est une caractéristique intrinsèque de granulats qui se mesure sur la classe granulaire 6,3/10 mm.

L'essai comprend deux phases successives :

- Une action de polissage dans une machine spéciale.
- La mesure de la rugosité de surface des gravillons au pendule de frottement.

Les critères de qualité concernant le polissage sont donnés dans le tableau I.6.

**Tableau I.6.** Interprétation de l'essai de polissage des granulats.

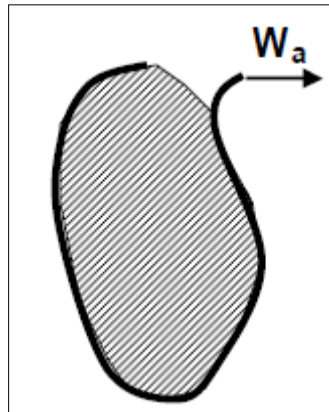
Coefficient de polissage	Appréciation	Interprétation
Inférieur à 0,35	Mauvais	En principe, un tel granulat ne doit pas être employé en couche de surface
Entre 0,35 et 0,45	Passable	Un tel granulat ne doit être utilisé que lorsque les conditions de tracé et de trafic sont favorables
Entre 0,45 et 0,55	Bon	L'utilisation d'un tel granulat est recommandée lorsque les conditions de tracé et de trafic sont défavorables (virages, carrefours, vitesses élevées, trafic intense)
Supérieur à 0,55	Très bon	

### I.2.2.3. Propriétés adhésives et cohésives

#### I.2.2.3.1. Propriétés adhésives

Le terme "adhésion" est utilisé pour représenter les forces ou le travail nécessaire à la rupture d'un film de bitume enrobant un gravillon.

L'adhésion dépend des forces intermoléculaires et interatomiques qui se développent au contact bitume-gravillon [6].



**Figure I.20.** Représentation schématique de l'énergie d'adhésion, bitume-gravillon.

Énergie d'adhésion  $W_a$  : énergie dépensée pour arracher un film de bitume fortement adsorbé sur la surface du granulat.

L'adhésivité peut être déterminée par :

- ❖ Un essai à la plaque Vialit (adhésivité active selon la méthode du LCPC).
- ❖ Un essai de désenrobage à l'eau (adhésivité passive).

Le changement de composition chimique des liants pendant le vieillissement, ainsi que la chimie de surface des granulats peuvent influencer sur la liaison entre le bitume et les granulats.

L'eau peut attaquer la liaison bitume-granulats par diffusion à travers le film de bitume et puis en atteignant la surface des granulats, ce qui provoque le phénomène de désenrobage.

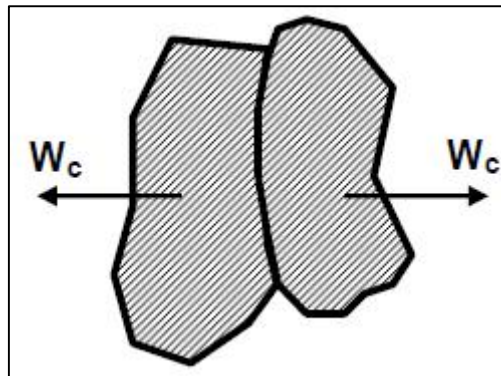
Pour améliorer l'adhésion du bitume aux granulats, on ajoute un dope d'adhésivité au bitume.

### I.2.2.3.2. Propriétés cohésives

La cohésion des bitumes est l'énergie nécessaire pour causer une rupture interne dans le liant, (Figure I.21).

Énergie de cohésion  $W_c$  : énergie dépensée pour décoller deux granulats unis par un film de bitume.

Il existe plusieurs méthodes de mesure de la cohésion, parmi lesquelles, deux sont mieux adaptées aux liants routiers: L'essai au mouton-pendule et le pelage.



**Figure I.21.** Représentation schématique de l'énergie de cohésion.

Les résultats ont montré que l'addition de polymères au bitume augmente la force de cohésion.

## I.3. Comportement des enrobés bitumineux [20]

L'enrobé bitumineux hérite des caractéristiques viscoélastiques du liant qu'il contient. Ses propriétés mécaniques dépendent de la durée de sollicitation (ou de sa fréquence) et de la température. Les enrobés entrent dans la catégorie des matériaux viscoélastiques et thermoplastiques.

Les matériaux bitumineux sont généralement considérés comme étant homogènes, isotropes, viscoélastiques, linéaires et thermo-susceptibles.

### I.3.1. Milieu continu

La structure composite grenue confère à l'enrobé utilisé couramment sur chaussées un caractère hétérogène, on peut néanmoins faire l'hypothèse d'homogénéité macroscopique à l'échelle d'une couche de chaussée.

### I.3.2. Isotropie

Le mode de mise en œuvre de l'enrobé sur chaussées (répandage du matériau foisonné par couche et compactage par passage successif de compacteurs à la surface) confère au matériau une certaine anisotropie (gradient de densité dans le sens de l'épaisseur de la couche, orientation privilégiée des grains par le compactage).

Dans les calculs de dimensionnement routier, on fait toutefois l'hypothèse d'isotropie du matériau.

### **I.3.3. Viscoélasticité**

Lorsque les charges sont appliquées très lentement, l'enrobé présente un comportement à prédominance fluide visqueux. Lorsqu'elles sont appliquées très rapidement, il présente un comportement pratiquement élastique. Entre ces deux cas de figure extrêmes, il présente un comportement viscoélastique dont la linéarité dépend du niveau de déformation.

### **I.3.4. Linéarité**

On considère que les enrobés bitumineux présentent un domaine de sollicitation pour lequel leur comportement est linéaire (figure I.23). C'est dans le domaine de linéarité que sont réalisées les mesures du module des matériaux bitumineux. Ceci nécessite d'appliquer des petites déformations.

Dans certains cas, on se contente de l'hypothèse d'élasticité linéaire pour décrire le comportement du matériau. Cette hypothèse est utilisée pour le calcul des contraintes et des déformations dans les couches bitumineuses, dans le cadre de dimensionnement des chaussées.

### **I.3.5. Influence de la température**

La température est un paramètre déterminant sur le comportement du matériau bitumineux. L'enrobé bitumineux est thermo-susceptible, c'est à dire que ses propriétés dépendent fortement de sa température.

A température basse, l'enrobé possède sous sollicitation usuelle (trafic routier) une rigidité élevée et il peut se montrer fragile.

A température élevée, il présente un module faible et une déformabilité importante. Ces propriétés peuvent être responsables du phénomène d'orniérage.

### **I.3.6. Phénomène de la fatigue des enrobés bitumineux**

Le phénomène de fatigue d'un matériau se caractérise par sa rupture après application répétée d'un grand nombre de sollicitations (en pratique supérieur à  $10^4$ ) dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture instantanée du matériau.

Les premières études fondamentales du phénomène de fatigue en laboratoire ont été entreprises en 1852 par WÖHLER sur les métaux [3].

L'essai classique, permettant de caractériser le phénomène de fatigue consiste à soumettre une éprouvette de matériaux à étudier à des sollicitations répétées et à noter le nombre de cycles entraînant la rupture de l'éprouvette, appelé "durée de vie".

La représentation classique des résultats de l'essai est la courbe de fatigue ou la courbe de WÖHLER est donnée dans la figure I.22. Cette courbe fait correspondre une durée de vie à la sollicitation exercée, qui peut être une contrainte ou une déformation imposée.

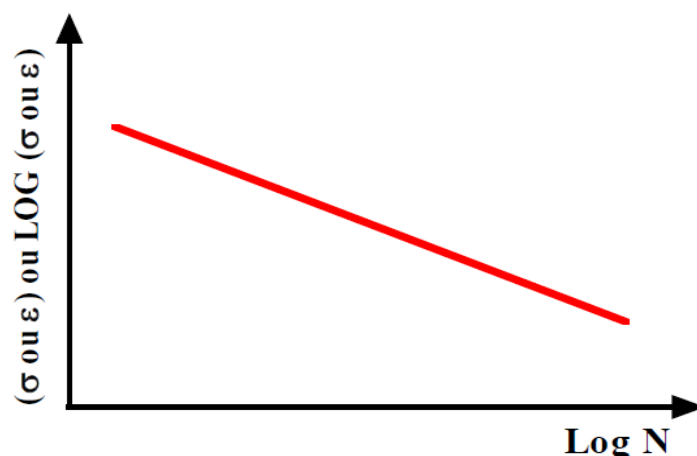


Figure I.22. Courbe de WÖHLER

La figure I.23 permet d’identifier les quatre types de comportement principaux des enrobés bitumineux en fonction du nombre N de cycle de chargements, (Di Benedetto, 1990) [cité dans 3].

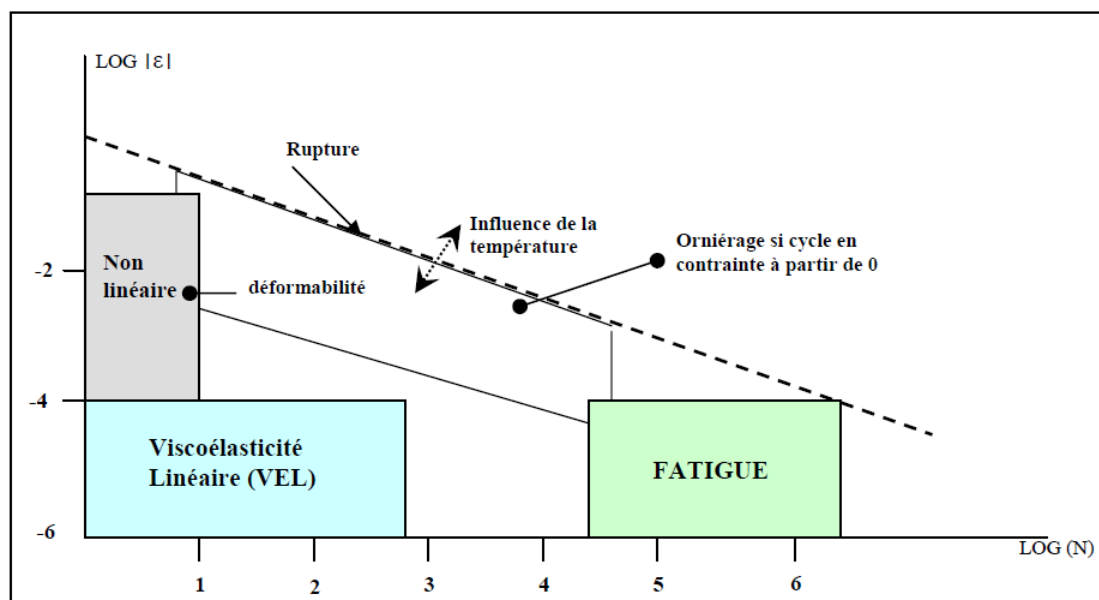


Figure I.23. Comportement “type” des bétons bitumineux, ( $\epsilon$ ) déformation – (N) nombre de chargements [3].

Le tableau I.7 résume le comportement des enrobés bitumineux selon la charge appliquée et la déformation, (D’après Di Benedetto, 1990) [cité dans 3].

Tableau I.7 Le comportement des enrobés bitumineux

Chargement appliqué	Déformation à la rupture	Comportement
Faible	Quelques pour-cent	Non linéaire
Quelques centaines de cycles	Faibles ( $<10^{-4}$ )	Viscoélastique linéaire
Plusieurs dizaines de milliers de cycles	Faibles	Fatigue
Cycles déviatoires en contrainte	Irréversibles, proche de la rupture	Orniérage

#### **I.4. Essais sur les enrobés bitumineux**

Les essais conduits sur les enrobés bitumineux peuvent être classés selon l'état de contrainte appliqué de l'éprouvette au cours de l'essai. Il y a les essais homogènes et les essais non-homogènes (Di Benedetto et De La Roche 1998) [cité dans 4].

Les essais homogènes ont également l'avantage de donner accès directement à la contrainte et à la déformation et donc aux propriétés mécaniques. Par contre, avec les essais non-homogènes, les propriétés rhéologiques sont obtenues grâce à l'utilisation de lois de similitude.

##### **I.4.1. Essai à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) [EN 12697-31]**

La presse à cisaillement giratoire permet de caractériser la compactibilité des enrobés hydrocarbonés, évaluer sa maniabilité et prévoir certaines difficultés de compactage sur chantier. Le compactage est obtenu en effectuant le nombre de girations désiré. La température de l'échantillon est ajustée en fonction du type de bitume utilisé.

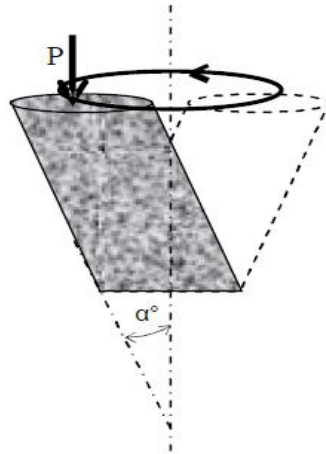
On applique sur le sommet d'une éprouvette une pression verticale. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1° et soumise à un mouvement circulaire (figure I.24). Ces différentes actions exercent un compactage par pétrissage simulant l'effet des compacteurs à pneus sur le chantier.

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.

L'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de girations. Cette courbe du pourcentage de vides en fonction du nombre de girations décrit la maniabilité du mélange, qui est utilisée comme critère de formulation des enrobés.

Le premier critère, fixé à 10 girations, requiert une quantité minimale de vides supérieure à un seuil de 11 %. Ce critère, que l'on appelle parfois « seuil d'estimation de la maniabilité », permet de s'assurer que le mélange n'est pas trop maniable. Ainsi, un mélange qui atteindrait de 4 % à 5 % de vides après seulement 10 girations serait jugé trop maniable et sujet à l'orniérage.

Le second critère, fixé entre 60 et 120 girations selon les types d'enrobés, requiert une quantité de vides comprise dans une fourchette variant de 4 % à 9 %. Ce critère permet d'assurer que le mélange est suffisamment imperméable (9 % maximum) pour être durable, sans toutefois être trop maniable (4 % minimum) et être ainsi sujet à l'orniérage.

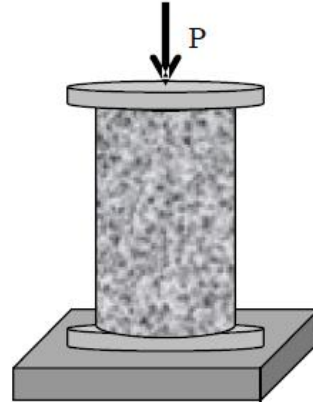


**Figure I.24.** Principe du compactage à la presse à cisaillement giratoire PCG

#### I.4.2. Essai de la tenue à l'eau (Duriez) [EN 12697-12]

Un ensemble de corps d'épreuve cylindriques est divisé en deux lots équivalents et mis en conservation. Un lot est conservé à sec à 18 °C et 50 % d'humidité, tandis que l'autre est saturé d'eau et conservé dans un bain à 18 °C. Après conservation, la résistance à la compression de chacun des deux lots est déterminée à 18 °C, (figure I.25).

Le rapport entre la résistance à la compression du lot conservé dans l'eau et celle du lot conservé à sec exprimé en pourcentage donne la tenue à l'eau du mélange.



**Figure I.25.** Principe de l'essai Duriez

#### I.4.3. Essai Marshall [EN 12697-34]

Les éprouvettes doivent être compactées, en ayant appliqué 50 coups sur chaque face.

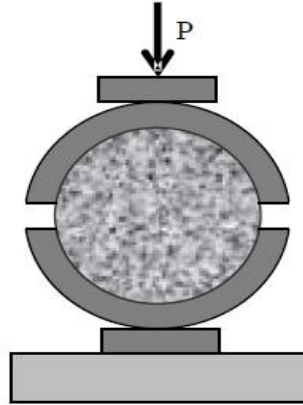
Ces éprouvettes sont placées entre les deux mâchoires semi-cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse constante à 60°C. Les éprouvettes sont conservées au préalable pendant 30 à 40 minutes dans un bain marie à 60°C; (figure I.26).

Au cours de l'essai, la charge et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture. Il conduit à la détermination directe de deux grandeurs : le fluage (mm) et la stabilité Marshall (kN),

**Stabilité S** : résistance maximale à la déformation, d'une éprouvette moulée d'enrobé, en (kN),

**Fluage F** : déformation d'une éprouvette moulée à la charge maximale, en (mm)

**Quotient Marshall** : rapport,  $S/F$ , entre la stabilité S, et le fluage F.

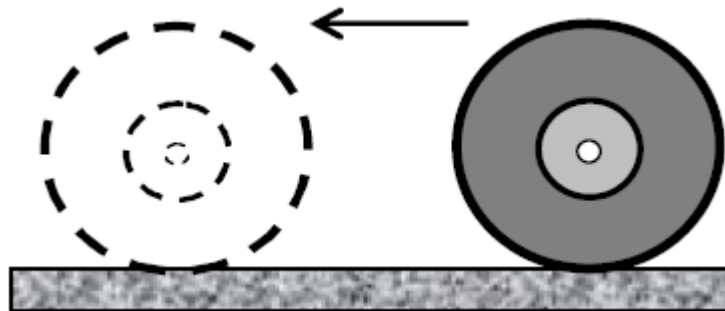


**Figure I.26.** Principe de l'essai Marshall

#### I.4.4. Essai d'orniérage [EN 12697-22]

La masse d'enrobé est compactée dans un moule parallélépipède; à l'aide d'une charge réglable entre (1 et 10 kN) appliquée par une ou plusieurs roues équipées de pneumatiques, qui exécutent des passes à vitesse constante parallèlement à l'axe de la plaque selon un plan de balayage spécifié (figure I.27).

La profondeur de la déformation produite dans le passage de 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 I.27.** Principe de l'essai d'orniérage

#### I.4.5. Essais de module [EN 12697-26]

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

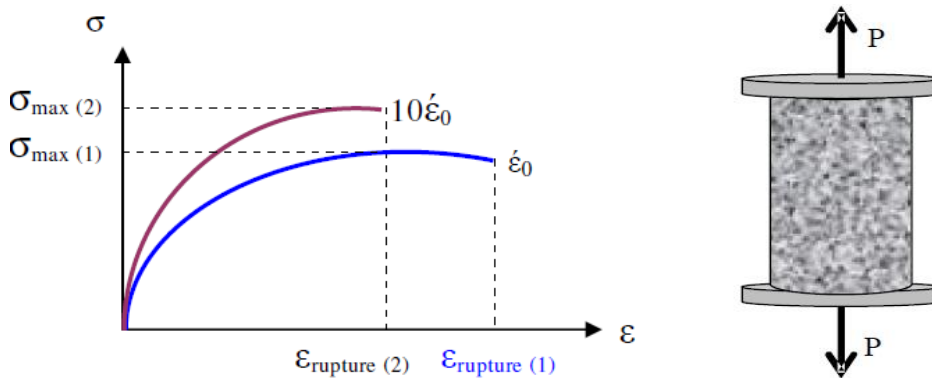
La rigidité du mélange est déterminée soit par un essai de module complexe (solicitation sinusoïdale sur éprouvette trapézoïdale) soit par un essai de traction directe ou indirecte (sur éprouvette cylindrique ou parallélépipédique).

#### I.4.5.1. Essai de traction directe [EN 13286-40]

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, la déformation et la température à l'instant  $t$ .

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

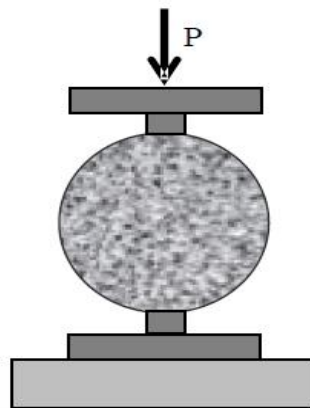
Plus la vitesse de déformation imposée est élevée, plus l'enrobé a un comportement rigide (contrainte maximale plus élevée) et plus l'allongement à la rupture est faible ; (Figure I.28).



**Figure I.28.** Résultats classiques pour l'essai de traction directe sur enrobé [21].

#### I.4.5.2. Essai de traction indirecte (compression diamétrale) [12697-23]

La résistance à la traction indirecte, est la résistance maximale (calculée) à la traction d'une éprouvette cylindrique sous chargement diamétral jusqu'à rupture, à une température d'essai spécifiée et à une vitesse de déplacement spécifiée de la presse d'essai. Les grandeurs mesurées au cours de l'essai sont la variation de diamètre de l'éprouvette et la force d'application. On déduit par calcul le module de déformation et la résistance à la traction indirecte du matériau.



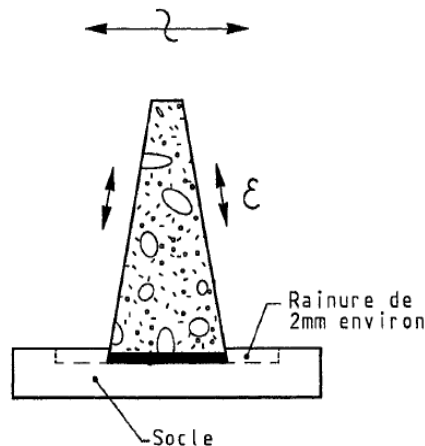
**Figure I.29.** Principe de l'essai de compression diamétrale

### I.4.5.3. Essai de Module complexe [NF EN 12697-26]

Le module complexe est un nombre complexe qui est le rapport entre une contrainte et une déformation relative complexes d'un mélange hydrocarboné dont le comportement est considéré comme viscoélastique linéaire.

L'éprouvette est sollicitée sinusoïdalement en tête, pendant un temps minimal de 30 s et maximal de 2 min par une flèche imposée  $Z = Z_0 \sin \omega t$  correspondant à une déformation relative inférieure à  $50 \times 10^{-6}$ , (Figure I.30).

L'essai est réalisé dans une enceinte thermostatique ventilée permettant de fixer la température pendant toute la durée des essais. Les forces, les flèches et l'angle de déphasage sont mesurées en tête d'éprouvette à l'aide de capteurs.



**Figure I.30.** Principe de l'essai de module complexe.

L'essai de module complexe sur éprouvettes trapézoïdales constitue l'un des essais de base pour la caractérisation des matériaux bitumineux routiers. Ce module complexe est le module exigé par les normes produits puisqu'il décrit mieux le comportement viscoélastique de l'enrobé à une température donnée.

La corrélation publiée en 2005 dans le Revue Générale des Routes et Aéroports (RGRA) entre les deux essais de module [67], l'essai de module complexe sur éprouvettes trapézoïdales et l'essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques est donnée par la relation suivante:

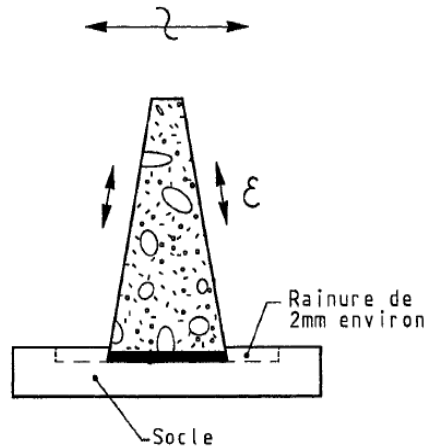
$$E^* = 0.759 E (\text{indirect}) + 3680 \text{ [MPa]} \quad (\text{I.5})$$

### I.4.6. Essai de fatigue (flexion en deux points) [EN 12697-24]

L'essai permet de caractériser le comportement des mélanges bitumineux en fatigue sous chargement à déplacement imposé par flexion en deux points, en utilisant des éprouvettes de forme trapézoïdale (*On peut utiliser la même éprouvette de l'essai de module complexe, car l'essai de module est non destructif*). Lorsque la contrainte appliquée pour maintenir la déformation constante est diminuée de moitié, l'éprouvette est considérée comme endommagée au nombre de cycles considéré.

A  $10^6$  cycles, le seuil de chargement relevé sur la droite est la valeur caractéristique de la résistance en fatigue dite : «  $\epsilon_6$  ».

La droite de fatigue doit être tracée en fonction des différentes amplitudes de déplacement auxquelles les essais élémentaires pour un mélange ont été faits. La déformation  $\varepsilon_6$ , et la pente de la droite de fatigue  $1/b$  doivent être déterminées à partir de cette courbe.



**Figure I.31.** Principe de l'essai de fatigue.

### I.5. Conclusion

Dans ce chapitre consacré aux enrobés bitumineux, on a passé en revue les aspects fondamentaux du matériau. On a présenté :

- Les différents constituants des enrobés bitumineux tels que le bitume, les granulats.

Le bitume a un comportement complexe, l'aspect viscoélastique assure la cohésion de l'enrobé.

Le comportement physico-chimique de bitume est influencé par deux types de paramètres à savoir :

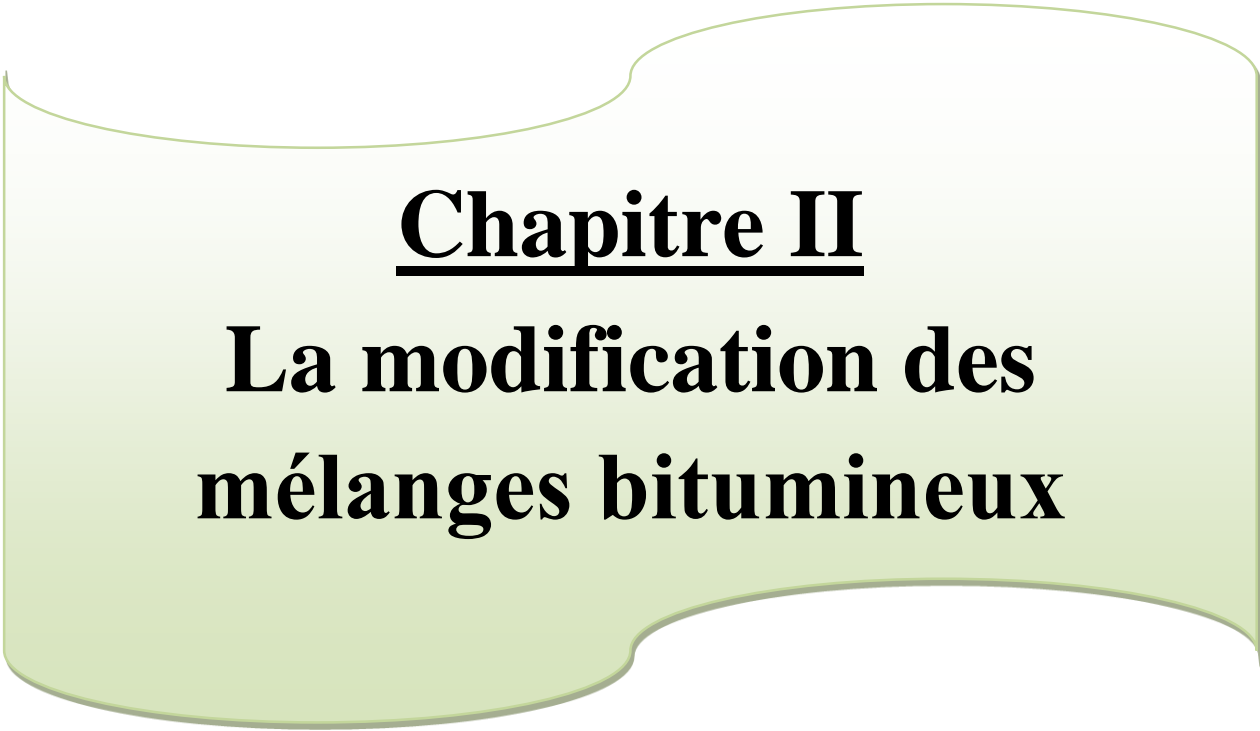
- ❖ Des paramètres internes, tels que son origine, sa composition générique... etc.
- ❖ Des paramètres externes, tels que la température, le taux de vieillissement, la fabrication...etc.

Les granulats qui ont un comportement élastique forment le squelette de l'enrobé, plusieurs paramètres de granulat influent sur les mélanges bitumineux.

- ❖ La granulométrie, la résistance à la rupture, la résistance à l'attrition et la forme apportent principalement de la stabilité à l'enrobé.
- ❖ La porosité et la nature de la surface du granulat sont importantes pour l'interaction granulat – bitume.
- Le comportement des enrobés bitumineux.

On a passé en revue les différents essais réalisées sur les enrobés.

Les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux dépendent de la durée de sollicitation et de la température. Ils entrent dans la catégorie des matériaux viscoélastiques et thermoplastiques



**Chapitre II**  
**La modification des  
mélanges bitumineux**

## Chapitre II : La modification des mélanges bitumineux

### II.1. Introduction

L'accroissement du trafic poids lourds, induit un risque accru d'orniérage des chaussées bitumineuses. 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. L'utilisation d'un bitume de grade plus dur, s'il apporte à l'enrobé un meilleur comportement à l'orniérage, accroît à l'inverse les risques de fissuration.

Pour garantir des chaussées durables, on doit avoir un bitume qui soit : pompable et maniable lors de sa mise en œuvre, et suffisamment rigide aux températures élevées de service pour maintenir le squelette granulaire et limiter le fluage des enrobés, permettant d'éviter ainsi le phénomène d'orniérage qui se manifeste typiquement autour de 50°C, selon le trafic et le climat. Il doit aussi être suffisamment mou aux basses températures de service pour permettre aux contraintes de se relaxer et résister ainsi à la fissuration par fatigue ou de retrait thermique [22].

Pour améliorer les performances de ces liants, on fait donc appel à des techniques de modification. À cet effet, les chercheurs se sont fixés comme objectif de trouver des additifs plus performants, moins coûteux et facile à incorporer dans des matrices bitumineuses.

Le développement significatif des liants modifiés ou comportant des additifs, avec des processus industrialisés et maîtrisés remonte aux années 70 [17].

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 [7].

En Allemagne, des applications d'enrobés au bitume-polymère voient le jour au début des années 70 [7].

On présente dans ce chapitre un aperçu sur le processus de modification des enrobés en mettant en avant les avancées réalisées dans ce domaine.

### II.2. Objectifs de la modification

Le bitume est dur et fragile en environnements froids et mou et fluide dans les environnements chauds ; une des nombreuses manières de durcir le bitume est de le mélanger avec des polymères synthétiques [23].

L'objectif de la modification est de produire un liant idéal, qui devrait avoir une cohésivité et une adhésivité améliorées et une susceptibilité thermique très faible dans toute la plage des températures d'utilisation [13]. Les résistances à la déformation permanente, à la rupture et à la fatigue devraient être fortes, alors que la susceptibilité aux temps de charge devrait être faible [6].

Les objectifs de la modification dépendent aussi des domaines d'application et des techniques projetées.

Pour atteindre des performances améliorées pour les enrobés bitumineux, diverses méthodes ont été mises au point et différents types d'additifs ont été testés.

Les polymères sont parmi les additifs qui ont montré leur apport plus ou moins bénéfique sur le comportement rhéologique des bitumes.

La modification du bitume peut être obtenue avec d'autres agents modifiants que les polymères de synthèse. Il s'agit notamment de la poudrette de caoutchouc et des latex. Il faut par ailleurs noter que des déchets de produits polymériques sont fréquemment utilisés comme la poudrette de caoutchouc de pneus usés et les polymères provenant des déchets municipaux comme le polyéthylène et le polypropylène [17].

**II.3. Généralités sur les polymères**

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs et « meros » parties, soit « plusieurs parties » ou « plusieurs unités ».

On appelle polymère une grande molécule constituée d'unités fondamentales appelées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes [24].

Un monomère est une molécule composée principalement de carbone et d'hydrogène, pouvant réagir avec d'autres monomères pour donner un polymère. Contrairement au polymère, un monomère a une faible masse moléculaire.

Exemple d'un polymère de type : polyéthylène glycol

- L'unité du polymère. CH<sub>2</sub>-CH<sub>2</sub>
- Monomère HO-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-OH Éthylène glycol
- Dimère HO-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-O-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-OH Di éthylène glycol
- Polymère OH-(O-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-O-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-O-CH<sub>2</sub>CH<sub>2</sub>-O) n-OH polyéthylène glycol

Le tableau II.1 résume quelques types des polymères utilisés

**Tableau II.1.** Exemples des polymères usuels

Monomère	Polymère	Quelques usages
Ethylène CH <sub>2</sub> =CH <sub>2</sub>	Polyéthylène - CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> - CH <sub>2</sub> -CH <sub>2</sub> -	Emballages, sacs poubelle, bouteilles, bassine
Styrène CH=CH <sub>2</sub>	Polystyrène - CH <sub>2</sub> -CH- CH-CH <sub>2</sub> -	Emballage, plaques isolantes
Chlorure de vinyle CH <sub>2</sub> =CHCl	polychlorure de vinyle (PVC) CH <sub>2</sub> -CHCl- CH <sub>2</sub> -CHCl-CH <sub>2</sub> -CHCl	Tuyaux, disques, bouteilles d'eau

La polymérisation est la réaction qui, à partir des monomères, forme en les liants des composés de masse moléculaire plus élevée, les polymères ou macromolécules [24].

Un homopolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères tous identiques.

Un copolymère est un polymère qui comporte des motifs monomères de deux ou plus sortes différentes.

### II.3.1. Structure des polymères [24]

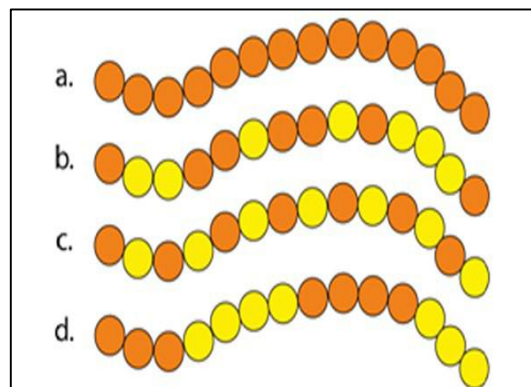
Les polymères peuvent présenter des architectures extrêmement variables. Ils peuvent être linéaires, ramifiés ou réticulés. Le plus souvent, ils sont amorphes, parfois ils peuvent être, au moins partiellement cristallisés.

#### II.3.1.1. Polymères linéaires

Les polymères linéaires sont constitués de grandes chaînes de monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes.

Les polymères sont liés entre eux par des liaisons secondaires qui assurent la stabilité du polymère. Ces liaisons secondaires sont des liaisons ou ponts hydrogène ou des liaisons de Van der Waals. Lorsque ces liaisons existent, le matériau devient rigide et présente un comportement de solide.

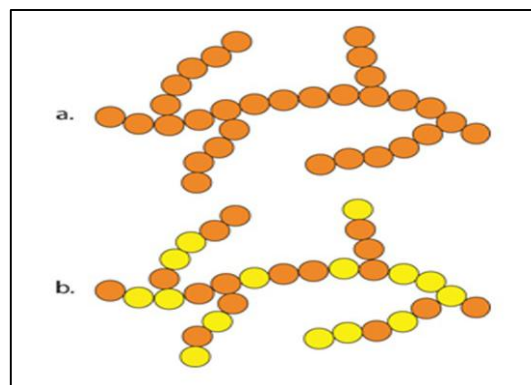
Si la température s'élève, l'agitation moléculaire qui en résulte va rompre progressivement ces liaisons secondaires. Le matériau va pouvoir s'écouler sous son propre poids : il présente alors le comportement d'un liquide visqueux. La figure II.1 donne différents exemples de polymères linéaires.



**Figure II.1.** Polymères linéaires (a: homopolymère, b: copolymère statistique, c: copolymère alterné, d: copolymère séquencé) [24].

#### II.3.1.2. Polymères ramifiés

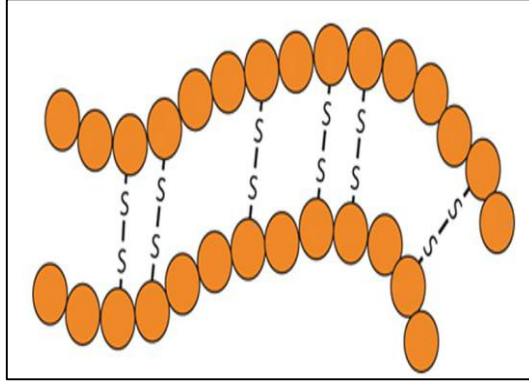
Des chaînes homopolymériques ou copolymériques peuvent se greffer sur d'autres chaînes au cours de la polymérisation, (Figure II.2).



**Figure II.2.** Homopolymère ramifié (a) et copolymère ramifié (b).

### II.3.1.3. Polymères réticulés

La réticulation correspond à la formation de liaisons chimiques suivant les différentes directions de l'espace au cours d'une polymérisation et qui conduit à la formation d'un réseau, (Figure II.3).

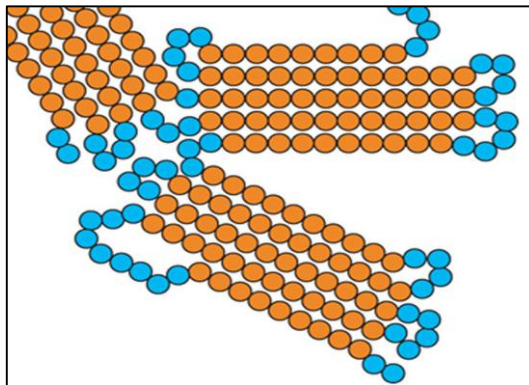


**Figure II.3.** Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.

### II.3.1.4. Polymères amorphes et polymères cristallisés

Les chaînes macromoléculaires peuvent être organisées de façon aléatoire dans l'espace et constituer ainsi une phase amorphe. La phase amorphe est, en théorie équivalente à un liquide « figé ».

Dans un polymère, les deux états ordonné et désordonné peuvent exister dans un même matériau qui est alors de nature semi-cristalline, (Figure II.4).



**Figure II.4.** Représentation schématique d'un polymère semi-cristallisé

### II.3.2. Principaux groupes de polymères

Les principaux groupes de polymères utilisés pour la modification des bitumes sont les suivants [6]:

- Polymères thermoplastiques.
- Polymères thermodurcissables.
- Caoutchoucs naturels et synthétiques.
- Caoutchoucs thermoplastiques.

### II.3.2.1. Polymères thermoplastiques

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

Les polymères thermoplastiques sont subdivisés en deux familles: les élastomères et les plastomères qui se distinguent, aux températures d'usage, par des comportements différents du point de vue de leur rigidité, de leur déformabilité et de leur résilience.

#### II.3.2.1.1. Elastomères

L'utilisation des élastomères thermoplastiques pour la modification de bitume continue à se développer rapidement. Ces matériaux se comportent en tant que polymères linéaires pendant le traitement chaud et en tant que caoutchoucs vulcanisés aux températures ambiantes. Ils résistent également bien à l'oxygène et au rayonnement solaire; donc au vieillissement naturel.

Parmi les polymères thermoplastiques élastomères, on distingue

- Les copolymères Styrène-isopropène-styrène (SIS)
- Les copolymères Styrène-Butadiène (SB)
- Les copolymères Styrène-Butadiène-Styrène (SBS)

La modification des bitumes par les « SBS » :

- Diminue la susceptibilité thermique,
- Augmente la cohésion,
- Améliore le comportement rhéologique des bitumes.

#### II.3.2.1.2. Plastomères [6,7]

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, par contre ils peuvent se séparer pendant le chauffage [25]. Les principaux polymères de ce groupe sont 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).

L'éthylène acétate de vinyle (EVA) est largement utilisé dans la modification des bitumes. Ce type de polymère est facilement dispersé dans le bitume et il a une bonne compatibilité avec la majorité des bitumes disponibles, il est thermiquement stable avec l'utilisation de simple procédure de modification [25].

L'addition d'EVA au bitume :

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

#### II.3.2.2. Polymères thermodurcissables [6,7]

Le chauffage ultérieur de polymères thermodurcissables conduit à leur dégradation thermique et non au ramollissement, ils durcissent de façon irréversible avec la possibilité de traitement à l'état visqueux.

Les produits les plus connus sont basés sur des résines, 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. Quand les deux composants (résine et durcissant) des résines thermodurcissables se mélangent, le bitume modifié devient très résistant aux attaques des produits chimiques, notamment des solvants et des fuels. 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 pour couvrir des aires spéciales des aéroports et des ponts.

### **II.3.2.3. Caoutchoucs naturels et synthétiques [6]**

Le caoutchouc naturel est susceptible à la décomposition et à l'oxydation. Il possède un poids molaire trop élevé pour être directement dissous dans le bitume. Il doit être partiellement décomposé et mécaniquement homogénéisé.

Les caoutchoucs naturels et synthétiques sont mieux dispersés sous forme de latex.

Les principaux polymères de ce groupe sont le polybutadiène, le polyisoprène, le butyle caoutchouc, le styrene butadiene rubber (SBR) et le polychloroprène.

### **II.3.2.4. Caoutchoucs thermoplastiques**

Les caoutchoucs thermoplastiques forment une nouvelle classe d'élastomères qui a retenu l'attention de l'industrie depuis une quinzaine d'années [6], car ils allient les propriétés d'élasticité et de résilience aux caractéristiques de mise en œuvre des thermoplastiques. De telles propriétés sont liées à la conformation particulière de ces copolymères qui conduit à une microstructure originale.

Tous les caoutchoucs thermoplastiques introduisent dans le bitume des éléments forts de déformation élastique et permettent d'obtenir des dispersions stables. Toutefois, la résistance au chauffage et à l'oxydation est plus faible que celle des polyoléfines, ce qui est dû à la présence de doubles liaisons dans des chaînes principales.

Les caoutchoucs d'Éthylène-Propylène-Ruber (EPR) sont des caoutchoucs thermoplastiques contenant quelques 50 à 60% d'éthylène. Ils se mélangent bien avec les bitumes, ainsi ils servent à ajuster les propriétés des bitumes comme par exemple la viscosité.

## **II.4. Procédés de la modification des mélanges bitumineux**

La modification des enrobés bitumineux peut s'opérer de deux manières : sec et humide.

### **II.4.1. Enrobé modifié par la méthode sèche : Dry Process**

L'enrobé est fabriqué selon les proportions de l'étude de formulation des différentes fractions des granulats et du bitume, la quantité de polymère est choisie comme un pourcentage en poids du squelette granulaire. Le polymère est incorporé avec le squelette granulaire lors du malaxage, le bitume est introduit par la suite.

#### **II.4.2. Enrobé modifié par la méthode humide (Bitume modifié) : Wet Process**

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

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

### **II.5. Bitume modifié**

#### **II.5.1. Facteurs influençant les propriétés des bitumes modifiés**

##### **II.5.1.1. Caractéristiques des polymères**

Le meilleur mélange de polymère avec le bitume est celui qui permet d'augmenter la résistance à l'orniérage à températures élevées sans le rendre trop visqueux pendant le malaxage ou trop fragile à basses températures. Le polymère devrait être suffisamment compatible avec le bitume pour ne pas causer la séparation de phase pendant le stockage, le transport, la mise en œuvre et le service.

Giavarini et al (1996), avance que plusieurs paramètres du polymère influent sur le procédé de modification tels que la teneur en polymère, la composition chimique, la structure, la masse moléculaire moyenne, etc [26].

Selon Ali et al (1994) ; la fissuration thermique due à la basse température ne peut pas être améliorée par l'addition des polymères ; le grade du bitume influe sur les propriétés mécaniques du mélange à basse température [26].

##### **II.5.1.2. Caractéristiques des bitumes**

Les propriétés mécaniques de l'enrobé et sa micromorphologie (stabilité du mélange) sont influencées par la nature du bitume.

Selon Zielinski et al. (1995), le bitume doit contenir assez de fractions d'huile pour dissoudre les polymères, pour que le mélange bitume polymère soit stable [cité dans 26].

Pour une faible quantité de polymère, le bitume doit être riche en résines et asphaltènes pour augmenter la consistance et l'élasticité du mélange.

Selon Vonk et Bull (1989) ; l'élastomère en caoutchouc thermoplastique peut absorber presque tous les composants du bitume sauf les asphaltènes. La teneur en asphaltènes du bitume ne doit pas être trop élevée, sinon l'addition d'un caoutchouc thermoplastique peut conduire à la précipitation des asphaltènes et conduire à la séparation de phases d'où le mélange devient impraticable. La concentration admissible d'asphaltène dépend de la masse moléculaire de polymère et des asphaltènes et de l'aromaticité [cité dans 26].

### II.5.2. Compatibilité des bitumes et des polymères

La première notion de compatibilité entre bitume et polymère consistait seulement à vérifier visuellement l'homogénéité du mélange. C'est-à-dire, s'il n'y a pas de modification visible de l'équilibre colloïdal du bitume (une destruction de cet équilibre se traduisant par une précipitation des asphaltènes et par un ressuage des huiles) [17].

Le développement des méthodes microscopiques ont permis de montrer, par la suite, que les mélanges modifiés aux polymères présentent deux phases distinctes.

La compatibilité peut en effet être définie de deux façons :

#### 1) En termes thermodynamiques

La compatibilité se définit comme une situation où le bitume et le polymère forment une seule phase. Cette définition de la compatibilité se réfère généralement à la solubilité d'un polymère dans le bitume. L'implication pratique de cette solubilité d'un polymère dans le bitume est qu'il n'y aura pas de séparation de phases et qu'un tel mélange peut être stocké sans agitation.

Par conséquent, la miscibilité totale des polymères dans la matrice bitumineuse n'est pas voulue et les polymères partiellement miscibles sont préférés. Cette miscibilité partielle rend tout à fait difficile de définir la compatibilité [27].

#### 2) En termes pratiques

La compatibilité se définit comme une situation où le bitume et le polymère peuvent se combiner pour former un produit dont les propriétés se trouvent améliorées et où ce mélange peut être manipulé sans précautions excessives. L'implication pratique pour un tel mélange bitume/polymère est qu'il peut y avoir séparation des phases si le mélange est stocké sans agitation.

Certains chercheurs ont formalisé la notion de compatibilité bitume-polymère selon des principes généraux qui permettent d'anticiper grossièrement l'aptitude d'un bitume à former de bons bitumes polymères [17] :

- 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.

Il y a quelques procédés pour améliorer la compatibilité et la stabilité du mélange polymère-bitume, par exemple l'ajout de sulfonate ou d'acide sulfonique après l'incorporation du polymère avec le bitume. La compatibilité peut être améliorée, si l'acide est ajouté au bitume avant le polymère [26].

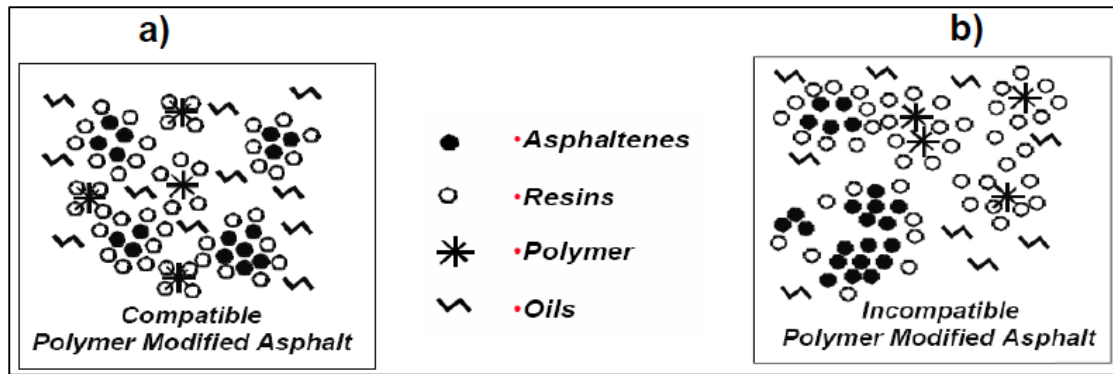


Figure II.5. Structures des bitume polymères : a) compatible, b) incompatible [7].

### II.5.3. Mécanisme de la modification [10]

La modification des propriétés des bitumes par l'addition de polymère est souvent expliquée par le gonflement du polymère par les huiles du bitume [10].

Les bitumes modifiés par des polymères sont généralement, des mélanges biphasiques

- Une phase de polymère gonflé par une fraction huileuse légère du bitume,
- Une phase regroupant les constituants du liant n'intervenant pas dans la solvation et donc plus riche en résines et en asphaltènes que le bitume de base.

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.

Brion (1984), a fait une étude assez approfondie sur ce phénomène de gonflement par des tests de centrifugation lui permettant de déterminer un taux de gonflement [10].

Il a montré que :

- la composition générique du bitume est sans influence sur le taux de gonflement.
- La composition du polymère joue un rôle minime sur le taux de gonflement.
- le mode de préparation du mélange influe sur le phénomène de gonflement.

Le taux de gonflement suit une loi linéaire décroissante en fonction de la teneur en polymère, (Figure II.6).

Brion (1984), a montré que le taux de gonflement est indépendant de la notion de compatibilité, (Figure II.6).

Selon Kraus, trois paramètres influent sur le taux de dispersion d'un copolymère, (Figure II.7), [cité dans 10].

- **La taille des particules** : plus elles sont petites, plus la surface d'échange est importante et plus grande est la vitesse de diffusion du bitume dans les particules. (Étape 1 et 2)
- **Le cisaillement** : malgré le gonflement, les molécules deviennent d'autant plus mobiles qu'elles ont été rompues (étape 3 et 4).

- **La température** : la vitesse de diffusion du bitume dans les particules de polymères augmente avec la température.

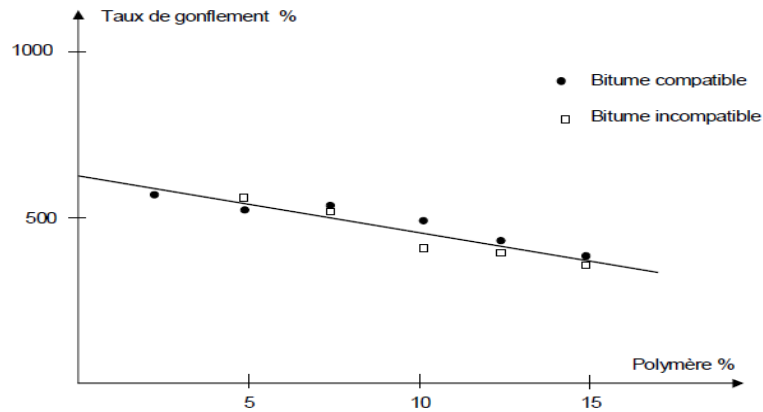


Figure II.6. Influence de la teneur en polymère sur le taux de gonflement [10].

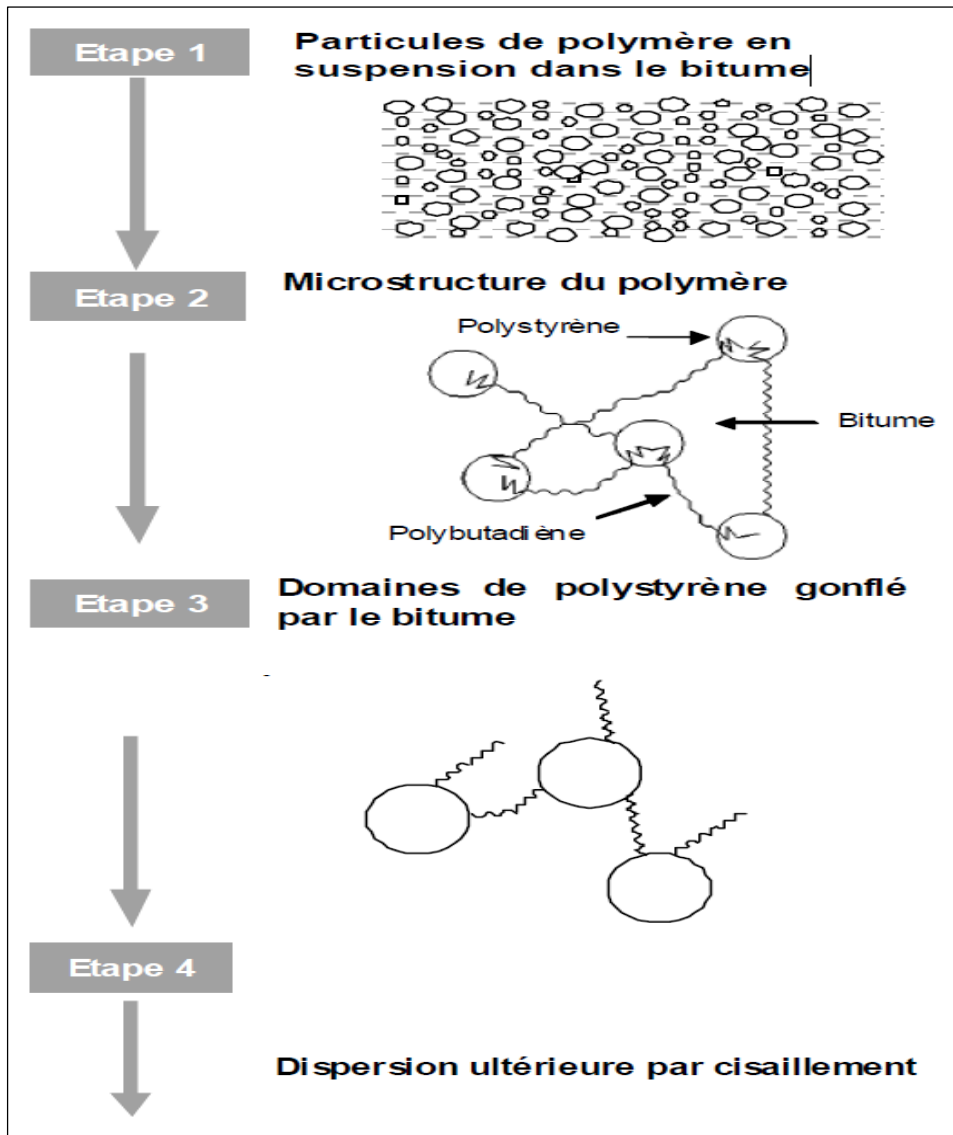


Figure II.7. Mécanisme de la dispersion d'un polymère de type SBS dans le bitume [10].

## II.6. Caractérisation des bitumes polymères

La plupart des essais et techniques d'études utilisés pour les bitumes purs peuvent être employés pour la caractérisation des liants modifiés.

### II.6.1. Analyses physico-chimiques

L'analyse chimique des bitumes polymères peut être effectuée avec les mêmes outils analytiques que pour les bitumes purs.

### II.6.2. Mesure de la pénétrabilité

La détermination de la pénétrabilité ne pose pas en général de problème pour les bitumes polymères. Il existe cependant des liants modifiés pour lesquels cette détermination reste problématique. En particulier, avec des liants modifiés à forte teneur en polymère pour lesquels la température d'essai se situe soit dans le domaine de fusion, soit dans le domaine de cristallisation.

### II.6.3. 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.

### II.6.4. Indice de pénétrabilité

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 susceptibilité thermique des liants modifiés est déterminée par l'indice de pénétrabilité IP, on utilise les résultats obtenus par les essais de pénétrabilités et points de ramollissement [14]

$$IP = \frac{1952 - 500 \log(Pen_{25}) - 20 SP}{50 \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (I.6)$$

Où

$Pen_{25}$  : Pénétrabilité à 25 C°

$SP$  : Température de point de ramollissement (softening point temperature)

### II.6.5. Point de fragilité Fraass

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. Il y'a une faible différence entre les points de Fraass des liants modifiés et ceux de leur bitume de base,

### II.6.6. Durcissement simulé au RTFOT

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.

L'expérience a montré que l'essai RTFOT n'a plus la même représentativité pour les bitumes modifiés par des polymères.

Avec les bitumes modifiés par des polymères, la procédure normalisée RTFOT conduit habituellement à un vieillissement non uniforme de l'échantillon. Ceci peut cependant être corrigé par une adaptation mineure du test comme l'introduction d'un petit barreau d'acier cylindrique dans le bitume ; le déplacement naturel de ce barreau pendant l'essai crée un brassage suffisant de l'échantillon pour qu'il y ait un vieillissement uniforme.

### II.6.7. Essais spécifiques aux liants modifiés

#### II.6.7.1. 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.

La stabilité des bitumes polymère dépend non seulement de la différence dans la densité et de la viscosité entre le bitume et le polymère mais également de la structure de bitume [28].

Directement liée à la compatibilité ou à la finesse de la microstructure du bitume, la stabilité au stockage peut varier considérablement d'un liant à l'autre, notamment en fonction de la composition du bitume. Elle peut être de quelques heures seulement voire de quelques minutes dans le cas de mélanges instables, mais aller jusqu'à plusieurs semaines, voire plusieurs mois, pour les mélanges très stables [17].

La stabilité au stockage des liants modifiés est une caractéristique d'usage extrêmement importante. Ces liants étant constitués de deux phases distinctes [29]. Ils sont soumis aux mêmes principes physiques que ceux qui régissent la sédimentation des émulsions de bitume (loi de Stokes).

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 dans un étuve pendant 48 heures à 163 C° [30], de le refroidir brusquement et de procéder au découpage en trois parties égales après avoir enlevé la pellicule d'aluminium.

Lorsque la différence aux points de ramollissement entre la partie supérieure et inférieure du tube est moins de 2.5 C°, on dit que le mélange bitume polymère est stable au stockage [31].

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.

Une des solutions applicable dans ces cas est le maintien des mélanges sous agitation aux températures de stockage et de transport.

Le problème de la stabilité au stockage à températures élevées peut être résolu par l'ajout de l'acide polyphosphorique, qui change la structure de bitume de structure sol à structure gel [28].

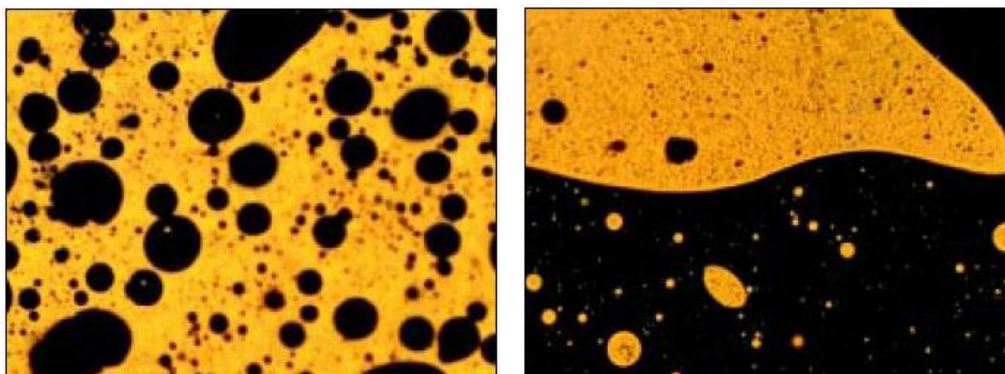
La stabilité au stockage des bitumes modifiés par des SBS (styrene-butadiene-styrene) peut être améliorée par l'ajout de soufre et d'un accélérateur de vulcanisation lors du malaxage avec un grand cisaillement et une température élevée [32].

Guian Wen et al ont montré que la stabilité au stockage des bitumes modifiés du copolymère de styrène-butadiène-styrène (SBS) peut être améliorée sensiblement avec l'addition du soufre élémentaire [33].

#### II.6.7.2. Observation microscopique (Microscopie de fluorescence)

La morphologie de PMA (polymere modified asphalt) a été habituellement étudiée au moyen du microscope de fluorescence pour caractériser la distribution et la finesse du polymère dispersées dans la matrice bitumineuse [31].

Nicro Co, utilise le microscope optique à fluorescence pour les liants bi-phasiques 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, les polymères gonflés deviennent jaune - vert alors que le bitume lui-même reste noir, (Figure II.8) [31].



Bitume modifié avec 7% d'EVA.

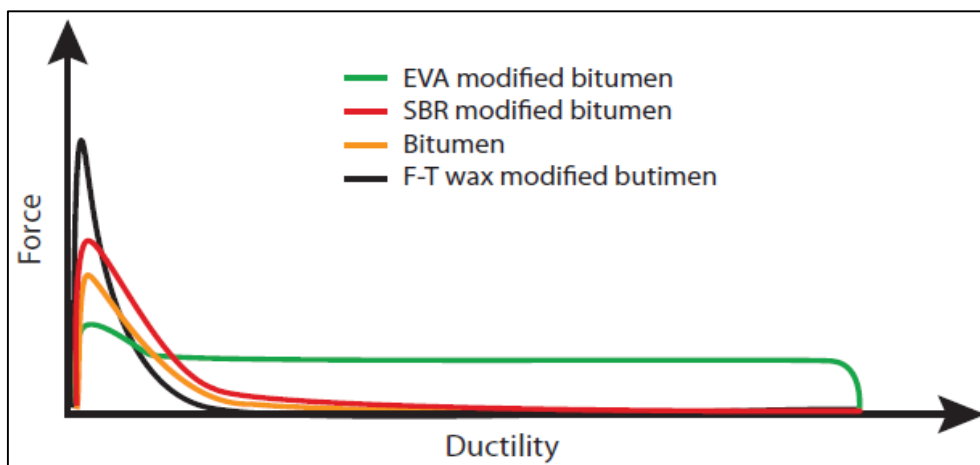
Bitume modifié avec 7% de SBS.

**Figure II.8.** Microstructure d'un bitume polymère [7].

### II.6.7.3. Essai force-ductilité

Différents essais ont été développés pour évaluer l'amélioration de la résistance à l'étirement des liants modifiés par des polymères. Parmi ceux-ci, l'essai de force-ductilité présente l'avantage d'employer un appareil d'essai relativement simple et courant, un ductilimètre. Force et allongement sont mesurés lors de l'essai pratiqué avec une vitesse d'étirement constante de 50 mm/min. L'essai force-ductilité permet de déterminer la force cohésive des bitumes modifiés. La figure II.9 montre quelques courbes de l'essai ductilité-force pour certains bitumes modifiés.

La cohésion est une mesure de la contrainte de traction nécessaire pour casser le lien entre les molécules du bitume. La force, et la dureté des bitumes sont améliorées par la modification des bitumes avec l'ajout des polymères.



**Figure. II.9.** Courbes de l'essai ductilité-force pour certains bitumes modifiés [34].

La phase élastique est représentée par la surface sous la courbe avant la crête initiale et la surface totale peut être employée pour calculer la dureté. C'est une bonne indication de l'énergie nécessaire pour casser le lien entre les molécules du bitume donc une bonne évaluation de résistance à la fissuration.

## II.7. Domaines d'emploi des bitumes modifiés [17]

Les bitumes modifiés par des polymères sont essentiellement employés en couche de roulement pour assurer la sécurité et le confort des usagers en augmentant la résistance à l'arrachement, la tenue à l'eau, en favorisant la cohésion et en réduisant l'orniérage et assurant la durabilité sous trafic élevé des caractéristiques de surface. Ceci a permis le développement d'enrobés bien adaptés aux besoins (enrobés drainant, enrobés minces, très minces etc.).

Les enrobés préconisés en couche d'assise pour des sites particuliers sont élaborés avec des liants spéciaux lorsque les études préalables de formulation avec des bitumes traditionnels ne débouchent pas sur une solution technique et économique intéressante ou lorsque les conditions de chantier le nécessitent.

Les autres domaines d'emploi des bitumes polymères concernent les liants pour enduits superficiels, couche de liaison, enrobés coulés à froid et couche d'accrochage (sous forme d'émulsions) et les complexes anti-remontées de fissure.

## II.8. Evolution des bétons bitumineux

L'évolution du trafic et des charges (globales et par essieu) sur le réseau des autoroutes et des routes principales incite à recourir à des revêtements plus performants. Ce qui met en évidence l'évolution des bétons bitumineux au cours du temps.

### II.8.1. Bétons bitumineux (BBSG)

Les bétons bitumineux représentent aujourd'hui la première technique de construction des couches de roulements de chaussées sur le réseau routier. La stabilité est obtenue par l'utilisation de bitume relativement dur (35/50) à un dosage relativement faible et avec l'utilisation de granulats entièrement concassés.

#### ✓ Caractéristiques

- Granulométrie 0/10 et 0/14 (pas de normes sur la composition)
- $\approx 5$  à 5,3% de bitume
- Epaisseur de mise en œuvre: 6 à 8 cm,
- Augmenter la teneur en bitume pour améliorer la tenue en fatigue.

**Tableau II.2.** Les propriétés des bétons bitumineux

BB	Bitume	Teneur en liant (TL)	Orniérage (%)	Module de rigidité E (MPa)	Déformation en fatigue $\epsilon_6$
classe 1	35/50	5,2	$\leq 10$	5500	$\geq 100 \cdot 10^{-6}$
classe 2	35/50	5,2	$\leq 7,5$	7000	$\geq 100 \cdot 10^{-6}$
classe 3	35/50	5,2	$\leq 5$	7000	$\geq 100 \cdot 10^{-6}$

### II.8.2. Bétons Bitumineux à Module Elevé (BBME)

Dans les années 80, les travaux de renforcement en traverse d'agglomération et de restructuration de voies lentes d'autoroutes ont conduit à développer des matériaux bitumineux aux performances mécaniques plus élevées (module et fatigue), permettant d'en réduire les épaisseurs des couches de chaussées. Les enrobés à module élevé (EME) étaient nés [35].

Le principe des EME repose sur le remplacement du bitume classique 35/50 par un bitume très dur 20/30 ou 10/20, permettant d'augmenter notablement le module de rigidité de l'enrobé,

On peut augmenter sensiblement le pourcentage de bitume sans risquer l'orniérage grâce à l'utilisation d'un liant très rigide, ce qui se traduit par une meilleure tenue à la fatigue.

✓ **Caractéristiques**

- Granulométrie 0/10, 0/14 (pas de normes sur la composition)
- $\approx 5,2$  à  $5,5\%$  de bitume
- Epaisseur de mise en œuvre: 6 à 8 cm,

**Tableau II.3.** Les propriétés des bétons bitumineux à module élevé

BBME	Bitume	Orniérage (%)	Module de rigidité (E : Mpa)	Déformation en fatigue $\epsilon_6$
Classe 1	10/20 ou 20/30	$\leq 10$	9000	$\geq 100 \cdot 10^{-6}$
Classe 2	10/20 ou 20/30	$\leq 7,5$	11000	$\geq 100 \cdot 10^{-6}$
Classe 3	10/20 ou 20/30	$\leq 5$	11000	$\geq 100 \cdot 10^{-6}$

**II.9. Conclusion**

Ce chapitre a été consacré à la présentation de la modification des bitumes par des polymères, afin d'aboutir à un liant idéal, qui devrait avoir une cohésivité et une adhésivité améliorées 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 leur performances en termes 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.

Aussi, il a été mis en évidence les différents types de polymères :

- Les polymères thermoplastiques sont caractérisés par le ramollissement durant le chauffage et par le durcissement durant le refroidissement, et ils sont subdivisés en deux familles: les élastomères et les plastomères.
- Les polymères thermodurcissables qui durcissent de façon irréversible avec la possibilité de traitement à l'état visqueux, le chauffage ultérieur de ce type de polymère conduit à leur dégradation thermique et non au ramollissement.
- Les caoutchoucs naturels et synthétiques qui sont susceptibles à la décomposition et à l'oxydation.
- Les caoutchoucs thermoplastiques qui forment une nouvelle classe d'élastomères qui a retenu l'attention de l'industrie depuis une quinzaine d'années.

En fin, on a présenté les principaux essais utilisés pour caractériser ces produits composites.

## **Chapitre III**

# **Amélioration des enrobés bitumineux par l'ajout de sachets en plastiques**

## **Chapitre III : Amélioration des enrobés bitumineux par l'ajout de de sachets en plastique.**

### **III.1. Introduction**

Devant les besoins, sans cesse croissants, des ressources en matériaux et face aux exigences des conditions de préservation de l'environnement dans une vision de développement durable, il est devenu nécessaire et pertinent de prospecter et d'étudier toutes les possibilités et opportunités de réutilisation et de valorisation des déchets et sous-produits industriels notamment dans le domaine du génie civil [36].

On rapporte dans ce chapitre quelques expériences de recyclage de déchets de type polymères dans le domaine routier.

### **III.2. Déchets plastiques**

#### **III.2.1. Plastique**

Le nom de plastique recouvre un ensemble de matériaux organiques de synthèse. La matière de base de leur fabrication, la résine, est constituée de macromolécules appelées "polymères". On y ajoute des additifs et adjuvants pour améliorer les propriétés chimiques et physiques de ces matériaux (résistance aux chocs, couleur, plasticité) [37].

Les six principales résines "polymères" qui forment le plastique sont : Polyéthylène téréphtalate (PET), polyéthylène haute densité (PEhd), polychlorure de vinyle (PVC), polyéthylène basse densité (PEbd), polypropylène (PP) et polystyrène (PS) [38].

Actuellement, il existe plus de 700 types de plastiques aux noms complexes que seuls les chimistes peuvent encore prononcer. Dans l'usage quotidien, la plupart de ces matières reçoivent le nom de « plastique » [37].

Le plastique remplace graduellement des matériaux tels que le bois, le métal ou le verre, puisqu'on lui reconnaît de nombreux avantages : la résistance, la polyvalence, la durabilité et la légèreté. C'est la raison pour laquelle le plastique a de nombreuses applications.

Les sacs plastiques sont fabriqués à partir du polyéthylène basse densité (PEbd), avec un indice de fluidité de 160 C°. L'indice de fluidité est la température à laquelle le plastique fond.

#### **III.2.2.Déchet**

Selon SACHS I, (1977), le déchet est un résidu de production et de consommation sans valeur d'usage [39]. Cette définition est revue dans le contexte du développement durable.

On appellera déchets plastiques les résidus essentiellement constitués de matière plastique.

Les matières plastiques ont des effets néfastes sur la nature du fait de leur caractère non biodégradable. Les sacs plastiques peuvent durer jusqu'à 1 000 ans dans

### **Chapitre III Amélioration des enrobés bitumineux par l'ajout de sachets en plastique**

l'environnement. On estime qu'avec la même quantité de pétrole servant à fabriquer un sac plastique, une voiture peut rouler sur 115 mètres [39].

Le poids très faible des sachets plastiques et surtout le fait d'être facilement transportés par le vent font que ces derniers s'accrochent au moindre obstacle. Le paysage se trouve ainsi encombré par les sachets plastiques surtout à l'entrée et à la sortie des grandes villes.

Rejetés dans la nature, les sachets, participent à l'enlaidissement des paysages. Ils constituent aussi une menace pour les animaux et ont des influences négatives sur les sols et l'atmosphère. Ils présentent également des risques sanitaires pour les hommes.

En Algérie, les sacs plastiques sont très prisés à cause de leur coût très bas et les sacs de couleur foncée pour leur discrétion. Chaque Algérien consomme en moyenne 117 sacs par an, soit un total de 6 milliards de sacs par an. C'est pour dire l'importance du recyclage d'un tel déchet dans le pays.

#### **III.3. Recyclage des déchets**

Le recyclage a deux conséquences écologiques majeures, la réduction du volume de déchets et la préservation des ressources naturelles. C'est une des activités économiques de la société de consommation.

##### **III.3.1. Procédés de recyclage**

Il existe trois grandes familles de techniques de recyclage : chimique, mécanique et organique.

Le recyclage dit « chimique » utilise une réaction chimique pour traiter les déchets, par exemple pour séparer certains composants.

Le recyclage dit « mécanique » est la transformation des déchets à l'aide d'une machine, par exemple pour le broyer.

Le recyclage dit « organique » consiste, après compostage ou fermentation, à produire des engrais et du carburant tel que le biogaz.

Dans le cas des déchets plastiques on utilise le recyclage mécanique (valorisation matière).

#### **III.4. Valorisation des déchets dans le domaine routier**

L'idée d'incorporer, les déchets de sacs plastique dans le bitume est nouvelle et la littérature sur le sujet est plutôt rare. Pour bien comprendre le phénomène et l'interaction entre le bitume et les plastiques (bitume-plastique), on se base sur la littérature du bitume-caoutchouc, car le caoutchouc est largement utilisé et le phénomène de l'interaction bitume-caoutchouc est bien caractérisé et se trouve être similaire avec l'interaction bitume-plastique.

### **III.4.1. Pneus usagés**

#### **III.4.1.1. Introduction**

La matière de base du pneumatique est composée principalement d'élastomères naturels (caoutchouc) ou synthétiques (copolymère de styrène - butadiène ou autres issus de la pétrochimie) auxquels 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 peu entre les pneus de tourisme et les pneus poids lourd [7].

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 [8].

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.

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 [cité dans 8].

MacDonald a mis au point, en 1960, la première formulation de bitume-caoutchouc donnant des performances satisfaisantes. Le bitume- caoutchouc a servi en premier lieu à réparer les nids de- poule. Le bitume caoutchouc a servi à d'autres applications : membranes gravillonnées dans les années 70, et enrobés bitumineux dans les années 80 [cité dans 8].

L'association ASTM, (1988) (American Society for Testing and Materials) a publié une première définition de ce qu'est exactement un bitume caoutchouc : « ... un mélange de bitume, de caoutchouc de pneus récupéré et quelques additifs, dans lequel le composant caoutchouc représente au moins 15% en poids du mélange total et ayant réagi avec le bitume chaud suffisamment pour provoquer le gonflement des particules de caoutchouc » [cité dans 8].

Les enrobés bitumineux à chaud contenant du caoutchouc, ont été réalisés à partir de la fin des années 60 et avec des tonnages appréciables à partir du milieu des années 70.

#### **III.4.1.2. Procédés de fabrication d'enrobés contenant de la poudrette de caoutchouc**

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

### III.4.1.2.1. 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.

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.

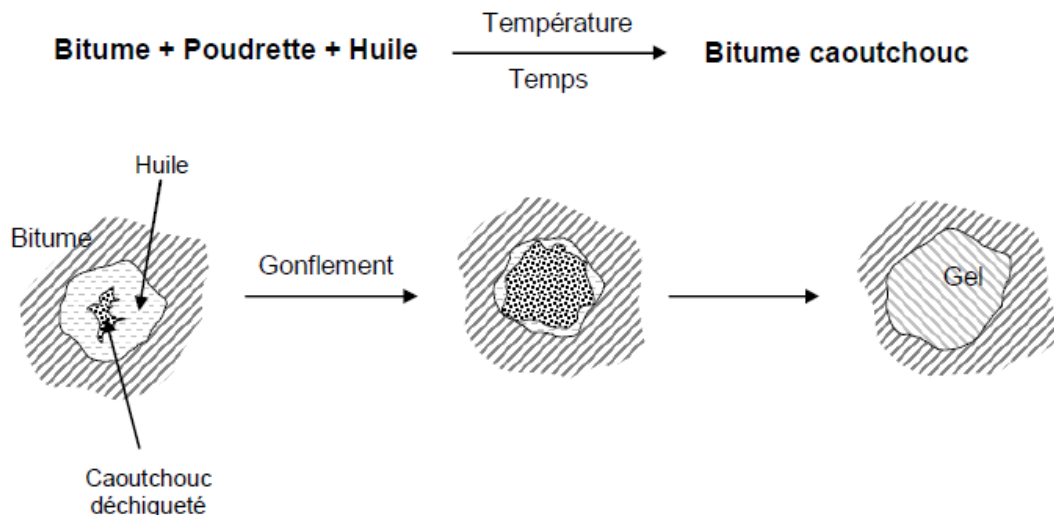
### III.4.1.2.2. Procédé humide (Wet Process)

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 »

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.

L'effet conjugué de la température élevée et des huiles du mélange permet le gonflement des particules de caoutchouc. Ces particules gonflées donnent naissance à un gel bitume- caoutchouc, (Figure III.1).

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.



**Figure III.1.** Interprétation du processus d'élaboration du bitume caoutchouc [8].

### III.4.1.3. Influence des paramètres de fabrication sur les caractéristiques physico-chimiques du bitume - caoutchouc

Il y a plusieurs paramètres qui influent sur les caractéristiques physico-chimiques du bitume - caoutchouc tels que la taille des particules de polymère, la nature de bitume et le temps de malaxage.

➤ La taille de particules de polymère

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 (1997), la dissolution est meilleure pour des particules plus fines [cité dans 8].

➤ La nature du bitume

La nature du bitume a aussi un effet déterminant sur l'interaction bitume et 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

D'après Billiter (1997), 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 [8].

#### **III.4.1.4. Interaction bitume- caoutchouc**

L'interaction à haute température du bitume avec les particules de caoutchouc provenant du pneu est présentée d'une part comme une réaction chimique qui consiste en la dégradation des chaînes élastomériques par effet thermique et d'autre part, comme un processus de dévulcanisation du caoutchouc où se produit la rupture des liaisons soufrées propres à la vulcanisation, et qui est révélée par une diminution du soufre à la surface des particules de caoutchouc. Toutefois, l'interaction constitue avant tout un phénomène physique dont le mécanisme principal est le gonflement du caoutchouc quand il capte les fractions les plus légères du bitume [40].

Pendant l'interaction bitume-caoutchouc, les particules de caoutchouc commencent à gonfler ou à augmenter de volume étant donné l'absorption des fractions aromatiques. Autour de la particule de caoutchouc se forme un « gel » ou une « couche molle » qui se détache sous l'effet de l'agitation en même temps qu'elle est intégrée au bitume. En portant le phénomène à l'extrême, si la température ou l'énergie d'agitation étaient prolongées, la particule de caoutchouc disparaîtrait au sein du bitume.

#### **III.4.1.5. Recyclage de l'enrobé contenant du caoutchouc**

Selon Ould Hnia les préoccupations quant au recyclage des enrobés contenant du caoutchouc sont apparues à la fin des années 80 avec l'arrivée en fin de vie des premières sections construites. Les projets de recyclage de ces enrobés se sont intéressés non seulement au processus technique mais aussi aux impacts sur l'environnement et la santé publique. Le fraisât d'enrobé au bitume caoutchouc peut être incorporé (jusqu'à 30% en masse de recyclé) dans un enrobé neuf pour produire

un matériau répondant aux exigences. Des procédés de réchauffage par micro-ondes sont expérimentés pour tenter de recycler 100% du fraisât d'enrobés [8].

### **III.4.1.6. Avantages des bitumes caoutchouc**

Les recherches ont montré que la réduction du bruit, par rapport à l'ancienne couche de roulement, est très significative pour les enrobés ouverts avec des inclusions de caoutchouc en combinant l'effet d'absorption de la porosité de l'enrobé avec celui de l'amortissement du caoutchouc.

L'incorporation de caoutchouc dans les enrobés présente un module complexe inférieur à celui d'un enrobé classique pour les basses et moyennes températures, et un module complexe supérieur pour les températures où le phénomène d'orniérage devient significatif [8].

Les résistances à l'orniérage de l'enrobé humide (obtenu par le wet processing) et de l'enrobé au bitume polymère (Pmb) sont semblables et nettement supérieures à celle d'un enrobé classique [8].

Il a été observé que la résistance à l'orniérage est améliorée avec une teneur en caoutchouc plus forte et une poudrette de caoutchouc plus grossière [8].

A teneur de caoutchouc équivalente, les enrobés secs (dry processing) se comportent mieux que les enrobés humides. L'ajout d'huile à l'enrobé humide améliore de manière significative la résistance à la fatigue.

### **III.4.2. Valorisation des sachets plastiques**

Le remplacement d'une partie des agrégats primaires ou l'amélioration des produits bitumineux par l'ajout de déchets plastiques a les avantages de réduire l'extraction des agrégats, les quantités de déchets plastiques, et les impacts environnementaux et sociaux [41].

L'idée de recycler les déchets de sachets plastiques remonte aux années 90. Quelques recherches ont été effectuées sur la modification des mélanges bitumeux par les déchets plastiques [42]. Les expériences avec les bitumes modifiés avec les sachets plastiques sont tout de même rares dans la littérature.

Il est possible d'améliorer la performance des couches de roulement par la réutilisation de déchets plastiques pour la modification des mélanges bitumineux. Les études montrent que l'introduction des plastiques, principalement les polyéthylènes, dans les enrobés réduit les déformations permanentes (orniérage) et les fissurations thermiques dues à la basse température [43], [44]. Le recyclage des déchets plastiques augmente la durée de vie d'une route et permet de résoudre les problèmes d'environnement [42], [45].

#### **❖ Procédé sec (dry process)**

Dans la modification des enrobés par les déchets plastiques par la voie sèche (dry process), les plastiques enrobent les granulats, ce qui donne une meilleure adhésivité entre le bitume et les granulats, une diminution de vides et empêche l'absorption

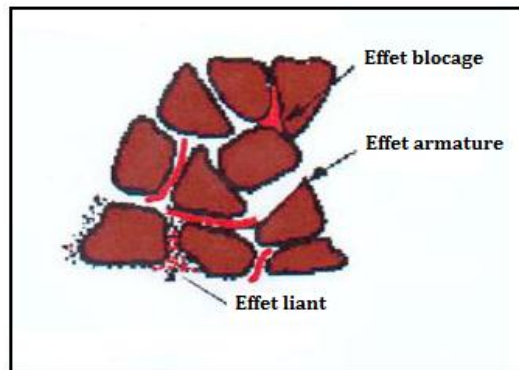
### Chapitre III Amélioration des enrobés bitumineux par l'ajout de sachets en plastique

d'humidité et l'oxydation du bitume. La route peut résister à la circulation dense et montrer une meilleure durée de vie [46].

La modification des enrobés par l'adjonction de déchets plastiques peut conduire à trois effets selon, leur nature chimique, leur taille et leurs caractéristiques physiques [17]: (Figure III.2).

1. un effet sur le liant dû à l'augmentation de la viscosité du bitume par dissolution vraie de certaines matières plastiques, ou dispersion à l'état fondu ;
2. un effet d'armature provoqué par les lanières ou les fibres plastiques encore suffisamment rigides et suffisamment longues, pour créer des ponts à l'intérieur du squelette granulométrique.
3. un effet bloquant dû aux plastiques ramollis provisoirement pendant la mise en œuvre, de taille courte et qui vont être thermoformés lors du compactage pour remplir les vides du squelette granulométrique.

Ces trois effets, seuls ou cumulés, conduisent à un matériau hydrocarboné nettement moins sensible à la température et donc moins sensible aux déformations par fluage [17].



**Figure III.2.** Effets de l'addition de déchets plastiques dans les enrobés [17].

La réutilisation des déchets plastiques de type LDPE et polypropylène dans les mélanges bitumineux a montré une croissance significative dans la durabilité et la stabilité (environ 2.5 fois plus grande que la stabilité obtenue par des mélanges classiques) avec une bonne résistance à la fatigue [47].

L'incorporation des LDPE dans les mélanges bitumineux remplace 30% d'agrégats de 2.36-5mm, réduit la densité de 16% ; augmente la stabilité Marshall de 250% et améliore la résistance à la traction indirecte [47].

Il y a une amélioration significative dans la résistance des granulats après l'ajout de plastique (voie sèche), car la surface du granulat est couverte par un film mince de polymère ce qui diminue le phénomène de désenrobage par l'amélioration de l'adhésivité entre les granulats et le bitume [48], [43].

Al-Ghannam, a étudié les propriétés physiques des mélanges bitumineux avec les polyéthylènes (PE), et il a constaté que le PE a augmenté les propriétés rhéologiques de l'enrobé [49].

### **Chapitre III Amélioration des enrobés bitumineux par l'ajout de sachets en plastique**

Nolan et al, ont étudié l'influence du PE sur la fissuration des enrobés bitumineux à basses températures (-15 °C à -40 °C), ils ont conclu que la modification des enrobés par des PE réduit la fissuration à basse température (-20 °C pour 6% PE, -35 °C pour 8% PE) [49].

La résistance à la compression (RC) des enrobés bitumineux augmente avec l'augmentation du pourcentage de polymère et de la nature de plastique,  $RC(PP) > RC(PE) > RC(PS)$  (Tableau III.2) [48].

**Tableau III.1** Résistance à la compression en fonction de la teneur et type de polymères

Type de plastique	Pourcentage	Résistance à la compression (tonne)
Polyéthylène	10	250
	20	270
	25	290
Polypropylène	10	280
	20	290
	25	310
polystyrène	10	155
	20	165
	25	170

#### **❖ Procédé humide (wet process)**

Justo (2002), a montré la possibilité de l'utilisation des sachets plastiques comme additif dans les mélanges de béton bitumeux. Les propriétés du bitume modifié par l'ajout des sachets plastiques comparées au bitume pur, indiquent que les valeurs de pénétration et de ductilité du bitume modifié diminuent avec l'augmentation de l'additif des sachets plastiques, jusqu'à 12 % en poids de bitume. L'incorporation des déchets plastiques dans le bitume augmente la durée de vie des couches de chaussée [cité dans 46].

Al-Hadidy et Yi-qiu ont étudié l'influence du LDPE sur les liants bitumineux, les résultats ont montré que le point de ramollissement augmente par rapport au bitume pur, avec des valeurs de ductilité minimum de la série de spécification [50], [51].

Moatasim Attaelmanan et al, ont étudié l'influence du HDPE (high density polyethylene) sur les liants bitumineux, ils ont conclu que [49]:

- La pénétrabilité à 25 °C diminue avec l'augmentation du pourcentage de HDPE, ce qui indique une meilleure résistance au cisaillement à des températures élevées.
- La valeur de ductilité est diminuée de 150 mm pour le bitume pur (grade 80/100) jusqu'à 99mm pour 5% HDPE.
- Le point de ramollissement augmente avec l'augmentation du pourcentage de HDPE, ce qui implique l'amélioration de la résistance à la déformation.

### Chapitre III Amélioration des enrobés bitumineux par l'ajout de sachets en plastique

- Les valeurs de l'indice de pénétrabilité montrent que le HDPE a réduit la susceptibilité thermique du liant.
- Les résultats d'essai de ductilité et d'uniformité ont indiqué que le HDPE et le bitume sont compatibles.
- Les résultats de Marshall montrent que l'ajout de 5% HDPE augmente le quotient Marshall QM de l'enrobé de 55%.
- Les liants modifiés par HDPE montrent une meilleure résistance à la déformation permanente due à leur forte stabilité Marshall.
- La résistance à la traction augmente de 79.82% à 94.81% pour 5% HDPE
- HDPE augmente le module de rigidité à basse température (-10 °C) ce qui diminue la fissuration.
- Les résultats ont montré qu'on peut obtenir un revêtement souple avec une haute performance, durée de vie élevée et plus économique avec 5% HDPE

Lobna (1992), a étudié les propriétés rhéologiques des liants bitumineux modifiés par LDPE avec deux temps de malaxage 4 et 24h. Elle a conclu que le temps de malaxage entre LDPE et le bitume augmente l'homogénéité et améliore les propriétés rhéologiques des liants. L'ajout du LDPE diminue la ductilité jusqu'à des limites inférieures 100<sup>+</sup> mm pour 8% LDPE [50].

Al-Dubabe et al, ont tenté d'évaluer l'efficacité du polymère sur la modification de bitume d'origine arabe, ils ont constaté que l'addition du polyéthylène de faible densité (LDPE) augmente le point de ramollissement de bitume pur de 3%. Ils ont conclu que la modification de bitume d'origine Arabe par des polymères est efficace, en améliorant les propriétés rhéologiques de l'enrobé [52].

Punith et Veeraragavan, utilisent le PE (sacs plastiques LDPE) pour modifier le bitume (de classe 80/100), ils ont constaté que le PE réduit la pénétrabilité et la ductilité, et augmente le point de ramollissement et la densité. Ils ont choisi la teneur de 5% de PE de la masse du mélange comme une teneur optimale pour améliorer les performances de l'enrobé bitumineux [53].

Cristina Fuentes-Audén et al, ont étudié les propriétés thermiques et mécaniques des bitumes modifiés par les polyéthylènes (LDPE) recyclés. Ils ont montré que l'addition des polyéthylènes au bitume produit une augmentation de résistance à la traction et de module de Young. Ces valeurs peuvent être corrélées avec les performances à long terme du bitume modifié, indiquant un perfectionnement de la résistance à la rupture et à la fissuration thermique pendant la durée de vie d'une chaussée [54].

Sinan Himishoglu et Agar d'Emine ont utilisé plusieurs déchets plastiques de type HDPE comme des polymères pour étudier les effets de la température et du temps de malaxage des mélanges modifiés avec le HDPE sur la stabilité de Marshall, le fluage Marshall, et le quotient de Marshall. Les résultats montrent que le pourcentage optimal du HDPE est 4% avec une température de malaxage de 165C° durant 30 min [55].

### Chapitre III Amélioration des enrobés bitumineux par l'ajout de sachets en plastique

Naskar et al, ont étudié l'influence des déchets plastiques sur la stabilité des liants bitumineux, ils ont utilisé un bitume de grade 60/70 avec une durée de malaxage de 45 min, une température de 180 °C, et une vitesse de malaxage de 3500 tr/min. Ils sont indiqués que la température de malaxage de déchets plastiques avec le bitume ne devrait pas dépasser 185 C°, et le temps de malaxage devraient être assez adéquat pour la dispersion totale du plastique dans la matrice de bitume pour obtenir un mélange homogène [26].

La quantité de polyéthylène ajoutée, ne devrait pas dépasser 15 % pour les bitumes distillés. La température du mélange bitume-polyéthylène devrait être 170-200° C, la durée de malaxage efficace est environ 2 à 3 heures [56].

Abdellatif Ait-Kadi et al, ont étudié l'association HDPE/EPDM (ethylene-propylene-diene-monomere) 90/10, Ils ont trouvé que l'ajout du copolymère EPDM stabilise le mélange (rôle stabilisateur) et augmente quelques autres propriétés qui ne peuvent pas être améliorées en employant seulement le polyéthylène (HDPE) (rôle additif) [29].

M. Murphy et al, ont étudié l'influence des différents polymères recyclés sur le bitume, comprenant le Polyéthylène (LDPE et HDPE), polypropylène (homopolymère polypropylène (HPP) et copolymère polypropylène (CPP)), éthylène vinyle acétate (EVA), styrène butadiène styrène (SBS), polyéther polyuréthane (PEPU). Ils ont trouvé que l'association des deux polymères EVA et LDPE donnent des mélanges de meilleures propriétés que les autres polymères [57].

Sur le sujet de la toxicité, les résultats obtenus par les analyses thermiques DSC (Differential Scanning Calorimeter) et TGA (Thermo Gravimetric Analysis) (tableau III.2) montrent que les polymères de types polyéthylènes PE, polypropylènes PP et les polystyrènes PS ramollissent facilement entre environ 130-140 °C sans dégagement de gaz. A environ 270 °C sont décomposés avec dégagement des gaz comme le méthane et l'éthane. A environ 700 °C ils subissent la combustion avec dégagement de monoxyde de carbone CO et de dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> [48].

**Tableau. III.2.** les propriétés thermiques de quelque polymère

Polymère	Solubilité dans l'eau	Température de ramollissement	Produit dégagé	Température de décomposition	Produit dégagé	Température de combustion	Produit dégagé
PE	Nul	100-120	Non gaz	270-350	CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	>700	CO, CO <sub>2</sub>
PP	Nul	140-160	Non gaz	270-300	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	>700	CO, CO <sub>2</sub>
PS	Nul	110-140	Non gaz	300-350	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	>700	CO, CO <sub>2</sub>

#### ❖ Quelques expériences sur l'utilisation du plastique dans les chaussées.

Le concept d'utiliser les déchets plastiques pour la réalisation des chaussées souples a démarré depuis 2000 en Inde [42] (25 Km à Bangalore en 2002 [46]).

Plus de 2500 Km de routes sont réalisés par des enrobés modifiés par les déchets plastique, (plastiphalt) en Inde depuis 2000 [48].

Plusieurs sites visités après cinq ans de la mise en service indiquent, qu'il n'y a aucune dégradation (comme nids de poule, fissuration, fluage et déformation) [48].

Des mélanges bitumeux contenant du bitume modifié par le polyéthylène ont été employés en Czequoslovakie dans la chaussée d'un pont de 130 m de long à travers le fleuve d'Odre et sur 150 m de long à travers le fleuve d'Ilava [56].

#### **III.4.2.1. Compatibilité entre le bitume et LDPE**

Il est bien établi dans la littérature que les mélanges bitumes- polyoléfines (polyéthylènes) montrent une morphologie bi-phasique, où les phases riches en polymère et les phases riches en bitume peuvent être clairement distinguées [54], [57].

Le polyéthylène (PE) est l'un des additifs de polymère les plus efficaces pour l'amélioration des caractéristiques des bitumes. Il permet de réduire les déformations permanentes sous les charges lourdes. Malheureusement, la nature cristalline élevée du PE diminue sa compatibilité avec les bitumes. Les particules de PE se séparent du bitume à haute température de stockage, ce qui limite l'application du bitume modifié par les PE dans les chaussées routières [58].

Il y'a une faible compatibilité entre le bitume et LDPE, et une phase de séparation se produit à des températures élevées. Pour augmenter la compatibilité entre le bitume et les polymères, on introduit des huiles (extender oils) pour mieux dissoudre les particules fines des polymères dans la matrice bitumineuse [59].

Li Jun et al, ont étudié la différence entre un bitume modifié par LDPE et un bitume modifié par LDPE avec l'ajout d'une huile de type Glycidyl methacrylate (GMA). Ils ont trouvé que le bitume modifié par LDPE-GMA a un point de ramollissement plus élevée, donc une meilleure résistance à l'orniérage (figure III.3) [59].

La ductilité à 10 °C qui caractérise les performances à basse température, diminue par l'ajout du LDPE par contre elle augmente avec l'incorporation du GMA, (Figure III.4).

Le polyéthylène (PE) et le polypropylène (PP) sont des plastomères qui peuvent apporter une meilleure rigidité et réduire de manière significative les déformations dues au trafic. Malheureusement, en raison de leur nature, PE et PP sont non polaires, peuvent être presque totalement non-miscibles avec le bitume, et leur utilisation est habituellement limitée à la production de membranes imperméables [60], [61].

Une solution possible pour améliorer la compatibilité, est l'utilisation des copolymères de bases PE, où le comonomère est polaire, inerte ou réactif en ce qui concerne le bitume, par exemple éthylène-vinylacetate (EVA), éthylène-butyle acrylate (EBA), et glycidylmethacrylate(GMA) [60].

Les polyéthylènes non réactifs avec les fractions du bitume, précipitent dans le mélange après refroidissement [56].

Les expériences sur l'introduction du polyéthylène dans les bitumes non paraffiniques ont échoué en raison de l'insolubilité de polyéthylène dans ce type de bitume. Il est

très difficile, voire impossible, d'obtenir un mélange homogène et stable au moyen de procédures simples. Ainsi, des résines époxydes ne peuvent pas être employées pour améliorer les bitumes paraffiniques, et le polyéthylène n'est pas miscible avec le bitume non paraffinique. Ce problème, cependant, peut être résolu par des réactions catalytiques [56].

La différence très grande dans les viscosités du polymère et du bitume à températures élevées, empêche la dissolution de particules de polymère sous le cisaillement. Le mélange de matériaux qui ont des viscosités extrêmement différentes à températures élevées, n'est pas une tâche facile, et des malaxeurs spéciaux sont nécessaires. Utiliser des malaxeurs conventionnels à grande vitesse n'est pas souhaitable, et les longs temps de malaxage induisent des changements structurels dans le bitume [62].

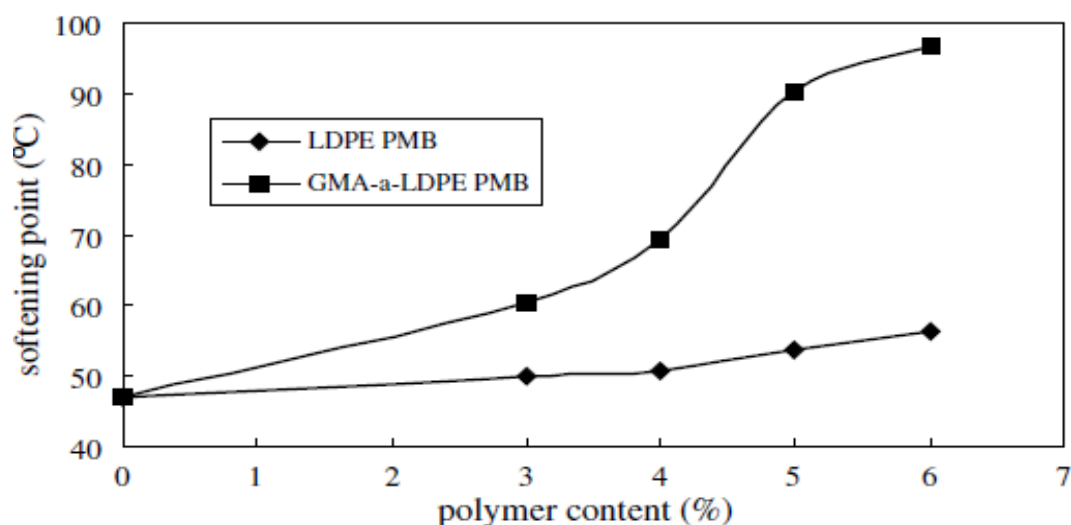


Figure III.3. Point de ramollissement en fonction de % polymère. [59]

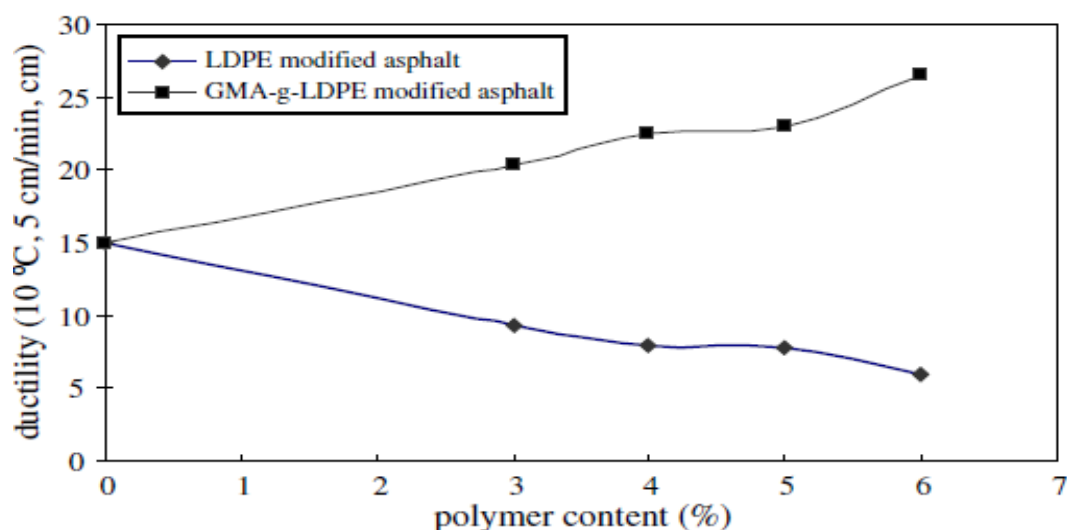


Figure III.4. Ductilité en fonction de % polymère [59].

# Partie II

## ETUDE EXPÉRIMENTALE

---

La deuxième partie présente l'étude expérimentale. Elle aborde les principaux essais réalisés, et présente et discute les résultats obtenus.

Cette partie contient deux chapitres : Bitume modifié et Enrobé modifié.

- Chapitre IV : le bitume modifié consiste en:
  - La caractérisation des propriétés physico-chimiques et mécaniques du bitume pur et celui modifié suivant différentes configurations.
  - La recherche de conditions optimales pour la modification du bitume par l'ajout de plastique et de l'huile de vidange.
- Chapitre V l'enrobé modifié consiste à:
  - Formuler un béton bitumineux, en se basant sur la méthode de formulation française (LCPC).
  - Mettre en évidence les gains apportés par le bitume-plastique sur les performances du béton bitumineux testé.

# **Chapitre IV**

## **Modification du bitume**

## Chapitre IV : Modification du bitume

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, il est procédé à la définition et l'identification du bitume de base utilisé et à rechercher des méthodes et des conditions optimales pour sa modification par l'ajout de plastique de sachets, et d'un agent assouplissant, une huile de vidange. Les gains apportés par la modification du bitume sont aussi mis en évidence.

### IV.2 Matériaux et méthodes expérimentales

#### IV.2.1 Matériaux

##### IV.2.1.1 Bitume

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bitume de base ont donné les résultats rassemblés dans le tableau IV.1. Il s'agit d'un bitume de classe 35/50 commercialisé par NAFTAL.

**Tableau IV.1.** Caractéristiques du bitume utilisé

Type d'essai		Norme	Résultat	Spécification NF EN 12591
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)		EN 1426	41.96	35 - 50
Température bille et anneau « TBA » (°C)		EN 1427	55.85	50-58
Densité relative (g/cm <sup>3</sup> )		EN 15326	1.04	1,0 - 1,1
Ductilité à 25 °C (cm)		EN 13589	138	> 60
Après RTFOT	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	EN 12607-1	22.6	-
	TBA (°C)		62.85	> 52
	Pénétrabilité restante [%]		53.86	> 53
	Δ TBA [°C]		7	< 8

Les caractéristiques physico- mécaniques du bitume pur étudié concordent avec les spécifications préconisées dans la norme NF EN 12591 « Spécifications des bitumes routiers » pour la classe 35/50.

##### IV.2.1.2 Caractérisation du plastique de sachets

Les sacs plastiques sont à base de polyéthylène basse densité LDPE (Low Density Polyethylene). Les polyéthylènes (PE) sont des plastomères thermoplastiques. Les polymères de type LDPE sont caractérisés par leurs structures branchées (branchement de molécules à certains endroits des chaînes de polymère, de formule chimique (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>n</sub>, (figure IV.1))

Les caractéristiques du polyéthylène basse densité (LDPE) telles que présentées dans la littérature sont résumées dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2. Caractéristiques du LDPE (sachets plastiques)

Physiques et chimiques	
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	0.915-0.935
Masse molaire moyenne (g/mol)	10 000
Mécaniques	
Structure	Branchée (figure IV.1)
Caractéristiques principales	Souplesse, transparence, soudabilité
Contrainte au seuil (rupture) (MPa)	10-13
Module de traction (MPa)	200-300
Module de flexion (MPa)	60-400
Thermiques	
Température de fusion (°C)	110-120
Transition vitreuse (°C)	environ -110
Plage de t° de résistance (°C)	de -70 à +60
Conductivité thermique	faible

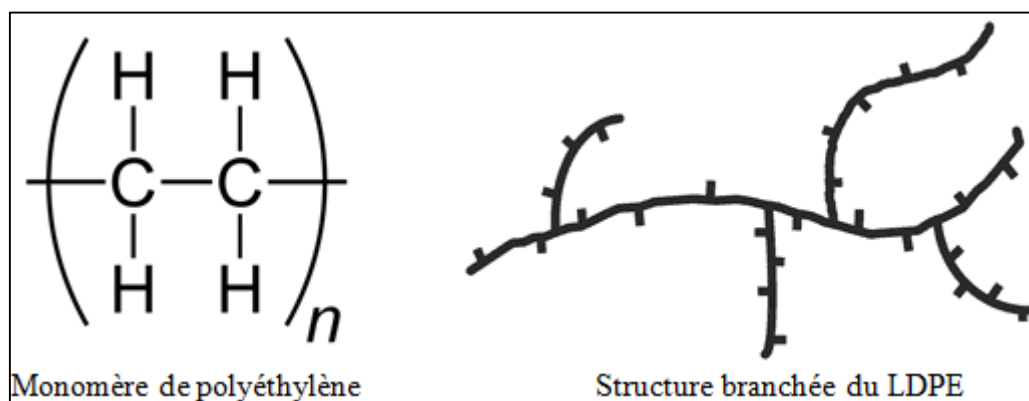


Figure IV.1. Structure chimique du plastique de sachets (LDPE)

#### IV.2.2. Définition des conditions expérimentales de la modification du bitume

On procède ici à rechercher des méthodes et des conditions optimales pour la modification du bitume 35-50 par l'ajout de plastique de sachets.

✓ **Le mode opératoire général adopté suit les étapes :**

- Préchauffer le bitume à 170°C.
- Incorporer progressivement par petits pourcentages les particules de plastique découpées en petits morceaux (figure IV.2) dans le récipient de bitume.
- Maintenir le mélange à température de 170 ±10°C, ([22], [63]),
- Vider immédiatement le contenu du récipient et procéder à la mesure des caractéristiques physiques et mécaniques des bitumes ainsi modifiés.

### IV.2.2.1. Influence de la taille des particules de sachets sur la modification du bitume

Pour faire apparaître l'influence de la taille des particules de plastique sur les caractéristiques du bitume modifié, on adopte des particules de sachets de taille inférieure à 2mm, et d'autres plus grandes de (2-5mm) (figure IV.2), et on fixe le pourcentage d'ajout à 0.5% ,en masse de bitume, pour cette étude. Après une heure de malaxage on obtient un mélange homogène; les particules de plastique n'apparaissent



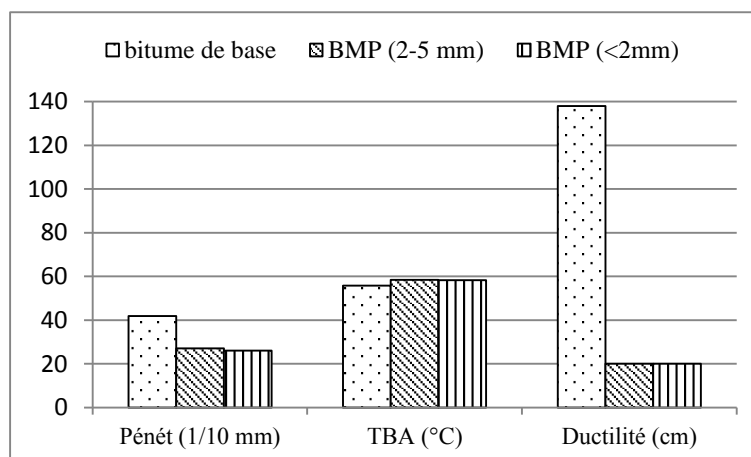
plus à vue d'œil.

**Figure IV.2.** La taille de particule de plastique de sachets (2-5 mm).

Les résultats obtenus sont explicités en termes de pénétrabilité, point de ramollissement et ductilité. Ils sont rassemblés dans le tableau IV.3 et la figure IV.3.

**Tableau IV.3.** Les caractéristiques du bitume-plastique en fonction de la taille des particules de plastique.

% ajout	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	TBA (°C)	Ductilité (cm)
Bitume pur	41.96	55.85	138
0.5 (2-5mm)	27.10	58.40	20
0.5 (<2mm)	26.00	58.25	20



**Figure IV.3.** Les caractéristiques du bitume-plastique en fonction de la taille des particules de plastique.

D'après les résultats de la figure IV.3, on remarque bien que les tailles de particules de plastique testées n'influent pas substantiellement sur les caractéristiques du bitume modifié pour les pourcentages testés. Ce qui indique que les tailles testées sont suffisamment petites pour permettre probablement, pour le pourcentage testé, la parfaite fusion du plastique de sachets dans la matrice bitumineuse. Ainsi on justifie l'adoption de la taille de (2-5mm) du plastique (figure IV.2) pour le reste du travail.

#### IV.2.2.2. Influence du temps de malaxage sur la modification du bitume

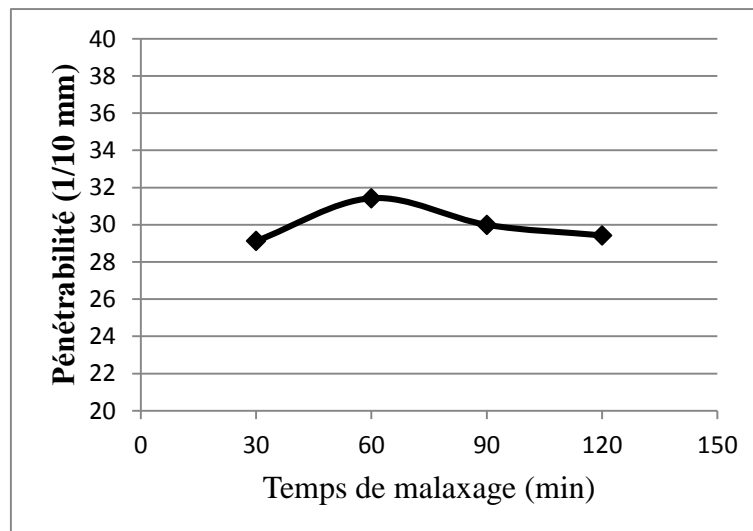
Pour déterminer le temps de malaxage optimal pour la modification du bitume, on fixe le pourcentage d'ajout à 0.5% et on fait varier le temps de malaxage, avec une vitesse de malaxage de 600 tr/min. On teste les temps, 30, 60, 90, et 120 min de malaxage.

##### 1. Pénétrabilité à 25 °C

Les résultats de la pénétrabilité en fonction du temps de malaxage sont rassemblés dans le tableau IV.4 et la figure IV.4.

**Tableau IV.4.** Résultats de la pénétrabilité en fonction du temps de malaxage

Temps de malaxage (min)	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	Spécification NF EN 12591
Bitume pur	41.96	35-50
30	29.13	20-30
60	31.43	20-30
90	30	20-30
120	29.43	20-30



**Figure IV.4.** Variation de la pénétrabilité en fonction du temps de malaxage

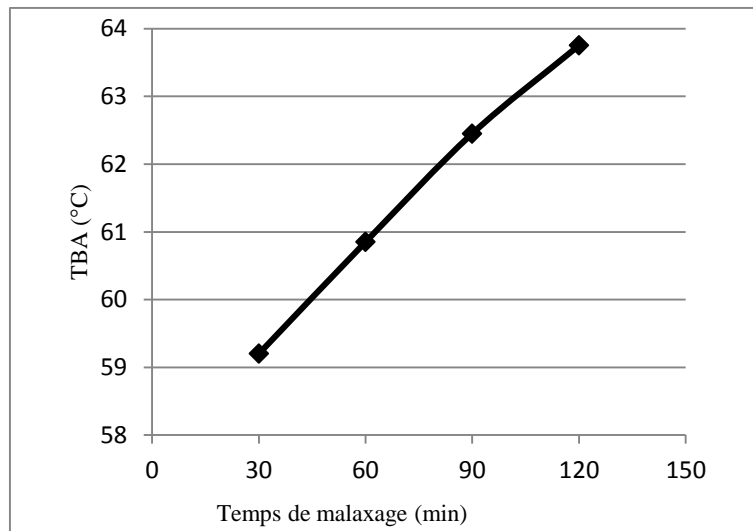
D'après les résultats de la figure IV.4, on remarque que la durée de malaxage exerce un effet négligeable sur la pénétrabilité du mélange.

## 2. Point de ramollissement

Les résultats du point de ramollissement en fonction du temps de malaxage sont rassemblés dans le tableau IV.5 et la figure IV.5.

**Tableau IV.5.** Résultats du point de ramollissement en fonction du temps de malaxage

Temps de malaxage (min)	TBA (°C)	Spécification NF EN 12591	
		35-50	50-58
Bitume pur	55.85	35-50	50-58
30	59.2	20-30	55-63
60	60.85	20-30	55-63
90	62.45	20-30	55-63
120	63.75	20-30	55-63



**Figure IV.5.** La variation du point de ramollissement en fonction du temps de malaxage.

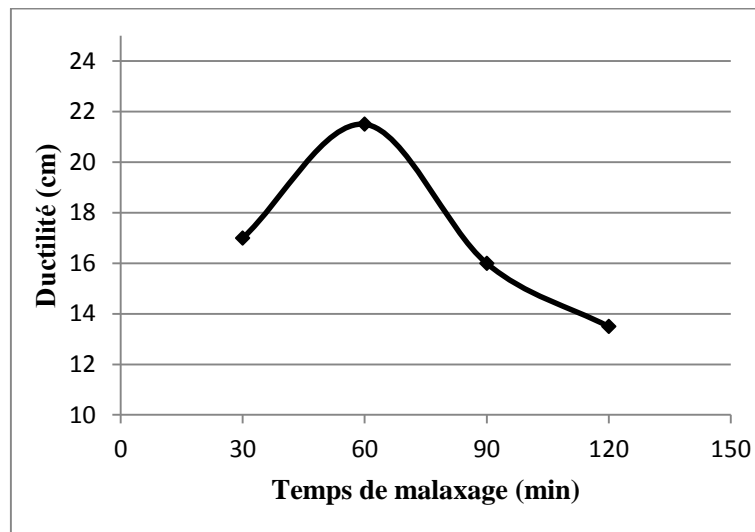
D'après les résultats de la figure IV.5, on remarque que le point de ramollissement augmente d'une manière linéaire en fonction du temps de malaxage (cisaillement). Le cisaillement rend le bitume-plastique de meilleure caractéristique à haute température.

## 3. Ductilité

Les résultats de la ductilité en fonction du temps de malaxage sont rassemblés dans le tableau IV.6 et la figure IV.6.

**Tableau IV.6.** Résultats de la ductilité en fonction du temps de malaxage.

Temps de malaxage (min)	Ductilité (cm)	Spécification NF EN 12591	
Bitume pur	138	35-50	>60 cm
30	17	20-30	>25 cm
60	21.5	20-30	>25 cm
90	16	20-30	>25 cm
120	13.5	20-30	>25 cm

**Figure IV.6.** Variation de la ductilité en fonction du temps de malaxage.

Avec 30 min de malaxage, on remarque que des particules solides de plastique restent encore visibles dans le mélange, indiquant que l'énergie de cisaillement est insuffisante pour la dispersion des particules de plastique de sachets dans la matrice bitumineuse. A partir de 1h de malaxage le mélange apparaît plus homogène à vue d'œil.

La ductilité du bitume à 25 °C, qui caractérise la durabilité à température intermédiaire, diminue en fonction du taux de cisaillement (temps de malaxage) à partir d'une heure de malaxage.

Les longs temps de malaxage induisent des changements structurels dans le bitume modifié. Sur la base de ces résultats, on retient 1h de malaxage, qui correspond à la meilleure ductilité, comme un temps suffisant pour le cisaillement du plastique de sachets dans la matrice bitumineuse.

#### IV.2.2.3. Influence de l'énergie de cisaillement sur la modification du bitume

Pour montrer l'effet de l'énergie de cisaillement sur les caractéristiques de bitume-plastique, on fixe le temps de malaxage à une heure (1h) et on malaxe le mélange bitume-plastique avec une faible énergie (manuel) comparée avec une vitesse de

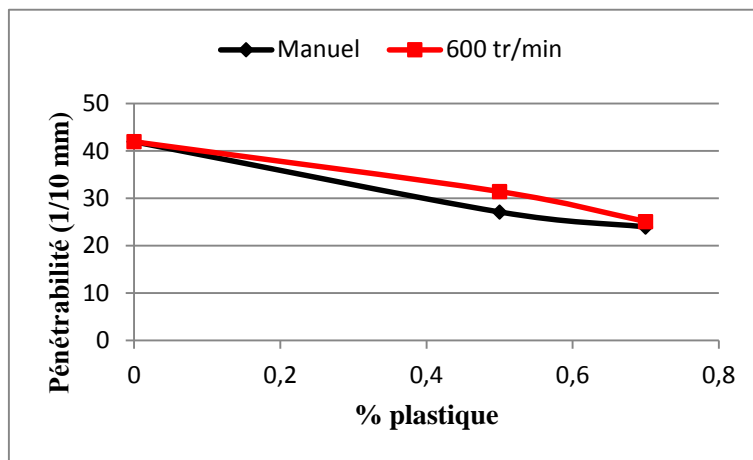
malaxage de 600 tr/min [7]. On teste pour deux pourcentages d'ajout de plastique (0.5 et 0.7 %).

**1. Pénétrabilité à 25 °C**

Les résultats de la pénétrabilité en fonction de l'énergie de malaxage (cisaillement) sont rassemblés dans le tableau IV.7 et la figure IV.7.

**Tableau IV.7.** Résultats de pénétrabilité pour deux énergies de cisaillement.

% ajout	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm) Avec malaxage		Variation de pénétrabilité (1/10 mm)	Spécification NF EN 12591
	Manuel	600 tr/min		
0	41.96		0	35-50
0.5	27.10	31.43	4.33	20-30
0.7	23.93	25.10	1.17	20-30



**Figure IV.7.** La variation de la pénétrabilité pour deux énergies de cisaillement.

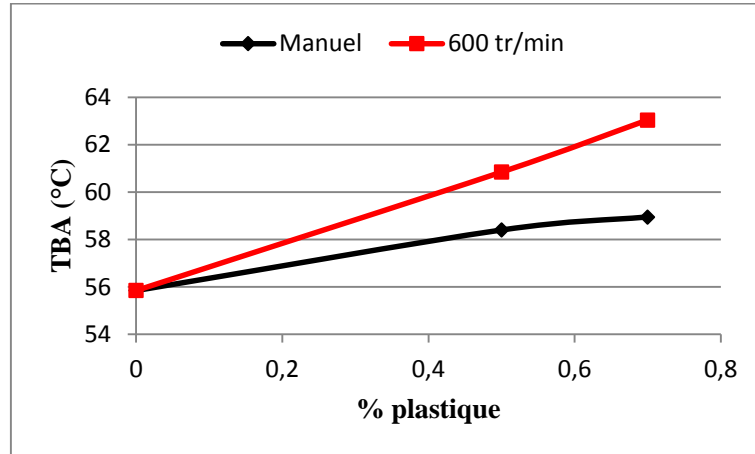
D'après les résultats de la figure IV.7, on remarque qu'il y a une petite variation de la pénétrabilité entre les deux énergies de malaxage, néanmoins la pénétrabilité obtenue par un malaxage manuel (faible énergie) est inférieure à celle obtenue par un malaxage mécanique (600 tr/min), qui peut être expliqué par la mauvaise dissolution du plastique dans la matrice bitumineuse avec une faible énergie de malaxage.

**2. Point de ramollissement**

Les résultats de la température bille anneau en fonction de l'énergie de malaxage (cisaillement) sont rassemblés dans le tableau IV.8 et la figure IV.8.

**Tableau IV.8.** Résultats du point de ramollissement pour deux énergies de cisaillement.

% ajout	TBA °C		Variation du TBA (°C)	Spécification NF EN 12591	
	Manuel	600 tr/min			
0	55.85		0	35-50	50-58
0.5	58.40	60.85	2.24	20-30	55-63
0.7	58.95	63.05	4.10	20-30	55-63



**Figure IV.8.** Variation du point de ramollissement pour deux énergies de cisaillement.

La température bille-anneau augmente avec l'énergie de malaxage pour les différents teneurs en plastique.

Une différence de 4 °C est obtenue pour 0,7% de plastique et environ 2,25 °C pour 0,5% de plastique. Un meilleur mélange bitume-plastique est obtenu par le malaxage mécanique,

Une plus grande énergie de cisaillement permet une meilleure trituration du plastique. On est autorisé de croire aussi que l'énergie de cisaillement permet une plus grande dispersion des groupements d'asphaltènes. Ce qui permet une meilleure homogénéisation des mélanges.

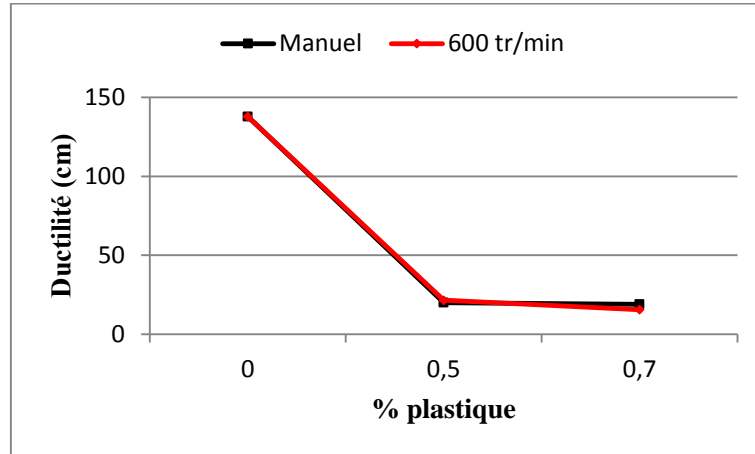
### 3. Ductilité

Les résultats de la ductilité en fonction de l'énergie de malaxage (cisaillement) sont rassemblés dans le tableau IV.9 et la figure IV.9.

**Tableau IV.9.** Résultats de ductilité en fonction d'énergie de cisaillement.

% ajout	Ductilité (cm)		Variation de la ductilité (cm)	Spécification NF EN 12591	
	Manuel	600 tr/min			
0	138		0	35-50	>60 cm
0,5	20	21,5	0,5	20-30	>25 cm
0,7	19	15,5	3,5	20-30	>25 cm

D'après les résultats de la figure IV.9, on remarque que la ductilité chute de 138 cm pour le bitume pur à environ 20 cm pour les deux énergies de malaxage.



**Figure IV.9.** Variation de la ductilité en fonction d'énergie de cisaillement

#### 4. Susceptibilité thermique

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

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

$$50A = \frac{20 - IP}{10 + IP} \quad (IV.1)$$

$$(IV.2)$$

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

On utilise 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.

$$A = \frac{\log(800) - \log(Pen(25^\circ C))}{TBA - 25} \quad (IV.3)$$

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 susceptibilité thermique des liants modifiés est calculée par l'indice de pénétrabilité IP, on utilise les résultats obtenus par les essais de pénétrabilité et points de ramollissement [14]

$$IP = \frac{1952 - 500 \log(Pen_{25}) - 20 SP}{50 \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (IV.4)$$

Où

$Pen_{25}$  : Pénétrabilité à 25 C°

SP : Température de point de ramollissement (softening point temperature)

**Tableau IV.10.** La susceptibilité thermique et l'indice de pénétrabilité en fonction de l'énergie de cisaillement

% ajout	Susceptibilité thermique		Spécification [14]	Indice de pénétrabilité		Spécification [14]
	Manuel	600 tr/min		Manuel	600 tr/min	
0	0.041		0.015-0.06	-0.24		-3 à +7
0.5	0.044	0.038	0.015-0.06	-0.63	0.128	-3 à +7
0.7	0.045	0.039	0.015-0.06	-0.759	0.078	-3 à +7

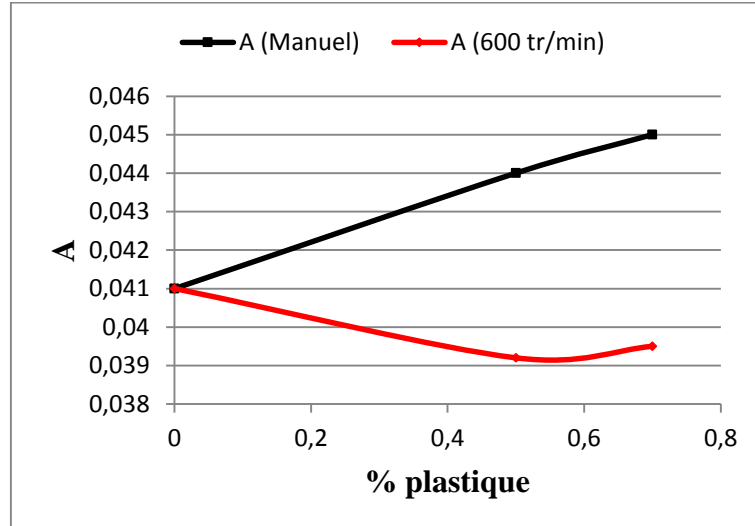
Les bitumes obtenus sont des bitumes routiers car les valeurs de A et IP sont comprises entre :  $-3 \leq IP \leq +7$ , et  $0,015 \leq A \leq 0,06$  respectivement.

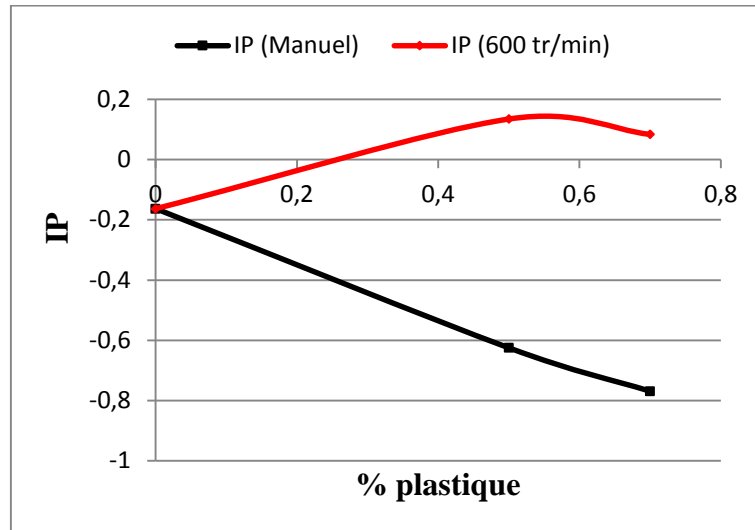
Les résultats de la figure IV.10, montrent la variation de la susceptibilité thermique (A) des bitumes-plastique en fonction de l'énergie de cisaillement.

D'après les résultats de la figure IV.10, on remarque que pour les bitumes modifiés par une faible énergie de malaxage la susceptibilité thermique augmente. Elle diminue par contre pour les bitumes modifiés avec un grand cisaillement.

La courbe de la figure IV.11, montre la variation de l'indice de pénétrabilité des bitumes modifiés en fonction de l'ajout de plastique et de l'énergie de cisaillement.

Les résultats de la figure IV.11 montrent que l'indice de pénétrabilité augmente pour les bitumes modifiés utilisant une grande énergie de malaxage et diminue pour les bitumes modifiés par une faible énergie de malaxage.

**Figure IV.10.** Variation de la susceptibilité thermique en fonction de l'énergie de cisaillement.



**Figure IV.11.** Variation de l'indice de pénétrabilité en fonction de l'énergie de cisaillement.

Le bitume modifié utilisant une vitesse d'agitation de 600 tr/min est moins susceptible à la température par rapport au bitume de base et au bitume modifié par une faible force d'agitation.

Alors, on peut remarquer d'après la susceptibilité thermique et les résultats du point de ramollissement que l'effet du cisaillement dans la modification des bitumes n'est pas négligeable.

Ce résultat pourrait être dû principalement à la grande différence entre les viscosités du polymère et du bitume à températures élevées, qui empêche la parfaite dissolution de particules de polymère sous une faible énergie de cisaillement.

#### IV.2.2.4. Conditions de la modification

D'après les résultats précédents, on peut définir les conditions optimales pour la modification du bitume par les déchets de plastiques de sachets. On retient donc:

- La taille de particule de plastiques de sachets : 2-5 mm
- Le temps de malaxage : 1 h
- La vitesse de cisaillement : 600 tr/min

### IV.3. Modification du bitume

#### IV.3.1. Influence de la teneur en plastique sur le bitume

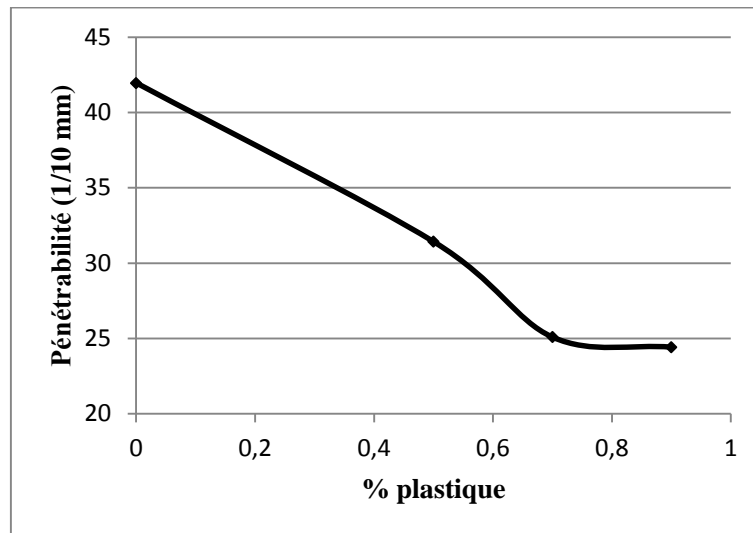
On fait varier le pourcentage de plastique en veillant à obtenir à chaque fois des mélanges stables et homogènes appréciés à vue d'œil.

##### 1. Pénétrabilité à 25 °C

Les résultats de la pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique sont rassemblés dans le tableau IV.11 et la figure IV.12.

**Tableau IV.11.** Résultats de pénétrabilité en fonction de la teneur en plastiques

% ajout	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	Spécification NF EN 12591
0	41.96	35-50
0.5	31.43	20-30
0.7	25.1	20-30
0.9	24.43	20-30

**Figure IV.12.** La variation de pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique.

Les résultats de la figure IV.12, mettent en évidence le fait que la pénétrabilité décroît lorsqu'on élève la concentration de plastique de sachets dans le liant, le bitume devenant plus dur avec l'ajout de plastique. La classe de bitume passe de celle, du bitume pur 35-50 à celle de 20-30 pour tous les pourcentages de plastique considérés.

L'absorption et le gonflement des PE peuvent avoir comme conséquence la modification de la composition et de la structure de la matrice de bitume, indiquant l'augmentation de la viscosité. Ce phénomène s'explique par la dispersion du plastique et son interaction avec les constituants du liant. Ces interactions vont contribuer à l'augmentation de la consistance des bitumes.

La variation est quasi-linéaire jusqu'à 0.7%. Au-delà de cette valeur la pénétrabilité devient stable à l'ajout de plastique. Il semble que 0.7% est le pourcentage pour laquelle le bitume passe de l'état SOL à l'état GEL, puisque un supplément de plastique ne varie plus la pénétrabilité du mélange.

De point de vue de la pénétrabilité, les bitumes plus durs sont meilleurs en fatigue pour des couches de roulement relativement épaisses. L'utilisation d'un bitume dur augmente la durée de vie de l'enrobé [20].

La littérature montre que pour des conditions données de température et de fréquence, le module complexe est grandement influencé par la nature et donc le module du bitume, aussi bien en terme de valeur de la norme du module  $|E^*|$ , qu'en angle de

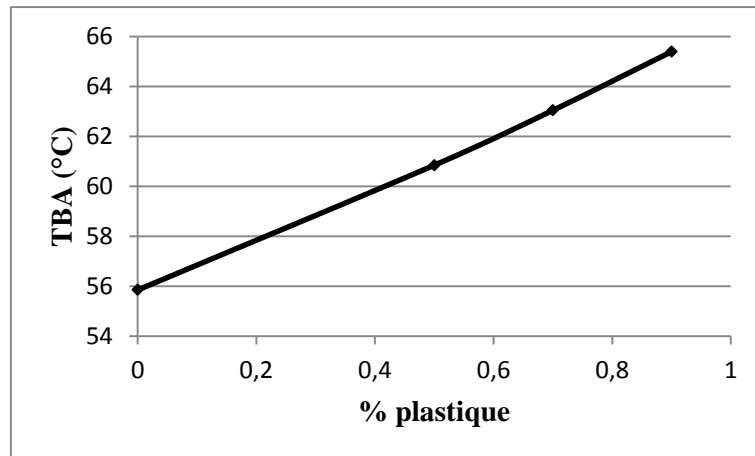
phase ( $\phi$ ). Plus le bitume est dur, plus la norme du module complexe est élevée et la valeur de l'angle de phase est faible [20].

## 2. Point de ramollissement

Les résultats de la température bille-anneau en fonction de la teneur en plastique sont rassemblés dans le tableau IV.12 et la figure IV.13.

**Tableau IV.12.** Résultats de point de ramollissement en fonction du teneur en plastique

% ajout	TBA (°C)	Spécification NF EN 12591	
0	55.85	35-50	50-58
0.5	60.85	20-30	55-63
0.7	63.05	20-30	55-63
0.9	65.40	20-30	55-63



**Figure IV.13.** La variation du point de ramollissement en fonction de la teneur en plastique

Il ressort de la figure IV.13, que la température de ramollissement augmente avec le pourcentage de plastique, ce qui présage l'augmentation de la résistance à l'orniérage de l'enrobé bitumineux, avec un meilleur comportement du bitume à haute température. Ce phénomène s'explique par le fait que l'effet de la perturbation de l'équilibre dynamique qui existe entre les composants des bitumes et qui est provoqué par les composants des particules de plastique de sachets est compensé par l'effet de formation de nouvelles interactions qui sont dues à la réorganisation des molécules dans les mélanges. Il paraît que les nouvelles liaisons créées dans les mélanges sont plus fortes que celles qui existent entre les molécules du bitume pur.

La température bille anneau du bitume modifié par l'ajout de sachets (polyéthylène) entre dans l'intervalle de bitume pur de grade dur 20/30 (55-63 °C).

## 3. Susceptibilité thermique

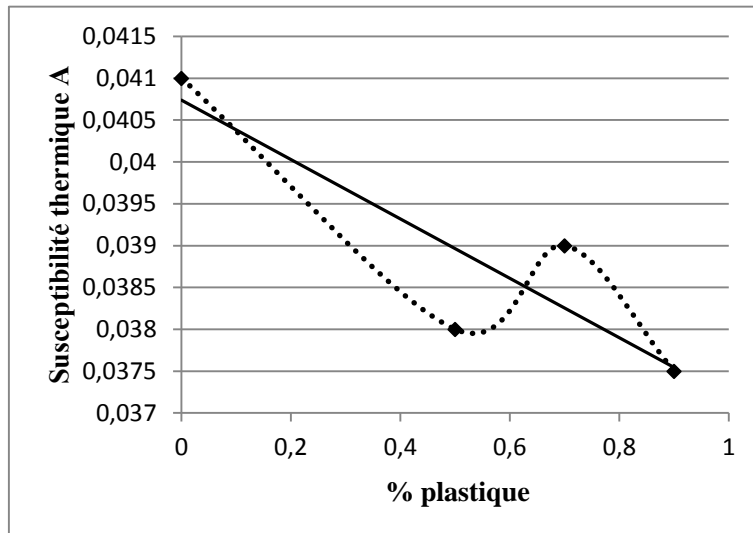
On se base sur la formule de la susceptibilité thermique des bitumes modifiés :

$$IP = \frac{1952 - 500 \log(Pen_{25}) - 20 SP}{50 \log(Pen_{25}) - SP - 120} \quad (IV.5)$$

Les résultats de la susceptibilité thermique en fonction de la teneur en plastique sont résumés dans le tableau IV.13 et la figure IV.14.

**Tableau IV.13.** Résultats de la susceptibilité thermique

% ajout	Susceptibilité thermique	Spécification [14]	Indice de pénétrabilité	Spécification [14]
0	0.041	0.015-0.06	-0.24	-3 à +7
0.5	0.038	0.015-0.06	0.128	-3 à +7
0.7	0.039	0.015-0.06	0.078	-3 à +7
0.9	0.0375	0.015-0.06	0.430	-3 à +7



**Figure IV.14.** Variation de la susceptibilité thermique en fonction de la teneur en plastique.

Les bitumes obtenus sont des bitumes routiers car les valeurs de A et IP sont comprises entre :  $-3 \leq IP \leq +7$ , et  $0,06 \leq A \leq 0,15$ .

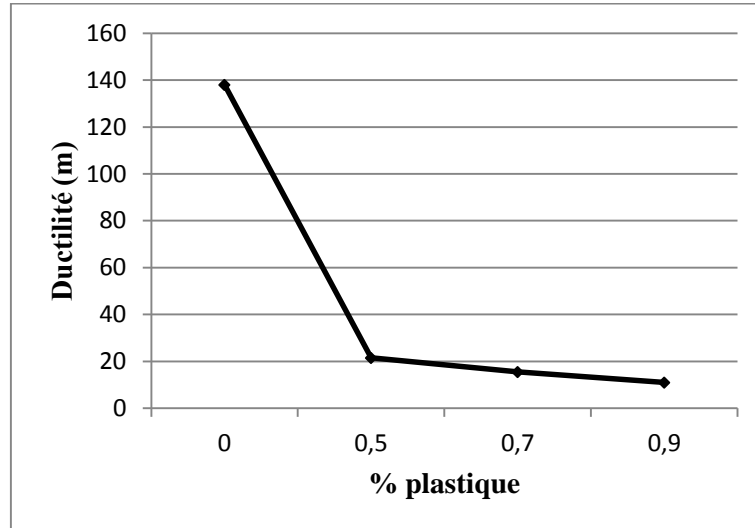
Sans pouvoir dégager une fonction de variation précise, les résultats de la figure IV.14, montrent que la susceptibilité thermique des bitumes diminue en fonction de la teneur en plastique. Le bitume-plastique est moins susceptible à la température que le bitume pur.

#### 4. Ductilité

Les résultats de la ductilité en fonction de la teneur en plastique sont rassemblés dans le tableau IV.14 et la figure IV.15

**Tableau IV.14.** Résultats de la ductilité en fonction du teneur en plastique

% ajout	Ductilité (cm)	Spécification NF EN 12591	
0	138	35-50	>60 cm
0.5	21.5	20-30	>25 cm
0.7	15.5	20-30	>25 cm
0.9	11	20-30	>25 cm



**Figure IV.15.** La variation de la ductilité en fonction de la teneur en plastique

L'ajout de plastique de sachets au bitume influe d'une façon remarquable sur la ductilité. La ductilité du bitume modifié par l'ajout de plastique de sachets ne dépasse pas 20 cm pour toutes les teneurs en plastique. Alors que la ductilité du bitume pur de la classe équivalente est d'environ 25cm.

La ductilité n'est fonction que du module de rigidité du matériau indépendamment de l'origine, du type ou de la catégorie du bitume. 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 [7]. Il est important de souligner à ce niveau que l'essai de ductilité standard ne peut pas rendre correctement compte de la cohésion d'un bitume modifié. La réalisation d'un essai de type force-ductilité serait plus à même de juger de l'aptitude d'un bitume modifié à résister à la traction.

### 5. Etude des bitumes-plastique au vieillissement

Pour montrer l'influence du plastique sur le vieillissement des bitumes, on réalise l'essai RTFOT avec un pourcentage de 0.7% de plastique. On détermine la pénétrabilité et le point de ramollissement dits après RTFOT.

#### 5.1.Pénétrabilité

Les résultats sont donnés dans le tableau IV.15 et schématisés par la figure IV.16.

**Tableau IV.15.** Résultats de pénétrabilité après RTFOT

Bitume	Bitume de base	Bitume+0,7% plastiques	Spécification NF EN 12591
Pénétrabilité à 25 °C			
avant RTFOT [1/10mm]	41.96	25.1	/
après RTFOT [1/10mm]	22.6	16.33	/
Pénétrabilité restante [%]	53.86	65.05	>53

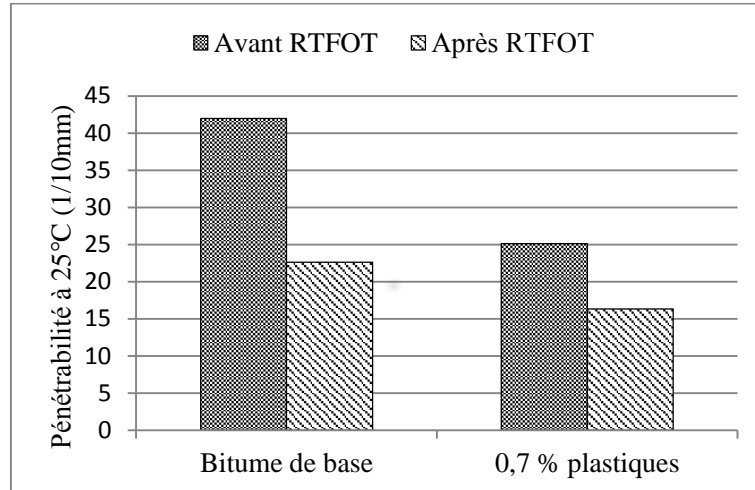


Figure IV.16. Résultats de pénétrabilité après RTFOT

D’après les résultats de la figure IV.16, on remarque que, la pénétrabilité des bitumes (purs et modifiés) diminue après RTFOT. Le pourcentage de pénétrabilité restante (P2/P1) augmente de 54 % pour le bitume pur à 65% pour le bitume modifié par 0,7% plastiques.

L’ajout de plastique au bitume diminue le taux de vieillissement des bitumes, Ce qui présage une meilleure durée de vie aux chaussées à base de bitume modifié.

**5.2.Température bille et anneau « TBA »**

Les résultats sont donnés dans le tableau IV.16 et par la figure IV.17.

Tableau IV.16. Résultats du point de ramollissement après RTFOT

Bitume / TBA °C	Bitume de base	Bitume+0,7% plastiques	Spécification NF EN 12591
avant RTFOT [°C]	55.85	63.05	/
après RTFOT [°C]	62.85	70.55	/
$\Delta TBA$ restante [°C]	7	7,5	<8

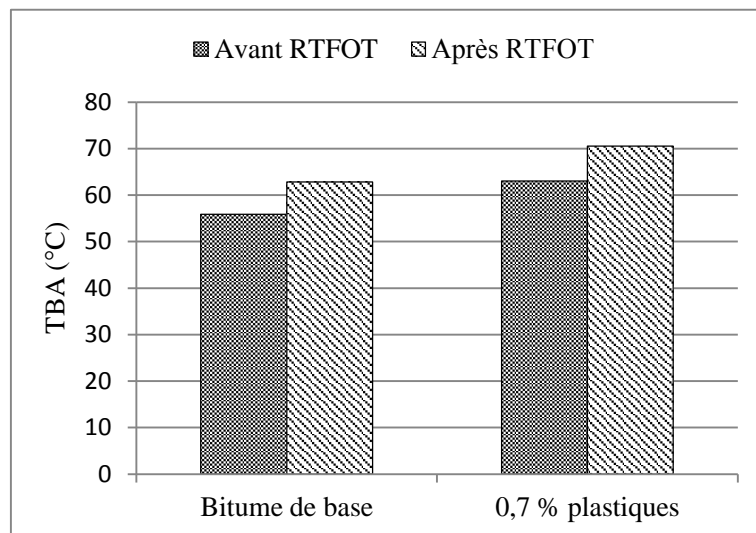


Figure IV.17. Résultats du point de ramollissement après RTFOT

D'après les résultats de la figure IV.17, on remarque que, la température bille et anneau « TBA » des bitumes (purs et modifiés) augmente après RTFOT, et la TBA restante est pratiquement la même pour le bitume pur et le bitume modifié avec 0.7 % plastique.

On peut constater que tous les bitumes subissent un vieillissement mis en évidence par l'essai RTFOT, ce vieillissement se traduit par :

- Une diminution de la pénétrabilité.
- Une augmentation de la température bille et anneau.

En termes chimiques, le vieillissement mène d'abord à une diminution de contenu aromatique et à l'augmentation suivante du contenu de résine, ainsi qu'un contenu relatif plus élevé d'asphalte. Par conséquent, il est courant que les composés aromatiques produisent des résines qui produisent à leur tour des asphaltènes [27], [64].

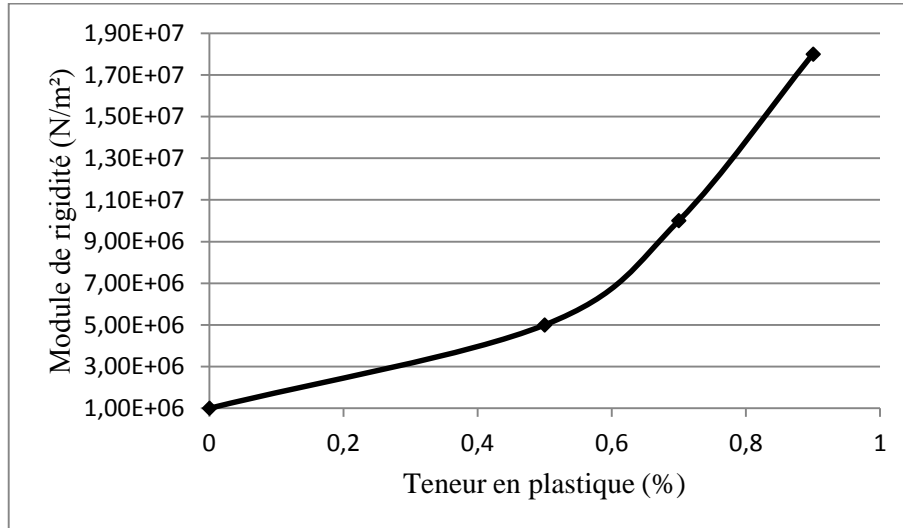
#### 6. Détermination du module de rigidité des bitumes-plastique selon l'abaque de Van der Poel

La détermination du module de rigidité par l'abaque de Van der Poel est utilisée pour les bitumes simples, en se basant sur les résultats de la température bille et anneau et l'indice de pénétrabilité. Dans cette partie, on utilise la méthode de Van der Poel pour la détermination du module de rigidité des bitumes-plastique, pour mettre en évidence l'influence de l'ajout de plastique de sachets sur la rigidité des bitumes. On détermine le module de rigidité des bitumes-plastique pour deux températures d'essai (T), 15 °C pour caractériser le comportement rhéologiques des liants à basse température, et 25 °C pour les moyennes températures (température de service) avec une fréquence de sollicitation de 10 Hz.

Les résultats de module de rigidité en fonction du teneur en plastique sont résumés dans le tableau IV.17 et les figures I.18 et I.19.

**Tableau IV.17.** Module de rigidité en fonction de la teneur en plastique.

Teneur en plastique (%)		0	0.5	0.7	0.9
TBA		55.85	60.85	63.05	65.40
IP		-0.24	0.128	0.078	0.430
Différence de la T° (TBA- T)	15 °C	40.85	45.85	48.05	50.40
	25 °C	30.85	35.85	38.05	40.40
S (N/m <sup>2</sup> ), 15 °C, 10 Hz		1 10 <sup>6</sup>	5 10 <sup>6</sup>	1 10 <sup>7</sup>	1.8 10 <sup>7</sup>
S (N/m <sup>2</sup> ), 25 °C, 10 Hz		3 10 <sup>4</sup>	1.7 10 <sup>5</sup>	5 10 <sup>5</sup>	8 10 <sup>5</sup>

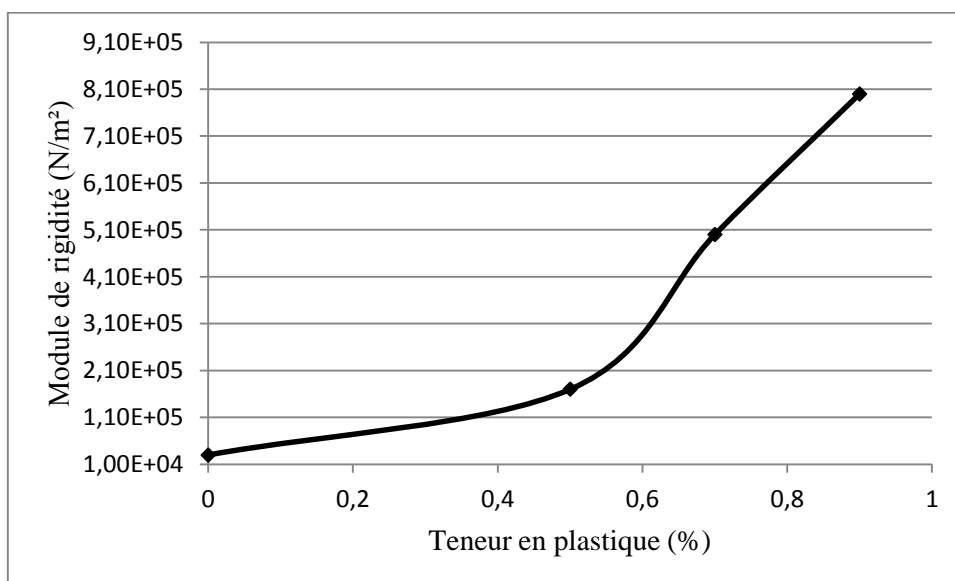


**Figure IV.18.** Module de rigidité estimé à 15 °C en fonction du teneur en plastique.

On remarque d'après la figure IV.18 que le module de rigidité à basse température augmente en fonction du pourcentage du plastique de sachets. Cette augmentation indique que les bitumes modifiés par l'ajout de plastique ont des meilleures caractéristiques rhéologiques à basse température, ce qui présage à une amélioration vis-à-vis des fissurations thermiques dues aux basse températures, alors une bonne résistance à la fatigue.

Le module de rigidité du bitume à température de service (25 °C) augmente par l'augmentation de l'ajout de plastique de sachets (figure IV.19), ce qui donne une meilleure durabilité à l'enrobé, et par voie de conséquence une meilleure durée de vie aux chaussées.

L'ajout de polymère de type plastomère au bitume augmente le module de rigidité et la viscosité à température normale [25], [65].



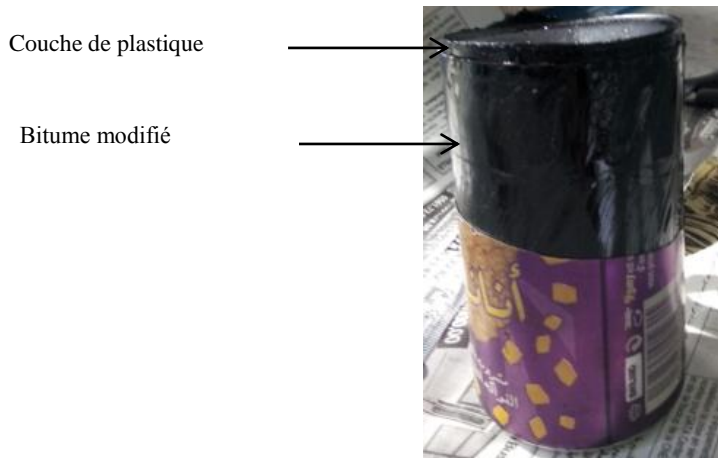
**Figure IV.19.** Module de rigidité estimé à 25 °C en fonction du teneur en plastique

### 7. Essai de stabilité au stockage

Dans cet essai, on maintient un tube d'aluminium de (50 mm de diamètre et 130 mm de hauteur) contenant le bitume-plastique en position verticale dans l'étuve pendant 48 heures à 163 C°, on le refroidit brusquement et on le découpe en trois parties égales. La différence des points de ramollissement entre la partie supérieure et inférieure du tube doit être inférieure à 2.5 C° pour conclure que le mélange bitume-plastique est stable au stockage.

L'échantillon testé est constitué de bitume modifié avec 0.7% de plastique (en masse).

A la fin de l'essai on a remarqué l'existence d'une couche de plastique dans la partie supérieure du mélange (figure IV.20), ce qui illustre visuellement que le bitume-plastique n'est pas stable au stockage. Les résultats du point de ramollissement des deux parties sont résumés dans le tableau IV.18.



**Figure IV.20.** Essai de stabilité au stockage.

**Tableau IV.18.** Les résultats de l'essai de stabilité au stockage.

	TBA (°C)	Spécification
Partie supérieure	68,6	/
Partie inférieure	62,6	/
$\Delta TBA$ (°C)	6,00	< 2.5 °C

D'après les résultats du tableau IV.18, on remarque que la différence du point de ramollissement entre la partie supérieure et la partie inférieure dépasse le 2,5 °C, le mélange bitume-plastique est donc instable au stockage. Ceci vient consolider les constatations visuelles de l'échantillon testé.

On peut donc affirmer, en termes de point de ramollissement, que l'échantillon subit une séparation de phases pendant le stockage à chaud.

Le problème de la stabilité au stockage à températures élevées peut être résolu par l'ajout d'agents chimiques (l'ajout de l'acide polyphosphorique), qui change la

structure de bitume de structure sol à structure gel, ou de maintenir les mélanges sous agitation aux températures de stockage et de transport [28].

Pendant l'interaction bitume-plastique, les particules de plastique commencent à gonfler ou à augmenter de volume étant donné l'absorption des fractions aromatiques.

L'effet conjugué de la température élevée et les huiles du mélange permet le gonflement des particules de polymère. Ces particules gonflées donnent naissance à un bitume de type GEL, de viscosité plus importante.

Le bitume 35-50 contient alors une quantité insuffisante d'huile aromatique, pour réaliser en même temps le gonflement du plastique et à la dissolution normale des particules de plastique dans la matrice bitumineuse. Pour faire face à ce problème, on introduit généralement des huiles (extender-oils) pour tenter d'augmenter l'homogénéité du mélange bitume-plastique. Dans ce travail on teste l'huile de vidange moteur comme extender-oil.

### IV.3.2. Influence de l'ajout d'une huile au bitume-plastique

Pour augmenter la compatibilité entre le bitume et le plastique, on introduit des huiles usées de vidange des véhicules (extender-oils) pour aider la dissolution des particules fines des polymères dans la matrice bitumineuse.

#### IV.3.2.1. Composition moyenne d'une huile usagée

Avant emploi, les huiles moteurs sont constituées d'une huile de graissage de base (mélange complexe d'hydrocarbures, 80 à 90% par volume) et d'additifs destinés à en améliorer la performance (10 à 20% par volume). Les huiles moteur sont altérées durant l'utilisation en raison de la dégradation des additifs, de la contamination par les produits de combustion et de l'addition de métaux provenant de l'usure du moteur. La composition des huiles moteurs usées est donc variable et difficile à définir. Il est reconnu que les principales composantes consistent en hydrocarbures aliphatiques et aromatiques. Il y a également des composés organiques et inorganiques de chlore, de soufre, de phosphore, de brome, d'azote, et des métaux [66].

Etant donnée sa structure difficile, la composition moyenne d'une huile usagée peut se présenter comme indiqué dans la figure IV.21.

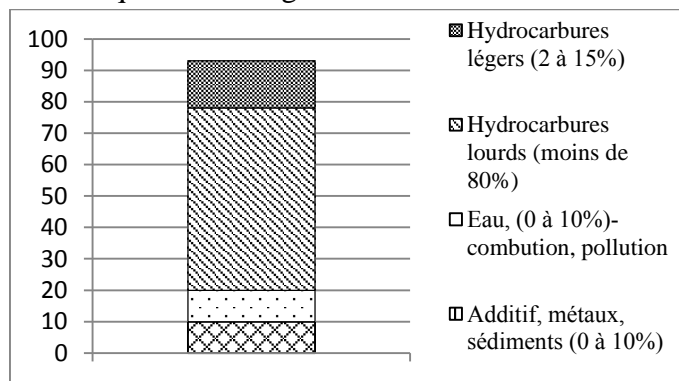


Figure IV.21. Composition moyenne d'une huile usagée [66].

### IV.3.2.2. Influence de l'huile de vidange sur le bitume pur

Pour faire apparaître l'influence de l'huile de vidange sur le bitume pur, on ajoute des pourcentages d'huile au bitume et on se base sur les résultats donnés par la pénétrabilité, le point de ramollissement et la ductilité pour exprimer cette influence.

#### ✓ Mode opératoire

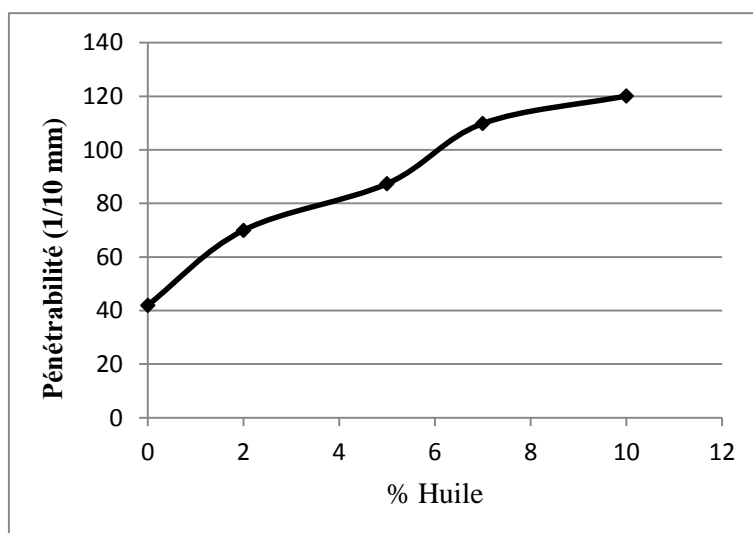
- Chauffer le bitume jusqu'à la consistance fluide, avec une température environ 160 °C.
- Ajouter un pourcentage d'huile préchauffé au bitume.
- Malaxer le mélange à 150 °C, environ 10 min.
- Vider immédiatement le récipient et procéder à la mesure des caractéristiques physiques et mécaniques des bitumes modifiés.

#### 1. Pénétrabilité à 25 °C

Les résultats de la pénétrabilité en fonction de la teneur en huile de vidange sont rassemblés dans le tableau IV.19 et la figure IV.22.

**Tableau IV.19.** Résultats de la pénétrabilité en fonction du teneur en huile de vidange.

% huile	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	Spécification NF EN 12591
0	41.96	35-50
2	69.93	50-70
5	87.33	70-100
7	109.8	100-150
10	120.1	100-150



**Figure IV.22.** Variation de la pénétrabilité en fonction du teneur en huile de vidange au bitume pur.

Après l'ajout de l'huile de vidange au bitume de grade semi dur de classe 35/50, on remarque que la pénétrabilité augmente et que le bitume pur perd de la viscosité, parce que la fraction huileuse augmente (les maltènes) et les micelles d'asphaltènes deviennent totalement solvatées ce qui rend le bitume de structure SOL.

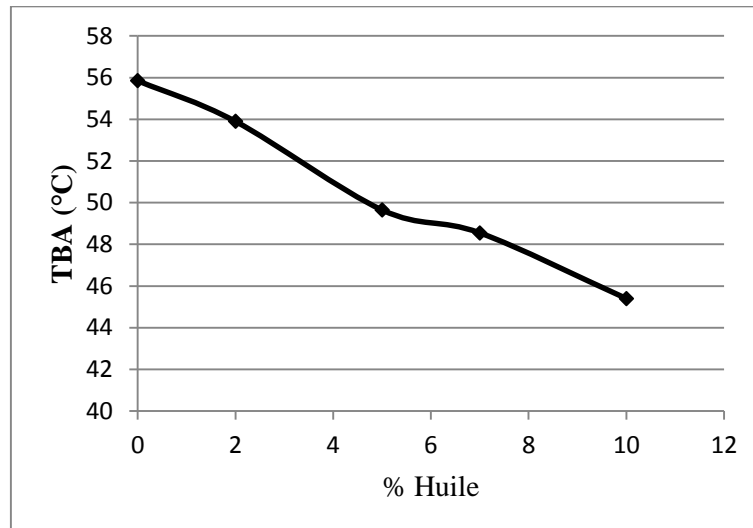
## 2. Point de ramollissement

Les résultats de la température bille-anneau en fonction de la teneur en huile de vidange sont rassemblés dans le tableau IV.20 et la figure IV.23.

**Tableau IV.20.** Résultats du point de ramollissement en fonction du teneur en huile de vidange.

% huile	TBA (°C)	Spécification NF EN 12591	
		35-50	50-58
0	55.85	35-50	50-58
2	53.9	50-70	46-54
5	49.65	70-100	43-51
7	48.55	100-150	39-47
10	45.4	100-150	39-47

D'après les résultats de la figure IV.23, on remarque que le point de ramollissement diminue en fonction de la teneur en huile de vidange. Après l'ajout d'huile, les bitumes perdent leur élasticité à des températures élevées. Les bitumes mous sont très sensibles à haute température. Ce qui augmente leur susceptibilité à l'orniérage (déformations permanentes).



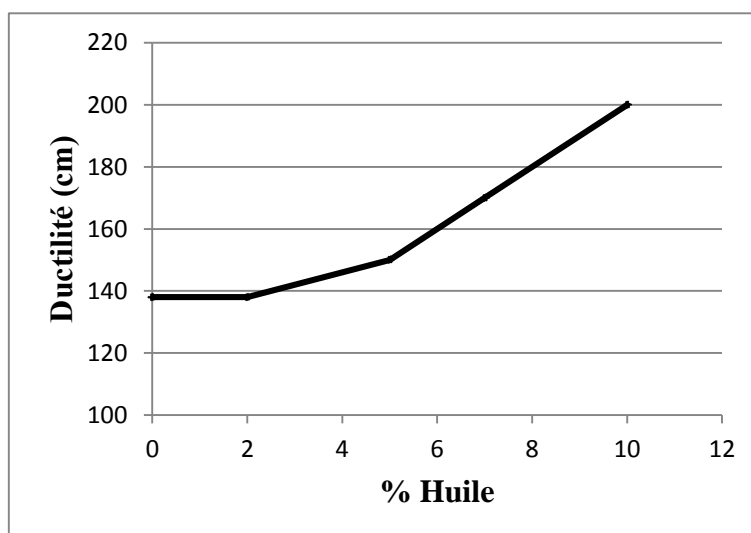
**Figure IV.23.** Variation du point de ramollissement en fonction du teneur en huile de vidange.

## 3. Ductilité

Les résultats de la ductilité en fonction de la teneur en huile de vidange sont rassemblés dans le tableau IV.21 et la figure IV.24.

**Tableau IV.21.** Résultats de la ductilité en fonction de la teneur en huile de vidange.

% ajout	Ductilité (cm)	Spécification NF EN 12591	
0	138	35-50	>60 cm
2	138	50-70	>80 cm
5	> 145	70-100	>100 cm
7	> 145	100-150	>100 cm
10	> 145	100-150	>100 cm

**Figure IV.24.** Variation de la ductilité en fonction de la teneur en huile de vidange.

D'après le résultat de la figure IV.24, on remarque que la ductilité augmente en fonction de la teneur en huile de vidange, ce qui caractérise la non fragilité du liant avec une grande aptitude à enrober le squelette granulaire.

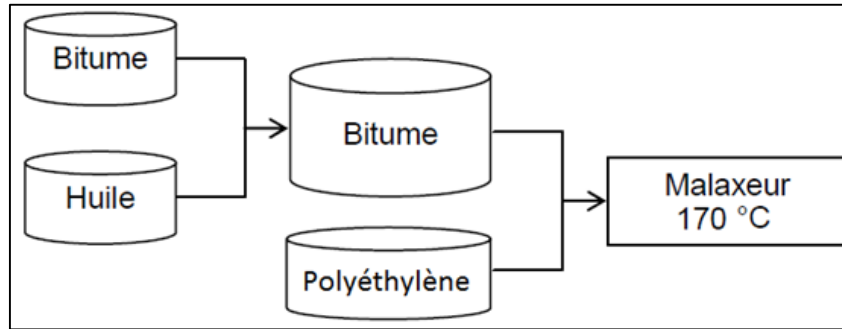
Il est important de signaler que pour les pourcentages de 7 et 10%, le film de bitume touche et colle au fond du ductilimètre, le frottement du bitume avec le fond du ductilimètre provoque la rupture à des valeurs inférieures que celles données avec 2 et 5% d'huile.

L'ajout des faibles pourcentages d'huile de vidange au bitume semi dur, donne des bitumes mous, qui répondent aux spécifications préconisées dans la norme NF EN 12591 « Spécifications des bitumes routiers »,

Alors, on peut utiliser l'huile de vidange comme un agent pour tenter d'augmenter la dispersion des plastiques (polyéthylènes) dans la matrice bitumineuse.

#### **IV.3.2.3. Modification du bitume-huile de vidange par l'ajout de plastique**

Le liant modifié est composé de polyéthylène, de bitume et d'huile aromatique destinée à fluxer le bitume et à le rendre plus réactif vis-à-vis du polymère (figure IV.25).



**Figure IV.25.** Chaîne de fabrication du bitume-polymère.

Pour avoir des mélanges bitume-plastique homogènes qui répondent aux spécifications du bitume modifié, on doit d’abord fixer le pourcentage d’huile à adopter.

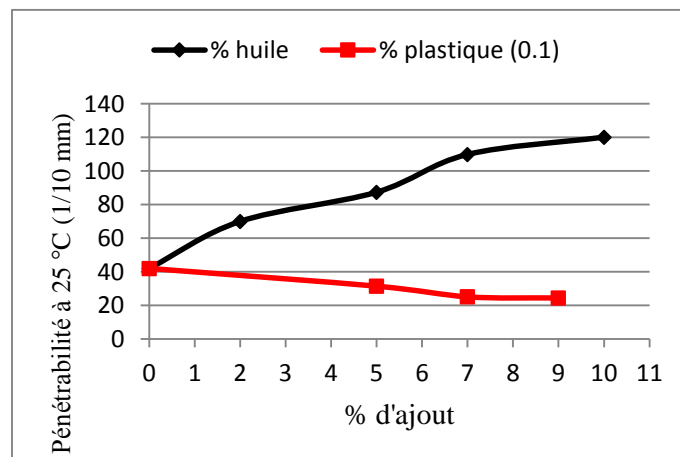
Pour déterminer le pourcentage d’huile adéquat, on se base sur la comparaison des résultats de pénétrabilité et de point de ramollissement obtenus par le bitume-plastique et bitume-huile

**1. Résultats de la pénétrabilité**

Les résultats de la pénétrabilité des deux bitumes modifiés en fonction de la teneur en plastique et teneur en huile sont rassemblés dans le tableau IV.22 et la figure IV.26.

**Tableau IV.22.** Résultats de la pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique et la teneur en huile.

% huile	Pénét (1/10 mm)	Spécification NF EN 12591	% plastique	Pénét (1/10 mm)	Spécification NF EN 12591
0	41.96	35-50	0	41.96	35-50
2	69.93	50-70	0.5	31,43	20-30
5	87.33	70-100	0.7	25,1	20-30
7	109.8	100-150	0.9	24,43	20-30
10	120.1	100-150			



**Figure IV.26.** Variation de la pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique et la teneur en huile.

On calcule la différence entre la pénétrabilité de chaque mélange de bitume-huile et le bitume-plastique, on doit chercher le pourcentage d'huile qui donne une petite différence entre la pénétrabilité de bitume-huile et bitume-plastique, car une grande différence de pénétrabilité nécessite une grande quantité de plastique ce qui peut provoquer le risque de ségrégation de mélange.

Les résultats de la différence de pénétrabilité entre le bitume-huile et le bitume-plastique sont rassemblés dans le tableau IV.23 et la figure IV.27.

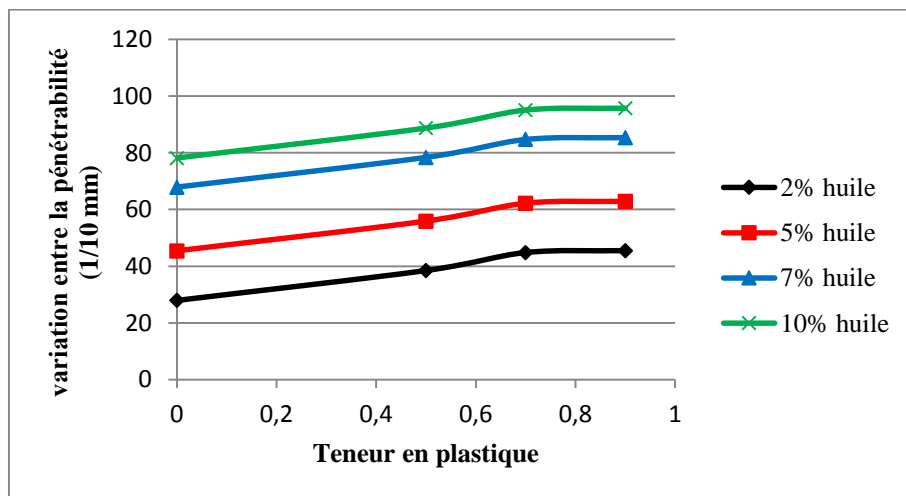
**Tableau IV.23.** Différence de la pénétrabilité entre le bitume-huile et le bitume-plastique.

% huile	Variation de la pénétrabilité (1/10 mm)			
	% plastique			
	0	0.5	0.7	0.9
2	27,97	38,5	44,83	45,5
5	45,37	55,9	62,23	62,9
7	67,84	78,37	84,7	85,37
10	78,14	88,67	95	95,67

D'après les résultats de la figure IV.27, on remarque que pour le même pourcentage de plastique, la variation de pénétrabilité augmente d'une façon significative avec l'augmentation du pourcentage d'huile. Mais elle a une faible variation avec la teneur en plastique.

Pour les deux teneurs en huiles de 7 et 10%, on remarque que la différence entre les valeurs de la pénétrabilité dépasse 80. (1/10 mm). Alors ils nécessitent des pourcentages élevés de plastique pour empêcher la pénétrabilité à des valeurs inférieures à 30. 1/10 mm, ce qui peut provoquer la ségrégation des mélanges à haute température.

D'après les résultats on va limiter le pourcentage d'huile pour la modification entre 2 et 5%.



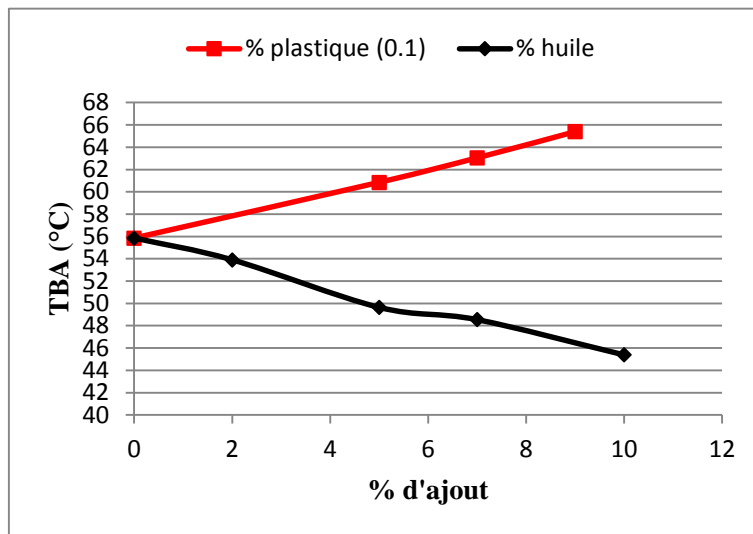
**Figure IV.27.** Variation de la pénétrabilité entre le bitume-huile et le bitume-plastique.

**2. Résultats de point de ramollissement**

Les résultats du point de ramollissement des deux bitumes modifiés en fonction du teneur en plastique et teneur en huile sont rassemblés dans le tableau IV.24 et la figure IV.28.

**Tableau IV.24.** Résultats du point de ramollissement en fonction du teneur en plastique et teneur en huile.

% huile	TBA (°C)	Spécification		% plastique	TBA (°C)	Spécification NF EN 12591	
0	55.85	35-50	50-58	0	55.85	35-50	50-58
2	53.9	50-70	46-54	0.5	60.85	20-30	55-63
5	49.65	70-100	43-51	0.7	63.05	20-30	55-63
7	48.55	100-150	39-47	0.9	65.4	20-30	55-63
10	45.4	100-150	39-47				

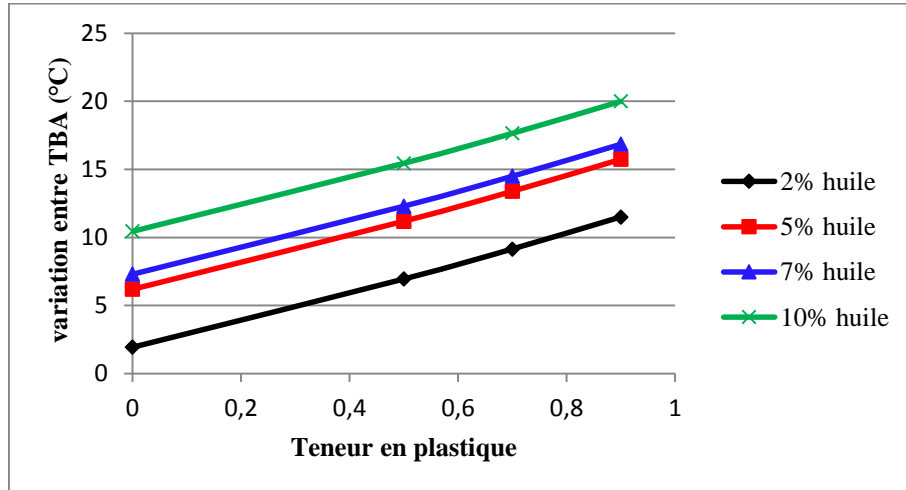


**Figure IV.28.** La variation de point de ramollissement en fonction de la teneur en plastique et de la teneur en huile.

Les résultats de la variation du point de ramollissement entre le bitume-huile et bitume-plastique sont rassemblés dans le tableau IV.25 et la figure IV.29.

**Tableau IV.25.** Variation du point de ramollissement entre le bitume-huile et bitume-plastique

% huile	Variation du point de ramollissement (°C)		
	% plastique		
	0.5	0.7	0.9
2	6,95	9,15	11,5
5	11,2	13,4	15,75
7	12,3	14,5	16,85
10	15,45	17,65	20



**Figure IV.29.** Variation du point de ramollissement entre le bitume-huile et bitume-plastique

Pour le même pourcentage de plastique, la variation de la température bille et anneau augmente d'une façon significative avec l'augmentation de la teneur en huile. Mais elle a une faible variation avec la teneur en plastique.

D'après les résultats de la figure IV.29, on remarque qu'il y a une grande différence entre les valeurs des points de ramollissements de bitume-huile et bitume-plastique pour les trois teneurs en huile 5, 7 et 10%.

Alors, on va fixer le pourcentage de 2% d'huile comme un pourcentage idéal pour le reste de la modification en poussant les pourcentages de plastique jusqu'à 2%.

#### IV.3.2.4. Influence de la teneur en plastique sur le bitume + 2% huile de vidange

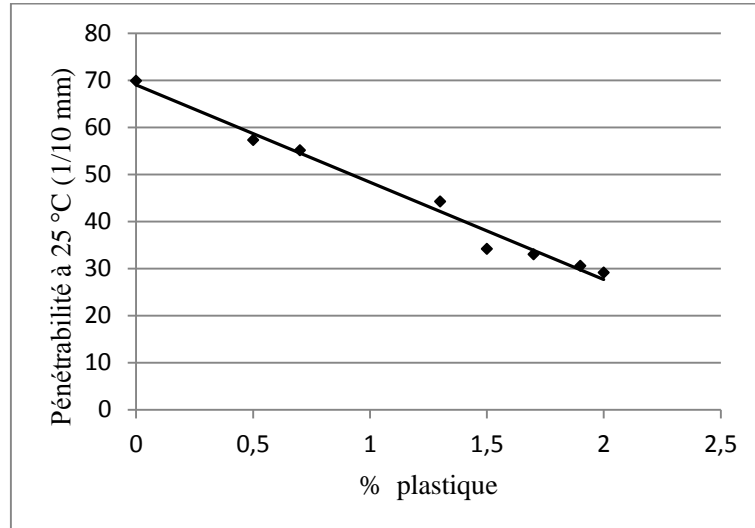
On ajoute 2% d'huile de vidange, et on fait varier le pourcentage de plastique de sachets en veillant à obtenir des mélanges stables et homogènes. On a remarqué qu'au-delà de 2% de plastique le mélange ne peut plus être homogène.

##### 1. Pénétrabilité à 25 °C

Les résultats de la pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique sont rassemblés dans le tableau IV.26 et la figure IV.30.

**Tableau IV.26.** Résultats de la pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique

% ajout	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	Spécification NF EN 12591
0	69,93	50-70
0,5	57,30	50-70
0,7	55,16	50-70
1,3	44,25	35-50
1,5	34,23	35-50
1,7	33,03	35-50
1,9	30,60	20-30
2,0	29,16	20-30



**Figure IV.30.** Variation de la pénétrabilité en fonction de la teneur en plastique

D'après les résultats de la figure IV.30, on remarque que la variation est quasi-linéaire en fonction de la teneur en plastique.

Avec 2% d'huile de vidange, le bitume peut dissoudre une plus grande quantité de plastique. On remarque aussi que les mélanges apparaissent plus homogènes à vue d'œil, avec l'absence des petites particules qui étaient visibles dans les bitumes modifiés (bitume-plastique) sans huile. Néanmoins, il faut signaler qu'à 2% de plastique le mélange devient rugueux avec apparition des phases continues de particules de plastiques de sachets (phase riche en polymère).

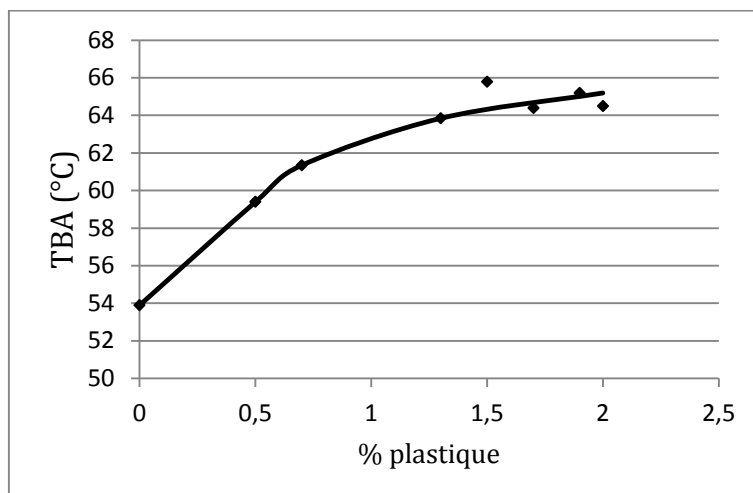
## 2. Point de ramollissement

Les résultats de la température bille-anneau en fonction de la teneur en plastique sont rassemblés dans le tableau IV.27 et la figure IV.31.

D'après les résultats de la figure IV.31, on remarque que la température du point de ramollissement augmente en fonction de la quantité de plastique, elle se stabilise à partir de l'ajout de 1,5% de plastique entre 64 et 65 °C, sachant que l'erreur admise entre deux températures de ramollissement est de 1 à 1,5 °C.

**Tableau IV.27.** Résultats de la température bille anneau en fonction de la teneur en plastique.

% ajout	TBA (°C)	Spécification NF EN 12591	
0	53.90	50-70	46-54
0.5	59.40	50-70	46-54
0.7	61.35	50-70	46-54
1.3	63.85	35-50	50-58
1.5	65.80	35-50	50-58
1.7	64.40	35-50	50-58
1.9	65.20	20-30	55-63
2.0	64.50	20-30	55-63



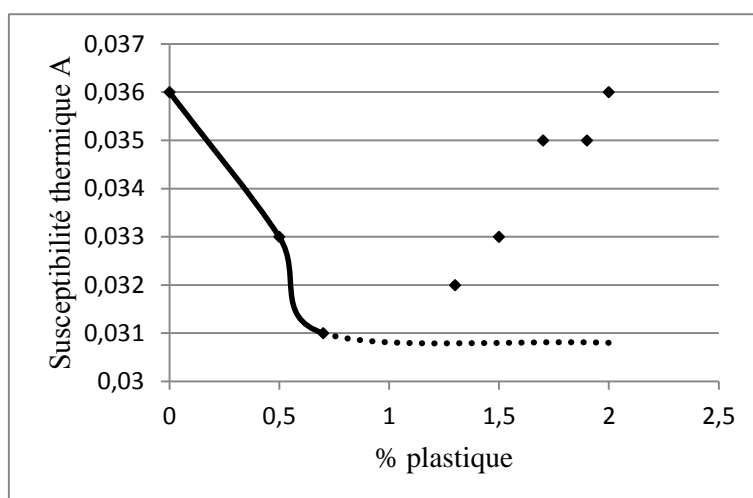
**Figure IV.31.** Variation de la température bille anneau en fonction de la teneur en plastique

### 3. Susceptibilité thermique

Les résultats de la susceptibilité thermique en fonction de la teneur en plastique sont résumés dans le tableau IV.28 et la figure IV.32.

**Tableau IV.28.** Résultats de la susceptibilité thermique en fonction de la teneur en plastique

% ajout	Susceptibilité thermique	Spécification [14]	Indice de pénétrabilité	Spécification [14]
0	0,036	0.015-0.06	0,591	-3 à +7
0.5	0,033	0.015-0.06	1,257	-3 à +7
0.7	0,031	0.015-0.06	1,546	-3 à +7
1.3	0,032	0.015-0.06	1,456	-3 à +7
1.5	0,033	0.015-0.06	1,2	-3 à +7
1.7	0,035	0.015-0.06	0,729	-3 à +7
1.9	0,035	0.015-0.06	0,855	-3 à +7
2	0,036	0.015-0.06	0,632	-3 à +7



**Figure IV.32.** Résultats de la susceptibilité thermique en fonction du teneur en plastique.

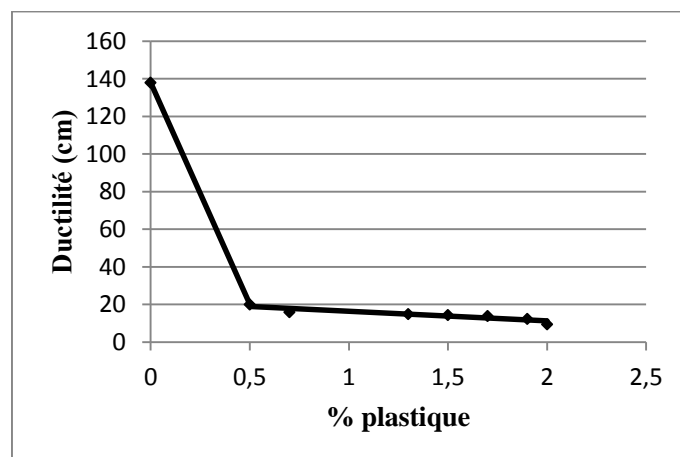
Les résultats de la figure IV.32, résumant la variation de la susceptibilité thermique des bitumes modifiés par 2% d'huile de vidange en fonction de l'ajout de plastique de sachets. On remarque que la susceptibilité thermique diminue jusqu'à 0,7% de plastique et au-delà de ce pourcentage la susceptibilité semble augmenter avec l'augmentation de la teneur en plastique tout en restant toujours inférieure à la susceptibilité thermique de bitume de base et des bitumes-plastiques (sans huile). L'augmentation de la susceptibilité thermique au-delà de 0.7% plastique n'est pas justifiée expérimentalement. Elle découle exclusivement de l'erreur introduite par le calcul de la susceptibilité à partir de la TBA, lorsque la pénétrabilité varie et la TBA ne change pas, ce qui est le cas ici. Sur cette base il est possible de conclure que la susceptibilité thermique du bitume-plastique + 2% d'huile se stabilise au-delà de 0.7% de plastique. Ce qui permet dans ce cas de s'attendre à une amélioration remarquable de la résistance à l'orniérage des bitumes-plastique+huile vidange.

#### 4. Ductilité

Les résultats de la ductilité en fonction de la teneur en plastique sont rassemblés dans le tableau IV. 29 et la figure IV.33.

**Tableau IV.29.** Résultats de la ductilité en fonction de la teneur en plastique.

% ajout	Ductilité (cm)	Spécification NF EN 12591	
0	138	50-70	>80 cm
0.5	20	50-70	>80 cm
0.7	16	50-70	>80 cm
1.3	15	35-50	>60 cm
1.5	14.5	35-50	>60 cm
1.7	14	35-50	>60 cm
1.9	12.5	20-30	>25 cm
2.0	9.5	20-30	>25 cm



**Figure IV.33.** Variation de la ductilité en fonction de la teneur en plastique.

D'après les résultats de la figure IV.33, on remarque que l'ajout d'une faible quantité de plastique influe directement sur la ductilité, mais cette dernière reste néanmoins

quasi stable avec l'augmentation de la teneur en plastique. On remarque que malgré l'ajout de l'huile de vidange, la ductilité reste influencée par l'ajout de plastique car le critère ductile n'est pas en relation avec les huiles aromatiques. Il reste que, tel que mentionné plus haut, l'essai de ductilité standard ne peut pas juger de la cohésion des bitumes modifiés. L'essai force-ductilité est plus adapté dans ce cas.

### 5. Etude des bitumes (+2% huile)-plastique au vieillissement

Pour montrer l'effet conjugué de l'huile et du plastique sur le vieillissement des bitumes, on a réalisé l'essai RTFOT avec un pourcentage de 1.7% plastique. On calcule la pénétrabilité et le point de ramollissement dit après RTFOT.

#### 5.1.Pénétrabilité

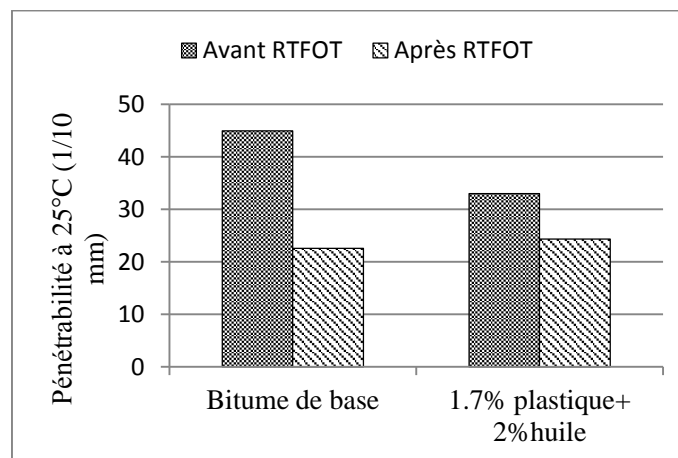
Les résultats de la pénétrabilité après RTFOT sont donnés dans le tableau IV.30 et par la figure IV.34.

**Tableau IV.30.** Résultats de pénétrabilité après RTFOT

Bitume	Bitume de base	Bitume+2% huile+1.7%plastiques	Spécification NF EN 12591
Pénétrabilité à 25 °C			
avant RTFOT [1/10mm]	41.96	33.03	/
après RTFOT [1/10mm]	22.6	24.33	/
Pénétrabilité restante [%]	53.86	73.66	>53

D'après les résultats de la figure IV.34 on remarque que, la pénétrabilité des bitumes (purs et modifiés) diminue après RTFOT. Le pourcentage de pénétrabilité restante (P2/P1) augmente de 54 % pour le bitume pur à 74 % pour le bitume modifié par 2% huile et 1,7% plastique.

L'ajout de plastique au bitume + 2% huile diminue le taux de vieillissement des bitumes, ce qui permet de s'attendre à une meilleure durée de vie des chaussées à base de bitume modifié plus huile.



**Figure IV.34.** Résultats de pénétrabilité après RTFOT.

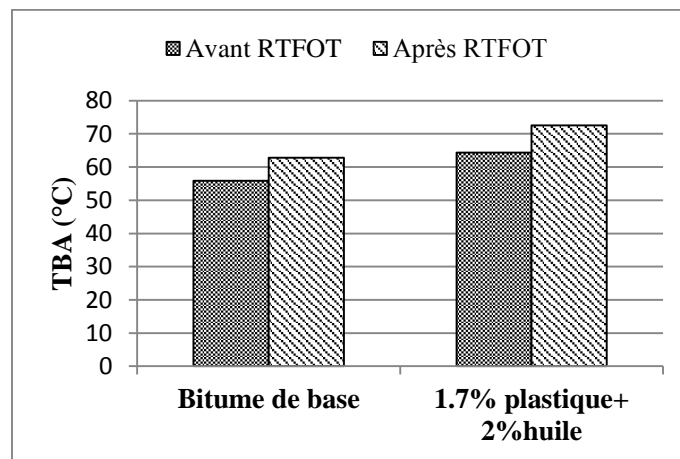
### 5.2. Température bille et anneau « TBA »

Les résultats du point de ramollissement après RTFOT sont donnés par le tableau IV.31 et schématisés par la figure IV.35.

**Tableau IV.31.** Résultats du point de ramollissement après RTFOT

Bitume TBA °C	Bitume de base	Bitume+0,7% plastiques	Spécification NF EN 12591
avant RTFOT [°C]	55.85	64,4	/
après RTFOT [°C]	62.85	72,6	/
$\Delta TBA$ restante [°C]	7	8,2	<8

D'après les résultats de la figure IV.35, on remarque que, la température bille-anneau « TBA » des bitumes (purs et modifiés) augmente après RTFOT. La TBA restante augmente de 7 °C pour le bitume pur à 8.2 °C pour le bitume modifié par 2% huile et 1.7% plastique. Ce résultat confirme l'apport des plastomères qui tendent à modifier la pénétrabilité et beaucoup moins la température bille-anneau des bitumes modifiés.



**Figure IV.35.** Résultats du point de ramollissement après RTFOT.

### 6. Détermination du module de rigidité des bitumes-huile-plastique selon l'abaque de Van der Poel

On détermine le module de rigidité des bitumes-huile-plastique pour deux températures d'essai (T), 15 °C et 25 °C avec une fréquence de sollicitation de 10 Hz.

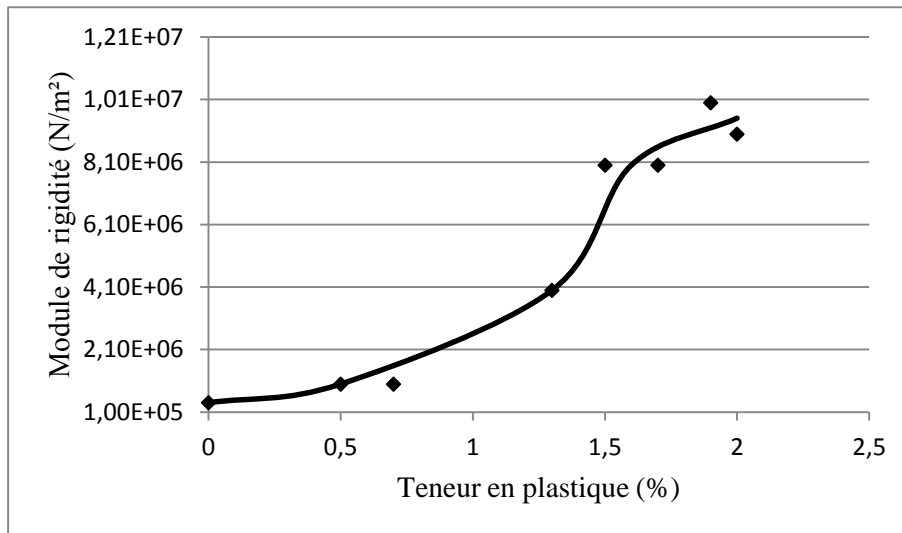
Les résultats de module de rigidité des bitume-huile-plastique sont résumés dans le tableau IV.32 et les figures I.36 et I.37.

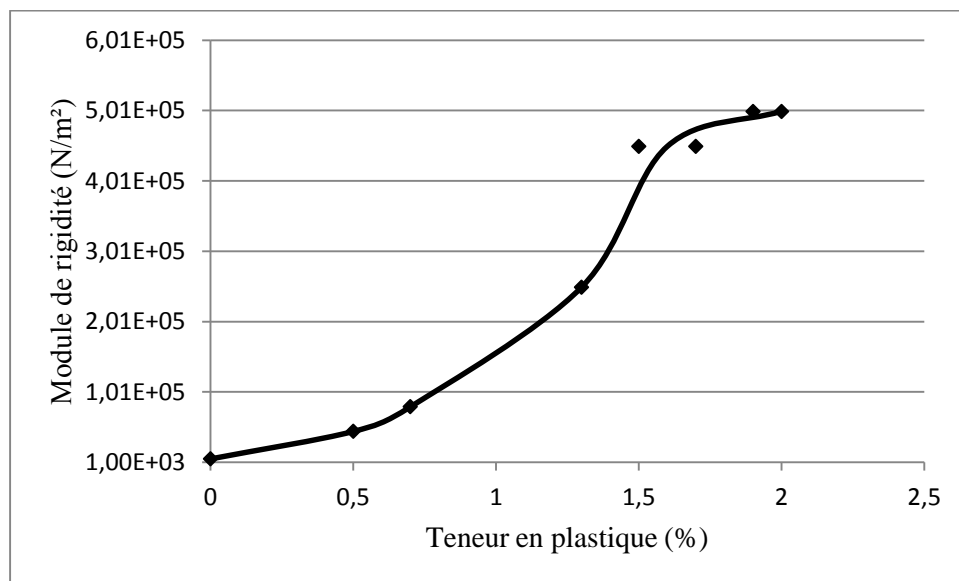
**Tableau IV.32.** Module de rigidité des bitumes-huile-plastique en fonction du teneur en plastique.

Teneur en plastique (%)	0	0.5	0.7	1.3	1.5	1.7	1.9	2
TBA	53.9	59.4	61.35	63.85	65.8	64.4	65.2	64.5
IP	0.591	1.257	1.546	1.456	1.2	0.729	0.855	0.632
Différence de la T°	15	38.9	44.4	46.35	48.85	50.8	49.4	49.4
	25	28.9	34.4	36.35	38.85	40.8	39.4	39.4
S (N/m <sup>2</sup> ), 15 °C, 10 Hz	4 10 <sup>5</sup>	1 10 <sup>6</sup>	1 10 <sup>6</sup>	4 10 <sup>6</sup>	8 10 <sup>6</sup>	8 10 <sup>6</sup>	1 10 <sup>7</sup>	9 10 <sup>6</sup>
S (N/m <sup>2</sup> ), 25 °C, 10 Hz	6 10 <sup>3</sup>	4.5 10 <sup>4</sup>	8 10 <sup>4</sup>	2.5 10 <sup>5</sup>	4.5 10 <sup>5</sup>	4.5 10 <sup>5</sup>	5 10 <sup>5</sup>	5 10 <sup>5</sup>

D'après la figure IV.36, on remarque que le module de rigidité du bitume à basse température augmente de  $4.10^5$  Pa (N/m<sup>2</sup>) pour le bitume pur jusqu'à  $1.10^7$  Pa pour l'ajout de 1,9% plastique au bitume plus 2% d'huile. Le bitume-huile-plastique diminue la susceptibilité à la fissuration thermique de l'enrobé bitumineux à basse température.

D'après la figure IV.37, on remarque que, l'ajout de plastique de sachets au bitume plus 2% huile augmente le module de rigidité du bitume à température de 25 °C, ce qui augmente la durabilité des enrobés bitumineux.

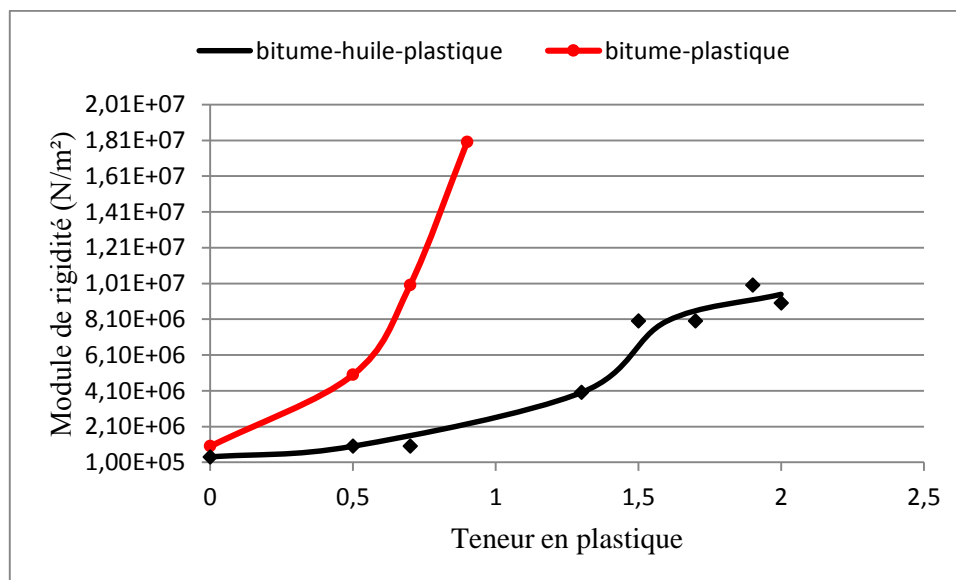
**Figure IV.36.** Module de rigidité estimé à 15 °C en fonction du teneur en plastique.



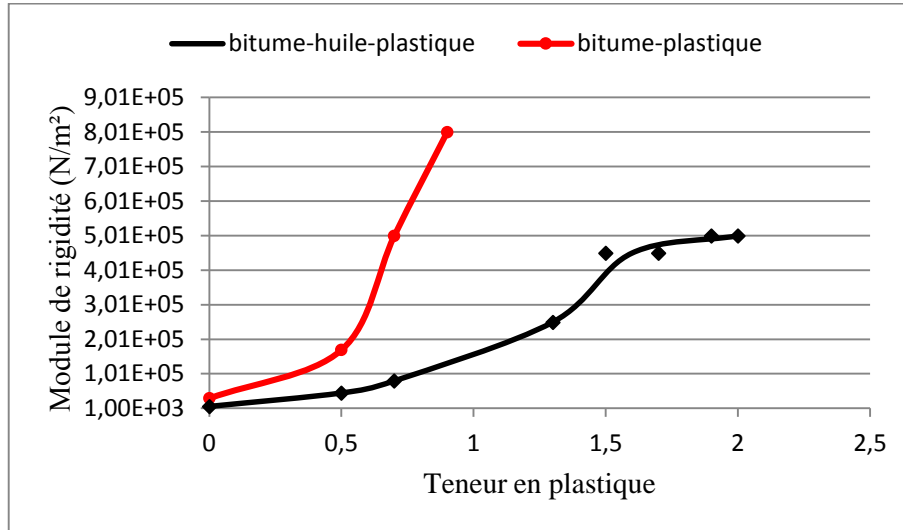
**Figure IV.37.** Module de rigidité estimé à 25 °C en fonction du teneur en plastique.

On reporte sur les figures I.38 et I.39, les modules de rigidité estimé à 15 °C et 25 °C, pour le bitume-plastique et le bitume-huile-plastique.

Les résultats des figures 1.38 et I.39, permettent de montrer que l'ajout de l'huile autorise l'utilisation de plus grande quantité de plastique, mais occasionne une perte de rigidité du bitume et donc de l'enrobé bitumineux.



**Figure IV.38.** Module de rigidité estimé à 15 °C en fonction du teneur en plastique.

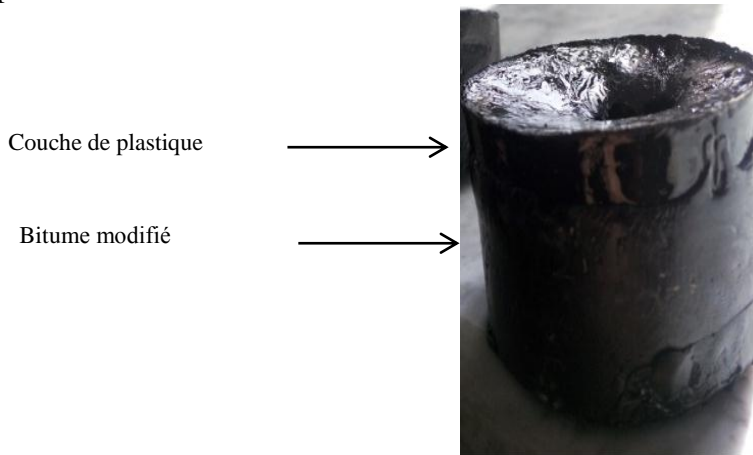


**Figure IV.39.** Module de rigidité estimé à 25 °C en fonction du teneur en plastique.

**7. Essai de stabilité au stockage**

Dans cet essai, on teste la stabilité au stockage sur un tube d'aluminium de (50 mm de diamètre et 130 mm d'hauteur) contenant le bitume modifié par 2% huile et 1.7 % plastique.

A la fin d'essai on a remarqué l'existence d'une couche de plastique dans la partie supérieure du mélange (figure IV.40), ce qui montre visuellement que le bitume-plastique n'est pas stable au stockage. Les résultats du point de ramollissement des deux parties sont résumés dans le tableau IV.33.



**Figure IV.40.** Essai de stabilité au stockage (partie supérieure).

**Tableau IV.33.** Les résultats de l'essai de stabilité au stockage.

	TBA (°C)	Spécification [31]
Partie supérieure	>75	/
Partie inférieure	60.45	/
$\Delta TBA$ (°C)	>15	< 2.5 °C

D'après les résultats du tableau IV.32, on remarque que la différence du point de ramollissement entre la partie supérieure et la partie inférieure dépasse le 2,5 °C, alors que le mélange (bitume-huile-plastique) est instable au stockage.

#### IV.4. Conclusion

Dans cette partie on a déterminé les caractéristiques essentielles d'un liant bitumineux élaboré en substituant partiellement, au bitume 35/50, les particules de plastiques de sachets de taille (2-5 mm).

Pour des pourcentages de 0.5, 0.7 et 0.9% en masse d'incorporation de particules de plastique de sachets dans le bitume, le liant devient plus dur et passe aux spécifications du grade 20/30.

Pour des pourcentages de 0.5, 0.7, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 et 2% en masse d'incorporation de particules de plastiques de sachets dans le bitume modifié par 2% d'huile de vidange, les différentes valeurs enregistrées ont révélé que la pénétrabilité diminue quand la teneur en plastique augmente donnant naissance à des liants bitumineux appartenant aux classes respectives 50/70 pour (0.5 et 0.7%), 35/50 pour (1.3 et 1.5%) et 20/30 pour (1.9 et 2%), alors que le point de ramollissement augmente jusqu'à 1.5% plastiques pour se stabiliser à environ 64 et 65 °C et la ductilité standard continue à diminuer jusqu'à atteindre 9.5 cm pour 2% de plastique. La ductilité standard n'étant pas adaptée à mesurer la cohésion des bitumes-modifiés, l'essai force-ductilité devrait être utilisé pour évaluer la résistance à la traction du bitume-plastique + huile de vidange.

L'ajout de plastique de sachets au bitume pur 35/50 et au bitume modifié par 2% d'huile de vidange, diminue la susceptibilité thermique, augmente la résistance au vieillissement. Les essais de décantation montrent que les deux mélanges sont instables au stockage, comme c'est le cas de la plupart des bitumes modifiés.

En conclusion, on peut retenir que le travail a permis de mettre en évidence les gains suivants apportés par l'ajout de plastique et plastique plus huile :

- Une meilleure ouvrabilité des mélanges apportée par l'ajout de l'huile, qui est synonyme d'un étalement du liant plus aisé, compactage plus facile.
- Une meilleure rigidité explicitée par l'augmentation du point de ramollissement, ce qui diminue le phénomène d'orniérage.
- Une moindre susceptibilité thermique.
- Une meilleure résistance au vieillissement mise en évidence par les caractéristiques après RTFOT, ce qui présage une meilleure durabilité du mélange.
- Une meilleure résistance à la fissuration thermique explicitée par l'augmentation de module de rigidité des liants modifiés à basse température, ce qui augmente la résistance à la fatigue.
- Une meilleure durabilité à la chaussée, explicitée par l'augmentation de module de rigidité du bitume à moyenne température.

## **Chapitre V**

**L'enrobé bitumineux modifié  
par l'ajout de sachets en  
plastique**

## **Chapitre V. L'enrobé bitumineux modifié par l'ajout de sachets en plastique.**

### **V.1. Introduction**

Les revêtements bitumineux sont de plus en plus sollicités et les méthodes de formulation d'enrobés utilisées à ce jour ne permettent plus de formuler des enrobés suffisamment performants pour résister aux contraintes de plus en plus exigeantes. La méthode Marshall, utilisée depuis plus d'une cinquantaine d'années pour la formulation des enrobés, a été conçue pour des enrobés utilisés dans des contextes différents. On utilise dans ce travail la méthode de formulation française (méthode LCPC) pour la formulation d'un enrobé de type BB 0/14.

### **V.2. Méthode de formulation française pour les enrobés**

L'épreuve de formulation des enrobés appliquée en France est définie par les normes. Elle se caractérise par une approche fondée le plus possible sur les performances du mélange. L'épreuve de formulation se déroule avec des matériaux préparés en laboratoire, représentatifs du chantier projeté. Elle porte sur des seuils de performance.

L'épreuve de formulation impose des spécifications sur les composants, notamment sur les granulats. Elle fait appel à l'essai de presse à cisaillement giratoire, à l'essai de tenue à l'eau, à la résistance à l'orniérage, au module de rigidité et à la résistance à la fatigue.

La méthode a pour principe de maximiser la teneur en bitume afin d'assurer une meilleure durabilité des enrobés (résistance à la fissuration, au désenrobage et à l'arrachement). Les enrobés à teneur en bitume élevée ayant tendance à se déformer facilement sous l'action des charges lourdes, la résistance à l'orniérage doit être assurée par l'utilisation de granulats suffisamment angulaires.

### **V.3. Etude de formulation**

L'objectif d'une étude de formulation est de définir les dosages des divers constituants capables d'atteindre et d'assurer, au cours de la vie de l'ouvrage réalisé, le maintien à un niveau satisfaisant des propriétés d'usage.

Les différents niveaux de l'épreuve de formulation varient du plus simple (niveau 1) au plus complet (niveau 4), les niveaux supérieurs englobant les exigences des niveaux inférieurs (figure V.1).

La méthode LCPC conduit à des enrobés généralement plus riches en bitume, donc plus résistants à la fissuration, que ceux formulés au moyen de la méthode Marshall, sans toutefois présenter les degrés de maniabilité excessive observés dans le passé.

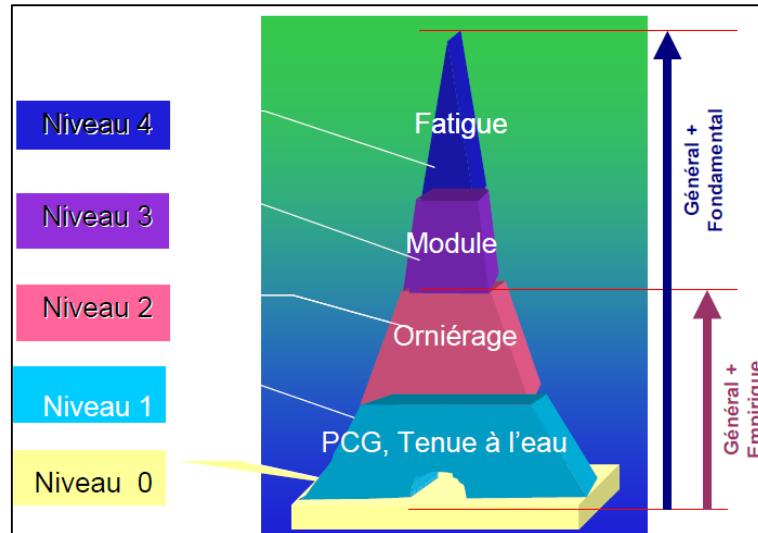


Figure V.1. Résumé des niveaux de l'épreuve de formulation LCPC.

## V.4. Formulation de l'enrobé type BB 0/14

### V.4.1. Matériaux d'étude

#### V.4.1.1. Granulats

On a procédé à la définition et à l'identification des granulats rentrant dans la constitution du béton bitumineux destiné à la réalisation de la couche de roulement.

Pour chaque classe granulaire, des essais physiques, chimiques et mécaniques ont été réalisés permettant de caractériser les matériaux et de les classer selon la norme correspondante.

##### 1) Origine des granulats

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

Les trois fractions granulaires (0/3, 3/8, 8/15) sont approvisionnées de la carrière de BOUZEGZA (Wilaya de Bouira).

##### 2) Analyse chimique sommaire

Les minéraux jouent un rôle important, sur la qualité de l'adhésivité des granulats avec les liants hydrocarbures. Les résultats de l'analyse chimique sont récapitulés dans le tableau V.1.

L'analyse chimique sommaire révèle que les granulats testés de la carrière de BOUZEGZA sont constitués d'un pourcentage élevé de carbonates ( $79.2\% > 70\%$  de  $\text{CaCO}_3$ ) ce qui montre que ce sont des granulats fortement carbonatés. Ils doivent présenter alors une excellente adhésivité et une bonne tenue à l'eau avec les liants hydrocarbonés.

**Tableau V.1.** Analyse chimique sommaire de granulats.

Norme	Essai	Gravier 8/15
NF EN 1744-1	Teneur en sulfates solubles dans l'acide (% SO <sub>3</sub> )	Trace
NF P 94-048	Carbonate (% CaCO <sub>3</sub> )	79.2
Par calcul	Eau de constitution (%)	5.98
NF EN 1744-1	Teneur en chlorures solubles dans l'eau (% Cl <sup>-</sup> )	0.002
NF EN 1744-1	Perte au feu (% PAF)	40.5

### 3) Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés dans le tableau V.2.

**Tableau V.2.** Résultats de l'analyse granulométrique.

Norme	Tamis (mm)	Tamisat (%)		
		0/3	3/8	8/15
NF EN 933-1	25	100,00	100,00	100,00
	20	100,00	100,00	100,00
	16	100,00	100,00	99,89
	12,5	100,00	100,00	86,66
	10	100,00	100,00	53,27
	8	100,00	98,80	22,44
	6,3	100,00	71,40	5,38
	5	100,00	33,60	2,07
	4	98,50	9,40	1,28
	2	68,28	1,40	0,99
	1	40,73	0,90	0,93
	0,5	24,71	0,90	0,93
	0,25	15,86	0,90	0,93
	0,125	10,85	0,90	0,93
	0,063	8,01	1,20	0,84

Les courbes granulaires de chaque fraction sont indiquées sur la figure V.2.

D'après les résultats de l'analyse granulométrique, on remarque que le sable (0/3) est pauvre en fines (passant à 0.063 mm  $\geq$  16% selon la norme XP 18-545), de ce fait, on enrichit la fraction 0/3 par l'ajout de filler d'apport (calcaire).

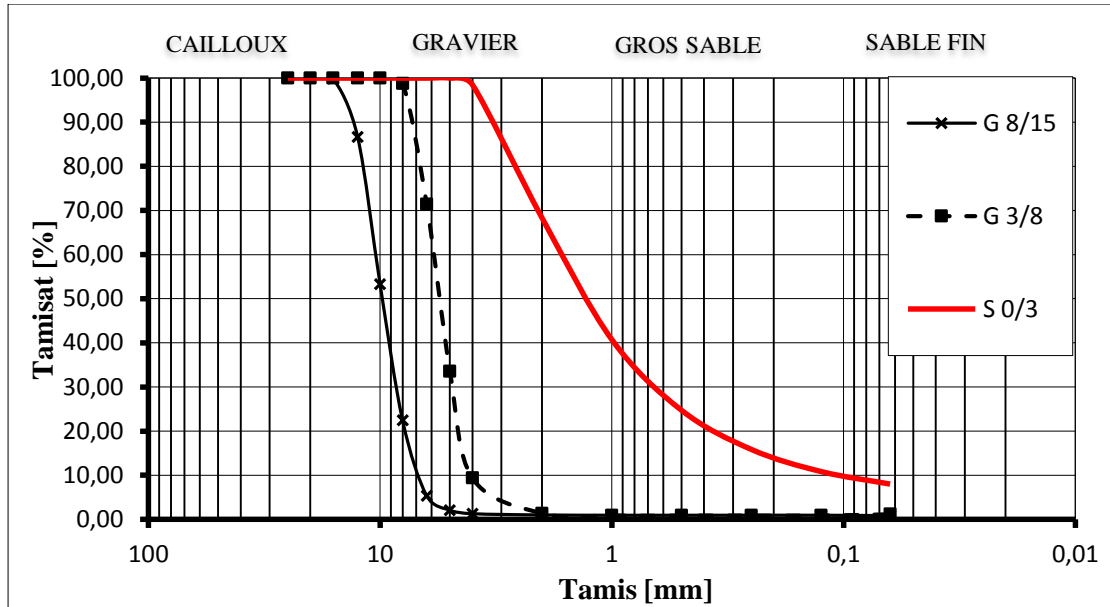


Figure V.2. Les courbes granulométriques de trois fractions granulaires.

#### 4) Caractéristiques des granulats

Le tableau V.3 présente les résultats à l'issue des essais de caractérisation appliqués aux trois classes granulaires.

Tableau V.3. Caractérisation des trois classes granulaire.

Norme	Essai	0/3	3/8	8/15	Spécification [19]
NF EN 1097-2	Los Angeles (LA %)	-	-	<b>28</b>	<25
NF EN 1097-1	Micro Deval ( $M_{DE}$ %)	-	-	12	<20
NF EN 933-1	Propreté superficielle (f %)	-	<b>1.16</b>	0.75	<1 %
NF EN 933-3	Coefficient d'aplatissement (FI %)	-	14	11	< 20 %
NF EN 933-8	Equivalent de sable (SE %)	74	-	-	> 60 %
NF EN 933-8	Valeur au bleu de Méthylène (MB)	1.1	-	-	< 2

D'après les résultats de caractérisation des granulats, on constate qu'hormis un LA et propreté limites, les matériaux granulaires sont conformes aux spécifications. Les matériaux présentent de bonnes caractéristiques intrinsèques et de fabrication.

#### V.4.1.2. Caractéristiques du bitume

On utilise le bitume 35/50 dans ce travail et dont les spécifications sont présentées dans le chapitre IV de la partie expérimentale, pour la formulation de l'enrobé témoin. On utilise le bitume modifié par le plastique de sachets pour les enrobés modifiés.

V.4.2. Courbe granulométrique du mélange

La courbe granulométrique qui s'insère dans le fuseau de spécification est obtenue pour les proportions granulaires résumées dans le tableau V.4.

Tableau V.4. Pourcentages pondéraux des différentes classes

Fraction granulaire	Filler	0/3	3/8	8/15
Pourcentage pondéraux (%)	4	35	15	46

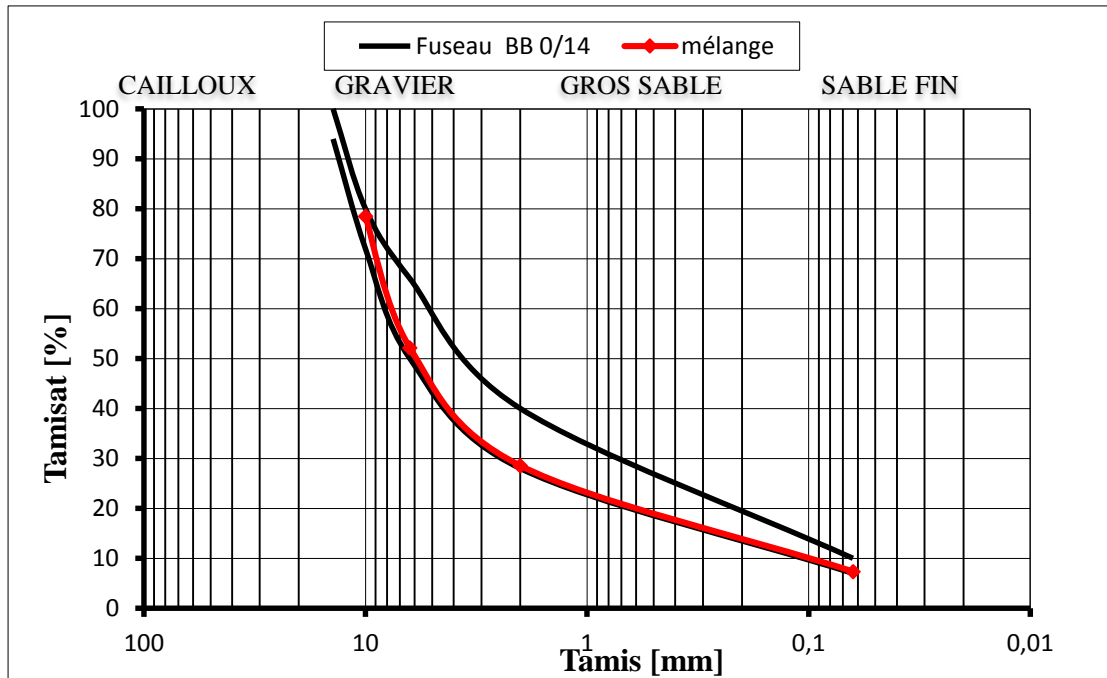


Figure V.3. Courbe granulométrique du mélange granulaire.

V.4.3. Teneur en liant

Au lieu de faire varier la quantité de bitume afin de déterminer la proportion optimale comme dans le cas de la méthode Marshall, la procédure LCPC de formulation consiste à fixer la teneur en bitume et de vérifier cette teneur par les spécifications des différents niveaux de l'épreuve de formulation.

La teneur en liant joue clairement sur la résistance à la fatigue de l'enrobé. L'augmentation de la teneur en liant améliore le comportement en fatigue jusqu'à une valeur limite. Au-delà de cette valeur la résistance diminue. Il existe donc, d'après les auteurs, une teneur en liant optimale vis-à-vis du comportement à la fatigue [20].

La teneur en liant est donnée par la formule expérimentale suivante :

$$TL = k. \alpha. \sqrt[5]{\Sigma} \tag{V.I}$$

Avec :

TL : Teneur en liant extérieure (rapport de la masse de liant à la masse de granulats secs).

$k$  : Le module de richesse est une grandeur proportionnelle à l'épaisseur conventionnelle du film de liant hydrocarboné enrobant le granulat ( $k$  minimal pour les BBSG 0/14 est 3,2).

$\alpha$  : Un coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats

$$\alpha = \frac{2.65}{\rho_G} \quad (\text{V.2})$$

$\rho_G$  : Masse volumique des granulats ( $\text{g/cm}^3$ ).

$\Sigma$  : La surface spécifique des granulats, ( $\text{m}^2/\text{kg}$ ), déterminée par la relation :

$$100 \Sigma = 0.25 G + 2.3 S + 12 s + 150 f \quad (\text{V.3})$$

$G$  : Proportion d'éléments supérieurs à 6,3 mm

$S$  : Proportion d'éléments compris entre 6,3 mm et 0,250 mm

$s$  : Proportion d'éléments compris entre 0,250 mm et 0,063 mm

$f$  : Proportion des éléments inférieurs à 0,063 mm

Les résultats sont résumés dans le tableau V.5

**Tableau V.5.** Détermination de la teneur en liant.

Type d'enrobé	$\rho_G$ ( $\text{g/cm}^3$ )	$\alpha$	$\Sigma$	$k$ ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	% TL
BB 0/14	2.714	0.976	12.47	3.3	<b>5.34</b>

#### V.4.4. Mesure de la masse volumique réelle (MVR)

La masse volumique réelle ( $MVR$ ) du mélange est calculée avec la formule suivante :

$$MVR = \frac{\text{Poids (granulats + bitume)}}{\text{Volume (granulats + bitume)}} \quad (\text{V.4})$$

$$MVR = \frac{100 + TL_{ext}}{\frac{\%G_{8/15}}{\rho_{8/15}} + \frac{\%G_{3/8}}{\rho_{3/8}} + \frac{\%S_{0/3}}{\rho_{0/3}} + \frac{\%f}{\rho_f} + \frac{TL_{ext}}{\rho_b}}$$

Le tableau V.6 résume les résultats des masses volumiques des différentes fractions et la masse volumique réelle de l'enrobé.

**Tableau V.6.** La masse volumique

Fraction	8/15	3/8	0/3	Filler	TL	$MVR$
Masse volumique $\rho$ ( $\text{T/m}^3$ )	2.72	2.71	2.71	2.71	1.04	2.51

#### V.4.5. Mode opératoire de malaxage en laboratoire selon la norme 12697-35.

- Chauffer le bitume à 160 °C pour une période de 2 h.
- Malaxer le bitume + plastique à 170 ±10 °C, pour une période de 1h, pour les bitumes modifiés.
- Chauffer les granulats et les fillers à 170 °C, pour une période de 5h.
- Préchauffer la cuve du malaxeur, jusqu'à la température de malaxage.

- Malaxer les granulats à sec, puis ajouter le liant au mélange granulaire préchauffé.
- Malaxer les constituants dans la cuve (chambre de malaxage), pour une durée de 3 min.
- Confectionner les éprouvettes pour l'essai.
- Stocker les moules remplis dans une enceinte à la température d'essai (160 °C), pendant une durée comprise entre 30 min et 2 h.

**V.4.6. Essai PCG selon la norme 12697-31**

L'essai permet de la détermination du pourcentage de vides d'une éprouvette pour un nombre de girations donné ou pour la dérivation d'une courbe de la masse volumique (ou pourcentage de vides) en fonction du nombre de girations.

Le mélange bitumineux est contenu dans un moule cylindrique délimité par des pastilles et conservé à une température constante (160 °C pour cette étude).

La masse,  $M$ , du mélange à introduire dans le moule doit être déterminée par l'équation suivante :

$$M = 10^{-9} \pi \frac{D^2}{4} h_{min} \rho_m \tag{V.5}$$

$M$  : est la masse du mélange à introduire dans le moule, en kilogrammes (kg) ;

$D$  : est le diamètre interne du moule, en millimètres (mm) ;

$h_{min}$  : est la hauteur minimale de l'éprouvette compactée, correspondant à un pourcentage de vide nul, en millimètres (mm) ; avec :

$$0,66 < \frac{h_{min}}{D} < 1,05 \tag{V.6}$$

On prend  $h_{min} = 100 \text{ mm}$ .

$\rho_m$  : est la masse volumique réelle du mélange, en kilogrammes par mètre cube (kg/m<sup>3</sup>).

Pour le béton bitumineux type 0/14, la dimension nominale maximale des granulats est inférieure à 16 mm, le diamètre des éprouvettes doit être de 100 mm.

Après le remplissage des moules, les éprouvettes sont stockées dans une enceinte à la température d'essai, à  $\pm 10$  °C près (160 °C), pendant une durée comprise entre 30 min et 2 h.

L'essai permet de calculer le pourcentage de vides moyen  $v(ng)$  %, pour chaque nombre de girations spécifié  $ng$ .

$$v(ng)\% = 100 \left[ \frac{h(ng) - h_{min}}{h(ng)} \right] \tag{V.7}$$

$v(ng)\%$  : est le pourcentage de vides après un nombre de girations  $ng$ , (%) ;

$h(ng)$  : est la hauteur de l'éprouvette après un nombre de girations  $ng$ , en millimètres (mm) ;

$h_{min}$  : est la hauteur minimale de l'éprouvette compactée, correspondant à un pourcentage de vide nul, en millimètres (mm).

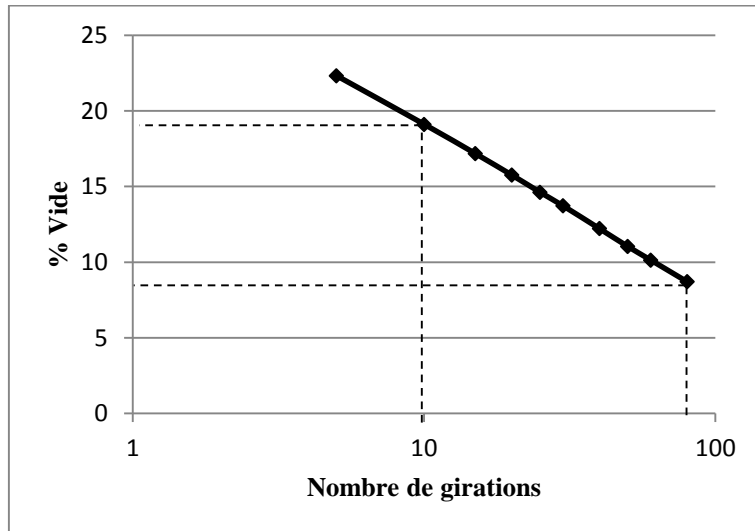
**V.4.6.1. Expression des résultats**

Les résultats de l'essai PCG sont résumés dans le tableau V.7.

**Tableau V.7.** Résultats de l'essai PCG.

Nombre de girations	Hauteur de l'éprouvette (mm)	Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	% de vide	Spécifications [LCPC]
5	128,77	1947,75	22,33	
10	123,65	2028,33	<b>19,12</b>	>11
15	120,76	2076,86	17,18	
20	118,73	2112,45	15,77	
25	117,16	2140,82	14,63	
30	115,94	2163,39	13,73	
40	113,95	2201,16	12,23	
50	112,44	2230,65	11,05	
60	111,31	2253,30	10,15	
80	109,57	2289,20	<b>8,72</b>	4 à 9

La figure V.4 résume l'évolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations



**Figure V.4.** Pourcentage de vide du BB en fonction du nombre de giration.

D'après les résultats du tableau, on remarque que l'enrobé BB 0/14 répond bien à la spécification de l'essai PCG à 10 et à 80 girations, pour la formulation des bétons bitumineux.

**V.4.6.2. Calcul de la compacité**

La compacité de l'enrobé est donnée par la formule suivante:

$$C \% = \frac{MVA}{MVR} 100 \tag{V.8}$$

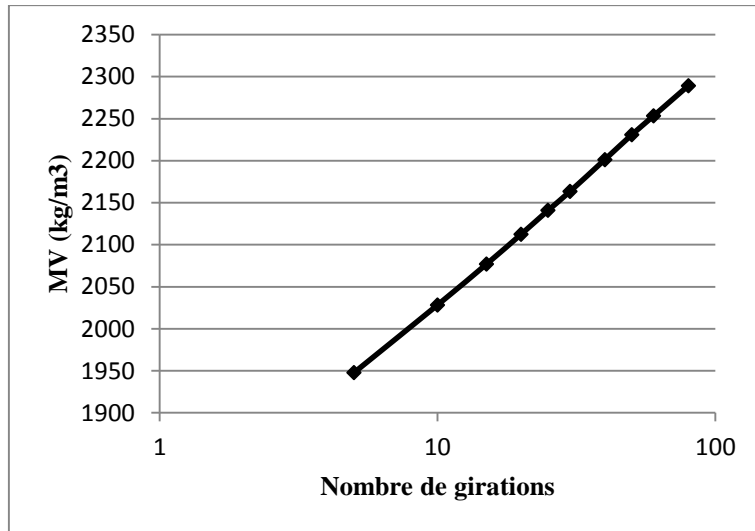
*MVA* : La masse volumique apparente

*MVR* : La masse volumique réelle

La masse volumique apparente (*MVA*) mesurée par la méthode géométrique :

$$MVA = \frac{\text{Masse d'un échantillon d'enrobe}}{\text{Volume de l'échantillon d'enrobe}}$$

La figure V.5 résume l'évolution de la masse volumique en fonction du nombre de girations



**Figure V.5.** Evolution de la masse volumique en fonction du nombre de girations

Les résultats de la compacité sont résumés dans le tableau V.8.

**Tableau V.8.** Compacité du mélange étudié.

<i>MVR</i> (T/m³)	<i>MVA</i> (T/m³)	Compacité %
2.51	2.289	91.20

D'après les résultats obtenus, le béton bitumineux étudié répond aux spécifications du compactage, avec une compacité supérieure à 90%.

**V.4.7. Essai de la tenue à l'eau selon la norme 12697-12**

Le but de l'essai est de déterminer la sensibilité à l'eau du mélange par le rapport r/R entre la résistance à la compression après immersion (r), et celle après conservation sans immersion (R) à 18 °C.

Six éprouvettes de 80 mm de diamètre, sont fabriquées par compactage statique à double effet avec une charge de 60 kN pendant 5 min sur chaque éprouvette. Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation à 18 °C dans

des conditions définies : à l'air pour trois éprouvettes, en immersion pour les trois autres.

### V.4.7.1. Expression des résultats

Le tableau V.9 résume les résultats de l'essai de la tenue à l'eau.

**Tableau V.9.** Les résultats de l'essai de la tenue à l'eau.

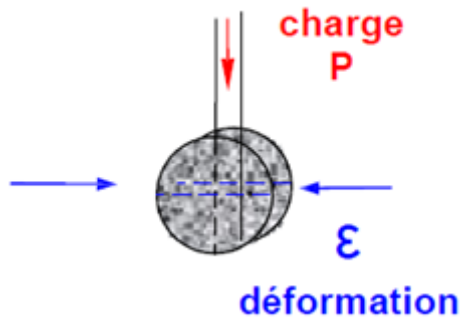
Lot	Sec	Immergé
Charge de rupture (KN)	24,28	20,53
Résistance à la compression (MPa)	4,83	4,08
r/R (%)	84,47	
Spécification (%)	> 70	

On remarque d'après les résultats du tableau V.9, que le rapport r/R est supérieur à 70%, alors le béton bitumineux étudié répond à la spécification de la tenue à l'eau, avec une bonne résistance au désenrobage.

### V.4.8. Essai de Module de rigidité selon la norme EN 12697-26

Le module de rigidité est un indicateur du degré de cohésion au sein de la structure d'un matériau.

Plusieurs méthodes normalisées existent pour déterminer le module des enrobés bitumineux. L'essai de module en traction indirecte sur éprouvettes cylindriques (figure V.6) et essai de module complexe en flexion sur éprouvettes trapézoïdales sont parmi les méthodes les plus utilisées.



**Figure V.6.** Principe de l'essai de traction indirecte.

Le module ainsi mesuré concerne la réponse instantané de l'enrobé lors de sa mise en charge, il ne tient pas compte du comportement différé de l'enrobé en tant que matériau viscoélastique.

#### V.4.8.1. Expression des résultats

On utilise l'essai de traction indirecte sur des éprouvettes cylindriques pour calculer le module de rigidité. On se base sur la corrélation (I.5) pour calculer le module complexe (exigé par les normes).

Les éprouvettes utilisées pour déterminer le module de rigidité sont obtenues à partir du sciage des éprouvettes de l'essai PCG.

## Chapitre V L'enrobé bitumineux modifié par l'ajout de sachets en plastique

Les résultats de module de rigidité sont résumés dans le tableau V.10.

**Tableau V.10.** Résultats de module de rigidité.

Type d'enrobé	Module 15°C, 10Hz (MPa)		Spécification [LCPC]	Classe
	traction indirecte	module complexe		
BB 0/14	5200	7627	> 7000	2 et 3

D'après le tableau V.10, on remarque que les résultats répondent aux spécifications du module de rigidité de l'enrobé BB 0/14.

D'après les résultats obtenus par les différents essais (PCG, Duriez, Module), on remarque que l'enrobé étudié répond aux spécifications imposées par les normes. Ainsi le béton bitumineux appartient à la classe 2 et 3, la classe 2 ou 3 est déterminée par l'essai de l'orniérage qui n'est pas réalisé dans ce travail.

### V.5. Etude de l'enrobé modifié

Dans cette partie, on étudie les performances et les gains apportés à l'enrobé par la modification de bitume par le plastique de sachets.

#### V.5.1. Enrobé modifié par bitume-plastique

Pour mettre en évidence l'influence de bitume-plastique sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé, on se base sur les essais réalisés sur le béton bitumineux témoin (PCG, Duriez, et le module), et on utilise le bitume modifié par 0.7 et 0.9 % plastique.

##### ✓ Compactibilité (PCG)

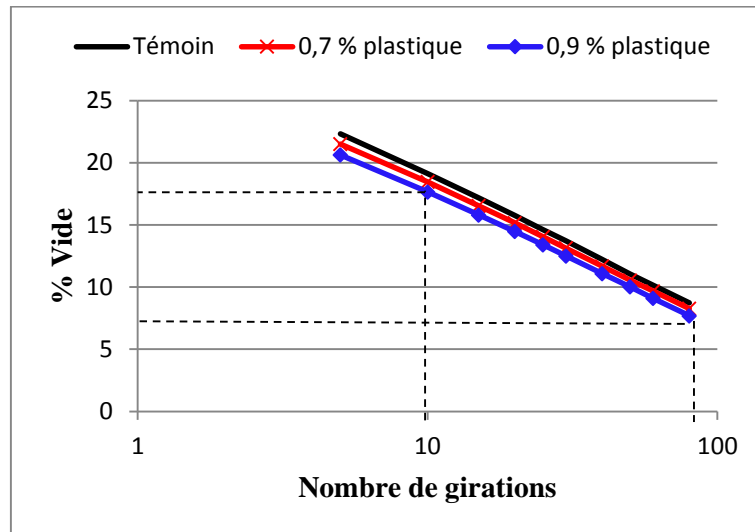
Dans cette partie de l'étude, on montre l'effet de bitume-plastique sur la compactibilité des bétons bitumineux, donnée par le pourcentage de vides des mélanges.

Les résultats de l'essai PCG sont résumés dans le tableau V.11.

**Tableau V.11.** Résultats de l'essai PCG pour les deux teneurs en plastique.

Nombre de girations	Hauteur de l'éprouvette (mm)		Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )		% de vide		Spécifications [LCPC]
	0,7 %	0,9 %	0,7 %	0,9 %	0,7%	0,9%	
	<b>Bitume-plastique</b>						
<b>5</b>	127,42	126,01	1968,62	1990,47	21,50	20,63	
<b>10</b>	122,67	121,45	2044,74	2065,20	<b>18,47</b>	<b>17,66</b>	>11
<b>15</b>	119,85	118,80	2092,83	2111,34	16,54	15,81	
<b>20</b>	117,90	116,94	2127,54	2144,91	15,17	14,48	
<b>25</b>	116,38	115,51	2155,24	2171,43	14,06	13,42	
<b>30</b>	115,14	114,32	2178,42	2194,08	13,14	12,51	
<b>40</b>	113,26	112,49	2214,66	2229,74	11,69	11,10	
<b>50</b>	111,82	111,16	2243,16	2256,46	10,56	10,03	
<b>60</b>	110,73	110,03	2265,23	2279,63	9,68	9,10	
<b>80</b>	109,03	108,60	2300,45	2315,04	<b>8,27</b>	<b>7,70</b>	4 à 9

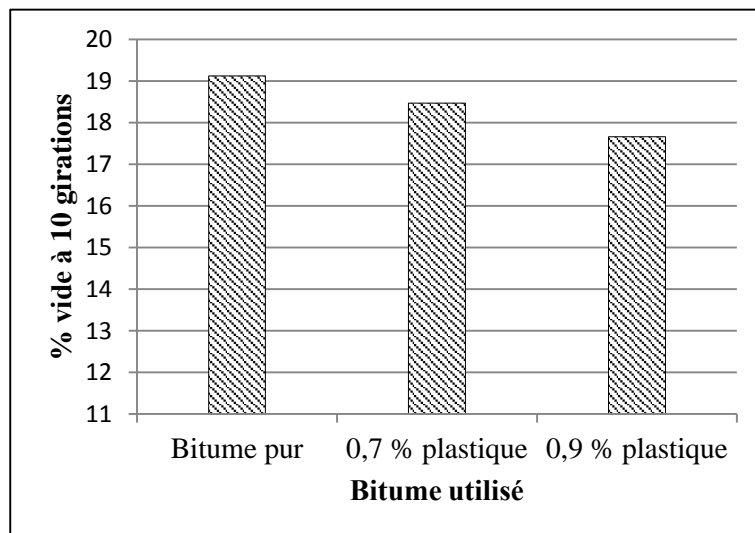
La figure V.7 résume l'évolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations pour les trois enrobés étudiés.



**Figure V.7.** Evolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations.

Les résultats de la figure V.7, montrent que les bétons bitumineux modifiés par l'ajout de déchets de plastique de sachets au bitume 35/50 répondent bien aux spécifications de l'essai PCG.

La figure V.8 résume le pourcentage de vide à 10 girations en fonction du bitume utilisé.



**Figure V.8.** Pourcentage de vide à 10 girations en fonction du bitume utilisé.

D'après les résultats de la figure V.8, on remarque que le pourcentage de vide à 10 girations « seuil d'estimation de la maniabilité », est supérieur à 11% pour les trois enrobés indiquant que les mélanges ne sont pas trop maniabiles. Ce qui donne une meilleure résistance à l'orniérage.

La figure V.9 résume le pourcentage de vide à 80 girations en fonction du bitume utilisé.

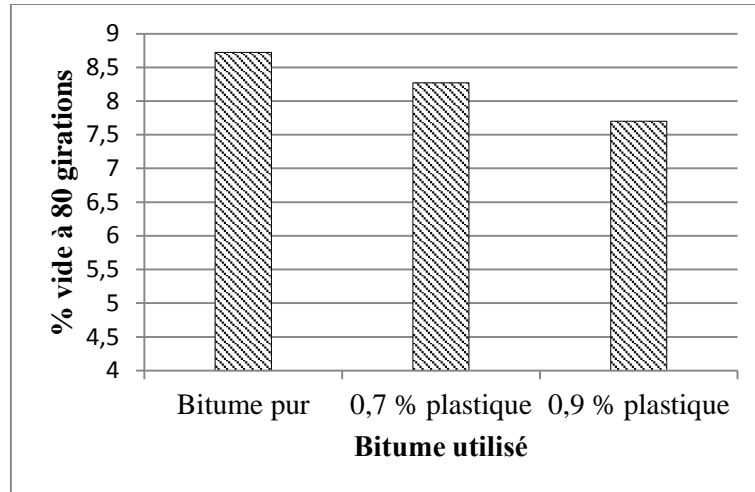


Figure V.9. Pourcentage de vide à 80 girations en fonction du bitume utilisé.

D'après les résultats de la figure V.9, on remarque que le pourcentage de vide à 80 girations est bien compris entre 4% et 9% pour les trois enrobés, ce qui permet d'assurer que les mélanges sont suffisamment imperméables pour être durables, sans toutefois être trop maniables (4 % minimum) et être ainsi sujet à l'orniérage.

La diminution des vides dans les mélanges est due peut être à la diminution de la viscosité du bitume modifié apportée par le Polyéthylène de basse densité à haute température (température de fusion du plastique 110-120 °C).

La teneur en vide résulte de la formulation et de la mise en œuvre et, de ce fait, est le facteur le plus important. Elle conditionne pratiquement un grand nombre de qualités requises : "imperméabilité à l'eau, module de rigidité, bonne résistance à l'orniérage et à la fatigue" [20].

La figure V.10 donne l'évolution de la masse volumique des mélanges en fonction du nombre de girations.

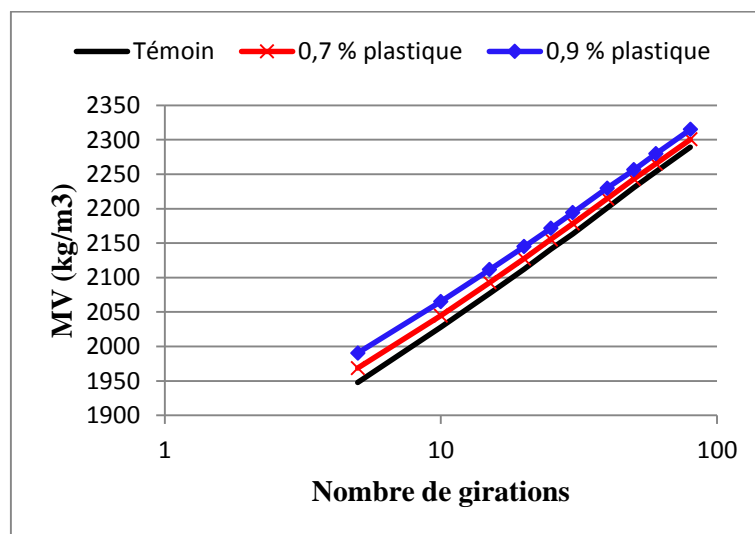


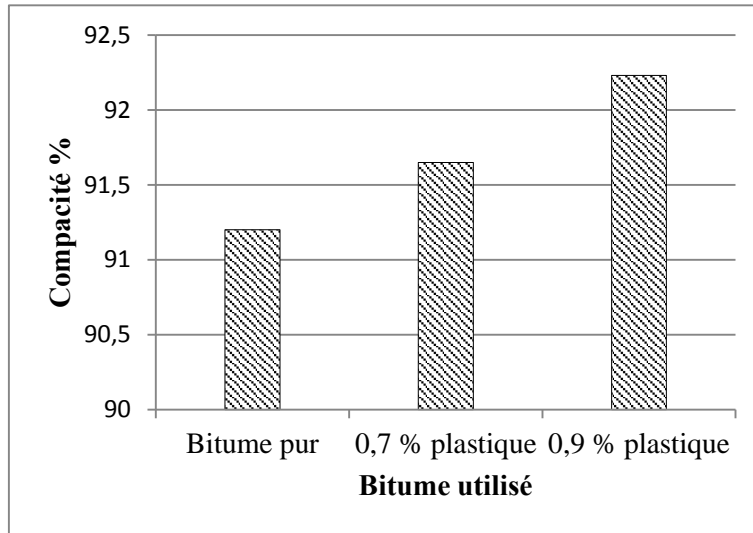
Figure V.10. L'évolution de la masse volumique en fonction du nombre de girations.

D'après les résultats de la figure V.10, on remarque que l'ajout de plastique au bitume augmente la masse volumique du béton bitumineux et donc permet une meilleure compacité.

Les résultats de la compacité sont résumés dans le tableau V.12 et la figure V.11.

**Tableau V.12.** Résultats de la compacité

<i>MVR</i> (T/m <sup>3</sup> )	<i>MVA</i> (T/m <sup>3</sup> )			Compacité %		
	Bitume-plastique			Bitume-plastique		
	0%	0.7 %	0.9 %	0 %	0.7 %	0.9 %
2.51	2.289	2.300	2.315	91.20	91.65	92.23



**Figure V.11.** Résultats de la compacité.

D'après les résultats de la figure V.11, on remarque que la compacité dépasse 90 % pour les trois enrobés, et que les enrobés réalisés par le bitume-plastique ont une meilleure compacité.

La diminution des vides dans le béton bitumineux augmente la résistance au vieillissement des bitumes par la diminution des contacts de l'air chaud avec le bitume ce qui donne une meilleure durabilité au matériau.

Les résultats d'une campagne expérimentale réalisée avec l'essai de flexion quatre points en faisant varier les paramètres de formulation, indépendamment de la nature du liant, a montré que la diminution de la teneur en vide (augmentation de la compacité) augmente la durée de vie de la chaussée [20].

✓ **Tenue à l'eau**

Dans cette partie de l'étude, on montre l'effet du bitume-plastique sur le béton bitumineux vis-à-vis la résistance au désenrobage déterminée par l'essai de la tenue à l'eau. Le tableau V.13 résume les résultats de l'essai de la tenue à l'eau

**Tableau V.13.** Les résultats de l'essai de la tenue à l'eau.

Teneur en plastique	0%		0.7%		0.9%	
Lot	Sec	Immergé	Sec	Immergé	Sec	Immergé
Charge de rupture (KN)	24,28	20,53	30,85	30,23	24,48	23,93
Résistance à la compression (MPa)	4,83	4,08	6,14	6,01	4,87	4,76
r/R (%)	84,47		97,88		97,74	
Spécification (%)	> 70					

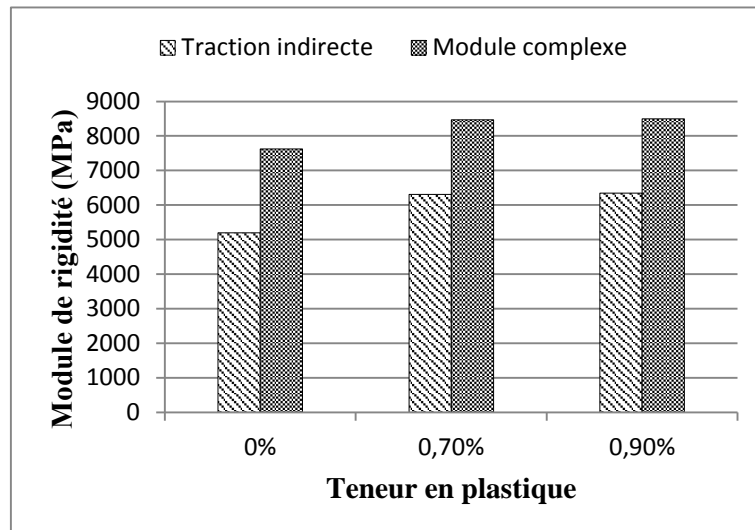
D'après les résultats donnés dans le tableau V.13, on remarque que le rapport r/R augmente de plus de 13% pour les deux teneurs en plastique testées, ce qui indique que les enrobés à bitume modifié par déchets plastique présentent une meilleure tenue à l'eau c.-à-d. une meilleure résistance au désenrobage.

✓ **Module de rigidité**

Dans cette partie, on montre l'effet de bitume-plastique sur la rigidité des bétons bitumineux. On se base sur les résultats de l'essai de traction indirecte et la corrélation (I.5) pour calculer le module complexe. Les résultats de module de rigidité pour les trois enrobés sont résumés dans le tableau V.14 et la figure V.12.

**Tableau V.14.** Résultats de module de rigidité pour les trois enrobés.

% plastique		0%	0.7%	0.9%	Spécification [LCPC]
Module 15°C, 10Hz (MPa)	traction indirecte	5200	6305	6343	/
	module complexe	7627	8465	8494	> 7000



**Figure V.12.** Résultats de module de rigidité pour les trois enrobés.

D'après les résultats de la figure V.12, on remarque que l'ajout de plastique au bitume augmente le module de rigidité de l'enrobé, de l'ordre de 1000 MPa par rapport à l'enrobé témoin.

Les gains apportés par l'ajout de plastique au bitume sur le module de rigidité de l'enrobé, relativement à l'enrobé témoin, sont résumés dans le tableau V.15 et la figure V.13.

Tableau V.15. Les gains apportés par le bitume-plastique sur le module de rigidité.

	Module 15°C, 10Hz (MPa)			
	traction indirecte		module complexe	
% plastique	0,7%	0,9%	0,7%	0,9%
Gain (%)	21,25	21,98	11,00	11,37

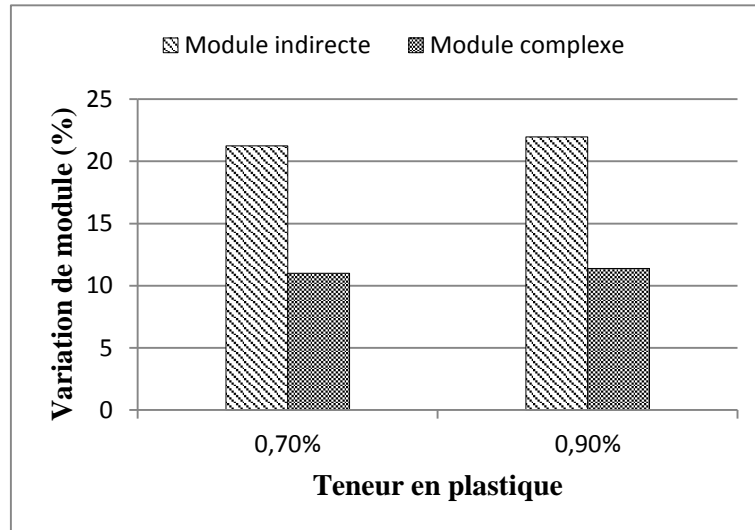


Figure V.13. Les gains apportés par le bitume-plastique sur le module de rigidité.

On remarque que le module de rigidité mesuré pour l'enrobé modifié par l'essai de traction indirecte augmente de 20% de la valeur de l'enrobé témoin. De même le module complexe augmente de 11% pour les deux teneurs en plastique testées.

Alors, sur la base des résultats des trois essais (PCG, Duriez, Module), on peut constater que l'utilisation du bitume-plastique dans les enrobés améliore les caractéristiques mécaniques de l'enrobé classique de type BB 0/14, avec une température de compactage de 160 °C au lieu de 180 °C (gain de 20 °C).

Selon la norme 12697-35, l'utilisation des bitumes de grade dur (20-30) dans les enrobés nécessite une température de malaxage de 180 °C pour assurer la maniabilité et le compactage requis. Les enrobés modifiés par l'utilisation du bitume-plastique répondent aux spécifications avec une température de malaxage de 160 °C, ce qui représente un gain substantiel en énergie.

### V.5.2. Enrobé modifié par bitume-plastique (Compactage à 180 °C)

Dans cette partie de l'étude, on met en évidence l'influence de la température de compactage sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé (compactibilité (PCG), Module), on compacte l'enrobé modifié par le bitume-plastique (0.7 % plastique) à 180 °C, température exigée pour les bitumes de grade durs.

#### ✓ Compactibilité (PCG)

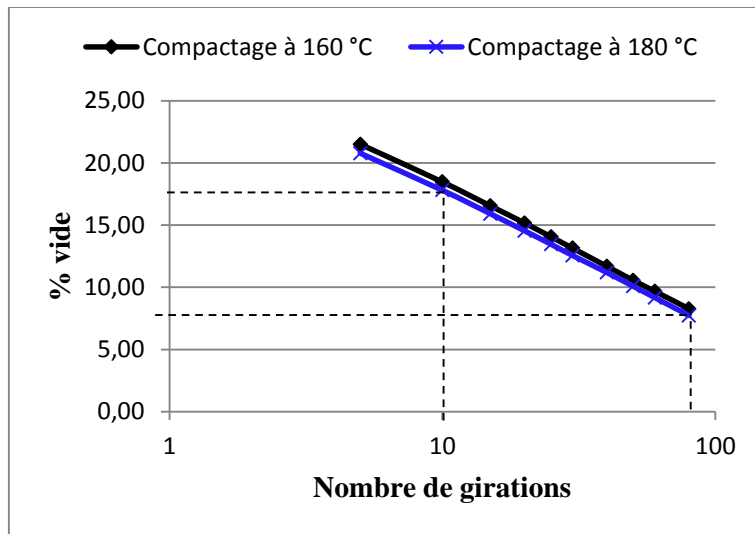
Pour mettre en évidence l'effet de température de fabrication du béton bitumineux modifié par l'utilisation du bitume-plastique sur la compactibilité des mélanges, on réalise l'essai PCG avec un pourcentage de 0.7 % plastique.

Le tableau V.16 résume les résultats de l'essai PCG pour les deux températures de compactage.

**Tableau V.16.** Les résultats de l'essai PCG pour les deux températures de compactage.

Nombre de girations	Hauteur de l'éprouvette (mm)		Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )		% de vide		Spécifications [LCPC]
	Température de compactage						
	160 °C	180 °C	160 °C	180 °C	160 °C	180 °C	
<b>5</b>	127,42	126,25	1968,62	1986,70	21,50	20,78	
<b>10</b>	122,67	121,67	2044,74	2061,39	<b>18,47</b>	<b>17,8</b>	<b>&gt;11</b>
<b>15</b>	119,85	118,94	2092,83	2108,79	16,54	15,91	
<b>20</b>	117,90	117,03	2127,54	2143,14	15,17	14,54	
<b>25</b>	116,38	115,57	2155,24	2170,28	14,06	13,46	
<b>30</b>	115,14	114,36	2178,42	2193,14	13,14	12,55	
<b>40</b>	113,26	112,61	2214,66	2227,22	11,69	11,19	
<b>50</b>	111,82	111,22	2243,16	2255,19	10,56	10,08	
<b>60</b>	110,73	110,10	2265,23	2278,01	9,68	9,17	
<b>80</b>	109,03	108,39	2300,45	2314,06	<b>8,27</b>	<b>7,73</b>	<b>4 à 9</b>

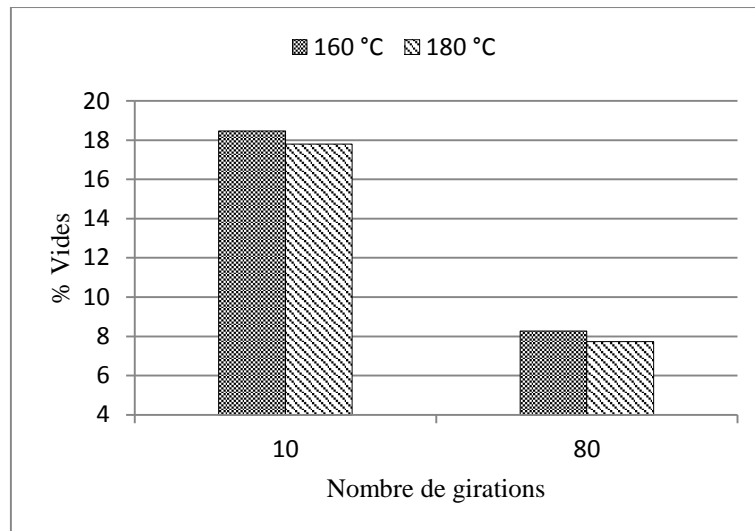
La figure V.14, résume la variation du pourcentage de vides en fonction du nombre de girations pour les deux températures de compactage.



**Figure V.14.** Variation du pourcentage de vides en fonction des deux températures de compactage.

Les résultats de la figure V.14 montrent que les deux mélanges répondent bien aux spécifications de l'essai PCG.

La figure V.15 résume le pourcentage de vide à 10, et 80 girations pour les deux températures de compactage.

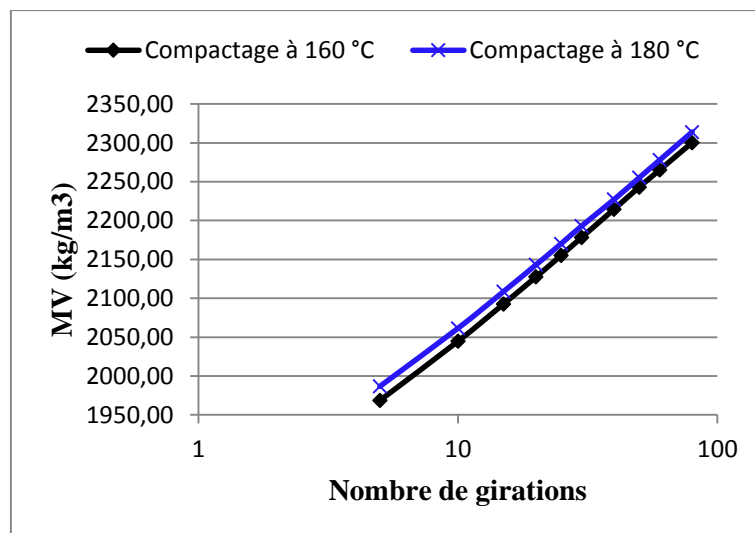


**Figure V.15.** Pourcentage de vide à 10, et 80 girations pour les deux températures de compactage.

D'après le résultat de la figure V.15, on remarque que le pourcentage de vide à 10 girations « seuil d'estimation de la maniabilité », est supérieur à 11%, et bien compris entre 4% et 9% à 80 girations pour les deux températures de compactage.

Le pourcentage de vides du mélange diminue avec l'augmentation de la température du compactage, ce qui montre que le bitume-plastique a une meilleure maniabilité à haute température.

La figure V.16 résume l'évolution de la masse volumique du mélange pour les deux températures de compactage.

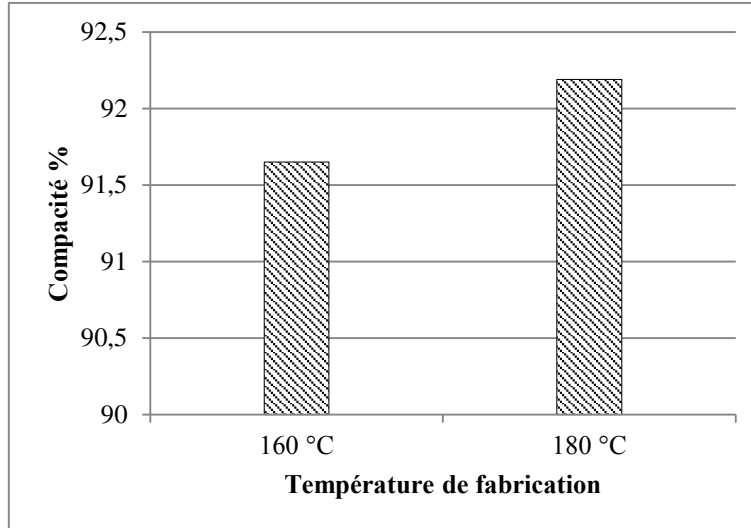


**Figure V.16.** Evolution de la masse volumique du mélange pour les deux températures de compactage.

D'après les résultats de la figure V.16, on remarque que la fabrication de l'enrobé à 180 °C, augmente la masse volumique du béton bitumineux et donc une meilleure compacité du mélange. Les résultats de la compacité sont résumés dans le tableau V.17 et la figure V.17.

**Tableau V.17.** Résultats de la compacité du BB modifié par 0.7% plastique.

<i>MVR</i> (T/m <sup>3</sup> )	2,51	
Température de compactage °C	160	180
<i>MVA</i> (T/m <sup>3</sup> )	2.300	2.314
Compacité	91,65	92,19



**Figure V.17.** Résultats de la compacité du BB modifié par 0.7% plastique.

D'après les résultats de la figure V.17, on remarque que la compacité augmente de 91.65% pour les enrobés fabriqués à 160 °C à 92.19% pour les enrobés fabriqués à 180 °C.

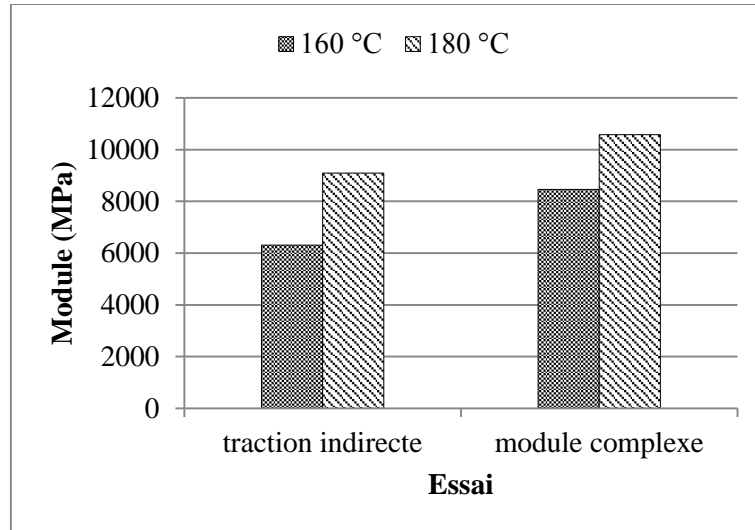
✓ **Module de rigidité**

Pour mettre en évidence l'effet de température de fabrication du béton bitumineux modifié par l'utilisation du bitume-plastique sur la rigidité des mélanges, on réalise l'essai de module avec un pourcentage de 0.7 % plastique.

Les résultats de l'essai de module de rigidité pour les deux températures de compactage sont résumés dans le tableau V.18 et la figure V.18.

**Tableau V.18.** Résultats de module de rigidité pour les deux températures de compactage.

% plastique		0%		0.7%		Spécification [LCPC]
Température de malaxage (°C)		160	180	160	180	
Module 15°C, 10Hz (MPa)	traction indirecte	5200	7755	6305	9088	/
	module complexe	7627	9566	8465	10578	> 7000



**Figure V.18.** Résultats de module de rigidité pour les deux températures de compactage.

On remarque d'après les résultats de la figure V.18 que le module de rigidité augmente avec l'augmentation de la température de fabrication de l'enrobé bitumineux.

On remarque que le module de rigidité du béton bitumineux modifié par 0.7% plastique mesuré par l'essai de traction indirecte augmente de 44% entre les deux températures testées, de même le module complexe augmente de 25%.

Le module complexe augmente d'environ 8500 MPa pour la température de compactage de 160 °C au 10600 MPa > 9000 MPa pour la température de 180 °C. Ce qui donne un béton bitumineux à module élevé.

### V.5.3. Enrobé modifié par bitume-huile-plastique à 160 °C

Pour mettre en évidence l'influence de bitume-huile-plastique sur les caractéristiques mécanique de l'enrobé, on utilise le bitume modifié par 1.7 et 1.9 % plastique avec 2% d'huile.

#### ✓ Compactibilité (PCG)

On montre ici l'effet de bitume-huile-plastique sur la compactibilité des bétons bitumineux, donné par le pourcentage de vides des mélanges. Les résultats de l'essai PCG sont résumés dans le tableau V.19.

Tableau V.19. Résultats de l'essai PCG pour les deux teneurs en plastique.

Nombre de girations	Hauteur de l'éprouvette (mm)		Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )		% de vide		Spécifications [LCPC]
	Bitume-plastique						
	1,7 %	1,9 %	1,7 %	1,9 %	1,7%	1,9%	
5	125,70	127,15	1995,42	1972,72	20,43	20,67	
10	121,06	122,46	2071,91	2052,20	<b>17,38</b>	<b>18,17</b>	>11
15	118,35	119,36	2120,33	2101,37	15,45	16,21	
20	116,39	117,41	2155,09	2136,42	14,07	14,81	
25	114,87	115,89	2183,48	2162,03	12,94	13,68	
30	113,68	114,62	2206,46	2188,37	12,02	12,74	
40	111,86	112,72	2242,21	2224,53	10,59	11,30	
50	110,45	111,33	2270,81	2252,88	9,45	10,17	
60	109,40	110,27	2292,55	2274,52	8,59	9,31	
80	107,71	108,59	2328,62	2309,84	<b>7,15</b>	<b>7,90</b>	4 à 9

La figure V.19 résume l'évolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations.

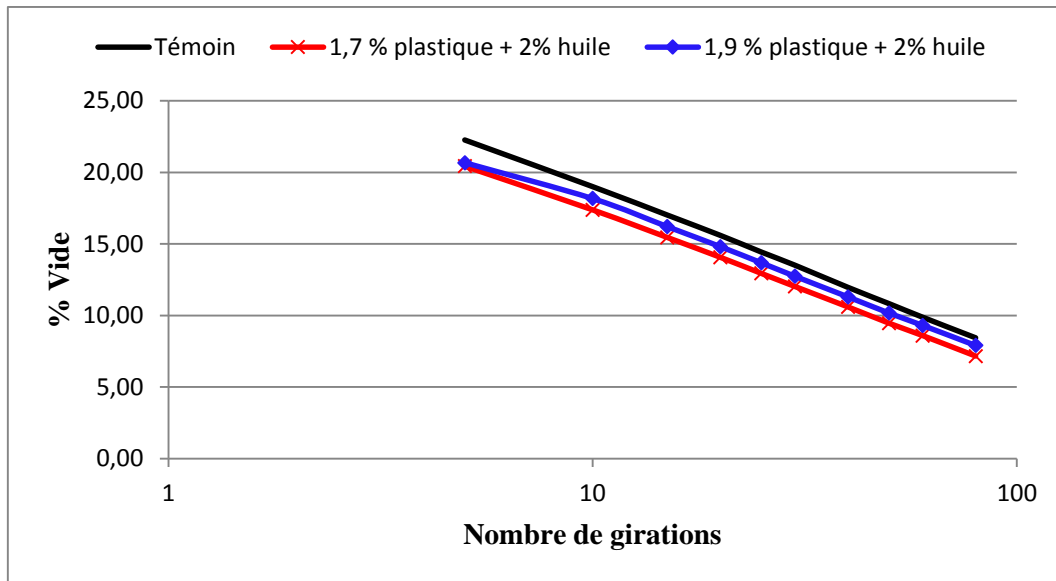
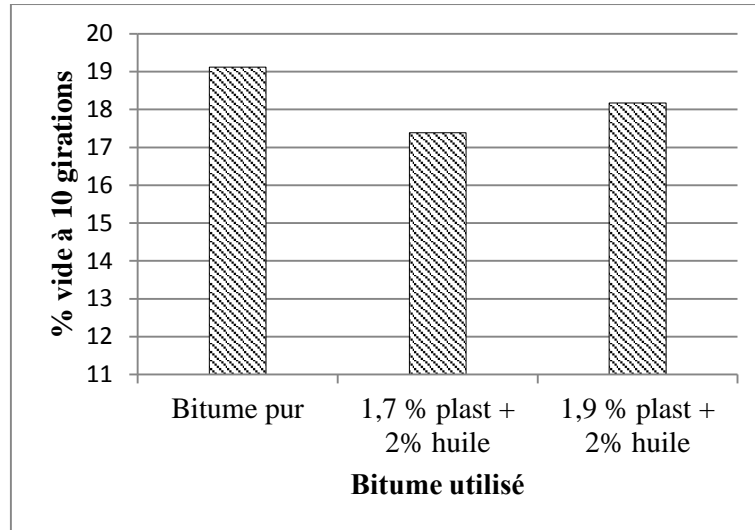


Figure V.19. Evolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de girations.

Les résultats de la figure V.19 montrent que les bétons bitumineux modifiés par bitume-huile-plastique répondent bien aux spécifications de l'essai PCG.

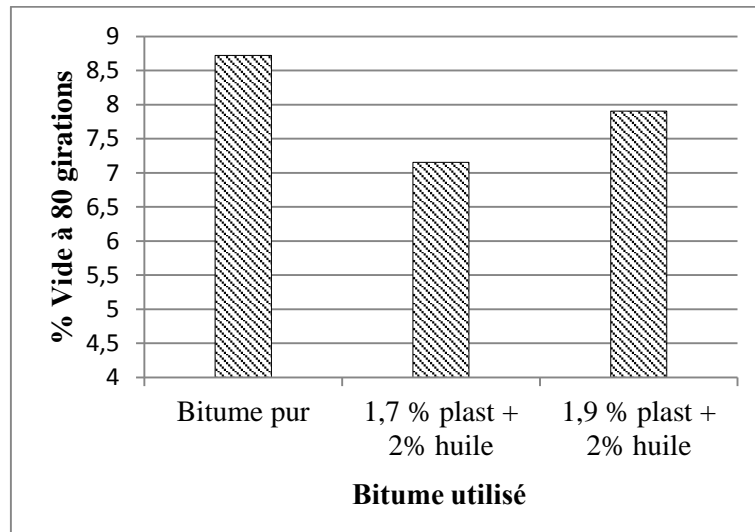
La figure V.20 résume le pourcentage de vide à 10 girations en fonction du bitume utilisé.



**Figure V.20.** Pourcentage de vide à 10 girations en fonction du bitume utilisé.

D'après le résultat de la figure V.20, on remarque que le pourcentage de vide à 10 girations « seuil d'estimation de la maniabilité », est supérieur à 11% pour les trois enrobés indiquant que les mélanges ne sont pas trop maniables.

La figure V.21 résume le pourcentage de vide à 80 girations en fonction du bitume utilisé.



**Figure V.21.** Pourcentage de vide à 10 girations en fonction du bitume utilisé.

D'après le résultat de la figure V.21, on remarque que le pourcentage de vide à 80 girations est bien compris entre 4% et 9% pour les enrobés modifiés par l'ajout de huile au bitume-plastique, qui permet d'améliorer la compactibilité des mélanges.

L'enrobé modifié par 1.7 % plastique+ 2% huile présente une meilleure compactibilité que celle modifié par 1.9% plastique+ 2% huile, ce qui peut être expliqué par la mauvaise dissolution de la quantité de 1.9% plastique. Une telle quantité nécessite une grande énergie de malaxage (> 600 tr/min).

La diminution des vides dans les mélanges augmente la compacité des bétons bitumineux, comme indique la figure V.23.

La figure V. 22 résume l'évolution de la masse volumique en fonction du nombre de girations.

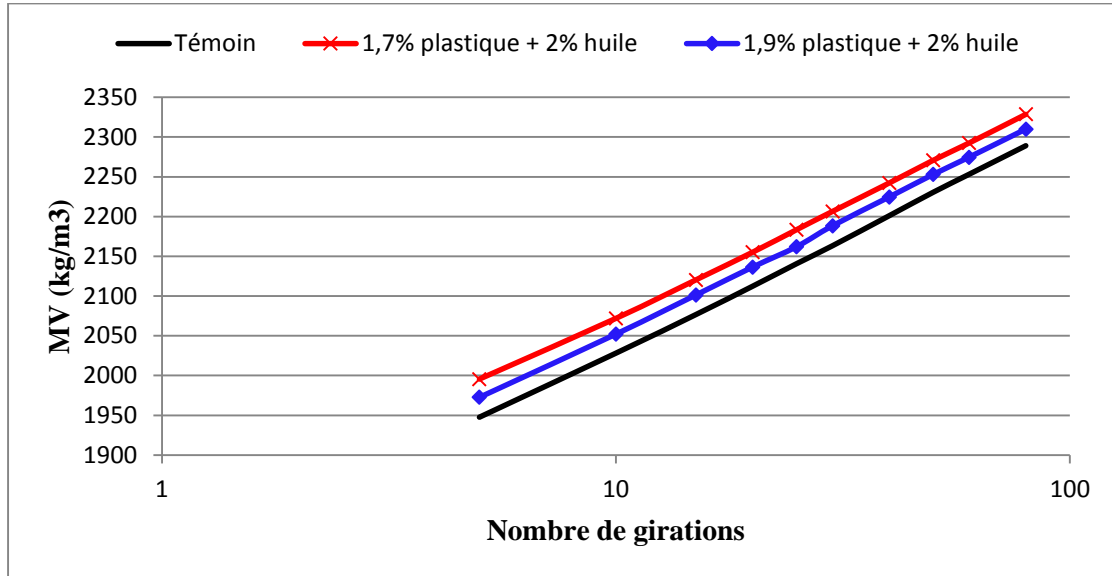


Figure V.22. Evolution de la masse volumique en fonction du nombre de girations.

Les résultats de la compacité sont résumés dans le tableau V.20 et la figure V.23.

Tableau V.20. Résultats de la compacité.

MVR (T/m <sup>3</sup> )	MVA (T/m <sup>3</sup> )			Compacité %		
	Bitume-huile-plastique			Bitume-huile-plastique		
	0%	1.7 %	1.9 %	0 %	1.7 %	1.9 %
2.51	2.289	2.328	2.309	91.20	92.77	92.03

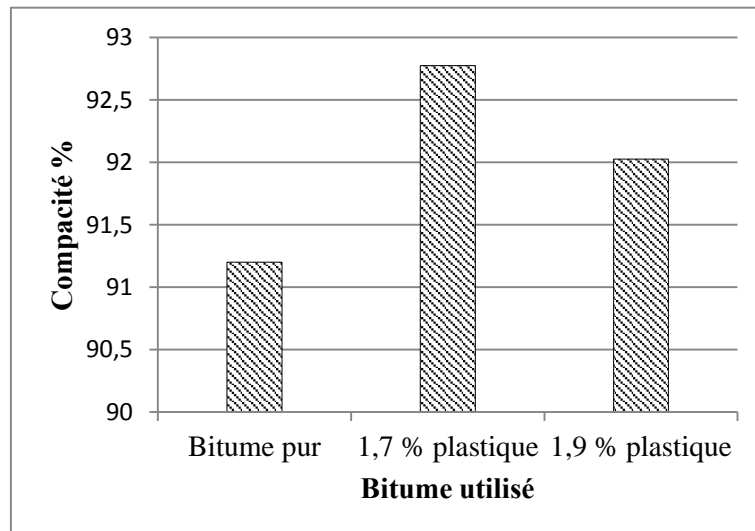


Figure V.23. Résultats de la compacité.

D'après les résultats de la figure V.23, on remarque que les bétons bitumineux réalisés par le bitume-huile-plastique ont une meilleure compacité par rapport au béton bitumineux témoin et les bétons bitumineux modifiés par bitume-plastique.

✓ **Tenue à l'eau**

On montre ici l'effet du bitume-huile-plastique sur la résistance au désenrobage des bétons bitumineux. Le tableau V.21 résume les résultats de l'essai de la tenue à l'eau.

**Tableau V.21.** Les résultats de l'essai de la tenue à l'eau.

Teneur en plastique	0%		1.7%		1.9%	
Lot	Sec	Immergé	Sec	Immergé	Sec	Immergé
Charge de rupture (kN)	24,28	20,53	22,38	21,28	26,54	25,10
Résistance à la compression (MPa)	4,83	4,08	4,45	4,23	5,28	4,99
r/R (%)	84,47		95,05		94,51	
Spécification (%)	> 70					

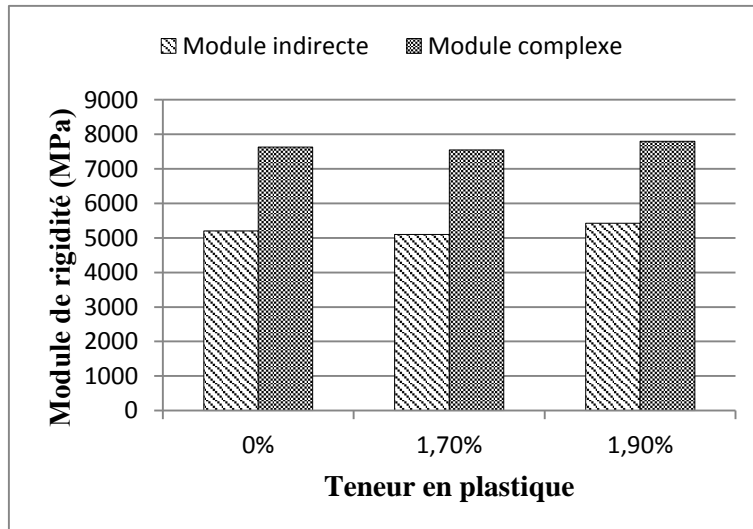
D'après les résultats données dans le tableau V.21, on remarque que le rapport r/R augmente de plus de 10% pour les deux teneurs en plastique testées, ce qui indique que les bétons bitumineux modifiés par bitume-huile-plastique présentent une meilleure tenue à l'eau c.-à-d. une meilleure résistance au désenrobage. Néanmoins les bétons bitumineux modifiés par bitume-plastique ont une résistance au désenrobage supérieure à celle modifiés par bitume-huile-plastique.

✓ **Module de rigidité**

On montre ici l'effet du bitume-huile-plastique sur la rigidité des bétons bitumineux. Les résultats de module de rigidité sont résumés dans le tableau V.22 et la figure V.24.

**Tableau V.22.** Résultats du module de rigidité.

% plastique		0%	1.7%	1.9%	Spécification [LCPC]
Module 15°C, 10Hz (MPa)	traction indirecte	5200	5100	5427	/
	module complexe	7627	7551	7799	> 7000



**Figure V.24.** Résultats de module de rigidité pour les trois enrobés.

D'après les résultats de la figure V.24, on remarque que l'ajout d'huile au bitume-plastique n'apporte pas de gain substantiel comparativement au module trouvé par l'enrobé témoin et introduire une perte de rigidité par rapport au enrobé modifié par le bitume-plastique.

Pour augmenter le module de rigidité de l'enrobé, il faut peut-être augmenter le pourcentage de plastique et l'énergie de cisaillement, car 1,7% ou 1,9% plastique est une faible quantité devant 2% huile, ou autrement diminuer le pourcentage de l'huile à 1%.

### **V.6. Conclusion**

Les objectifs poursuivis dans cette partie visent à élaborer un béton bitumineux de meilleures caractéristiques par l'addition des particules de plastique de sachets de tailles de 2-5 mm, pour modifier un bitume pur de classe 35-50 d'une part et par l'ajout de plastique au bitume "fluxé" par 2% d'huile de vidange d'autre part.

En synthèse on peut retenir que le travail a permis de mettre en évidence les gains prévisibles suivants apportés par l'ajout de plastiques au bitume pur et au bitume plus 2% huile :

- Une meilleure compactibilité des mélanges (enrobés modifiés) apportée par l'ajout de plastique, compactage plus facile.
- Une meilleure résistance à l'eau, bonne résistance au désenrobage.
- Une meilleure résistance au vieillissement mise en évidence par la diminution du vide, ce qui diminue le contact air chaud-bitume, et donc une meilleure durabilité du mélange.
- Une meilleure rigidité explicitée par l'augmentation du module complexe de l'enrobé modifié par bitume-plastique.

La modification du bitume par addition de plastique de sachets permet de fabriquer un enrobé de type BBME pour une température de fabrication de 180 °C. De même, permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques de l'enrobé classique de type BB 0/14, avec une température de compactage de 160 °C au lieu de 180 °C. Ce qui permet une économie d'énergie.

Les enrobés modifiés par le bitume-huile-plastique présente une rigidité inférieure de celle donnée par le bitume-plastique, malgré qu'ils ont donné une meilleure compactibilité et une bonne résistance au désenrobage, ce qui montre l'insuffisance de la quantité de plastique rajoutée (1.7% et 1.9%) pour un pourcentage de 2% d'huile (extender-oil) peut être importante.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Les couches de chaussées routières consomment des quantités considérables de granulats (10000 à 15000 tonnes/km de route) qui sont des sources fossiles non renouvelables. La croissance continue de la demande conjuguée à la raréfaction de ces ressources appellent la gestion durable de ces matériaux. Le procédé d'utilisation des pneus usés et des déchets plastiques dans les applications routières permet de minimiser la consommation de ces granulats.

Le présent travail s'est intéressé à l'influence de la modification des bitumes par l'ajout de déchets de sachets plastiques d'une part sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques des mélanges bitume – plastique et d'autre part l'influence de ces derniers sur les performances mécaniques des bétons bitumineux résultants.

Pour atteindre cet objectif, ce mémoire a été scindé en deux grandes parties à savoir :

- Une étude bibliographique sur les bitumes classiques, les enrobés bitumineux et les bitumes modifiés.
- Une étude expérimentale, a été réalisée au niveau du Laboratoire Central des Matériaux (Cosider Travaux Publics), cette partie comportait deux parties à savoir :
  - Une étude du bitume modifié.
  - Une étude sur les gains apportés par le bitume-plastique sur les bétons bitumineux type 0/14.

Le bitume utilisé dans cette étude est de classe 35-50, qui contient une quantité insuffisante d'huile aromatique, pour réaliser en même temps le gonflement du plastique et la dissolution des particules de plastique dans la matrice bitumineuse. Pour faire face à ce problème, on a introduit de l'huile de vidange pour augmenter l'homogénéité du mélange bitume-plastique.

Les tests classiques (pénétrabilité, TBA, et ductilité) effectués sur les bitumes modifiés ont montré que les propriétés des bitumes changent avec l'ajout de plastique de sachets. En effet, la pénétrabilité diminue, le point de ramollissement augmente, et la ductilité standard diminue, pour les deux types de bitumes étudiés (bitume pur, bitume + huile).

En ce qui concerne le vieillissement du bitume, les résultats de l'essai RTFOT montrent que l'ajout de plastique au bitume (bitume pur ou bitume + huile) diminue le taux de vieillissement des bitumes.

Les résultats des essais de stabilité au stockage montrent que le bitume-plastique et le bitume-huile-plastique sont instables au stockage.

Les essais mécaniques (PCG, Duriez, et module) réalisés sur les bétons bitumineux à base des bitumes modifiés (bitume-plastique, bitume-huile-plastique) ont montré que les performances des enrobés sont améliorés avec l'utilisation des bitumes modifiés. En effet le pourcentage de vide diminue, la tenue à l'eau et le module augmentent.

A la lumière des résultats obtenus à partir de la caractérisation rhéologique des bitumes purs et modifiés ainsi que leurs mélanges bitumineux, il est possible de faire les conclusions suivantes:

1) Sur le bitume modifié

- Une meilleure ouvrabilité des mélanges (bitumes-plastiques, et bitume-huile-plastique) à haute température apportée par la basse température de fusion de plastique de sachets (110-120 °C).
- Une meilleure résistance à l'orniérage explicitée par l'augmentation du point de ramollissement du bitume-plastique, et bitume-huile-plastique.
- Une moindre susceptibilité thermique.
- Une meilleure résistance au vieillissement mise en évidence par les caractéristiques après RTFOT, ce qui présage une meilleure durabilité du mélange bitumineux.
- Une meilleure résistance à la fissuration thermique explicitée par l'augmentation de module de rigidité des liants modifiés à basse température, ce qui augmente la résistance à la fatigue.
- Une meilleure durabilité de la chaussée, explicitée par l'augmentation de module de rigidité à moyenne température.

2) Sur l'enrobé modifié

- Une meilleure compactibilité des mélanges (enrobés modifiés) apportée par l'ajout de plastique, compactage plus facile.
- Une meilleure résistance à l'eau, bonne résistance au désenrobage.
- Une meilleure rigidité explicitée par l'augmentation du module complexe de l'enrobé.
- Une meilleure résistance au vieillissement mise en évidence par la diminution du vide, ce qui diminue le contact air chaud-bitume, et donc une meilleure durabilité du mélange.

A la suite de ce travail et à la lumière des résultats obtenus, quelques recommandations peuvent être faites pour la suite de cette recherche:

- Réaliser des essais chimiques sur les bitumes modifiés, tels que la chromatographie, pour mieux expliquer les phénomènes de réaction entre le plastique et le bitume.
- Réaliser des essais de centrifugation sur le bitume modifié afin de déterminer le taux de gonflement du plastique.
- Utiliser des malaxeurs à haute énergie de cisaillement pour augmenter l'homogénéité entre le bitume et le plastique.
- Ajouter des agents chimiques au bitume-plastique pour augmenter la stabilité au stockage.
- Associer au plastique des copolymères à base d'éthylènes pour augmenter la compatibilité entre le bitume et le polymère.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] T. Diffiné, “Analyse des déformations d’une chaussée contenant des matériaux bitumineux recyclés à froid”, Mémoire pour l’obtention du grade de maîtrise en génie de la construction, université du Québec, Ecole de Technologie Supérieure, CANADA, 2012.
- [2] Y. Lefeuvre, “Contribution à l’étude du comportement en fatigue des enrobes bitumineux. Etude de l’allongement des éprouvettes comme manifestation de l’endommagement diffus. Expérimentation–modélisation”, Mémoire pour l’obtention du diplôme de docteur, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Nantes, 2001
- [3] F. Olard, “Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures. Relations entre les propriétés du liant et de l’enrobe”, Mémoire pour l’obtention du diplôme de docteur, école doctorale des sciences pour l’ingénieur de Lyon, 2003.
- [4] A. Carter, “Rhéologie en petite déformation des enrobés bitumineux et mesure de leur résistance à basse température à partir de l’essai TSRSTS”, Mémoire pour l’obtention du grade de la maîtrise en génie de la construction, université du Québec, Ecole de Technologie Supérieure, CANADA, 2002.
- [5] C. Barco, “Influence de la température de compactage des plaques d’enrobés sur la résistance à l’orniérage”, Mémoire pour l’obtention du grade de la maîtrise en génie de la construction, université du Québec, Ecole de Technologie Supérieure, CANADA, 2007.
- [6] O. Solomatnikova, “Comportement rhéologique et propriétés cohésives et adhésives des liants bitumineux”, Mémoire pour l’obtention du grade de maître ès sciences, université Laval, faculté des sciences et génie, CANADA, 1998.
- [7] D. Magramane, “Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification à base de polymères : poudrette de caoutchouc”, Mémoire pour l’obtention du diplôme de Magister en Génie Civil, ENSTP, Alger, 2009.
- [8] M. Ould Henia, “Modélisation et prédiction du comportement rhéologique des mélanges bitume caoutchouc”, Mémoire pour l’obtention du grade de docteur ès sciences, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.
- [9] N. Tachon, “Nouveaux types de liants routiers à hautes performances, a teneur en bitume réduite par addition de produits organiques issus des agro-ressources”, Mémoire pour l’obtention du diplôme de docteur, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008.
- [10] A. Dony, “Liants bitumes-polymères, de la fabrication à la mise en œuvre en enrobes : influence de la nature du bitume sur leurs propriétés mécaniques, leur micromorphologie et leur stabilité thermique”, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées, Paris, 1991.
- [11] S. B. Djaffar, “Comportement rhéologique des bitumes modifiés par des polymères : influence du vieillissement”, Mémoire pour l’obtention du diplôme de docteur, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, faculté de génie civil, Alger, 2014.

- [12] B. Brule, "Caractérisation de produits bitumineux par chromatographie sur gel perméable", bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, spécial V, décembre 1977.
- [13] O. G. Ciochina, "incorporation dans les bitumes pétroliers des résidus de la distillation des huiles provenant de la pyrolyse sous vide de pneus usés, de bois et des rebuts de broyage d'automobiles ", Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès sciences, université Laval, faculté des sciences et génie, 2007.
- [14] J. Read, D. Whiteoak, "The Shell Bitumen Handbook, 5th edition". London, Thomas Telford. Publishing, pp. 119-170, November 2003.
- [15] M. Merbouh, "Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux. Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue ", Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur, université Bordeaux-I, 2010.
- [16] "Formation des Laboratoires départementaux Matériaux de chaussées, Essais de laboratoire, Contrôles de chantier ", guide technique.
- [17] S. Saoula, "Approche Modéliste et Valorisation des Enrobés Modifiés par Ajout de Polymères - Impact sur l'Environnement", Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur, université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, faculté de génie civil, Alger.
- [18] G. D. Airey, "Rheological Characteristics of Polymer Modified and Aged Bitumens ", pour l'obtention du grade de docteur, université Nottingham, 1997.
- [19] J.L. Delorme, C. Roche et L. Wendling, "Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés ", Groupe de travail RST, Formulation des enrobés, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2007.
- [20] H. Baaj, "Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux liants hydrocarbonés ", Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur, Ecole doctorale des sciences pour l'ingénieur de Lyon, 2002.
- [21] B. Julienne, "caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses ", Mémoire pour l'obtention du diplôme de docteur, Ecole doctorale des sciences pour l'ingénieur de Lyon, 2005.
- [22] W. BOUGHAMSA, "Modification d'un bitume 35/50 par du Polyéthylène à Haute Densité", Séminaire International, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction, Rabat, Maroc, 23-25 Novembre 2011.
- [23] T. McNally, "Polymer modified bitumen, Properties and characterization", Oxford Cambridge Philadelphia New Delhi, 2011.
- [24] P. Weiss, "Cours de chimie des polymères ", Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, 2009-2010.
- [25] U. Isacson, X. Lu, "Testing and appraisal of polymer modified road bitumens - state of the art", Materials and Structures, vol. 28, pp. 139-159, 1995.

- [26] Z. N. Kalantar, M. R. Karim, et A. Mahrez, “A review of using waste and virgin polymer in pavement”, *Construction and Building Materials*, vol. 33, pp. 55-62, February 2012.
- [27] D. Lesueur, “The Colloidal Structure of Bitumen: Consequences on the Rheology and on the Mechanisms of Bitumen Modification », *Advances in colloid and interface science*, vol. 145, pp. 42-82.
- [28] C. Giavarini, P.D. Filippis, M.L. Santarelli, and M. Scarsella, “Production of stable polypropylene modified bitumens”, *Elsevier Science*, vol. 75, pp. 681–686, November 1996.
- [29] A. Ait-Kadi, B. Brahim, M. Bousmina, “Polymer Blends for Enhanced Asphalt Binders”, *polymer engineering and science*, vol. 36, pp. 1724-1733, 1996.
- [30] B. Sengoz, G. Isikyakar, “Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen”, *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp.1897–1905, 2008.
- [31] F. Haiying, X. Leidong, D. Daying, L. Linfan, Y. Ming, et Y. Side, “Storage stability and compatibility of asphalt binder modified by SBS graft copolymer ”, *Construction and Building Materials*, vol. 21, pp.1528–1533, 2007.
- [32] S. Daquan, Y. Fen, S. Fangzhi, L. Weimin, “Storage Stability of SBS-Modified Road Asphalt: Preparation, Morphology, and Rheological Properties”, *Petroleum Science and Technology*, vol. 24, pp.1067–1077, 2006.
- [33] G. Wen, Y. Zhang, Y. Zhang, K. Sun, Y. Fan, “Rheological characterization of storage-stable SBS modified asphalts ”, *Polymer Testing*, vol.21, pp. 295-302, 2001.
- [34] Asphalt Academy, “The use of Modified Bituminous Binders in Road Construction”, *Technical Guideline*, 2007.
- [35] Y. Brosseau, “Les enrobés à module élevé : bilan de l’expérience de française et transfert de technologie ”, *Résultats de recherche au LCPC*.
- [36] F. Belabdelouahab et Z. Djidjeli, “Valorisation des pneumatiques usagés dans la protection de l’environnement ”, *19ème Congrès Français de Mécanique*, Marseille, 24-28 août 2009.
- [37] Collège Le Monteil, “Les plastiques dans notre vie ”, (2012).
- [38] H. Gervais, “Les plastiques, Fiches informatives ”, *RECYC-QUBEC*, 2010.
- [39] M.Z. Gertrude, “ Production domestique, récupération et recyclage des déchets plastiques : cas des sachets plastiques à Dakar”, *Pour l’obtention du grade de Docteur de 3ème cycle en Sciences de l’Environnement*, 1997.
- [40] B. Muñoz, J. G. Medina, et L. S. Rodríguez, “guide pour la fabrication d’enrobés bitumineux avec de la poudrette de caoutchouc issue de pneumatiques usagés ”, *Guide technique*, 2014.
- [41] J.J. Jafar, “Utilisation of Waste Plastic in Bituminous Mix for Improved Performance of Roads”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, pp. 1-7, 2015.

- [42] A. Gawande, G. Zamare, V.C. Renge, S. Tayde, and G. Bharsakale, “An overview on waste plastic utilization in asphaltting of roads”, *Journal of Engineering Research and Studies*, vol. III, pp.1-5, June 2012.
- [43] C.S. Bindu and K.S.Beena, (2010), “Waste plastic as a stabilizing additive in Stone Mastic Asphalt”, *International Journal of Engineering and Technology* Vol.2 (6), pp.379-387, 2010.
- [44] O. Gonzàlez, M. E. Munoz et A. Santamaria, “Bitumen/polyethylene blends: using m-LLDPEs to improve stability and viscoelastic properties”, *Rheol Acta*, vol.45, pp. 603–610, 2006.
- [45] H. Kowanou, D.A. Tchhouali, E.A. Sanya, et A.K. Vianou, “Effets de l’incorporation du fondu de déchets de sachets plastiques sur la consistance du bitume et la stabilité du béton bitumineux”, *Afrique Science*, vol. 10, pp. 39 – 52, 2014.
- [46] S. Rokade, “Use of Waste Plastic and Waste Rubber Tyres in Flexible Highway Pavements”, *International Conference on Future Environment and Energy*.Singapore, vol. 28, pp. 105-108, 2012.
- [47] S.E. Zoorob et L.B. Suparma, “Laboratory design and investigation of the properties of continuously graded Asphaltic concrete containing recycled plastics aggregate replacement (Plastiphalt)”, *Cement & Concrete Composites*, vol.22, pp. 233-242, 2000.
- [48] R. Vasudevan, A. Ramalinga, C. Sekar, B. Sundarakannan, et R. Velkennedy, “A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements ”, *Construction and Building Materials*, vol.28, pp. 311-320, 2012.
- [49] M. Attaelmanan, C.P. Feng, and A.I. Al-Hadidy, “Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier”, *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2764-2770, January 2011.
- [50] A.I. Al-Hadidy and T. Yi-Qiu, “Evaluation of Pyrolysis LDPE modified asphalt paving materials”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol.21, pp. 618-623, October 2009.
- [51] A.I. Al-Hadidy and T. Yi-qiu, “Effect of polyethylene on life of flexible pavements”, *Construction and Building Materials*, vol.23, pp. 1456-1464, August 2008.
- [52] I .A. AI-Dubabe, H.I. AI-Abdul Wahhab, I.M. Asi, et M.F. Ali “Polymer modification of Arab asphalt ”, *journal of materials in civil engineering*, vol.10, pp. 161-167, 1998.
- [53] V. S. Punith, and A. Veeraragavan, “Behavior of Asphalt Concrete Mixtures with Reclaimed Polyethylene as Additive”, *journal of Materials in Civil Engineering*, vol.19, pp. 500-507, June 2007.
- [54] C. Fuentes-Audén , J.A. Sandoval, A. Jerez, F.J. Navarro, “Evaluation of thermal and mechanical properties of recycled polyethylene modified bitumen ”, *Polymer Testing*, vol. 27, pp. 1005-1012, 2008.

- [55] E. Ahmadiania, M. Zargar, M. R. Karim, M. Abdelaziz, et P. Shafigh “ Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt ”, *Materials and design*, vol. 32, pp.4844-4849, 2011.
- [56] W. Minkowski, “Catalytic modification of road asphalt by polyethylene”, *J. Transp. Eng.* Vol. 111, pp. 54-72, 1985.
- [57] M. Murphy, M. O'Mahony, C. Lycett, et I.Jamieson, “Bitumens modified with recycled polymers”, *Materials and Structures*, vol.33, pp.438-444, 2000.
- [58] H. Zhang, W. Xiaowei, C. Dongwei, Y. Zhang, et H. Min, “ Effect of linear low density-polyethylene grafted with maleic anhydride (LLDPE-g-MAH) on properties of high density polyethylene/styrene– butadiene–styrene (HDPE/SBS) modified asphalt”, *Construction and Building Materials*, vol. 47, pp. 192-198, 2013.
- [59] L. Jun, Z. Yuxia, and Z. Yuzhen, “The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen”, *Construction and Building Materials*, vol. 22, pp. 1067–1073, June 2007.
- [60] G. Polacco, S. Berlincioni, D. Biondi, J. Stastna, et L. Zanzotto “Asphalt modification with different polyethylene-based polymers”, *European Polymer Journal*, vol.41, pp. 2831–2844, 2005.
- [61] G. Polacco, J Stastna, D. Biondi, et L. Zanzotto, “Relation between polymer architecture and nonlinear viscoelastic behavior of modified asphalts”, *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, vol.11, pp.230–245, 2006
- [62] A. A. Yousefi, “Polyethylene Dispersions in Bitumen: The Effects of the Polymer Structural Parameters”, *Journal of Applied Polymer Science*, pp.3183–3190, 2003.
- [63] A. Gawande, “Economics and viability of plastic road”, *Journal of Current Chemical & Pharmaceutical Sciences*, pp. 231-242, September 2013.
- [64] Moisés Garcia-Morales, P. Partal, F.J. Navarro, F. M. Boza, M.R. Mackley et C. Gallegos, “The rheology of recycled EVA/LDPE modified bitumen ”, *Rheol Acta*, vol. 43, pp. 482,490, 2004.
- [65] E. Ahmadiania, “Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt”, *Materials and Design*, vol.32, pp. 4844-4849, 2011.
- [66] S. Boukherrouba, “ Etude, Caractérisation et Mise au point d'un combustible Innovant à base des huiles de vidange”, *Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magister en énergétique et développement durable*, UMB - Boumerdes, 2011.
- [67] RGRA, “Revue Générale des Routes et Aérodrômes”, 2005.