



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et
de la Recherche Scientifique



Projet de Fin d'Étude
Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued
Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Présenté par :

- YAKOUB HAWA
- NECIRA AMIRA

Intitulé :

Amélioration des performances des enrobés
Bitumineux par la modification à base de polymères :
Déchets plastiques

Soutenue le : 04/06 /2024

Devant le jury composé de :

Dr : SOULAIMAN ILYASS	Président	Université
Dr : FKIK ALI	Examineur	Université
Dr : FETHIZA ALI Boubaker	Encadreur	Université

Année académique : 2023/2024

Remerciements

Louange à Dieu qui m'a permis de réaliser ce mémoire de maîtrise dans le domaine du génie civil. Tout d'abord, je tiens à exprimer mes remerciements et ma gratitude à mon encadrant, le Dr. **[FETHIZA ALI Boubaker]**, dont le précieux soutien et les conseils ont eu un grand impact sur la réalisation de ce mémorandum.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux distingués membres du comité de discussion.

J'adresse également mes sincères remerciements à tous les enseignants du département de génie civil de **[l'Université Hamma Lakhdar]** pour les connaissances et le soutien qu'ils ont apportés tout au long de la période d'études.

Je n'oublie pas de remercier mes collègues et amis qui ont partagé avec moi ce parcours académique et qui ont toujours été une source d'inspiration et de soutien.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma chère famille, en particulier à ma sœur, pour leur soutien et leurs encouragements continus, qui ont joué le plus grand rôle dans la réalisation de cet accomplissement.

Un grand merci et appréciation à tous

Dédicace

Mon Dieu, ce n'est pas grâce à mes efforts et à ma diligence, mais plutôt grâce à votre aide, votre générosité et votre grâce. Vous avez mes sincères louanges et mes remerciements.

Je dédie mon diplôme à celui qui m'a donné sa vie, à celui que j'ai confié à Dieu, et je lui dis : « J'ai accompli le commandement, alors sois fier de ton petit, mon père **Mohammed** »

Et à mon paradis dans la vie, au sentiment d'amour et au sentiment de tendresse, à l'ombre dans laquelle je vis, m'abritant chaque fois que j'ai souhaité que tu sois avec moi et partage cette joie avec moi, mais si Dieu le veut, tu serais parmi Sa miséricorde. Que Dieu ait pitié de toi, ma chère mère, **Mahrezia**.

À mon âme sœur et à la bénédiction que Dieu m'a donnée dans cette vie, ma joie, mon bonheur et mon modèle, aux meilleurs soutiens et proches, à celui qui m'a élevé et m'a appris le sens du succès, ma tante. Qui a donné sa vie pour moi.

Et tous mes remerciements et ma gratitude à ceux dont je ne peux pas compter la gentillesse, à ceux qui m'ont encouragé et soutenu, Manal, Khadikha, Laila, et je remercie mon professeur superviseur qui a déployé tous ses efforts dans la création de ce mémorandum et a été avec nous à tout moment, et tous les mots ne suffisent pas pour remercier le **Dr FETHIZA ALI Boubaker**.

YAKOUB HAOUA

Dédicace

Mon Dieu, ce n'est pas grâce à mes efforts et à ma diligence, mais plutôt grâce à votre aide, votre générosité et votre grâce. Vous avez mes sincères louanges et mes remerciements.

Je dédie mon témoignage à celui qui m'a donné sa vie, à celui que j'ai confié à Dieu, et j'ai souhaité qu'il soit avec moi et partage cette joie avec moi, et je lui dis : « Tu as accompli le commandement, et j'ai réalisé ce que tu souhaitais, alors sois fier de ta fille père, **Sadok** » Que Dieu ait pitié de toi et te fasse habiter dans son vaste paradis.

Et à celui qui m'a donné un sentiment d'amour et un sentiment de tendresse, et à celui qui a été mon soutien dans l'adversité, et dont les prières pour ma réussite m'ont suivi pas à pas au printemps de tendresse, ma chère maman, **Djamila**.

Et tous mes remerciements et ma gratitude à ceux dont je ne peux pas compter la gentillesse, à ceux qui m'ont encouragé et soutenu, à mes frères Ahmed, Mohemmad, Sadok, et chère sœur Maria, et je remercie mon professeur superviseur qui a déployé tous ses efforts dans la création de ce mémorandum et a été avec nous à tout moment, et tous les mots ne suffisent pas pour remercier le Dr. **FETHIZA ALI Boubaker**.

NECIRA AMIRA

Resumé

Les propriétés du bitume doivent être améliorées pour assurer de meilleures performances, telles que la résistance à la déformation permanente, la résistance à la fissuration à basse température, la résistance à la fissuration à la fatigue et la résistance au vieillissement.

Le but de ce travail est d'étudier l'influence de déchets plastiques sur les caractéristiques physiques des bitumes modifiés et les propriétés mécaniques de mise à jour béton bitumineux.

L'étude montre que :

- L'incorporation de déchets plastiques dans le bitume améliore ses propriétés physiques (pénétration, point de ramollissement, la susceptibilité thermique).
- La modification par DP a une influence positive sur les enrobés modifié par l'amélioration de stabilité Marshall

Mots-clés : bitume, bitume modifié, DP, enrobé bitumineux, Marshall.

ملخص:

يجب تحسين خصائص القار لضمان أداء أفضل، مثل مقاومة التشوه الدائم، ومقاومة التشقق الناتج عن درجات الحرارة المنخفضة، ومقاومة التشقق، ومقاومة الشخوخة. يهدف هذا العمل الى دراسة تأثير المخلفات البلاستيكية على الخصائص الفيزيائية للقار المعدل والخواص الميكانيكية للخرسانة الإسفلتية المحدثة.

وتبين الدراسة أن:

دمج النفايات البلاستيكية في القار يؤدي إلى تحسين خواصه الفيزيائية (الاختراق، نقطة التليين، الحساسية الحرارية.

التعديل بواسطة النفايات البلاستيكية له تأثير إيجابي على الأسفلت المعدل من خلال تحسين استقرار

مارشال.

الكلمات المفتاحية: القار، القار المعدل، النفايات البلاستيكية، التماسك، مارشال.

Liste des abréviations

BMP : Bitume modifié en polymère

DP : Déchet plastique alimentaire

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

GPC : Chromatographie sur Gel Perméable

IC : Indice d'instabilité colloïdale

IP : Indice de pénétrabilité

PAV : Pressure Aging Vassel

Pen25: Pénétration à 25 ° C

RTFOT: Rolling Thin Film Oven Test

SAEL : Société d'application d'élastomère

TBA : Température bille et anneau

Liste des figures

Figure 1.1. Schematisation de la composition d'un petrol brut.....	6
Figure 1.2 : Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole.....	7
Figure 1.3. Structure des asphaltènes selon.....	9
Figure1.4 Schématisation de la structure colloïdale d'un bitume routie.....	9
Figure1.5. Différents composants du bitume	10
Figure. 2.1 : Schéma des différents types de structures de chaussée.....	16
Figure 2.2 Constitution d'une structure de chaussée souple	17
Figure 2.3. Fissures transversales	17
Figure 2.4 : Fissures longitudinales	18
Figure 2.5 : Fissures de rives.....	18
Figure 2.6: Fissures de gel.....	19
Figure 2.7: Faïençage.....	19
Figure 2.8: Phénomène d'orniérage.....	20
Figure 2.9: Essai Marshall.....	24
Figure 2.10: Essai Duriez	24
Figure 2.11 : Essai de fluage	25
Figure 2.12: Cantabro	25
Figure 2.13: traction directe	26
Figure 2.14: retrait thermique empêché (AASHTO, TP10-93).....	26
Figure 2.15 : Rupture par Compression Diamétrale.	27
Figure 2.16 : détermination d'aliénabilité	27
Figure 2.17: Essai de stabilité.....	28
Figure 2.18: compression simple ou répété.....	28
Figure 3.1. Effet de la modification polymère sur la structure colloïdale du bitume: bitumeoriginal (gauche) et BmP correspondant avec augmentation de la teneur en asphaltènes dela matrice (droit),	32
Figure 3.2: Observation de la microstructure d'un bitume modifié par microscopie defluorescence (0.5x0.7mm).....	37
Figure 4.1: bitume.....	41
Figure 4.2: déchets plastique	42
Figure 4.3: Courbe granulometrie.....	44
Figure 4.4: Appareillage de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille	45
Figure 4.5: Température de ramollissement Bille Anneau	46

Figure 4.6: stabilité au stockage	46
Figure 4.7 : Essai Marshall pour les enrobés.....	47
Figure 5.1 Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité des bitumes	50
Figure 5.2 Influence de la teneur en DP sur la pénétrabilité des bitumes.	50
Figure 5.3 Influence du temps de malaxage sur la TBA des bitumes	51
Figure 5.4 Influence de la teneur en DP sur la TBA des bitumes.	52
Tableau 5.3 : la susceptibilité thermique des bitumes modifiés	52
Figure 5.5 Les résultats de la susceptibilité thermique des bitumes.....	53
Figure 5.6 : Prélèvement d'éprouvettes pour l'essai de stabilité au stockage.....	54
Figure 6.1 : Courbe granulométrique du mélange et fuseau de référence LCPC BB 0/14.	58
Figure 6.2 : Matériels utilisés pour fabrication les éprouvettes.....	59
Figure 6.3 Stabilité Marshall.	60

Liste des tableaux :

Tableau 1.1 : Classification des bitumes purs	11
Tableau 1.2: Parmi les essais effectués sur le bitume	12
Tableau 4.1 : résume les résultats des différents essais effectué sur le bitume	42
Tableau 4.2 : Les résultats de l'analyse chimique des granulats.	43
Tableau 5.1 : Variation de la pénétrabilité à 25 °C pour les différents mélanges	49
Tableau 5.2 : Variation de TBA pour les différents mélanges	51
Tableau 5.4 : Les résultats de la stabilité au stockage des bitumes modifiant	55
Tableau 6.1 : Pourcentages pondéraux des différentes classes	57
Tableau 6.2: composition de la formule utilisé	59
Tableau 6.3 : Résultats de l'essai Marshall.....	60

Tables des matières

Remercîments.....	i
Dédicace	ii
Dédicace	iii
Resumé	iv
Liste des abréviations.....	v
Liste des figures.....	vi
Liste de tableau :.....	viii
Tables des matières	ix
Introduction	1
Partie 1 : Etude Bibliographie	
CHAPITRE 1 : Les bitumes	
1.1 Introduction :	5
1.2 Le bitume :.....	5
1.3 Fabrication du bitume :	6
1.4 Composition chimique et structure des bitumes :.....	7
1.4.1 Composition chimique :	7
1.4.2 Les asphaltènes :	8
1.4.3 Les maltènes :	8
1.5 Classification des bitumes routiers :	10
1.6 Essais sur les bitumes :	12
1.7 Etude du vieillissement de bitume :	12
1.7.1 Le vieillissement chimique :	12
1.7.2 Le vieillissement physique :	13
1.8 Conclusion.....	14
CHAPITRE 2 :Les enrobés bitumineux	
2.1 Introduction :	16
2.2 Différents types de chaussées :.....	16
2.3 Structure d'une chaussée :.....	17
2.4 Les dégradations de chaussées :	17
2.5 Composition de l'enrobé :	20
2.6 Formulation de l'enrobé :	20
2.7 Granulats :	21
2.8 Le rôle du granulat dans l'enrobé :	21
2.9 Caractéristiques et propriétés des granulats :	21

2.10 Influence des granulats sur l'enrobé :	22
2.11 Essais sur Granulats :	22
2.12 Influence de la formulation d'enrobés :	23
2.13 Qualités requises pour les enrobés bitumineux :	23
2.14 Les essais sur les enrobés bitumineux :	23
2.15 Conclusion.....	28

CHAPITRE 3: La modification des bitumes

3.1 Introduction :	30
3.2 Les objectifs de la modification :	30
3.3 Mécanisme de la modification :	31
3.4 Les polymères utilisés pour la modification des bitumes :	33
3.5 Procédés de modification :	36
3.5.1 Le procédé humide « Wet Process » :	36
3.5.2 Le procédé sec « Dry Process » :	36
3.6 Domaines d'application des bitumes modifiés :	36
3.7 Essais spécifiques aux liants modifiés :	36
3.8 Les plastiques :	37
3.9 Conclusion :	38

Etude Expérimentale

CHAPITRE 4: Les Matériaux D'étude

4.1 Introduction	41
4.2 Présentations des Matériaux	41
4.2.1. Le bitume.....	41
4.2.2 Les déchets plastiques	42
4.2.3 Les granulats.....	43
4.3 La modification.....	44
4.4 Programme expérimental	45
4.4.1 Pénétrabilité (NF EN 1426).....	45
4.4.2 Température de ramollissement Bille Anneau (NF EN 1427) :	45
4.4.3 Essai de stabilité au stockage	46
4.4.4 Essai Marshall pour les enrobés	46
4.5 Conclusion.....	47

CHAPITRE 5: Influence du déchets plastiques sur les bitumes

5.1 Introduction	49
5.2 Consistances des bitumes modifiés.....	49

5.2.1 Pénétrabilité à 25 °C	49
5.2.2. Température de ramollissement Bille Anneau	51
5.2.3 Susceptibilité thermique (IP).....	52
5.2.4. Stabilité au stockage	53
5.3. Conclusion.....	55
CHAPITRE 6: Etude expérimentale sur les enrobés bitumineux	
6.1 Introduction	57
6.2. Etude de Formulation de l'enrobé	57
6.2.1 Courbe granulométrique du mélange.....	57
6.2.2. Teneur en liant	58
6.2.3. Mode de fabrication des éprouvettes	59
6.3. Influence de l'ajout de déchets plastiques sur les caractéristiques Marshall	60
6.4. Conclusion.....	61
Conclusion.....	62
Références bibliographiques.....	Error! Bookmark not defined.

Introduction

Le bitume dans sa configuration traditionnelle n'assure plus un bon fonctionnement des chaussées. Aux basses températures, le bitume possède un comportement fragile (donc fissuration de la chaussée), tandis qu'à hautes températures, il possède un comportement visqueux (problèmes d'orniérage ou déformations permanentes de la chaussée). De plus, le bitume est un matériau sensible au vieillissement et ses propriétés se dégradent au cours de la durée de vie.

Il existe de nombreux additifs qui peuvent être utilisés pour améliorer les propriétés des bitumes, les polymères sont parmi les additifs les plus utilisés pour la modification des bitumes, parmi lesquels les élastomères et les plastomères, mais la plupart d'entre eux sont des polymères vierges. Les polymères vierges sont difficiles à trouver et peu économiques lorsqu'ils sont utilisés comme modificateurs. On cherche des additifs performants, faciles à incorporer dans des matrices bitumineuses et moins coûteux, par conséquent, l'incorporation de déchets de polymères dans les chaussées améliore non seulement les performances des chaussées et réduit la pollution de l'environnement, mais réduit également la nécessité d'utiliser des polymères vierges dans les chaussées, permettant ainsi de réaliser des économies de coûts à long terme.

Ces dernières années, la quantité de déchets est énorme, par exemple, 4 à 5 billions de sacs en plastique polyéthylène sont produits chaque année dans le monde. L'Algérie est le cinquième plus grand pays consommateur au monde, avec 6 milliards de sacs par an. L'utilisation de déchets de polymères non biodégradables dans la construction de routes peut effectivement contribuer à l'élaboration d'une stratégie durable. Cela nous permet non seulement de récupérer le matériau brut modificateur à faible coût, mais offre également une solution face à la menace écologique posée par l'utilisation accrue de déchets (non biodégradables).

L'objectif de cette étude est amélioré les caractéristiques des bitumes modifiés et des enrobés bitumineux modifiés par l'ajout de déchets plastiques.

Notre étude comporte deux parties qui comprennent chacune plusieurs chapitres

La première partie est consacrée à la recherche bibliographique où sont présentés des généralités sur les bitumes, les polymères, sont également introduits ainsi que les caractéristiques des bitumes modifiés, les propriétés des granulats et son rôle dans l'enrobé, en suite des généralités sur les enrobés bitumineux. Et enfin une synthèse de quelques travaux de recherche effectués sur la modification des bitumes et des enrobés bitumineux.

La deuxième partie concerne l'étude expérimentale :

- Le premier chapitre est consacré à la présentation de l'origine des matériaux utilisés dans ce travail (granulats, bitume, polymères), et les différentes caractéristiques physiques et mécaniques de ces matériaux.

- Deuxièmement, un chapitre est consacré à l'influence de la modification sur la consistance de bitume (pénétrabilité, température de ramollissement, ductilité).

- Troisièmement, un chapitre est consacré à la formulation de l'enrobé bitumineux et d'étudier l'influence des bitumes modifiés sur les caractéristiques de l'enrobés par l'application des essais mécaniques.

Elle se termine par une conclusion générale.

Partie 1 :
Etude bibliographie

CHAPITRE 01 : Les bitumes

1.1 Introduction :

Le bitume est un matériau naturel ou synthétique couramment utilisé dans de nombreuses applications, caractérisé par sa texture collante et sa susceptibilité à l'adhérence aux solides. Le bitume est utilisé dans la fabrication de routes et de surfaces à base d'asphalte, ainsi que dans ses utilisations dans l'isolation des surfaces et la fabrication d'adhésifs et de matériaux d'isolation. Les propriétés du bitume dépendent de son type et de sa composition, et leurs utilisations varient en conséquence.

L'industrie du bitume est un processus complexe qui implique plusieurs étapes, allant de l'extraction des matières premières utilisées dans sa fabrication à sa composition et à sa classification finale. Le bitume est extrait des minerais de pétrole. Il est généralement fabriqué par distillation lourde de pétrole ou par broyage d'huile. Après avoir obtenu les matières premières, le bitume est fabriqué en le raffinant et en le désinfectant pour obtenir un produit fini avec une certaine proportion des ingrédients requis. Le bitume est classé en fonction du degré de viscosité et de sa texture, généralement par un système de classification basé sur divers tests tels que le test de viscosité, le degré de fusion et la composition chimique. Les utilisations du bitume varient en fonction de sa composition et de sa classification, car il est utilisé dans la fabrication de routes et de surfaces asphaltées, ainsi que dans l'isolation, les adhésifs et de nombreuses autres applications dans différentes industries.

1.2 Le bitume :

Le bitume est un matériau dont la souplesse d'emploi et les propriétés d'adhérence, de plasticité, d'élasticité, d'insolubilité dans l'eau, de résistance à de nombreux agents chimiques, d'étanchéité et de durabilité, lui ont valu un développement important dans la construction routière. Utilisé en faible proportion comme liant dans l'élaboration des enrobés bitumineux, le bitume confère aux enrobés les propriétés mécaniques particulières et spécifiques qui expliquent leur succès dans le domaine routier.

Connu depuis la plus haute antiquité, le bitume est préparé par distillation sous vide de bruts sélectionnés, il désigne à l'origine un produit dérivé du pétrole, présent à l'état naturel sous forme suintante, qui s'est constitué naturellement après une lente dégradation du plancton (sédiments organiques et minéraux) accumulé et enfoui au fond des bassins sédimentaires sous forme de strates.

Selon la spécification européenne, le bitume est défini comme un matériau pratiquement non volatil, adhésif et hydrophobe, dérivé du pétrole brut ou présent dans l'asphalte naturel, qui

est entièrement soluble dans le toluène ou presque (99 % pour un bitume routier), et très visqueux à température ambiante.

Diverses natures de pétroles bruts existent mais ils ne sont pas tous nécessairement propres à produire du bitume, mais pour obtenir une quantité importante il faut choisir un pétrole suffisamment lourd, autrement dit, celui qui présente une quantité importante en produits lourds asphaltiques [01].

1.3 Fabrication du bitume :

Les bitumes utilisés de nos jours pour le revêtement des routes et certains usages industriels sont fabriqués en raffinerie à partir d'un brut réduit, qui est lui-même issu de la distillation des pétroles bruts [02].

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

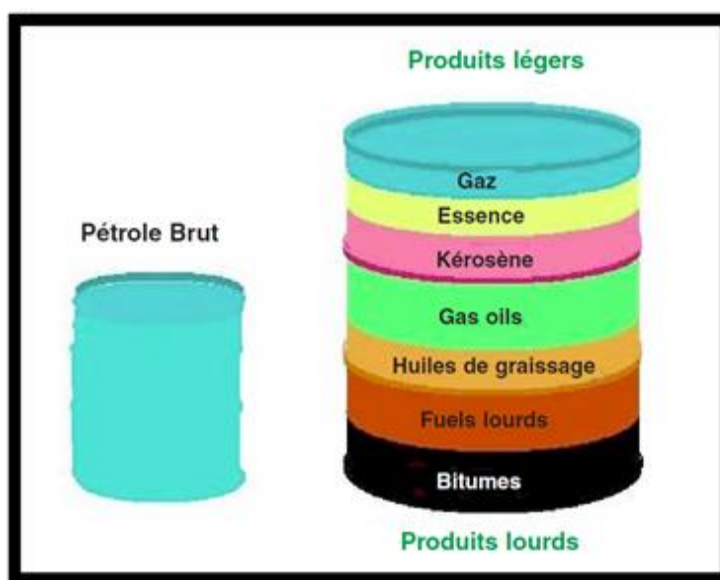


Figure 1.1. Schematisation de la composition d'un petrol brut.

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

Pour fabriquer des bitumes de spécifications données, la première condition consiste à choisir un pétrole brut suffisamment lourd, autrement dit, celui qui présente après distillation atmosphérique une quantité de résidu (brut réduit) la plus importante. Il est à signaler que sur

les 1300 pétroles bruts référencés dans le monde, 10% sont aptes à donner des bitumes respectant les spécifications d'usage [02].

Selon les diverses origines de ces pétroles, il a été adopté des méthodes particulières de fabrication pour obtenir des produits bitumineux de qualité [03]

Un schéma de principe de la fabrication des bitumes est présenté :

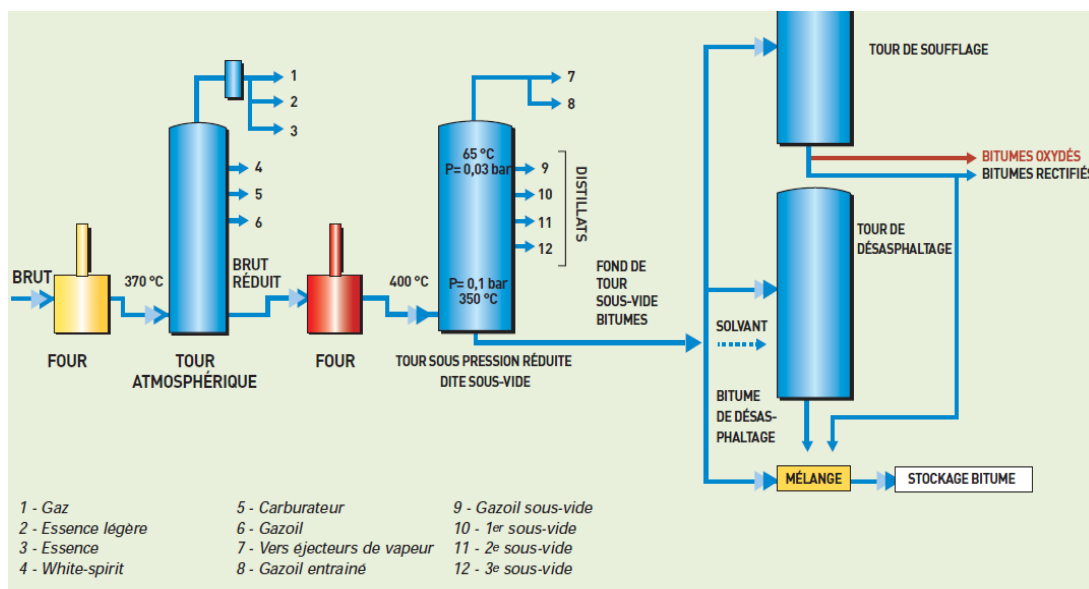


Figure 1.2 : Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole [04]

1.4 Composition chimique et structure des bitumes :

1.4.1 Composition chimique :

Le bitume est un produit complexe composé de différents hydrocarbures de poids moléculaire élevé appartenant dans leur grande majorité aux groupes aliphatiques et naphténiques. Ils sont à chaînes droites plus ou moins ramifiées ou cycliques et saturées.

Issus du raffinage des pétroles bruts, les bitumes sont des mélanges complexes de composés hydrocarbonés constitués de 80% à 85% de carbone (% massique), de 10% à 15% d'hydrogène, de 0% à 0,6% de soufre, de 2% à 3% d'oxygène et de 0 à 1% d'azote. Ils contiennent par ailleurs, divers éléments métalliques à l'état de traces, dont les principaux sont: fer, vanadium, nickel, aluminium et silic.

Ils ont des masses molaires et des structures chimiques variées. Les molécules de ces composés sont constituées de quatre principaux types d'hydrocarbures: paraffiniques, naphténiques, aromatiques et oléfiniques. Il faut également préciser que parmi les différentes molécules présentes dans les bitumes, rares sont celles constituées d'un seul des quatre types de

motifs cités. Compte tenu de cette diversité, il n'est pas réaliste de vouloir déterminer la composition exacte des bitumes, mais il y a eu des tentatives [03].

1.4.2 Les asphaltènes :

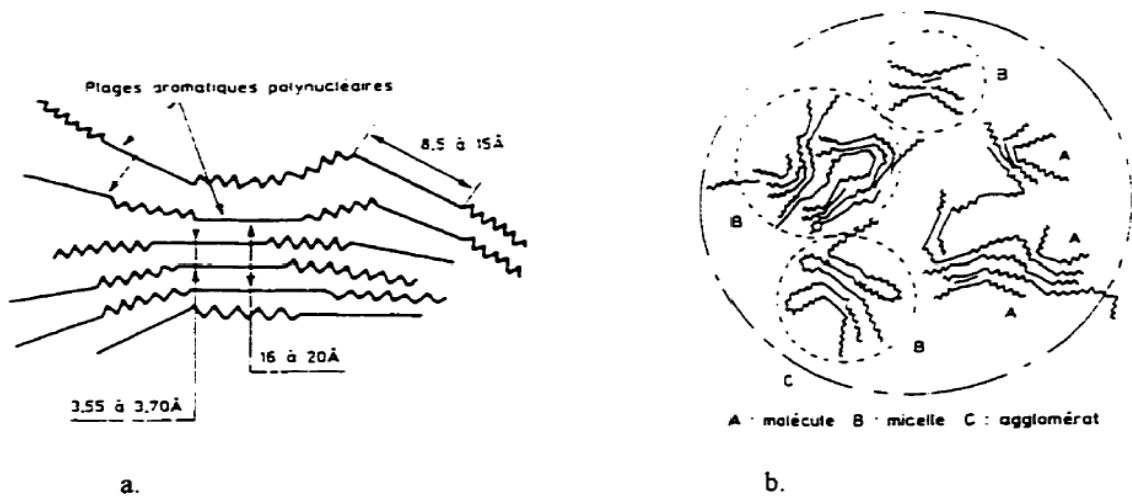
Ce sont des solides amorphes noirs ou bruns, que contiennent du Carbone, de l'hydrogène, de l'azote du soufre et de l'oxygène. Ce sont des matériaux aromatiques complexes très polaires (masse moléculaire entre 1000 et 100000 g/mole dans la majorité des cas). Leur taille varie de 5 à 30 nm. La teneur varie de 5 à 25 % du bitume total. Le rapport (hydrogène/carbone) H/C est de 1,1 [05].

1.4.3 Les maltènes :

Les molécules de maltènes peuvent être encore séparées par chromatographie en trois familles :

- a) **Les résines:** Solides ou semi solides bruns noirs, solides comme les asphaltènes. Ils sont composés de carbone, d'hydrogène, de faibles quantités d'oxygène, de soufre et d'azote, de nature très polaires (masse moléculaire entre 500 et 50000 g/mole). Le rapport H/C est de 1,3 à 1,4. Dans les bitumes routiers, la teneur habituelle des résines est de 13 à 25% [05].
- b) **Les aromatiques:** Ce sont des liquides visqueux bruns noirs. Ce sont des composés naphthéniques aromatiques de faible masse moléculaire (300 à 2000 g/mole) constitués de chaînes carbonées non polaires. Ils constituent 40 à 65 % du bitume total, le rapport C/H est de l'ordre de 0,7, la teneur en soufre peut atteindre 2 à 3 %.
- c) **Lessaturés:** Ils sont constitués d'hydrocarbures aliphatiques. Ce sont des huiles visqueuses non polaires de couleur blanche ou paille. La masse moléculaire est similaire aux aromatiques. Elle représente 5 à 20 % du bitume [06]. Le rapport atomique C/H est de 0,5 [05]. La proportion des différentes familles dépend de l'origine du brut, du mode de fabrication. D'une façon significative de la méthode de séparation, de grade et l'état de vieillissement du bitume.

Les figures 1.3, 1.4 et 1.5 représentent respectivement la structure des asphaltènes, la structure colloïdale du bitume routier et les différents composants du bitume.



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

(b). Microstructure
d'asphaltènes selon Yen

Figure 1.3. Structure des asphaltènes selon [07], [08].

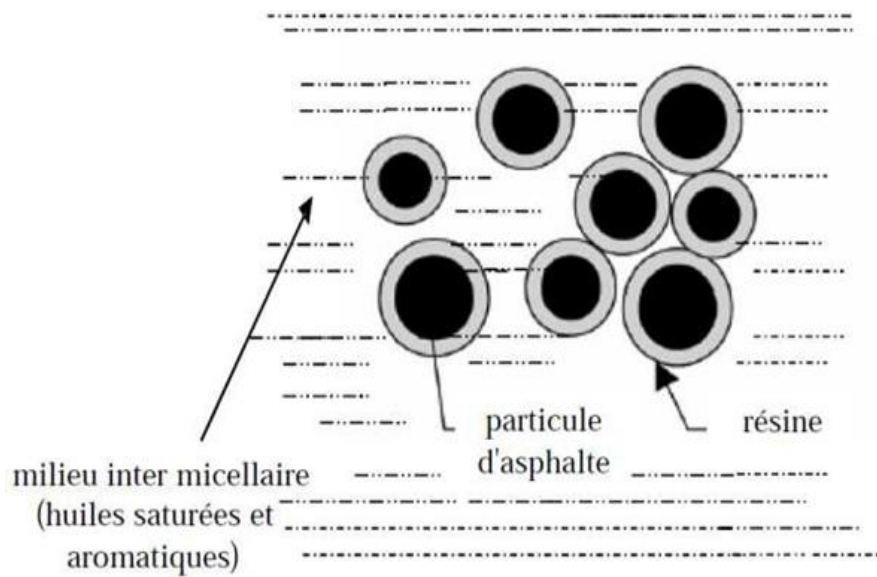


Figure 1.4 Schématisation de la structure colloïdale d'un bitume routier. [08].

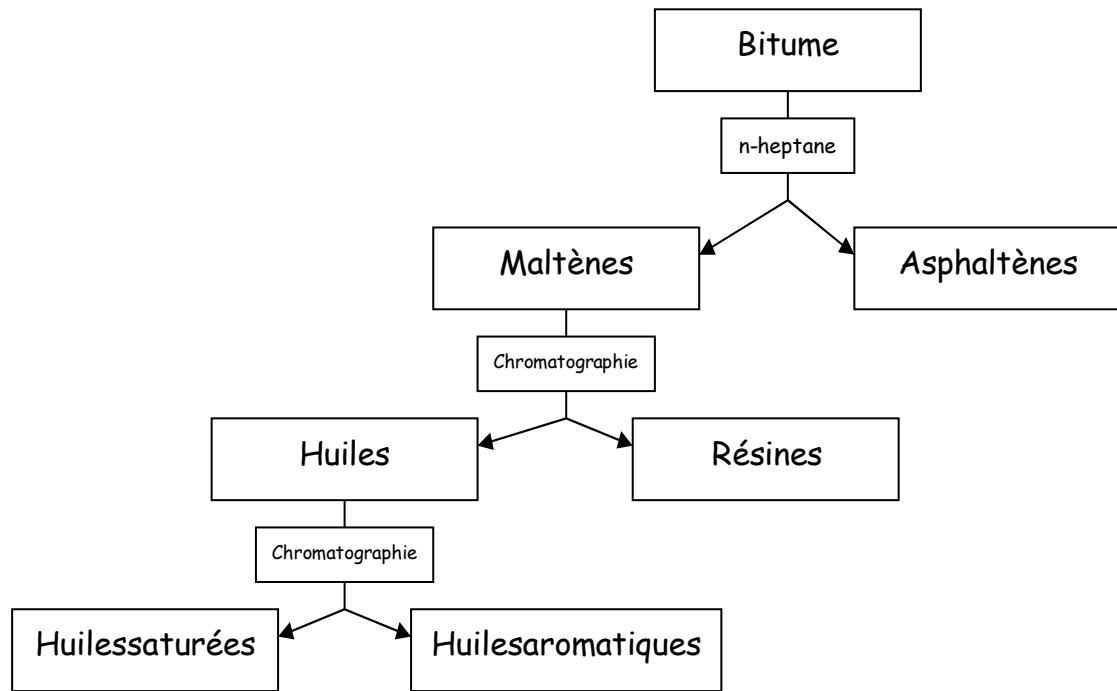


Figure1.5. Différents composants du bitume [08].

1.5 Classification des bitumes routiers :

Le tableau 1.1 donne la classification définie par les normes en vigueur

- Les bitumes 180-220 sont essentiellement utilisés pour la fabrication des émulsions et la réalisation d'enrobés fins mis en œuvre en couches minces.
- Les bitumes 70-100, 50-70 et 35-50, s'ils sont également utilisés pour la fabrication des émulsions, sont surtout destinés à la confection des enrobés denses, des bétons bitumineux et des graves-bitumes.
- Les bitumes 20-30 sont principalement utilisés pour la confection des couches d'assise en sable-bitume. Dans le cas de sables de concassage, on peut également employer le bitume 35-50

Tableau 1.1 : Classification des bitumes purs [09]

Qualité	180-220	70-100	50-70	35-50	20-30
Pénétrabilité (25°C, 100 g, 5 s). (1/10 mm)	70 à 100	180 à 220	50 à 70	35 à 50	20 à 3
Point de ramollissement bille et anneau. (°C)	42 à 48	34 à 43	46 à 51	50 à 56	52 à 68
Densité relative à 25 °C (méthode au pycnomètre)	1,00 à 1,10	1,00 à 1,07	/	1,00 à 1,07	1,00 à 1,10
Perte de masse au chauffage (163 °C, 5 h) (%)	< 1	< 2	/	< 2	< 1
Pourcentage de pénétrabilité restant après perte de masse au chauffage par rapport à la pénétrabilité initiale	> 70	> 70	> 70	> 70	> 70
Point d'éclair (appareil Cleveland) (°C)	> 230	> 230	> 230	> 250	> 250
Ductilité à 25 °C (cm)	> 100	> 100	> 80	> 60	> 25
Solubilité dans le tétrachloroéthylène (C ₂ Cl ₄) (%)	Solubilité dans le tétrachloroéthylène (C ₂ Cl ₄) (%)	> 99,5	> 99,5	Solubilité dans le tétrachloroéthylène (C ₂ Cl ₄) (%)	> 99,5
Teneur en paraffine (%)	Teneur en paraffine (%)	< 4,5	< 4,5	Teneur en paraffine (%)	< 4,5

1.6 Essais sur les bitumes :

Le tableau 1.2: Parmi les essais effectués sur le bitume

Essais	Norme
Pénétrabilité à l'aiguille	[NF T66-004]
Point de ramollissement	[NF T66-008]
Densité relative	[NF T66-007]
Perte de masse au chauffage	[NF T66-011]
Solubilité	[NF T66-012]
Ductilité	[NF T66-006]
Point de flamme et point de feu	[NF T66-118]
Viscosité cinématique	[EN 12595]
Teneur en paraffine	[NF T66-015]

1.7 Etude du vieillissement de bitume :

Le bitume est soumis à des changements notables dus aux conditions environnementales pendant leur différente phase d'utilisation. Il évolue dans le temps vers le durcissement ou le vieillissement, ces phénomènes de vieillissement entraînent des modifications de leurs paramètres mécaniques et rhéologiques qui sont fortement dépendants de leur structure chimique.

De ce fait, des travaux menés en permanence ont permis de mieux comprendre les interactions moléculaires que ce soit à l'échelle macroscopique ou microscopique impliquées au vieillissement. Deux types d'évolution sont à considérer ; vieillissement physique et vieillissement chimique :

1.7.1 Le vieillissement chimique :

Le vieillissement chimique est essentiellement dû à des phénomènes d'oxydation et de polymérisation. Il implique une évolution structurale et rhéologique des composants du bitume.

Lors du vieillissement, une partie des huiles aromatiques oxydées subit une polycondensation qui les convertit en résines et les résines se condensent en agrégats d'asphaltènes. Les ruptures des chaînes hydrocarbonées des huiles entraînent la formation d'alcanes et d'hétéro composés.

Les asphaltènes subissent, eux aussi, une oxydation par l'action de l'oxygène de l'air, lors des étapes de vieillissement.

Des carbènes peuvent également être engendrés. La viscosité du bitume augmente. La pénétration et la susceptibilité thermique du matériau diminuent. Cette dernière peut être attribuée à des changements de composition chimique. En effet, parmi les 4 familles composant le bitume, la fraction asphaltiques est la seule à augmenter, or c'est la fraction de plus basse susceptibilité thermique. De tendance « sol » à « sol-gel », le fluide acquiert une tendance « gel » [10].

1.7.2 Le vieillissement physique :

Le vieillissement physique se traduit par une augmentation de la viscosité sans modification chimique des constituants. Il touche essentiellement l'organisation colloïdale du matériau. La première cause est le chauffage lors de l'enrobage. L'augmentation de température permet une solubilisation, dans la matrice maléique, des résines adsorbées sur les micelles asphaltiques.

Les micelles et les agglomérats d'asphaltènes sont alors déstabilisés. Le réseau se désorganise et tend à se casser.

Cette thixotropie est plus ou moins intense selon la nature et la classe du bitume. La remise en structure, par diminution de température, est lente. Avec certains granulats dont le caractère absorbant par porosité est prononcé, les huiles légères peuvent migrer dans les pores des granulats, la composition globale du système est alors modifiée.

Si cette migration est faible et lente, elle n'est pourtant pas négligeable et entraîne un déséquilibre à l'origine de la formation d'agglomérats de taille importante. Cependant le durcissement physique contrairement au vieillissement chimique est un phénomène réversible, la vitesse de retour à l'état initial du système dépend de la viscosité du solvant c'est-à-dire des huiles saturées malténique [10].

Les essais les plus représentatifs pour la simulation du vieillissement du bitume en laboratoire sont l'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) et l'essai PAV (Pressure Aging Vessel). L'essai RTFOT est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes pendant la fabrication et la mise en place d'un enrobé. Et le PAV pour caractériser le vieillissement des bitumes in-situ (après 7 à 8 années de service).

La vitesse d'évolution du bitume dépend de différents paramètres : la température, la lumière (ultraviolets), l'épaisseur du film de bitume, l'humidité des granulats. Ce phénomène peut également être influencé par la nature des granulats, certains types de granulat absorbant les fractions huileuses du bitume, ce qui provoque son évolution.

1.8 Conclusion

En bref, la fabrication, la synthèse et la classification du bitume sont un processus complexe et important dans plusieurs industries. Ce travail nécessite des efforts et de l'expérience pour garantir un produit final qui répond aux spécifications requises pour chaque application. L'utilisation du bitume dépend de sa composition et de ses propriétés, ce qui en fait l'un des éléments essentiels de l'infrastructure routière et de nombreuses applications industrielles.

CHAPITRE 2 :Les enrobés bitumineux

2.1 Introduction :

Les routes sont une boppe de l'infrastructure de n'importe quel pays et se présentent dans une variété d'espèces en fonction de l'utilisation prévue et des conditions de l'environnement environnant. L'asphalte bitumineux est utilisé comme matériau majeur dans la construction de routes, consistant en une combinaison d'asphalte et d'agrégat. La composition de l'asphalte bitumineux implique une phase de mélange d'asphalte, obtenue à partir de la distillation d'huile, avec des agrégats, qui est sélectionnée et classée en fonction de ses propriétés physiques. Cette combinaison varie en fonction du type d'itinéraire à construire, des conditions climatiques et du trafic attendu. L'asphalte et les matériaux agrégés sont soumis à des tests rigoureux pour garantir la qualité et la durabilité de la route. Ces essais comprennent la densité, la flexibilité, la résistance à la corrosion et à la réfraction, et d'autres, qui aident à évaluer les performances de l'asphalte dans diverses conditions telles que la chaleur, la pression et l'humidité.

2.2 Différents types de chaussées :

Les structures de chaussées sont réparties en deux grandes classes (les chaussées bitumineuses)et les) chaussées en béton de ciment). La figure 2.1 donne un aperçu des structures de chaussée les plus fréquemment rencontrées [11]

Structure d'une chaussée

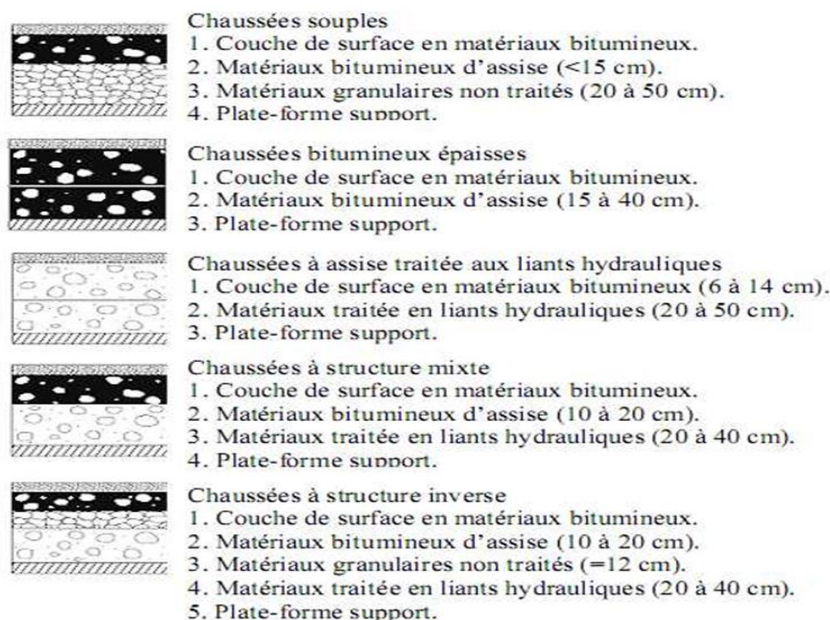


Figure. 2.1 : Schéma des différents types de structures de chaussée [11]

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

2.3 Structure d'une chaussée :

Les chaussées se présentent comme une structure multicouche (figure 2.2), qui sont conçues pour reprendre les charges induites par le trafic que le sol support seul ne pourrait pas soutenir. Au sein de cette structure multicouche, chaque couche remplit une ou plusieurs fonctions particulières et contribue à la résistance et la performance de la chaussée.

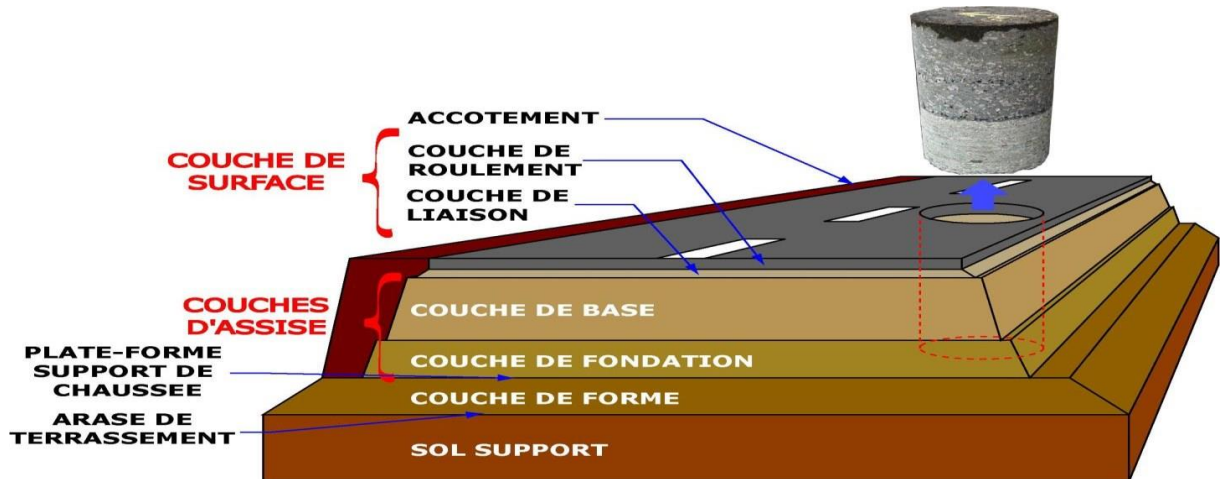


Figure 2.2 Constitution d'une structure de chaussée souple [12].

2.4 Les dégradations de chaussées :

2.4.1 Les fissures :

La fissure est une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée. Différents types de fissures

a) Les fissures transversales :

Ces fissures sont sensiblement perpendiculaires à la chaussée. Elles peuvent être isolées ou périodiques d'espacement variable, elles peuvent aussi toucher toute la largeur de la chaussée ou une partie.



Figure 2.3. Fissures transversales

b) Fissures longitudinales :

Rupture du revêtement relativement parallèle à la direction de la route.



Figure 2.4 : Fissures longitudinales

c) Fissures de rives :

Ce sont des fissures qui apparaissent le long de l'accotement ou de la bordure du revêtement sous forme de lignes droites ou en arc de cercle.



Figure 2.5 : Fissures de rives

d) Fissures de gel :

Fissures actives sous l'effet du gel, elles peuvent être :

- Rectiligne et localisée au centre de la chaussée,
- D'apparence lézardée sans localisation précise sur la chaussée. [13]



Figure 2.6: Fissures de gel

2.4.2 Le faïençage :

Ensemble de fissures formant un maillage à petites mailles polygonales dont la dimension moyenne est de l'ordre de 30 cm ou moins.



Figure 2.7: Faïençage

2.4.3 Dégradation par orniérage :

La croissance du trafic lourd accélère l'apparition de la dégradation prématurée notamment l'orniérage que c'est une dépression longitudinale dans les traces du pneu, elle s'intensifie à température élevée.

L'orniérage constitue la cause principale de dégradation des chaussées souples. La sensibilité des chaussées souples à l'orniérage dépend des caractéristiques des chaussées, de la teneur en liant, du type et de la granulométrie, la figure 3.9 illustre un exemple d'une chaussée atteinte d'orniérage. [13]



Figure 2.8: Phénomène d’orniérage

En autre terme, l’orniérage est le premier mode de déformation des chaussées souples, du fait le recours aux techniques de modification de consistance de couche de roulement est d’une issue déterminante. Pour cela, on essaye d’étudier en détail ce type de déformation afin d’adopter un tel remède approprié [13].

2.5 Composition de l’enrobé :

Les enrobés bitumineux sont fabriqués par mélange de gravillons, de sable avec ou sans fines, de filler, de liant bitumineux et d’éventuels dopes et/ou d’additifs, dans une proportion choisie. Dans ce mélange, le liant hydrocarboné (le bitume) est principalement responsable de la cohésion tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l’ensemble [14]

2.6 Formulation de l’enrobé :

Le critère de maniabilité permet d’exercer une discrimination entre des mélanges trop maniés, qui auront tendance à présenter des ornières, et des mélanges peu maniés, qui seront perméables et peu durables.

Afin de formuler un enrobé bitumineux performant, des critères sont à prendre en compte:

S’assurer que le mélange est suffisamment imperméable pour être durable, sans toutefois être trop maniable et être ainsi sujet à l’orniérage. Ce critère correspond à l’état du revêtement après le compactage effectué à l’étape de la construction. C’est dans cet état que les propriétés

du mélange sont évaluées (densité brute, densité maximale, pourcentage de vides entre les granulats)

2.7 Granulats :

Les composants minéraux constituent environ 95% de la masse d'un enrobé bitumineux (80-85% du volume). Cette prépondérance des matériaux granulaires dans le mélange va fortement influencer les propriétés mécaniques [15].

Les granulats sont l'ensemble des sables, gravillons ou pierres concassées, qui proviennent du creusement d'un gisement ou d'une extraction à partir d'une roche mère compacte. Le granulat est utilisé soit comme matériau en vrac, soit après transformation (criblage concassage, tamisage dé poussiéragelavage.).

2.8 Le rôle du granulat dans l'enrobé :

Le squelette minéral, constitué par l'ensemble des grains en contact, doit assurer la distribution des contraintes dans le mélange et la transmission des charges aux couches inférieures de la chaussée. Par ailleurs, les grains minéraux doivent avoir une bonne résistance aux efforts statiques et dynamiques pour ne pas s'endommager sous les chargements.

Le filler absorbe une part importante du liant avec lequel il constitue le mastic. Le pouvoir rigidifiant du filler associé au liant apporte sa stabilité au mélange et participe à sa résistance.

2.9 Caractéristiques et propriétés des granulats :

Les caractéristiques des granulats, telles que la forme, l'angularité et l'état de surface, qui influencent directement la résistance des contacts aux déplacements et aux rotations relatifs des grains. Les principales Caractéristiques des granulats utilisés dans les assises de chaussée sont les suivants [16] :

a) Granularité :

Elle caractérise la répartition du granulat en tranches dimensionnelles. Les gravillons sont définis par leur plus petite et leur plus grande dimension. On parle d'un d/D , avec une tolérance sur d et D de 15 % si $D > 1,58 d$, et de 20 % si $D \leq 1,58 d$.

Les graves et les sables sont des matériaux à granularité continue $0/D$, D étant supérieur à 6,3mm pour les graves.

b) Propreté :

L'absence d'éléments fins hydrophiles ou non (indésirables) issus du concassage de la roche ou des argiles rendent l'adhérence entre le liant et le granulat difficile.

c) Angularité :

Elle joue un rôle important pour les gravillons de la couche de roulement, en améliorant l'adhérence, et pour ceux des assises de chaussée, dont elle améliore la stabilité.

Pour un granulat de roche massive, elle est égale à 100 %.

Pour un granulat d'origine alluvionnaire, elle est définie par deux données:

- l'indice de concassage IC, proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulat élaboré;
- le rapport de concassage RC, rapport entre d du matériau soumis au concassage et D du granulat obtenu.

d) Forme :

Elle joue un rôle important à la fois pour les granulats de la couche de roulement, des gravillons plats ayant tendance à se coucher au moment du compactage, et pour les matériaux d'Assise, des granulats plats ou allongés réduisant la compacité et la stabilité.

Elle est définie par le pourcentage d'éléments tels que $G/E > 1,58$.

Elle est mesurée par un double tamisage sur des tamis à mailles carrées qui trient suivant la grosseur (G), et sur des cribles à barres parallèles qui trient suivant l'épaisseur (E)

2.10 Influence des granulats sur l'enrobé :

La procédure de formulation consiste plutôt à modifier la granulométrie ou les sources de granulats afin de satisfaire aux critères de vides. En formulation, le pourcentage de bitume ne peut varier que de 0,1 % par rapport à la teneur en bitume visée, selon la méthode LCP

[17]

Pour chaque type d'enrobé, le volume de bitume effectif est déterminé en pourcentage du volume totaux de l'enrober moins le volume des vides interstitiels.

2.11 Essais sur Granulats :

Les principaux essais qui sont effectués sur les granulats sont:



Essai d'analyse granulométrique (NF P 18-586).



Résistance aux chocs (Los Angeles NF P18-573)

- ✚ Résistance à l'attrition et à l'usure (NF P18-572)
- ✚ Résistance au polissage : NF P18-575
- ✚ Résistance au gel.
- ✚ Essai de propriété superficielle (Ps) (NF P 18-591)
- ✚ L'essai de l'écoulement du sable

2.12 Influence de la formulation d'enrobés :

De nombreux chercheurs se sont intéressés à la possibilité de supposer la valeur de ce module à partir de la composition de l'enrobé bitumineux, mais la majorité d'entre eux tiennent compte uniquement de la norme du module complexe, l'angle de phase étant rarement étudié.

Parmi les auteurs qui ont établi des relations entre le module complexe du liant et celui de l'enrobé, valables à la fois pour la norme et pour l'angle de phase du module complexe, on peut citer Franken, Zeng, Wick, Urge, [19] Des relations empiriques entre le module des enrobés et les propriétés de leur liant, en y introduisant la distribution volumique des différents constituants du mélange, ont été établies après plusieurs formules prévisionnelles par Heukelom et Klomp [20], Ugé et al.

2.13 Qualités requises pour les enrobés bitumineux :

Les enrobés réalisés à chaud ou à froid doivent avoir un certain nombre de qualités à savoir:

- ✓ La stabilité.
- ✓ La flexibilité.
- ✓ Intensité à l'eau.
- ✓ La durabilité.
- ✓ La durée de vie de l'enrobe.

2.14 Les essais sur les enrobés bitumineux : [21.22.23]

A. Essai Marshall :

Cet essai consiste à déterminer les caractéristiques mécaniques (stabilité, fluage et leur quotient), ainsi que le pourcentage de vides, le pourcentage de vides du granulat et le taux de remplissage en liant, de mélanges bitumineux denses enrobés et compactés à chaud dans des conditions normalisées. Ils sont compactés dans des moules cylindriques à l'aide d'une dame en vue de réaliser des éprouvettes cylindriques. Ces éprouvettes conservées à une température de 60°C sont placées entre les deux mâchoires semi cylindriques d'une presse qui se

rapprochent l'une de l'autre à une vitesse de déformation constante. $0,85 \pm 0,02$ mm / s Au cours de l'essai, la charge et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture.



Figure 2.9: Essai Marshall

B. Essai Duriez :

Consiste à déterminer à 18 °C la résistance à la compression simple et évaluer la réduction de résistance à la compression d'éprouvette avec ou sans immersion dans l'eau (NFP98-251-1)



Figure 2.10: Essai Duriez

C. Essai de fluage :

L'essai de fluage statique consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une charge un axiale en compression à une température fixée tandis que l'on mesure la déformation longitudinale de l'éprouvette en fonction du temps.



Figure 2.11 : Essai de fluage

D. Essai d'orniérage (NF P 98-253- 1) :

Il consiste à évaluer la résistance à l'orniérage d'un mélange hydrocarboné préparé et compacté en laboratoire.

Une éprouvette de mélange hydrocarboné, de forme parallélépipédique est soumise en surface à l'action d'une charge de roue décrivant un mouvement aller-retour rectiligne à une fréquence donnée et à une température constante. On considère comme profondeur d'ornière en un point de la surface de l'éprouvette, la dénivellation verticale permanente par rapport aux lèvres de l'ornière.

E. Essai CANTABRO :

Cet essai permet d'évaluer la perte de matériaux d'un enrobé drainant ou à texture ouverte sous l'influence du trafic (déchaussement, usure, abrasion, ...).

Il détermine aussi la perte de masse d'éprouvettes Marshall d'enrobés après rotations dans le tambour de la machine Los Angeles sans boulets.



Figure 2.12: CANTABRO

F. Essai de traction directe :

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



Figure 2.13: traction directe

G. Essai de retrait thermique empêché (AASHTO, TP10-93) :

Lorsqu'un matériau est soumis à une variation de température, il subit des déformations. Si celles-ci sont empêchées, les variations de température créent des contraintes appelées contraintes thermiques. Ce type de couplage thermomécanique est à l'origine des problèmes de fissuration observés à basse température sur les chaussées.



Figure 2.14: retrait thermique empêché (AASHTO, TP10-93)

H. Essai de Rupture par Compression Diamétrale :

Appelé essai de traction indirecte ou brésilien : Il s'agit d'un essai de contrôle rapide de la qualité d'éprouvettes d'enrobés hydrocarbonés. On mesure la résistance à la rupture par compression diamétrale.



Figure 2.15 : Rupture par Compression Diamétrale.

I. Essai de détermination d'aliénabilité :

Cet essai permet de déterminer sur chantier la d'aliénabilité des enrobés drainants. Il consiste à mesurer la durée d'écoulement d'une quantité d'eau donnée dans un revêtement enrobés drainant.



Figure 2.16 : détermination d'aliénabilité

J. Essai de résistance au désenrobage :

Il permet de contrôler l'influence de l'eau ou d'une solution d'eau salée sur un échantillon d'enrobé à froid. Déterminer visuellement si un échantillon d'enrobé à froid est sensible au

Désenrobage sous l'action de l'eau bouillante d'une part et d'une solution d'eau salée d'autre part.

K. Essai de stabilité :

Il s'agit de contrôler si un enrobé à froid, après compactage et durcissement, est encore sensible aux déformations. Déterminer le changement de forme d'un échantillon d'enrobé à froid compacté et durci, après un séjour au repos et après flexion sous son propre poids



Figure 2.17: Essai de stabilité

L. Essai de compression simple ou répété :

Il consiste à appliquer une compression simple cyclique à une éprouvette de forme cylindrique ou prismatique, avec ou sans confinement, où la sollicitation en contrainte est en générale de forme sinusoïdale non centrée.



Figure 2.18: compression simple ou répété

2.15 Conclusion

En bref, la compréhension des types de méthodes et le processus et l'essai de la formation d'asphalte bitumineux est vitale pour assurer la construction et l'entretien de routes robustes et de haute qualité. Grâce à l'utilisation de technologies appropriées et de tests rigoureux, d'excellentes performances routières à long terme peuvent être atteintes, contribuant à la fourniture d'une infrastructure durable et sûre pour la communauté.

CHAPITRE 3: La modification des bitumes

3.1 Introduction :

Les techniques de modification dans le domaine du bitume polymère et de la récupération des déchets sont essentielles à la réalisation de plusieurs objectifs, y compris l'amélioration de la qualité des routes et la contribution à la préservation de l'environnement et à une économie durable. La modification vise à améliorer les propriétés du bitume et à l'utiliser de manière plus efficace et durable, en ajoutant certains matériaux qui améliorent les performances, réduisent les coûts ou améliorent la durabilité environnementale. Le mécanisme de modification comprend l'utilisation de polymères, qui modifient et améliorent les propriétés du bitume telles que son élasticité et sa résistance à la corrosion et à la fissuration. En outre, le bitume polymère est utilisé dans la récupération des déchets bitumineux, où le bitume utilisé est recyclé à partir de méthodes de remplacement, ce qui réduit les coûts, réduit les déchets et conserve les ressources naturelles. Les domaines d'application du bitume polymère et de la récupération des déchets comprennent la construction de nouvelles routes et l'entretien des routes existantes, le développement de matériaux de construction durables et respectueux de l'environnement et l'amélioration globale de la performance de l'infrastructure. La réalisation de ces objectifs contribue à améliorer la qualité de vie et à préserver les ressources naturelles pour les générations actuelles et futures.

3.2 Les objectifs de la modification :

Les objectifs recherchés par la modification des bitumes par des polymères sont multiples. Ils'agit avant tout de modifier le comportement aux températures extrêmes atteintes par l' chaussée: conserver une consistance suffisamment élevée aux hautes températures pour éviter le ruisselement et déformations permanentes, diminuer la fragilité à basse température pour éviter les fissures et arrachements de gravillons.

Ces objectifs dépendent aussi des domaines d'application et des techniques projetées: enduits superficiels, tapis minces, enrobés drainants, couches de roulement pour routes à trafic intense, couche d'assise pour routes à trafic intense, membranes anti-fissures, chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art [24]

- **Enduits superficiels ; enrobés ultra-minces (1-2 cm), très minces (2-3 cm)**

Amélioration de la résistance sous les sollicitations de traction et de cisaillement;

Assurer la durabilité;

Eviter le ruisselement;

Améliorer l'adhésivité/tenue à l'eau.

- **Enrobés ouverts**

Améliorer les propriétés anti-dérapantes;

Augmenter la viscosité aux températures d'application.

- **Enrobés épais (> 5cm), enrobés minces (3 à 4cm)**

Assurer la résistance à l'orniérage;

Améliorer le comportement à basse température;

Améliorer le comportement à la fatigue.

- **Couche d'assise de chaussée**

Augmenter la résistance à la fatigue sous les chargements répétés du trafic;

Apport d'une certaine flexibilité.

- **Renforcement des chaussées**

Minimiser l'épaisseur du rechargement.

- **Membranes anti-fissures, imperméable**

Augmenter la capacité d'allongement.

3.3 Mécanisme de la modification :

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

La température de mélange est généralement comprise entre 150°C et 200°C ou plus. La durée de mélange varie de quelques minutes à quelques heures. La durée optimale de mélange est atteinte quand les propriétés désirées du bitume-polymère, telles que le point de ramollissement, la pénétration et la viscosité deviennent constantes. Les BmPne sont pas produits dans les raffineries à l'aide de moyens spéciaux, mais par des compagnies spécialisées dans la construction des routes.

Dans ce cas des mélanges physique du bitume avec les polymères, la modification du bitume s'opère par mise en contact du bitume et du polymère à une température supérieure à la température de fusion du polymère avec un malaxage approprié pour provoquer un mélange intime des différentes phases. Pour comprendre les interactions entre le bitume et les polymères, il faut considérer :

La nature du bitume,

Le caractère hétérophasique de ces polymères.

Les bitumes sont des mélanges complexes d'hydrocarbures possédant des compositions chimiques et des poids moléculaires variés. La structure des bitumes communément admise est celle d'une suspension colloïdale où la phase dispersée, les asphaltènes, est recouverte d'une couche de résines polaires formant des "micelles" immergées dans une phase continue Martinique. Cette dernière est elle-même constituée d'un mélange d'hydrocarbures aromatiques et saturés.

Les mélanges de bitume et d'élastomères du type styrène-butadiène-styrène (SBS) ou de plastomères de type éthyle-vinyle-acétate (EVA) sont à l'échelle de la microstructure, des systèmes à deux phases qui sont composées (Figure 3.1), [25] :

D'une phase riche en polymère qui contient le polymère et une partie des malmenés du bitume absorbée par le polymère;

D'une phase riche en asphaltènes contenant tous les constituants du bitume qui n'ont pas été absorbés par le polymère, en particulier les asphaltènes.

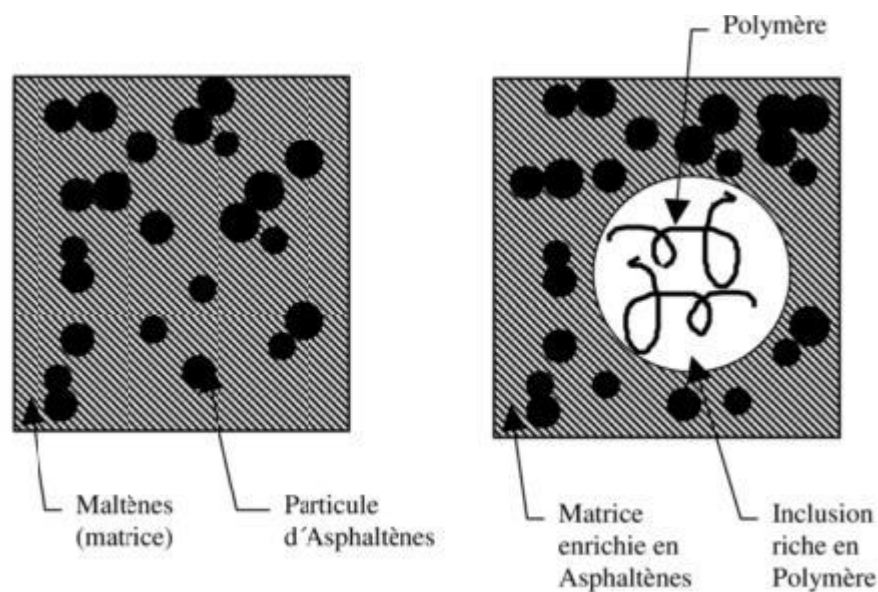


Figure 3.1. Effet de la modification polymère sur la structure colloïdale du bitume: bitume original (gauche) et BmP correspondant avec augmentation de la teneur en asphaltènes de la matrice (droit), [25].

Dans le cas où la phase dispersée de la Figure 3.1 devient la phase continue peut-être traitée de manière similaire, même si de tels BmP ne sont obtenus qu'avec des teneurs en polymères généralement supérieures à 7 % massique, ce qui rend leur coût prohibitif vis-à-

vis d'une application routière classique, mais permet d'obtenir d'excellents produits d'étanchéité.

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

La modification des propriétés des bitumes par addition de polymère est souvent expliquée par le gonflement du polymère par les huiles du bitume. En conséquence du gonflement du polymère, la quantité de phase dispersée est de l'ordre de 4 à 10 fois supérieure à celle de polymère introduit. Aussi, le polymère mobilise une quantité importante d'aromatiques, provoquant la concentration des asphaltènes en phase continue.

3.4 Les polymères utilisés pour la modification des bitumes :

Les polymères constituent la famille d'agents modifiants chimiques la plus utilisée pour la modification des bitumes. Ils se présentent sous la forme de macromolécules caractérisées par la répétition, un très grand nombre de fois, du même groupe d'atomes, motif constitutif formé d'un ou de plusieurs monomères.

Pour qu'un polymère soit efficace, il faut qu'il soit compatible avec la matrice bitumineuse.

Le Polymère doit améliorer la résistance du bitume à des températures élevées sans pour autant le rendre trop visqueux à la température de malaxage ou bien trop rigide à des températures basses. Si ce bitume est appelé à être utilisé dans le pavage des routes, il doit être capable de se malaxer dans des équipements conventionnels. Dans tous les cas, le bitume doit être disponible, moins coûteux et stable pendant le stockage et l'application. Les problèmes majeurs que posent les bitumes modifiés avec des polymères résident dans la mauvaise solubilité de certains polymères dans la matrice bitumineuse qui peut conduire à la séparation de phases.

Le choix de polymères pour modifier les bitumes est restreint à quelques familles chimiques, essentiellement les élastomères et les plastomères:

- Les plastomères qui se distinguent, aux températures d'usage, par des comportements différents du point de vue, en particulier, de leur rigidité, de leur déformabilité et de leur résilience.

- Pour les élastomères, la déformation élastique s'accompagne d'une déformation permanente qui peut être relativement importante. Il convient toutefois de noter qu'entre ces deux situations on observe une gamme de matériaux dont le

caractère élastomère ou plastique est gradué suivant la proportion des phases souple et rigide présentes dans la matrice du polymère.

➤ 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.

A. Les élastomères :

La modification des bitumes par des élastomères conduit à des liants appelés bitumes élastomères. Généralement, le bitume élastomère est obtenu par simple mélange physique [26], mais il peut être également réticulé. Tant pour les mélanges physiques que pour les réticulés, différents types d'homopolymères ou de copolymères peuvent être employés. Les plus courants dans le domaine routier appartiennent aux familles des copolymères styrène-butadiène.

Ce sont des composés naturels ou synthétiques présentant l'élasticité du caoutchouc à la température ambiante. Ils résistent bien à l'influence des produits tels que les huiles, les essences et sont insensibles à l'eau. Ils résistent également bien à l'oxygène et au rayonnement solaire; donc au vieillissement naturel.

Les plus courants dans le domaine routier appartiennent aux familles des copolymères styrène-butadiène. Il s'agit:

- Des copolymères Styrène-isoprène-styrène (SIS)
- Des copolymères Styrène-Butadiène (SB)
- Des copolymères Styrène-Ethylène-Butadiène-Styrène (SEBS)
- Des copolymères Styrène-Butadiène-Styrène (SBS)

Les polymères SBS sont les plus utilisés comme agent modifiant dans les bitumes. Au fur et à mesure que la température s'élève, les SBS se comportent comme des corps plastiques. Lors du refroidissement, le comportement est à nouveau élastique; le phénomène est donc parfaitement réversible. Ils ont l'avantage de se comporter comme des thermoplastiques aux températures de mise en œuvre et comme un caoutchouc vulcanisé. Toutefois leur inconvénient réside sur leur coût onéreux.

Dans le cas des copolymères triblocs styrène-(éthylène-Co-butylène)-styrène (SEBS), qui sont obtenus par simple hydrogénation de SBS, ils offrent au bitume modifié des performances similaires à celles de SBS. De plus, les SBS, comme tous les caoutchoucs insaturés, est sujette au vieillissement, ce qui limite la possibilité de recycler la chaussée en fin de vie. Cependant, la saturation de la double liaison rends le SEBS plus rigide que le SBS. En conséquence, il s'est avéré que le bitume modifié par le SEBS donne de meilleurs

résultats dans l'amélioration de la résistance à l'orniérage que le SBS, mais moins efficace dans l'amélioration des propriétés de fatigue à des températures intermédiaires [27].

Becker et al. ont constaté que les BmP à base de SEBS préparés par l'utilisation d'un bitume de faible grade sont plus stables que ceux correspondants au bitume préparé avec le SBS. Lorsqu'il est utilisé dans la modification du bitume, le SEBS est beaucoup plus résistant à la dégradation thermique par rapport au SBS [28]

B. Les plastomères :

Les polymères plastomères s'associent avec le bitume à la température ambiante en augmentant sa viscosité. Cependant, ils ne confèrent pas, d'une manière significative, une déformation élastique au bitume par contre ils peuvent se séparer pendant le chauffage.

Plus, le polymère est finement dispersé en gardant sa structure spéciale, plus le mélange est stable. Les plastomères sont caractérisés par le ramollissement durant le chauffage et par le durcissement durant le refroidissement.

Dans le domaine routier on rencontre essentiellement des copolymères d'éthylène:

- ❖ EVA (copolymères d'éthylène et d'acétate de vinyle),
- ❖ EMA (copolymères d'éthylène et d'acrylate de méthyle)
- ❖ EBA (copolymères d'éthylène et d'acrylate de butyle).

Les copolymères d'éthylène sont souvent qualifiés de "semi-cristallins". En effet les séquences polyéthylène sont susceptibles de Co-cristalliser pour former des domaines qui constitueront en quelque sorte des "nœuds" de réticulation conduisant à une vulcanisation physique du matériau. La cristallinité est directement liée à la teneur en éthylène.

Les copolymères d'EVA sont largement utilisés dans ce domaine. Ce sont des matériaux thermoplastiques avec une structure statistique dont les propriétés sont contrôlées par le poids moléculaire d'EVA et la teneur en vinyle acétate dans le copolymère [29]. Les groupements de vinyle acétate rompent l'arrangement des paquets serrés des segments de polyéthylène pour former des régions non-cristallines et amorphes. Les résultats obtenus par Bonnot et Pérez [30] montrent que l'addition d'EVA améliore la résistance à la déformation du bitume et augmente sa cohésion. Le bitume devient plus flexible à froid et moins fluide à chaud [31].

3.5 Procédés de modification :

La modification des enrobés bitumineux peut s'opérer de deux manières: à sec ou par voie humide.

3.5.1 Le procédé humide « Wet Process » :

La modification du bitume par des polymères est l'incorporation de polymères dans le bitume par mélange mécanique ou réaction chimique afin de modifier la structure chimique et les propriétés physiques et mécaniques.

Différentes procédures ont été développées pour produire les bitumes - polymères. La méthode la plus couramment utilisée dans un laboratoire ou une usine est basée sur les principes suivants:

La modification du bitume par des polymères du bitume est l'incorporation de polymères dans le bitume par mélange mécanique ou réaction chimique. La température de mélange est généralement comprise entre 150°C et 200°C. [32]

3.5.2 Le procédé sec « Dry Process » :

Dans ce procédé par voie sèche, lors de la fabrication du revêtement bitumineux à chaud, le polymère (l'additif) est ajouté directement dans le malaxeur de la centrale d'enrobage, avec les bitumes, les granulats, les sables, filler, etc.)

3.6 Domaines d'application des bitumes modifiés :

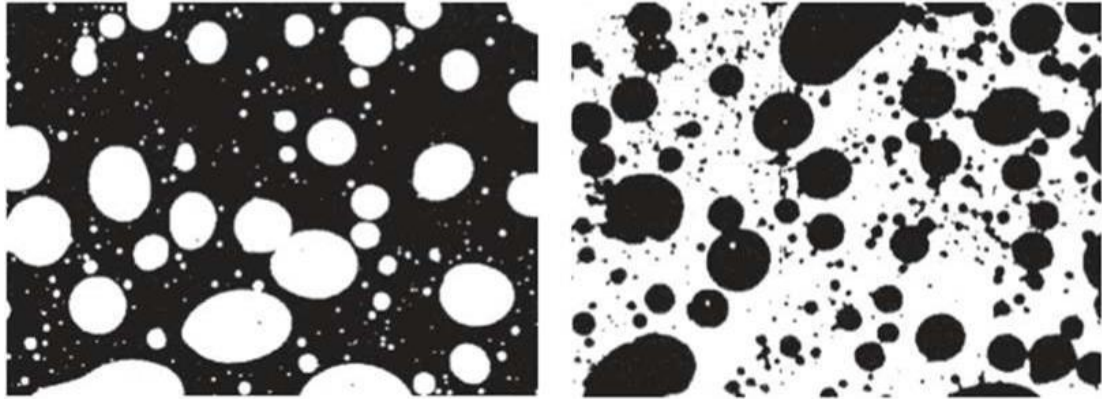
Les bitumes modifiés ont été développés pour les domaines d'utilisation suivants:

- ✓ Couches de surface en faible épaisseur (Enduit superficiel, Enrobé mince BBM 3 à 4cm, BBTM 2 à 3cm et BBUM 1 à 2cm...);
- ✓ Enrobés drainants ;
- ✓ Couches de roulement pour routes à trafic intense ;
- ✓ Couche d'assise pour routes à trafic intense ;
- ✓ Membranes anti-fissures et des chapes d'étanchéité ;
- ✓ Chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art.

3.7 Essais spécifiques aux liants modifiés :

- Observation microscopique :

C'est la technique la plus utilisée pour apprécier l'état de dispersion des phases bitume et polymères. Elle est basée sur le principe que les polymères, gonflés par certains composants du bitume auquel ils sont ajoutés, sont fluorescents lorsqu'ils sont éclairés par une lumière UV. Ils émettent une lumière jaune-vert alors que la phase bitume restante apparaît noire. [32]



Bitume modifié par 5% de SBS

Bitume modifié par 7% d'EVA

Figure 3.2: Observation de la microstructure d'un bitume modifié par microscopie de fluorescence (0.5x0.7mm) [32]

3.8 Les plastiques :

La consommation mondiale annuelle de plastique est passée d'environ 5 million de tonnes dans les années 1950 à près de 100 million de tonnes en 2001.[33]

En ce qui concerne les sacs plastiques, 4 à 5 billion de sacs en plastique polyéthylène sont fabriqués chaque année dans le monde. L'Algérie est le cinquième plus grand pays consommateur au monde, avec 6 milliards de sacs par an. Le plastique est facile à utiliser, mais il n'est pas écologique car il n'est pas biodégradable. Il est généralement éliminé par enfouissement ou incinération, ce qui peut entraîner des préoccupations environnementales, des dangers et des risques pour la santé.

De nombreux chercheurs ont étudié l'influence des matériaux plastiques sur les performances du bitume [34].

➤ Le bitume modifié par des déchets plastiques présente des caractéristiques de performance plus élevées, par rapport au bitume pur, notamment en termes de rigidité et de résistance à l'orniérage.

➤ Plus, que 2500 Km des routes sont réalisés par des enrobés modifiés par les déchets plastiques (plastifiant) en Inde depuis 2000. Plusieurs sites visités après cinq ans de la mise en service indiquent, qu'il n'y a aucune dégradation (comme nids poule, fissuration, fluage et déformation).

- Attaelmanan et al en 2011 ont indiqué que les valeurs de pénétration et de sensibilité à la température diminuent et que le point de ramollissement augmente en fonction de la teneur en HDPE. Ils ont conclu que des chaussées flexibles avec des performances et une durabilité plus élevée et des coûts inférieurs à ceux des mélanges conventionnels peuvent être obtenues avec 5% de HDPE.
- Nouali et al (2019) indiquent que l'addition de 0,7% de déchets de sacs en plastique (LDPE) diminue le taux de vieillissement du bitumen.

3.9 Conclusion :

Dans la construction routière proprement dite, les enrobés bitumineux sont soumis à une variété de contraintes, y compris des contraintes thermiques et des fréquences de contraintes mécaniques, nécessitant des enrobés moins sensibles aux changements de température et qui adhèrent fortement aux granulats. Par conséquent, l'utilisation du bitume modifié (BmP) est nécessaire. C'est une condition préalable à la construction de routes

Etude Expérimentale

CHAPITRE 4: Les Matériaux D'étude

4.1 Introduction

Dans cette partie, il a été procédé à la définition et l'identification des composants de base rentrant dans la constitution des matériaux étudiés. Pour chaque composant, des essais physiques ont été réalisés permettant de caractériser les matériaux et de les classer selon une normalisation.

4.2 Présentations des Matériaux

4.2.1. Le bitume

L'étude expérimentale a été effectuée sur un bitume de classe 35/50. Il provient de Naftal. Pour le caractériser nous avons effectué les analyses suivantes:

- ❖ Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN1426).
- ❖ Essai de ramollissement bille et anneau (NF EN1427).
- ❖ Essai de ductilité (NF EN 13589).
- ❖ Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF EN 12607-1)



Figure 4.1: bitume

Le tableau suivant résume les résultats des différents essais effectués sur le bitume.

Tableau 4.1 : résume les résultats des différents essais effectués sur le bitume

Type d'essai		Résultat	Spécification	Observation
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)		39	35 – 50	Acceptable
Température bille et anneau « TBA » (°C)		52	50-58	Acceptable
Indice de pénétrabilité « IP »		1,03	$-3 \leq IP \leq +7$	Acceptable
Ductilité (cm)		>100	100	Acceptable
Après RTFOT	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	26		
	TBA (°C)	60	> 52	Acceptable
	Pénétrabilité restante [%]	66,66	> 53	Acceptable
	ΔTBA [°C]	8	< 8	Acceptable

Commentaires : Les caractéristiques physico- mécaniques du bitume pur concordent avec les spécifications préconisées dans la norme NF EN 12-591 « Spécifications des bitumes routiers » pour la classe 35/50.

4.2.2 Les déchets plastiques

Les déchets plastiques utilisés dans ce travail sont obtenus à partir de sacs d'emballage alimentaire. La procédure de préparation du déchet plastique est de couper les sacs en petits morceaux de longueurs allant de 2 à 5 mm. Les déchets plastiques rougeâtres utilisés sont principalement constitués de polypropylène. La formule chimique du plastique utilisé est $(C_3H_6)_n$ et sa densité est de 0.9 g/cm^3 .



Figure 4.2: déchets plastique

4.2.3 Les granulats

Les granulats de cette étude sont les plus couramment utilisés par les entreprises pour la réalisation des chaussées.

Les granulats de classe 0/3, 3/8 et 8/15 utilisés dans notre recherche proviennent **de la carrière de hooud El-hamra, wilaya de Ouaregla.**

Les résultats de l'analyse chimique des granulats sont donnés dans le tableau suivant **(entreprise Souf pour goudron et huiles (Hassi Khalifa))**:

Tableau 4.2 : Les résultats de l'analyse chimique des granulats.

Norme	Essais	Tamis (mm)	Résultat			Spécifications
			0/3	3/8	8/15	
EN FN 933-1	Analyse granulométrique	20			100,00	
		16			83,00	
		14			62,00	
		12,5		100,00	40,00	
		10		99,94	11,00	
		8		90,00	7,00	
		6,3	100,00	62,00	3,00	
		5	99,81	37,00		
		4	99,42	19,00		
		2,5	90,00	6,00		
		2	85,00	0,10		
		1,25	71,00	0,00		
		1	60,00			
		0,63	59,00			
		0,315	40,00			
		0,16	34,00			
		0,08	22,00			
NF P15-461	Analyse chimique (%)	Insolubles	26,30	13,47		
		Sulfates	1,68	0,23		
		Carbonates	66,40	73,38		
		Chlorures	0,012	0,004		
NF P18-591	Propreté	P (%)	-	0,575	0,18	< 1%
EN FN 933-3	Aplatissement	A (%)	-	7,54	10,69	< 20%
NF P18-573	Los Angeles	LA (%)	-	18,40		< 25%
NF P18-572	Micro-Deval Humide	MDE (%)	-	14,65		< 20%
NF P18-597	ES à 10% de fines	ES (%)	61,32	-	-	> 40%
NF P18-554	Masse volumique réelle	MVR (g/cm ³)	2,58	2,62	2,62	

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés dans la figure suivante

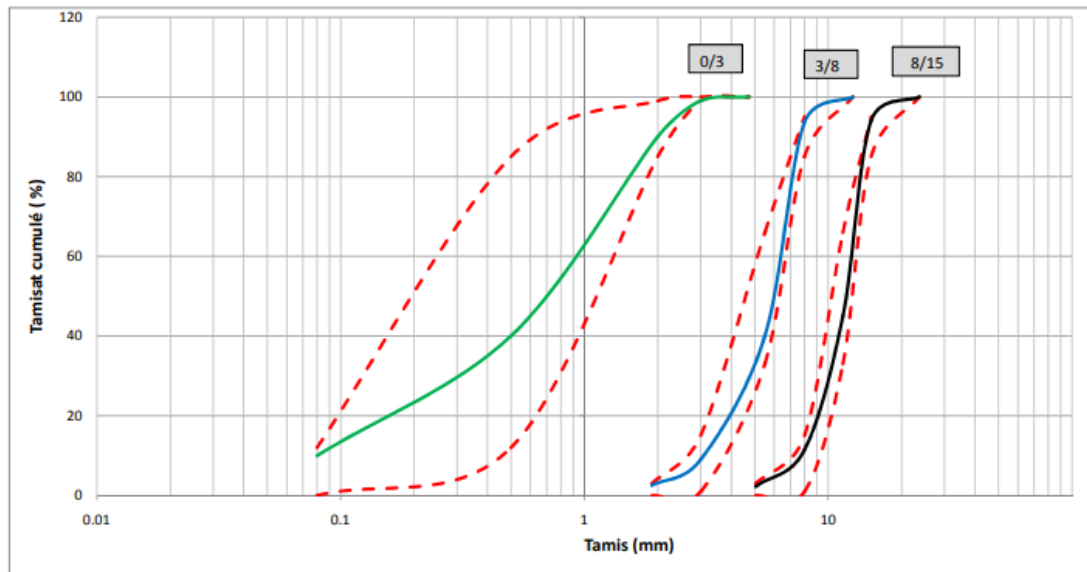


Figure 4.3: Courbe granulometrie

Le sable concassé de Haoud El-Hamra à une forte teneur en carbonates ($\text{CaCO}_3=66,40\%$) ce qui nous permet de dire que c'est un sable calcaire.

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

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

4.3 La modification

Les bitumes polymères sont fabriqués en général par dispersion du polymère dans le bitume sous agitation à chaud.

Nous avons pour cela utilisé, un appareillage se composant :

- d'un agitateur électrique à hélice muni d'un variateur de vitesse de rotation allant de 50 à 2500 tr/mn,
- d'un thermomètre allant de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $250\text{ }^{\circ}\text{C}$,
- d'un récipient dans lequel on effectue la modification, ce dernier est équipé d'un couvercle hermétique pour empêcher l'évaporation des huiles de bitume lors du chauffage.

Nous avons adopté les paramètres de modification suivants:

- Un volume de bitume d'environ 500g.

- ✚ Une température du mélange de $180 \pm 5^\circ\text{C}$.
- ✚ Une vitesse de malaxage: $600 \text{ tr/min} \pm 10 \text{ tr/min}$.
- ✚ Une durée de malaxage de 1, 2 et 3 heures.

4.4 Programme expérimental

4.4.1 Pénétrabilité (NF EN 1426)

Cette test consiste à mesurer la consistance des bitumes et des liants bitumineux. Cette méthode consiste à mesure la profondeur de pénétration verticale d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, en dixième de millimètre, dans des conditions précises de température, de charge et de durée d'application de la charge La pénétrabilité du liant bitumineux s'exprime par la profondeur (en dixièmes de millimètre) d'une aiguille standard de diamètre 1 mm soumis à une charge de 100 g pendant 5 secondes sur un échantillon de bitume maintenu à 25°C

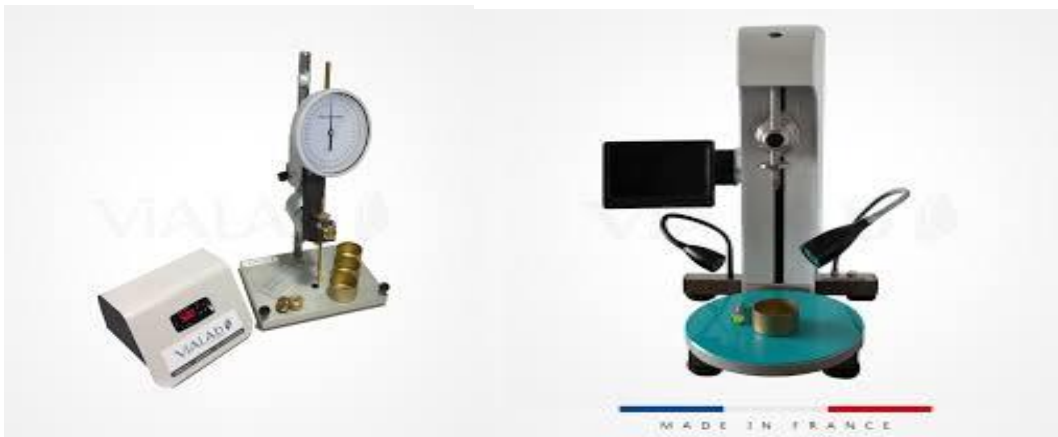


Figure 4.4: Appareillage de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille

4.4.2 Température de ramollissement Bille Anneau (NF EN 1427) :

Ce test mesure le point de ramollissement des liants bitumineux dans la plage de température de 28°C à 150°C . Deux disques horizontaux de bitume, coulés avec des anneaux en laiton épaulés, supportant chacun une bille d'acier de taille et de poids définis, sont chauffés dans un bain liquide à une vitesse contrôlée de montée en température de 5°C par minute. Le point de ramollissement spécifié doit correspondre à la température moyenne à laquelle les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à une bille enveloppée de liant bitumineux de tomber d'une hauteur de $25 \pm 0,4 \text{ mm}$



Figure 4.5: Température de ramollissement Bille Anneau

4.4.3 Essai de stabilité au stockage

Pour évaluer la stabilité au stockage, nous avons placé chaque mélange immédiatement après fabrication dans un tube cylindrique en aluminium ou il a été maintenu verticalement à une température de 165°C pendant 48 h. Il a été, par la suite, mis dans un congélateur à une température de -5°C pour le refroidir. Le tube a ensuite été découpé en trois parties de longueur égale à l'aide d'une spatule et de marteau. La différence de points de ramollissement entre les sections supérieure et inférieure du tube a été mesurée. Un échantillon est considéré comme ayant une bonne stabilité au stockage si la différence est inférieure à 2,5°C. Ce test est utilisé pour contrôler l'homogénéité et la compatibilité du bitume avec le polymère



Figure 4.6: stabilité au stockage

4.4.4 Essai Marshall pour les enrobés

La méthodologie algérienne de formulation préconise l'essai Marshall afin d'évaluer la résistance des bétons bitumineux.

Les dimensions des éprouvettes cylindriques sont 101,6 mm de diamètre et de 63,5 mm de hauteur. Les échantillons sont compactés par l'application de 50 coups par face à 150°C.

Conformément à la norme ASTM D 1559. Après une journée de conservation à la température ambiante, les éprouvettes sont immergées dans un bain de 60°C pendant 35 min. La stabilité marshall est la valeur (en KN) qui correspond à la force maximale enregistrée durant l'essai, alors que le fluage (en mm) est la déformation mesurée à la force maximale. Le rapport entre la stabilité (S) et le fluage (F) définit ainsi le quotient marshall (QM) qui permet d'évaluer la résistance des éprouvettes d'enrobés. Une valeur plus grande du quotient indique que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes.



Figure 4.7 : Essai Marshall pour les enrobés.

4.5 Conclusion

Après avoir effectué les essais nécessaires sur le bitume pur et modifié, nous passerons en revue dans le chapitre suivant les résultats obtenus.

CHAPITRE 5: Influence du déchets plastiques sur les bitumes

5.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des essais conventionnels (Pénétrabilité, température Bille et Anneau et la stabilité au stockage) effectués sur le bitume 35/50 et les bitumes modifiés par du déchets plastiques (DP) à différentes teneurs. Ces résultats serviront à l'évaluation des caractéristiques classiques empiriques des liants étudiés afin de prédire l'effet de la modification sur la consistance des bitumes modifiés.

5.2 Consistances des bitumes modifiés

La consistance des bitumes est déterminée à l'aide de l'essai de pénétrabilité et de l'essai de température Bille et Anneau (TBA).

5.2.1 Pénétrabilité à 25 °C

Les résultats de la pénétrabilité à 25 °C en fonction de la teneur en DP et la durée de malaxage, sont donnés dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Variation de la pénétrabilité à 25 °C pour les différents mélanges

Pénétrabilité à 25 °C	1h	2 h	3 h
Bitume pur	38	36	33
1%DP	35	33	30
3%DP	30	28	26
5% DP	27	25	23

5.2.1.1 Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité des bitumes

La figure 5.1 représente la **pénétrabilité** à 25°C en fonction de la durée de malaxage.

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

La pénétrabilité des bitumes modifiés à différents mélanges est diminuée par rapport au bitume de base pour toutes les durées de malaxage ce qui indique le bitume devient plus dur après la modification.

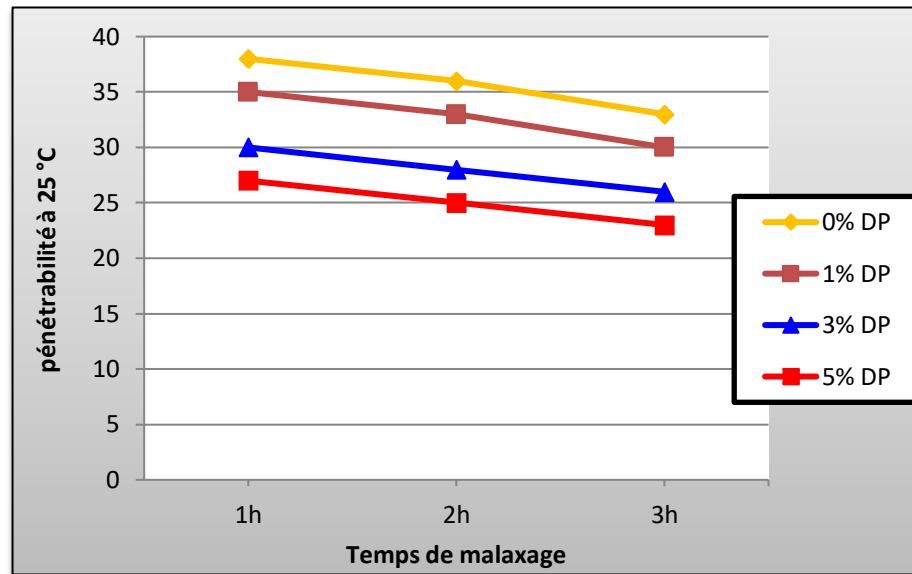


Figure 5.1 Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité des bitumes

5.2.1.2. Influence de la teneur en DP sur la pénétrabilité des bitumes

Les résultats d'évolution de la pénétrabilité en fonction de la teneur en déchets plastiques sont représentés sur la figure 5.2

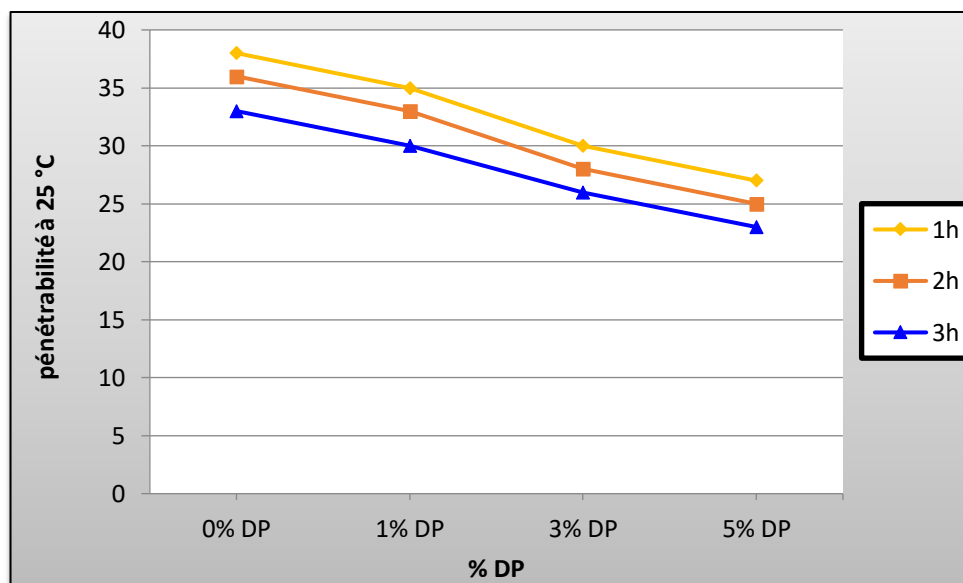


Figure 5.2 Influence de la teneur en DP sur la pénétrabilité des bitumes.

La figure 5.2 montre que la pénétrabilité des bitumes diminue avec l'augmentation de la teneur en polymère et qu'elle est toujours plus petite que celle du bitume de base.

Comparativement au bitume pur, les bitumes modifiés sont plus consistants ce qui montre que les bitumes modifiés par les déchets peuvent présenter un meilleur comportement à haute température.

5.2.2. Température de ramollissement Bille Anneau

Les résultats de la TBA en fonction de la durée de malaxage et du déchets plastiques sont rassemblés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Variation de TBA pour les différents mélanges

TBA (°C)	1h	2 h	3 h
Bitume pur	52	54	56
1%DP	55	58	59
3%DP	58	60	62
5% DP	60	63	66

5.2.2.1 Influence du temps de malaxage sur la TBA

La figure 5 .3 représente la TBA (°C) en fonction de la durée de malaxage.

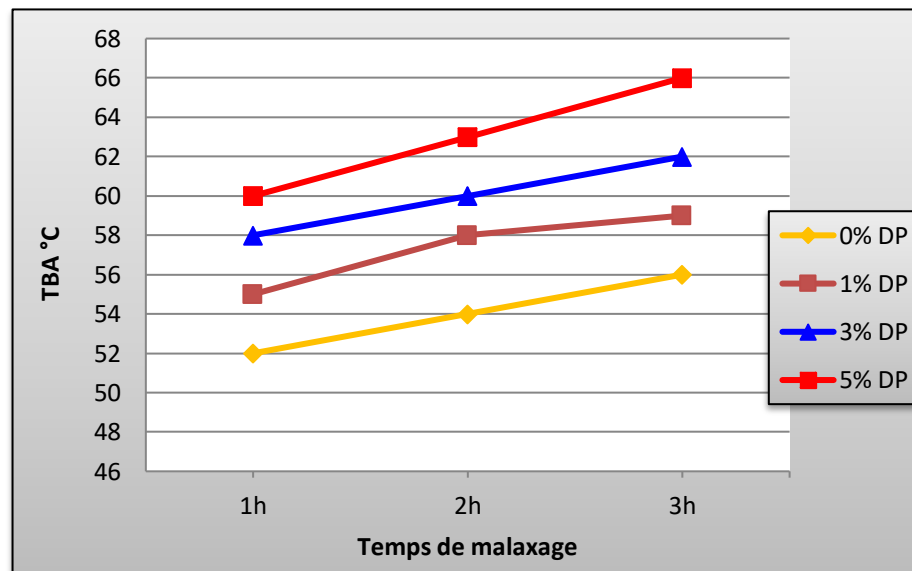


Figure 5.3 Influence du temps de malaxage sur la TBA des bitumes

Les résultats de la figure 5.3 montre que pour toutes les teneurs, les courbes présentent en général la même allure.

la TBA des bitumes (purs et modifiés à différents mélanges) augmente en fonction du temps de malaxage.

5.2.2.2. Influence de la teneur en DP sur la TBA

L'évolution de la TBA en fonction des teneurs en DP est présentée sur la figure 5.4

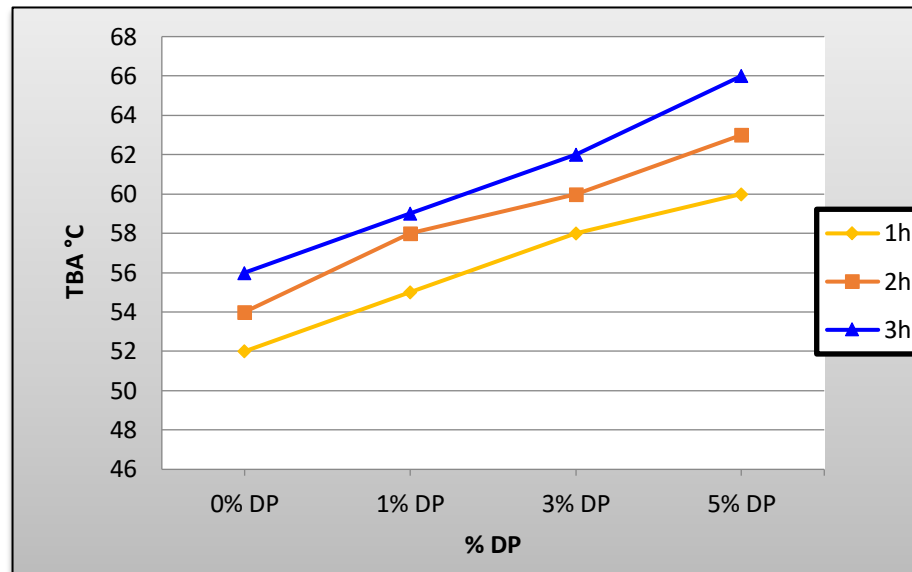


Figure 5.4 Influence de la teneur en DP sur la TBA des bitumes.

Les résultats de la figure 5.4 montrent que la température de ramollissement augmente avec l'augmentation de la teneur en déchets plastique. En effet, la température de ramollissement augmente d'environ 13% après l'ajout de 1% DP (3 heures) comparativement au bitume pur et de plus de 15% relativement au bitume + 5%DP (3 heures). Les résultats de la température de ramollissement montrent clairement que les additifs utilisés améliorent substantiellement les caractéristiques du bitume à hautes températures. L'augmentation de la TBA montre que les bitumes modifiés par les déchets plastiques augmentent la résistance à l'orniérage des chaussées bitumineuses fabriquées à base de ces déchets.

5.2.3 Susceptibilité thermique (IP)

La susceptibilité thermique est définie comme la modification du paramètre de consistance en fonction de la température, est représentée par un indice appelé indice de pénétrabilité (IP) exprimé par la relation montrée dans l'équation 28. (Où Pen₂₅ correspond à la pénétration à 25°C et TBA à la température de ramollissement).

$$IP = \frac{1952 - 500 \times \log(\text{Pen}_{25}) - 20 \times TBA}{50 \times \log(\text{Pen}_{25}) - TBA - 120}$$

Les résultats de la susceptibilité thermique en fonction de la teneur en déchets plastiques (**temps de malaxage 2 heures**) sont rassemblés dans le tableau 5.3 et schématisés par la figure 5.5

Tableau 5.3 : la susceptibilité thermique des bitumes modifiés

	Bitume pur	1%DP	3%DP	5%DP
La susceptibilité thermique	− 0 ,9757	−0,3207	−0,2640	0,0616

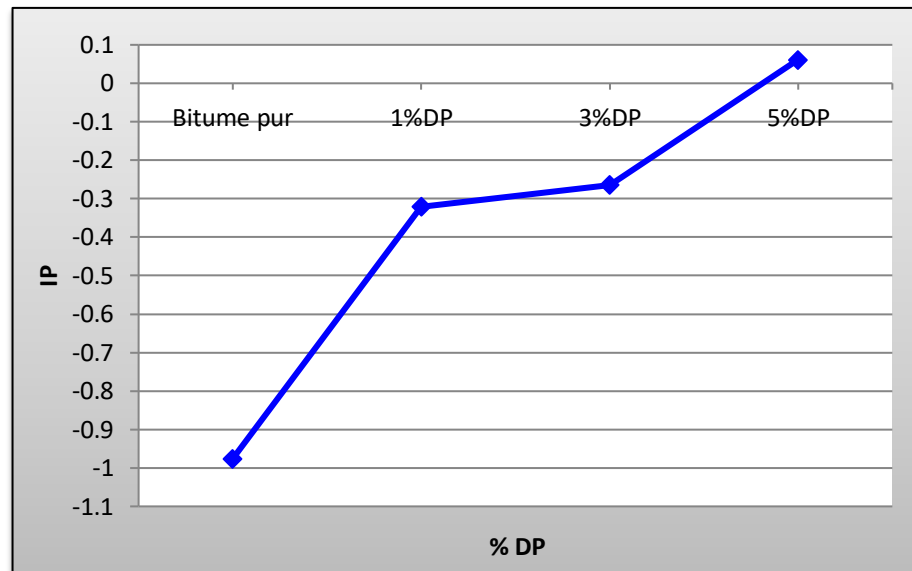


Figure 5.5 Les résultats de la susceptibilité thermique des bitumes

La figure 5.5 montre la variation de la susceptibilité thermique des bitumes modifiés, en fonction de la teneur en polymère. Il est connu que plus la valeur de l'indice de pénétrabilité augmente plus la susceptibilité thermique du liant diminue, on peut remarquer que les bitumes modifiés présentent une susceptibilité thermique moindre que le bitume pur explicité par l'augmentation de la valeur de IP en fonction de la teneur en polymère. Ces résultats suggèrent que le bitume modifié est plus résistant à la fissuration à basse température et à la déformation permanente.

5.2.4. Stabilité au stockage

Les propriétés du bitume modifié (BmP) dépendent largement de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques et la teneur en polymère, la nature et la classe du bitume, ainsi que le processus de mélange. Malgré le grand nombre de produits polymères utilisés, il existe relativement peu de types adaptés à la modification du bitume.

Le bitume modifié aux polymères (BmP) est un matériau de haut performance utilisé pour la construction et l'entretien des routes. Cependant, sa stabilité au stockage et son comportement

de séparation de phase ne sont pas encore suffisamment compris et doivent être étudiés pour une application plus réussie et durable du BmP.

Pour évaluer la stabilité au stockage, nous avons placé chaque mélange immédiatement après fabrication dans un tube cylindrique en aluminium ou il a été maintenu verticalement à une température de 165°C pendant 48 h. Il a été, par la suite, mis dans un congélateur à une température de -5°C pour le refroidir. Le tube a ensuite été découpé en trois parties de longueur égale à l'aide d'une spatule et de marteau. La différence de points de ramollissement entre les sections supérieure et inférieure du tube a été mesurée. Lorsque la différence est inférieure à 2,5 C, on peut considérer que l'échantillon a une bonne stabilité au stockage. Cet essai est utilisé pour contrôler l'homogénéité et la compatibilité du bitume avec le polymère



Figure 5.6 : Prélèvement d'éprouvettes pour l'essai de stabilité au stockage

Tableau 5.4 : Les résultats de la stabilité au stockage des bitumes modifiant

	Point de ramollissement °C			Commentaires
	Haut	Bas	Différence	
5% DP (2h)	67	59	8	>2.5 Instable

On remarque que la différence de points de ramollissement entre les sections supérieure et inférieure du tube supérieurs 2.5 °C ce qui indique que le bitume-DP instable au stockage. L'instabilité des bitumes modifiés avec DP peut être provoquée par l'augmentation de la quantité d'asphaltènes et la formation d'agglomérats conduisant à une séparation de phase.

Pour résoudre le problème d'instabilité, les chercheurs ont essayé différents types de solutions, telles que la vulcanisation au soufre, l'ajout l'acide polyphosphorique [33], l'utilisation de minéraux argileux hydrophobes, maintenir le mélange sous agitation aux températures de stockage et de transport.

5.3. Conclusion

Les résultats d'analyses classiques montrent que la modification change les propriétés des bitumes. En effet, la pénétrabilité des bitumes diminue par contre le point de ramollissement augmente avec l'ajout des polymères. Le degré d'influence varie en fonction de la quantité du modifiant ajouté et de la durée de malaxage. Le bitume modifié par DP n'est pas stable au stockage.

CHAPITRE 6: Etude expérimentale sur les enrobés bitumineux

6.1 Introduction

La qualité d'une route dépend essentiellement de la qualité du bitume et des granulats et la mise en œuvre. Les mélanges hydrocarbonés sont constitués de deux matériaux :

- ☒ Les granulats qui constituent le squelette minéral ;
- ☒ Le bitume qui a pour rôle d'assurer la liaison entre ces derniers,

Dans cette partie nous exposons l'origine des matériaux des granulats, les essais de caractérisations ainsi que des essais mécaniques de formulation (Marshall).

6.2. Etude de Formulation de l'enrobé

L'objectif principal de la formulation est de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides pour atteindre les performances visées. En fait, la formulation est basée sur deux phases principales ; à savoir la composition granulométrique et le dosage en liant.

6.2.1 Courbe granulométrique du mélange

Selon les méthodes de formulation en vigueur dans le différent laboratoire de travaux publics de notre pays, nous avons choisi un mélange granulaire composé de trois fractions granulométrique concernés (0/3, 3/8 et 8/15) s'insérant parfaitement dans un fuseau de référence (Fuseau SETRA/LCPC BB 0/14). La courbe granulométrique qui s'insère dans le fuseau de spécification est obtenue pour les proportions suivantes tableau 6.1:

Tableau 6.1 : Pourcentages pondéraux des différentes classes

Fraction	Pourcentages Pondéraux (%)
0/3	35
3/8	30
8/15	35

La figure 6.1, montre le mélange 0/14 et le fuseau de spécification :

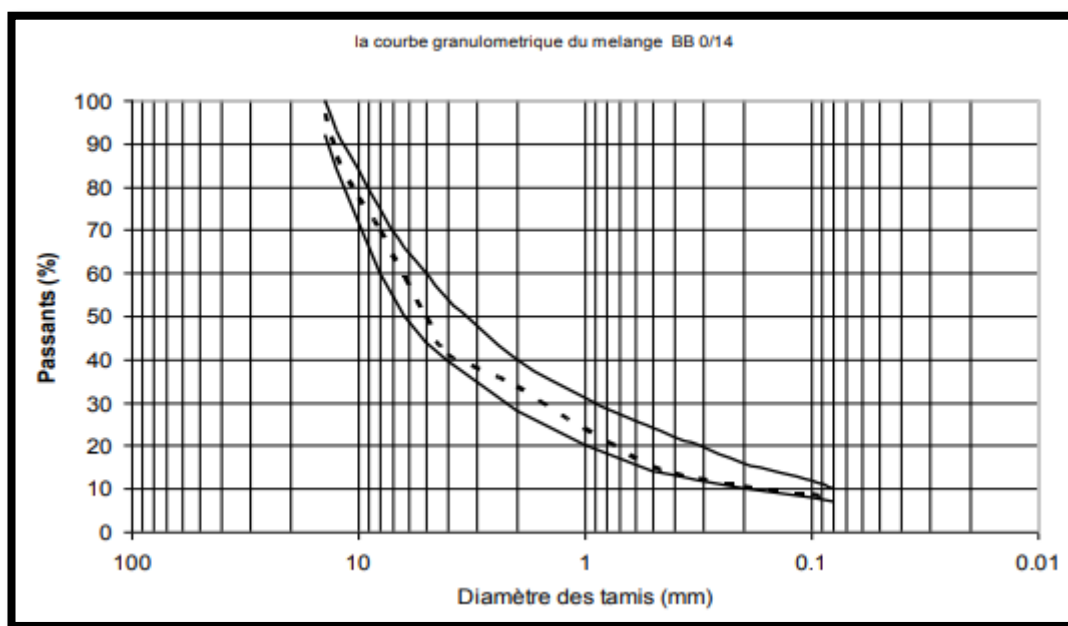


Fig 6.1 : Courbe granulométrique du mélange et fuseau de référence LCPC BB 0/14.

On remarque que la courbe granulométrique s'insère bien dans le fuseau de référence préconisé en Algérie pour les bétons bitumineux semi - grenus 0/14.

6.2.2. Teneur en liant

Par définition, on appelle teneur en liant, la masse de liant sur la masse des granulats secs, exprimée en pourcentage.

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats, notée Σ et exprimée en m^2/kg , c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères. Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique Σ :

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f$$

Avec :

- G : des éléments supérieurs à 6.3 mm,
- S : des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm,
- s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm,
- f : des éléments inférieurs à 0.08 mm,

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

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

Avec :

P : teneur en liant (%)

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats, il prendra les valeurs suivant :

- de 2 à 2,6 pour les graves bitumes « GB »
- de 3,3 à 3,9 pour un béton bitumineux « BB »

α : coefficient destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats « MVR_g ».

Si celle-ci diffère de 2.65 t/m³, on utilise la formule suivante :

$$\alpha = \frac{2.65}{MVR_g}$$

Conformément à la spécification, l'étude de formulation des bétons bitumineux a donné les résultats suivant le tableau 6.2, pour les matériaux utilisés (bitume 35/50, sable calcaire et gravier siliceux) :

Tableau 6.2: composition de la formule utilisé

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
% du mélange	35	30	35
Teneur en liant (%)	5,8		

6.2.3. Mode de fabrication des éprouvettes

La figure 6.2 représente les étapes de fabrication des éprouvettes d' malaxage, moulage, compactage et démoulage.



Figure 6.2 : Matériels utilisés pour fabrication des éprouvettes

6.3. Influence de l'ajout de déchets plastiques sur les caractéristiques Marshall

Les essais Marshall fournissent des indications sur les caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux fabriqués avec des bitumes modifiés. Les bitumes utilisés dans cette partie sont modifiés avec du DP à 1%, 3%, 5%.

L'enrobé bitumineux est compacté dans des moules à l'aide d'une dame en vue de réaliser des éprouvettes cylindriques. Ces éprouvettes (à température 60°C) sont placées entre les deux mâchoires semi-cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse constante. Au cours de l'essai, la charge et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture. Cet essai rentre dans la catégorie des essais à chargement unique qui, vu la complexité des sollicitations engendrées, ne permet pas la détermination d'une propriété intrinsèque du matériau (essai de performance). Il conduit à la détermination directe de deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage : le fluage FM (mm) et la stabilité Marshall SM (kN).

La stabilité Marshall (SM) est la résistance à l'écrasement de l'éprouvette à la température de 60°C en rupture.

Les résultats de l'essai Marshall pour chaque teneur en déchet plastique sont récapitulés dans le tableau 6.3 :

Tableau 6.3 : Résultats de l'essai Marshall

Teneur en DP (%)	0 %	1 %	3 %	5 %
Stabilité (KN)	9.6	10.1	10.7	11.8

6.3.1. Stabilité Marshall (SM)

La figure 6.3 représente la variation de la stabilité Marshall en fonction de la teneur en déchet plastique.

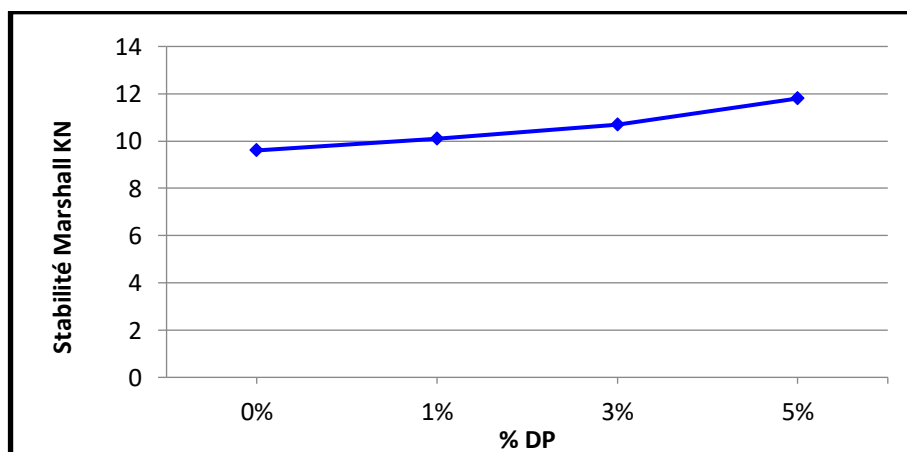


Figure 6.3 Stabilité Marshall.

D'après les résultats de la figure 6.3, on remarque que la SM augmente avec l'augmentation de la teneur en polymère et qu'elle est toujours plus petite que celle du bitume de base. L'incorporation du déchet plastique dans le bitume influe positivement sur la stabilité Marshall pour les différentes teneurs étudiées. Cette stabilité est maximale pour 5% de déchet plastique.

6.4. Conclusion

D'après les résultats des essais effectués, nous remarquons que les bétons bitumineux modifiés donnent de meilleure performance mécanique par rapport aux autres bétons bitumineux, les résultats sur les enrobés bitumineux montrent que les bétons bitumineux modifiés donnent de meilleure performance mécanique par rapport aux autres bétons bitumineux

Conclusion

L'agression du trafic routier sur les chaussées couplées avec des sollicitations climatiques impliquent plusieurs phénomènes qui provoquent à terme la ruine de la structure : l'orniérage, la fatigue et la fissuration.

Plusieurs études ont montré que le comportement du béton bitumineux dépend essentiellement du comportement du bitume, à basse température le bitume possède un comportement fragile (donc fissuration de la chaussée), et à la température élevée il possède un comportement visqueux (problèmes d'orniérage ou déformations permanentes de la chaussée). Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'orniérage (à température élevée).

L'enrobé bitumineux dans sa configuration traditionnelle n'assure pas un bon fonctionnement des chaussées, des études ont montré qu'en incorporation des polymères comme modifiant du liant améliore sensiblement les performances des chaussées.

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés à la modification du bitume de classe 35/50 commercialisé en Algérie par l'ajout d'un déchet plastique. L'objectif de cette étude est d'améliorer les propriétés des bitumes par l'ajout de déchets plastique.

Les propriétés des bitumes ont été mesurées par des méthodes conventionnelles (Pénétrabilité, température Bille et Anneau et la susceptibilité thermique). L'essai marshall sur les enrobés pour valider les résultats.

A la lumière des résultats exposés dans ce travail, les différentes conclusions suivantes peuvent être tirées :

I - Les bitumes modifiés

1. Les résultats d'analyses classiques ont montré que la modification du bitume par l'ajout de déchet plastique modifie les propriétés des bitumes. Le bitume modifié est plus dur que le bitume pur. En effet, la pénétrabilité des bitumes diminue par contre le point de ramollissement augmente avec l'ajout des polymères.

2. Les résultats expérimentaux montrent que les bitumes modifiés, par leur susceptibilité thermique moindre, présentent de bien meilleures performances que les bitumes conventionnels.

3. L'instabilité du BmP-DP peut être provoquée par l'augmentation de la quantité d'asphaltènes et la formation d'agglomérats a conduit à une séparation de phase

II. Les enrobés bitumineux

Les résultats sur les enrobés bitumineux montrent que les bétons bitumineux modifiés donnent de meilleure performance mécanique par rapport aux autres bétons bitumineux

En perspective

Nous proposons les actions suivantes :

- ☐ Etudier l'influence de l déchet plastique alimentaire sur les caractéristiques physiques et mécaniques des enrobés bitumineux (fatigue,orniérage, etc.).
- ☐ Réaliser des analyses chimiques sur les bitumes modifiés, telles que la chromatographie et la SARA, pour mieux expliquer les phénomènes de réaction entre le polymère et le bitume.
- ☐ Ajouter des agents chimiques pour augmenter la stabilité au stockage.

Références bibliographiques

- [01] NF EN 12597, Bitume et liants bitumineux: Terminologie, (2002).
- [02] Ministère des Travaux Publics, Algérie. « Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud » (2004),
- [03] K.AIT MOKHTAR, (1994) « Influence De L'affinité Liant Hydrocarboné Granulat Sur Les Caractéristiques Mécaniques Des Mélanges Hydrocarbonés » Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene institut de génie civil.
- [04] Groupement professionnel des bitumes, le bitume qu'est-ce que c'est ? « Genèse, constitution et caractéristiques du bitume », Bitume infos, N° spécial 1, (juin 2005).
- [05] Jean, F., Corté, H. Di Benedetto « matériaux routiers bitumineux, constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges, ISBN 2-7462-0960-8, Lavoisier 2005
- [06] Walzak. I., Détermination des produits organiques d'altération chimiques et radiochimiques du bitume, applications aux enrobés bitumés. Thèse doctorat janvier 2000 INSA Lyon, page 29-206.
- [07] Yen. T.F., (1981). "Structural differences between asphaltenes isolated from petroleum And from coal liquid", Chemistry of asphaltenes, advances in chemistry Series 195, 1981,pp.39-51.
- [08] OLARD F., CHABERT D., Développement de l'essai de fatigue sur liants et mastics bitumineux, Revue générale des routes et aérodrômes, N°865, pp. 69-74, 2008
- [09] JEAN BERTHIER « Granulats et liants routiers » Techniques de l'Ingénieur (1992)
- [10] Haddadi Smail- Contribution à l'étude du comportement des matériaux traités aux liants hydrocarbonés- influence des paramètres de composition- Thèse de magister- IGC- USTHB Fév. 1995.
- [11] SETRA-LCPC «Conception et dimensionnement des structures de chaussées » Guide technique, (Décembre 1994)
- [12] NGUYEN H.N., Etude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume, Thèse de doctorat Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2008
- [13] Magraman D, Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification à base de polymères : poudrette de caoutchouc, thèse de magister 2009, ENSTP
- [14] M.ROBERT (J.F.LAFON), ROUTES Matériaux, Durabilité des chaussées MASTER 2 GENIE-CIVIL tome II, U.P.S. M2 UE1 2011/2012
- [15] LAËTITIA EL BEZE «Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux, Identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf

d'apport» Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'université Paul CÉZANNE, Faculté des Sciences et Techniques (2008)

[16] DANG-TRUC NGUYEN « Prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses Thèse pour l'obtention du diplôme de Docteur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Spécialité : Structures et Matériaux (2006)

[17] JEAN BERTHIER « Granulats et liants routiers » Techniques de l'Ingénieur (1992)

[18] Sayegh, G, Variation des modules de quelques bitumes purs et bétons bitumineux., Thèse de Doctorat d'Ingénieur, Faculté des Sciences de l'université de Paris, 1965.

[19] D. Bodin, G. Pijaudier-Cabot, C. de La Roche, J.-M. Piau, A. Chabot, Continuum Damage Approach to Asphalt Concrete Fatigue Modeling, Journal of Engineering Mechanics. 130 (2004) 700–708. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2004)130:6(700).

[20] A. Zbiciak, R. Michalczyk, Characterization of the Complex Moduli for Asphalt-aggregate Mixtures at Various Temperatures, Procedia Engineering. 91 (2014) 118–123. doi:10.1016/j.proeng.2014.12.032.

[21] CERIU INFRASTRUCTURES, (2002) « LES REVETEMENTS TRES MINCES ET ULTRAMINCES DEMYSTIFIES » Bulletin d'information du Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines, Vol. 9 No 6

[22] B-J DONGMO, (2005) « CARACTERISATION DES DEFORMATIONS D'ORNIERAGE DES CHAUSSEES BITUMINEUSES », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat.

[23] S. MAILLARD, 2005 « FISSURATION ET AUTOREPARATION DES LIANTS BITUMINEUX –APPORT DE L'ESSAI DE RUPTURE LOCA

[24]. PIARC, Use of modified bituminous binders, special bitumens with additives in road pavements, Laboratoire

[25]. F. Hadrzynski, et C. Such. Modélisation du comportement rhéologique des bitumes polymères, le modèle autocohérent, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 214, pp.3-18, (1998).

[26] C.P. Valkering, W.-C. Vonk, C.-D. Whiteoak, Enrobés routiers améliorés à base de bitumes modifiés par des élastomères thermoplastiques SBS, Revue Générale des

[27] M.A. Elseifi, G.W. Flintsch, I.L. Al-Qadi. Quantitative effect of elastomeric modification on binder performance at intermediate and high temperatures. J Mater Civil Eng, 15 (1), pp. 32–40, (2003)

[28] X.H. Lu, I. Ulf. Modification of road bitumens with thermoplastic polymer. Polymer Testing, Volume 20, p. 77-86, (2000).

- [29] G.W. Gilby. EVA Copolymers as Modifiers for Bitumen Binders. J.Association of Asphalt Technol., 36(6), pp. 37-41, (1985).
- [30] J. Bonnot, et F. Pérez. Matériaux bitumineux spéciaux. Bulletin de Liaison du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 144, pp.65-71, (1986).
- [31] B. Brûlé, et M. Mazé. Les bitumes-polymères pour enrobés spéciaux. Extrait de la Revue Générale des Routes et des Aérodrômes, 726, pp.4-8, (1995)
- [32] Mohammed LIZOUL," OBSERVATION D'UN BITUME MODIFIE SOUS MICROSCOPE A EPI-FLUORESCENCE", Centre d'Etudes et de Recherches des Infrastructures de Transport], [Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes], [Maroc].
- [33] FETHIZA ALI Boubaker," Contribution à l'Étude du Comportement des Bitumes Modifiés par l'Association du NBR et de Déchets Plastiques",Thèse de doctorat,Faculté de génie civil ,houari boumediene,2021
- [34] Nouali Mohamed, Derriche Zohra, Ghorbel Elhem & and Chuanqiang Li, "Plastic bag waste modified bitumen a possible solution to the Algerian road pavements," Road Materials and Pavement Design. no. 1 13, 2019, doi: 10.1080/14680629.2018.1560355