



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ DE 20 AOÛT 1955 – SIKDA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE DES PROCÉDÉS

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de :

Master

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des polymères

**INFLUENCE DE LA TENEUR EN SBS
SUR LES PROPRIETES DU BITUME**

Réalisé par : - DAIRA Samah
- BOUBELLI Kamel
- BELLOUM Malak

Encadré par :
Dr BENMESLI Samia

Année Universitaire 2025- 2026.

Remerciements

En premier lieu, nous tenons à remercier DIEU, le Tout-Puissant, de nous avoir donné la force, le courage et la patience nécessaires pour accomplir ce modeste travail.

*Nous exprimons notre profonde gratitude et notre haute reconnaissance à notre encadrante, **Dr. SAMIA BENMESLI**, pour sa disponibilité constante, ses précieux conseils, sa bienveillance et la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire. Son accompagnement académique et humain a été un pilier essentiel dans la réussite de ce projet.*

*Nos chaleureux remerciements s'adressent également à l'ensemble des enseignants de **l'Université 20 Août 1955 de Skikda**, pour la qualité de la formation qu'ils nous ont dispensée.*

Nous honorons de nos vifs remerciements les honorables membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de rehausser notre soutenance par leur présence et leurs critiques constructives.

Enfin, ce parcours n'aurait pas eu le même sens sans le soutien indéfectible de nos chers parents. Merci pour votre amour inconditionnel, vos sacrifices quotidiens et vos encouragements dans les moments de doute. Vous avez su rendre ce chemin plus doux.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de cette aventure, nous vous disons merci du fond du cœur.

Dédicace

J'ai l'immense honneur de dédie ce travail

A mon cher père AMMAR DAIRA

A ma chère mère CHEHBA BERKOUK

Pour leur amour, leurs sacrifices et leurs encouragements tout au long de mes études.

À ma famille et mes proches,

Pour leur soutien moral et leur présence constante.

A mon fiancé,

Pour son amour et ses encouragements

À mes amis et collègues,

Pour les bons moments partagés et leur aide précieuse

À tous mes enseignants,

Qui ont contribué à ma formation et à mon parcours universitaire.

Enfin, à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

DAIRA Samah

DEDICACE

Je dédie ce mémoire à ma chère épouse, à mes enfants ADAM et YAHIA et à mes chers parents, pour leur amour, leur soutien et leur encouragement tout au long de mon parcours.

A mon cher trinôme merci pour tous les moments de bonheur qu'on a passés ensemble.

A tous mes professeurs de département génie des polymères (Dr BENMESLI, Dr BELHOUS, Dr BELLILI, Dr DAIRI, Dr GHARBI, Dr DAMOUS).

Je dédie cet humble mémoire.

BOUBELLI Kamel

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

À ma très chère mère, pour son amour inconditionnel, ses sacrifices et ses encouragements tout au long de mon parcours. Que Dieu la protège, lui accorde une longue vie et la garde toujours auprès de moi.

À mon cher père, pour ses précieux conseils, sa présence constante et les valeurs qu'il m'a transmises.

À ma sœur (Imen) et à mes deux frères (Mehdi et Adem), pour leur affection, leur complicité et leur soutien moral.

À toute ma famille, pour sa confiance indéfectible et son intérêt bienveillant.

À mes enseignants, qui m'ont guidée et transmis leur savoir avec dévouement et patience.

À mes amis et camarades, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables durant mes études.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet. Je leur adresse à tous ma profonde gratitude et mon immense respect.

BELLOUM Malak

LISTE DES FIGURES

Figure	Titre	Page
Figure I.1 :	Bitume.....	4
Figure I.2 :	Schéma représentant la fabrication des bitumes par raffinage du pétrole.....	5
Figure I.3 :	Structure hypothétique des asphaltènes des bitumes, a) : d'après Yen b) : d'après Groenzin et Mullins.....	7
Figure I.4 :	Structure pour la fraction saturée des bitumes.....	8
Figure I.5 :	Structure pour la fraction aromatique des bitumes.....	8
Figure I.6 :	Structure pour la fraction des résines des bitumes.....	9
Figure I.7 :	Schéma de séparation chimique des constituants du bitume.....	9
Figure I.8 :	Classe de comportement du bitume en fonction de la température.....	13
Figure I.9 :	(a) Béton bitumineux à l'émulsion (b) isolation bâtiment (photo original)	15
Figure I.10 :	Classes de comportement des bitumes en fonction de $ \epsilon $ et T.....	16
FigureII .1:	Schématique de la synthèse d'un polymère.....	17
FigureII.2 :	Polymères linéaires ; ;..... ; ;.....	18
FigureII.3 :	Polymères ramifiés.....	19
FigureII.4 :	Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes.....	19
FigureII.5 :	Polymères naturels (caoutchouc naturel, coton, résine naturel)	20
Figure II.6 :	Schéma représentant le processus de vapocraquage utilisé pour extraire des grands volumes de polymères synthétiques à partir du pétrole brut et du gaz naturel..... ; ; ; ; ;.....	21
FigureII.7 :	Homopolymère(a)linéaire ; (b) greffé et (c) étoilé..... ;.....	21
FigureII.8 :	Schéma simplifié des trois états structuraux des polymères..... ;.....	24

Figure II.9 : Configuration des macromolécules thermoplastique et élastomère.....	26
Figure II.10 : Structure chimique du SBS.....	28
Figure II.11 : Schéma du SBS.....	28
Figure II.12: Températures de transition vitreuse de copolymère SBS.....	29
Figure II.13: Représentation schématique des structures linéaire et en étoile des SB....	29
Figure III.1 : Thermoplastique.....	32
Figure III.2 : Structure du caoutchouc thermoplastique (SBS).....	33
Figure III.3: Thermodurcissables.....	34
Figure III. 4 : Réservoirs verticaux pour PMB.....	37
Figure III.5: Travailleur appliquant un BMP en revêtement imperméable à un toit.....	38
Figure III.6: Mécanismes de la dispersion d'un copolymère (Polystyrène – butadiène) dans le bitume.....	40
Figure IV.1 : Bitume pur (photo original)	49
Figure IV.2 : Le polymère SBS utilisé (photo original)	50
Figure IV.3 : Modification du bitume pur par SBS (photo original)	51
Figure IV.4 : L'échantillon dans le Goblet et placé dans le bain marie (photo original)...	52
Figure IV.5 : Pénétromètre (photo original)	52
Figure IV.6: Préparation les échantillons dans les anneaux (photo original)	53
Figure IV.7 : utilisée l'eau pour 2% ;4% ,6%.....	54
Figure IV.8 : utilisée glycérol pour 8%	54
Figure IV.9 : Placé l'échantillon dans le bécher (teste TBA) (photo original)	54
Figure IV.10: Les étapes de test TBA (photo original)	55
Figure IV.11: La 1 ^{er} et 2 ^{ème} touche (test TBA) (photo original)	55
Figure IV.12: Principe de l'essai de densité.....	56
Figure IV.13 : Les étapes de l'essai de densité (photo original)	56

Figure IV.14 : Schéma de principe de l'essai FRAASS.....	57
Figure IV.15 : Schéma de principe de l'essai de retour élastique.....	58
Figure IV.16 : Malaxeur de bitume modifiés par (SBS) (photo original)	58
Figure IV.17 : Moule pour la confection des éprouvettes (photo original)	58
Figure IV.18 : L'éprouvette dans le ductilimètre (photo original)	59
Figure IV.19 : Etirement des éprouvettes à 200 mm (photo original)	59
Figure IV.20 : Découpe de l'échantillon (photo original)	60
Figure IV.21 : Retour élastique des éprouvettes (photo original)	60
Figure IV.22 : Remplissage des tubes par les échantillons (photo original)	61
Figure IV.23 : Fermeture des tubes (photo original)	61
Figure IV.24 : Placer les tubes dans l'étuve pendant 72h à 180C° (photo original)	62
Figure IV.25 : Placer et coupé les tubes en trois par (photo original)	62
Figure IV.26 : L'essai de TBA pour déterminer la stabilité au stockage (photo original) de stabilité au stockage des matériaux BMP en fonction pourcentage des polymères (SBS)	63
Figure V.1 : Variation de la pénétrabilité des matériaux BMP en fonction du pourcentage du polymère (SBS).....	65
Figure V .2 : Variation de point de ramollissement des matériaux BMP en fonction du pourcentage du polymère (SBS).....	67
Figure V.3 : Variation de retour élastique des matériaux BMP en fonction du pourcentage du polymère(SBS).....	69
Figure V.4 : Variation de stabilité au stockage des matériaux BMP en fonction pourcentage des polymères (SBS).....	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Titre	Page
Tableau I.1 :	Analyse élémentaire des bitumes issus du traitement du brut pétrolier	10
Tableau I.2:	Motifs hydrocarbonés composant la molécule de bitume.....	11
Tableau I.3 :	Composition chimique (bitumes 40/50) selon certains chercheurs algériens	11
Tableau II.1 :	Modes et enchainements des copolymères.....	22
Tableau II.2 :	Types de polymères utilisés pour PMB.....	27
Tableau IV 1 :	Spécification des bitumes purs.....	49
Tableau IV 2 :	Spécification physico-chimique du SBS.....	50
Tableau V.1 :	Résultats de pénétrabilité des bitumes – SBS (BMP).....	65
Tableau V.2 :	Résultats de point de ramollissement (TBA) des bitumes – SBS (BMP)....	67
Tableau V-3 :	Résultats de retour élastique des bitumes – SBS (BMP).....	69
Tableau V-4 :	Résultats de stabilité au stockage des bitumes – SBS (BMP).....	71

LISTE DES ABREVEATIONS

H/C : Rapport atomique Hydrogène/Carbone

PH : Potentiel Hydrogène

DSR : le rhéomètre dynamique à cisaillement

BBR : le rhéomètre à faisceau de flexion

DTT : l'essai de traction directe

BMP : Bitume Modifié par Polymère

ADN : Acide Désoxyribonucléique

NR : Natural Rubber / Caoutchouc naturel

IR : Isoprène Rubber / Polyisoprène

SBR : Styrene-Butadiene Rubber / Copolymère de styrène et de butadiène

CR : Chloroprene Rubber / Polychloroprène

NBR : Nitrile Butadiene Rubber / Copolymère d'acrylonitrile et de butadiène

TPE : Elastomères thermoplastiques

Tg : Température de transition vitreuse

Tf : Température de fusion

DVD : Digital Versatile Disc

EVA : Éthylène Acétate de Vinyle

EMA : Éthylène Méthacrylate

ABE : éthylène-butyle-acrylate

SBS : Styrène Butadiène Styrène

SIS : Styrène-Isoprène-Styrène

SEBS : Styrène Ethylène Butylène Styrène

PEBD : Polyéthylène basse densité

PEHD : Polyéthylène haut densité

PELBE : Polyéthylène linéaire basse densité

EVA : Ethylène-Vinyle-Acétate

EBA : Ethylène-Butyle-Acrylate

PB : Polybutadiène

SiCl₄ : tétrachlorure de silicium

BuLi : Butyl-Lithium

PPa : Polypropylène atactique

PPI : Polypropylène isotactique

PPA : acides poly phosphoriques

TBA : Température de bille et anneau

LTP-E : Laboratoire des Travaux Publics de l'Est

RE : Retour Élastique

SOMMAIRE

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	I
DEDICACES.....	II
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAU.	VIII
LISTE DES ABREVIATIONS.....	IX
SOMMAIRE.....	XI
INTRODUCTION GENERALE	1

Chapitre I : Généralité sur les bitumes

I-1 Introduction.....	3
I-2 Définition du bitume.....	4
I-3 Origine et fabrication du bitume.....	5
I-3.1 Distillation.....	5
I-3.1.1 Distillation atmosphérique.....	6
I-3.1.2 Distillation sous vide.....	6
I-3.2 Soufflage.....	6
I-3.3 Désalphaltage.....	6
I-3.4 Craquage.....	7
I-4. Structure et composition chimique du bitume.....	7
I-4.1. Structure des bitumes.....	7
I-4.1.1 Asphaltènes.....	7
I-4.1.2 Maltènes.....	8
I-4.2 Composition chimique des bitumes.....	10
I-5 Différents types de bitumes.....	12
I-5.1 Bitumes purs.....	12
I-5.2 Cut-backs.....	12
I-5.3 Émulsions.....	12
I-6 Propriétés des bitumes.....	12
I-6.1 Réactivité.....	13
I-6.2 Cohésion.....	13

I-6.3 Viscoélasticité.....	13
I.6.4 Adhésion.....	14
I-6.5 Vieillissement du bitume.....	14
I-7 Applications du bitume.....	14
I-7.1 Applications routières.....	14
I-7.2 Applications hydrauliques.....	15
I-7.3 Applications industrielles.....	15
I-8 Comportement des bitumes purs.....	15
I-9 Conclusion	16

Chapitre II : Les polymères et polymère SBS

II-1 Introduction	17
II-2 Définition.....	17
II-3 Structure des polymères.....	18
II-3.1 Polymères linéaires.....	18
II-3.2 Polymères ramifiés.....	19
II-3.3 Polymères réticulés.....	19
II-4 Les différentes classes des polymères	20
II-4.1 Classification selon l'origine.....	20
II-4.2 Classification selon la structure.....	21
II-4.3 Classification selon le comportement thermique	22
II-4.4 Classification selon le comportement physique	23
II-5 Domaine d'utilisation	24
II-6 Les polymères utilisés pour modifier le bitume	25
II-6.1 Polymères thermoplastiques	25
II-6.2 Elastomères thermoplastiques.....	25
II-6.3 Caoutchouc naturel	26
II-6.4 Caoutchouc synthétique	26
II-7 Polymère SBS.....	27
II-7.1 Définition	27
II-7.2 Synthèse du SBS	28

II-7.3 Structure et propriété	28
II-7.4 Le rôle du SBS dans la modification des bitumes.....	30
II-8 Conclusion.....	30
 Chapitre III: Modification des bitumes par polymères	
III-1 Introduction	31
III-2 Principaux types bitumes-polymères.....	31
III-3 Types de polymères utilisés pour la modification des bitumes.....	32
III-3.1 Polymère thermoplastiques.....	32
III-3.2 Caoutchoucs naturels et synthétiques	32
III-3.3 Caoutchoucs thermoplastiques	33
III-3.4 Polymères thermodurcissables	34
III-4 Compatibilité des mélanges bitumes-polymères.....	35
III-5 Fabrication des bitumes modifiés avec polymères.....	36
III-6 Stockage des bitumes modifiés par les polymères.....	37
III-7 Objectif de modification	38
III-8 Mécanisme de modification des bitumes modifiés polymères.....	39
III-9 Domaine d'utilisation	40
III-10 Etude avancée sur les bitumes modifiés hybrides	41
III-10.1 Définition des bitumes modifiés hybrides	41
III-10.2 Composition et rôle des additifs dans les bitumes modifiés hybrides	41
III-10.2.1 Polymères	42
III-10.2.2 Additifs chimiques (le soufre dans les bitumes modifiés)	42
III-10.2.3 Charges et matériaux secondaires	43
III-10.3 Procédés de fabrication des bitumes modifiés hybrides	43
III-10.3.1 Préparation du bitume de base	43
III-10.3.2 Incorporation des polymères.....	43
III-10.3.3 Ajout des additifs chimiques.....	43
III-10.3.4 Ajout des charges et matériaux secondaires	44
III-10.3.5 Homogénéisation finale.....	44
III-10.3.6 Refroidissement et stockage	44

III-10.4	Propriétés et performances des bitumes modifiés hybrides.....	44
III-10.4.1	Propriétés rhéologiques	44
III-10.4.2	Propriétés mécaniques	45
III-10.4.3	Propriétés thermiques	45
III-10.4.4	Élasticité et retour élastique	45
III-10.4.5	Stabilité au stockage	45
III-10.4.6	Durabilité globale	46
III-11	Tendance actuelle	46
III-11.1	Passage des systèmes simples vers les systèmes hybrides.....	46
III-11.2	Développement des formulations à haute performance	47
III-11.3	Utilisation croissante des matériaux recyclés	47
III-11.4	Optimisation des additifs chimiques.....	47
III-11.5	Approche basée sur la performance (Performance-Based Design)	47
III-11.6	Développement durable et économie circulaire	48
III-12	Conclusion.....	48
Chapitre IV: Matériaux et méthodes expérimentales		
IV-1	Introduction	49
IV-2	Matériaux	49
IV-2.1	Les bitumes purs.....	49
IV-2.2	Le polymère (SBS)	50
IV-3	Préparation des mélanges bitume modifié par polymère (BMP)	50
IV-4	Techniques de caractérisation	51
IV-4.1	Essai de pénétrabilité	51
IV-4.2	Température de ramollissement par bille et anneau	52
IV-4.3	Essai de densité relative (méthode du pycnomètre)	55
IV-4.4	Température de fragilité frass	56
IV-4.5	Ductilité à 25°C	56
IV-4.6	Essai de retour élastique	57
IV-4.7	Stabilité de stockage.....	60
IV-5	Conclusion.....	63

Chapitre V: Résultats et discussions

V-1	Introduction	64
V-2	Caractérisation des bitumes modifiés par polymères	64
V-2.1	Pénétrabilité	64
V-2.2	Point de ramollissement (TBA)	66
V-2.3	Retour élastique	68
V-2.4	Stabilité au stockage	70
V-3	Conclusion.....	73

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

Récemment, la demande croissante de bitume de qualité supérieure vise à satisfaire les exigences de durabilité et de qualité des routes. Dans l'optique d'améliorer la qualité, de nombreuses recherches se sont orientées vers la transformation du bitume [1].

Naturellement disponible comme un sous-produit du raffinement du pétrole brut, le bitume est utilisé principalement dans la construction routière. Il est également employé comme agent liant dans les processus de pavage et d'étanchéité.

Cependant, l'efficacité du bitume à une certaine température est limitée dans les climats plus chauds ou plus froids, ce qui peut conduire à l'apparition de sillons sur les routes ou à l'égouttement sur les toits et les ponts. Pour minimiser la fissuration due aux contraintes à basse température et la déformation irréversible à haute température de service, il est essentiel d'améliorer la qualité du liant bitumineux.

L'attrait pour les bitumes modifiés dans la construction routière a connu une progression rapide au fil des années. On a eu recours à diverses méthodes et techniques pour prolonger la durée de vie des routes. L'approche la plus couramment employée consiste à modifier les matériaux par le biais de polymères. Des recherches ont prouvé que les polymères de synthèse peuvent être utilisés pour renforcer les caractéristiques thermiques et mécaniques du bitume [2, 3].

L'intégration et la dispersion adéquate d'un polymère, communément appelé bitume modifié par des polymères (BMP), dans la matrice bitumineuse reposent sur des interactions physiques ou des liaisons chimiques [1].

Durant les quatre dernières décennies, le BMP a suscité un intérêt croissant chez les chercheurs, et depuis les années 1970, des travaux de recherche ont régulièrement vu le jour dans ce domaine. Les plastomères [2] (tels que le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), l'éthylène-acétate de vinyle (EVA), l'éthylène-acrylate de butyle (EBA)) et les élastomères thermoplastiques (par exemple, le styrène-butadiène-styrène (SBS), le styrène-isoprène-styrène (SIS), et le styrène-éthylène/butylène-styrène (SEBS)) constituent le groupe de polymères étudiés. Leur objectif initial était de servir à la modification du bitume.

Il a été prouvé que ces polymères pouvaient apporter une certaine amélioration aux propriétés du bitume, comme l'augmentation de sa rigidité à haute température, une meilleure résistance aux fissures à basse température, une plus grande résilience face à

l'humidité et une durée de vie prolongée sous sollicitation alternée. Bien qu'ils aient des points forts, les polymères mentionnés ont aussi des désavantages qui restreignent leur application à une échelle industrielle. Par exemple, un défi majeur de l'emploi du SBS est la séparation de phases à des températures qui sont nécessaires pour le stockage du bitume [4].

Les chercheurs doivent également découvrir des techniques pour diminuer la réactivité de certains bitumes polymères modifiés aux hautes températures. Les travaux visent également à améliorer la stabilité en entreposage, à diminuer les coûts de fabrication, à renforcer la résistance à l'âge, et à améliorer la tenue à l'abrasion [5].

Dans ce cadre, notre étude intitulée « L'influence de la composition en SBS sur les caractéristiques du bitume », examine la combinaison de bitume pur avec un copolymère de styrène-butadiène-styrène (SBS) à diverses proportions, et son impact sur les propriétés physico-mécaniques du bitume.

Par conséquent, cette étude est structurée en cinq chapitres, que voici :

Chapitre I : généralités sur les bitumes.

Chapitre II : sur les polymères et le polymère SBS.

Chapitre III : présente les modifications des bitumes par polymère.

Chapitre IV : décrit les matériels et méthodes employées pour la préparation et la caractérisation du bitume modifié aux polymères. Il expose les différentes méthodes adoptées dans cette recherche ainsi que les procédés d'essai appliqués au bitume pur et au bitume modifié. La caractérisation des liants a été réalisée en se basant sur les tests de pénétrabilité, le point de ramollissement, les tests de retour élastique et les tests de stabilité lors du stockage.

Chapitre V : présente les résultats des expériences avec l'analyse qui considère l'impact de l'inflation du pourcentage en SBS sur les caractéristiques des bitumes (pénétrabilité, TBA, Retour élastique, stabilité au stockage).

Pour finir, nous concluons le travail avec une conclusion globale qui synthétise les données clés de cette étude et présente diverses pistes pour le perfectionnement et l'utilisation des bitumes modifiés polymères.

CHAPITRE I :
GENERALITE SUR
LES BITUMES

I-1 Introduction

Le bitume, connu pour certaines de ses caractéristiques depuis des milliers d'années [5], était exploité par les Égyptiens dans le cadre de la construction, de l'imperméabilisation et de la modification. De nos jours, on le perçoit comme un matériau thermoplastique dont les principaux atouts sont l'abondance et le coût modique. Il est employé dans divers secteurs tels que les toitures et le pavage [6].

Initialement, le mot « bitume » en français fait référence à un produit issu du pétrole qui peut se trouver de manière naturelle sous forme de suintante dans des pays comme le Mexique et le Venezuela, ou sous forme d'accumulation ou d'imprégnation dans certaines roches poreuses, comme à Madagascar et Pont-du-Château en France. À l'origine, le terme « asphalte » désignait des roches calcaires qui contenaient généralement entre 8 et 10 % de bitume, voire plus. Donc, le bitume et l'asphalte sont des produits naturels liés au pétrole. De nos jours, l'usage des bitumes et asphaltes naturels est peu fréquent, sauf dans certains cas pour enrichir le bitume qui est désormais extrait par le raffinage du pétrole.

Les liants hydrocarbonés sont des matières essentiellement constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène qui, lorsqu'elles interagissent avec des particules solides telles que les granulats, génèrent des forces d'adhésion et de cohésion. Cela confère une rigidité certaine et une résistance à la déformation en traction.

On identifie trois types de liants à base d'hydrocarbures : les liants naturels, les goudrons et les bitumes. À l'heure actuelle, le bitume, un mélange complexe de composés hydrocarbonés provenant pour la plupart et presque exclusivement de la transformation du pétrole brut [7].

Ce chapitre présente une revue détaillée de la littérature concernant les bitumes : leur définition, leur provenance et les méthodes de fabrication principales ; leur composition chimique et structure, ainsi que les différents types de bitume.

I-2 Définition du bitume

À température ambiante, le bitume est un matériau hautement visqueux, avec des viscosités variant de 10^5 - 10^6 Pa.s en fonction de sa provenance [8].

Les bitumes sont des matières naturelles ou issues du raffinage du pétrole brut. Les dépôts naturels de bitume se composent d'une combinaison de bitume et de minéraux finement divisés [9,10].

- Couleur noire
- Imperméabilité à l'eau
- Susceptibilité à la température
- Inertie chimique
- Pouvoir d'adhésion et de rétention

Le bitume est un dérivé des hydrocarbures lourds, un résidu noir issu du pétrole brut obtenu par distillation naturelle ou en raffinerie. Les bitumes issus de la distillation directe sont principalement utilisés pour produire des enrobés à chaud [7].

La composition chimique du bitume reste encore assez obscure. Cette ignorance est le résultat de la complexité élevée de l'assemblage de molécules organiques et inorganiques qui constituent ce matériau [6], on s'accorde généralement à dire que le bitume contient une diversité presque illimitée de molécules organiques et inorganiques, et que chaque type de pétrole brut détient ses propres propriétés chimiques et physiques [11]. Il est cependant possible de repérer certaines propriétés partagées par tous les bitumes.



Figure I.1: Bitume [12].

I-3 Origine et fabrication du bitume

Le bitume contemporain provient de la distillation du pétrole brut, qui est lui-même constitué d'une variété d'hydrocarbures. Au cours du processus de raffinage, le brut est initialement réchauffé par des échangeurs thermiques avant d'entamer la première distillation durant laquelle les hydrocarbures légers tels que l'essence et le kérosène sont extraits. Ainsi, le bitume est présent dans la fraction résiduelle de ce processus de distillation. Ce résidu est

parfois utilisé directement comme combustible, mais pour produire le bitume, d'autres procédés sont nécessaires. Les raffineries ont généralement recours à trois techniques pour produire divers types de bitume : la distillation, la distillation sous vide et l'extraction par solvant. Il n'y a que quelques grades de bitume qui sont fabriqués, tandis que les grades intermédiaires sont réalisés en mélangeant ces différents grades.

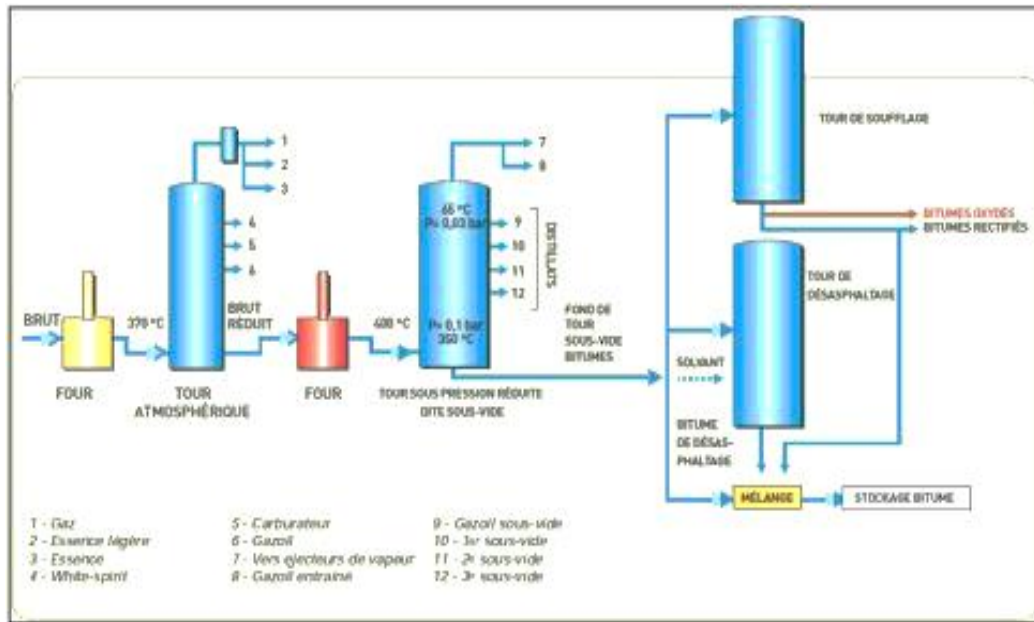


Figure I.2 : Schéma représentant la fabrication des bitumes par raffinage du pétrole [12,13].

I-3.1 Distillation

C'est le processus physique d'évaporation des éléments volatils pour la production de bitume, dans lequel la phase gazeuse est supprimée et condensée, restant à la base de la colonne de bitume. Elle s'effectue en deux phases [14].

I-3.1.1 Distillation atmosphérique

L'étape de distillation atmosphérique joue un rôle crucial dans le processus de raffinage du pétrole brut. Elle facilite la division des divers hydrocarbures présents dans le brut en fractions, qui peuvent être exploitées pour diverses utilisations comme le kérosène, l'asphalte ou le bitume. La séparation des éléments se fait selon leur volatilité. La vapeur est par la suite retirée et condensée, ce qui laisse la portion plus lourde se déposer au fond de la colonne. Il s'agit du résidu de distillation à pression atmosphérique, aussi désigné sous le nom de fioul lourd [14].

I-3.1.2 Distillation sous vide

Il s'agit d'un processus qui cherche à séparer les produits lourds des résidus de produits de moyenne densité en les soumettant à une seconde phase de distillation. Cette méthode de séparation s'appuie sur les principes identiques à ceux de la distillation atmosphérique, mais elle se réalise dans une colonne plus compacte et hermétiquement fermée, avec une pression diminuée. Effectivement, en réduisant la pression, la température d'ébullition des produits baisse, facilitant ainsi l'évaporation des produits lourds et leur récupération. De ce fait, le gazole est extrait du haut de la colonne tandis que le fioul lourd est récupéré à sa base. Les résidus issus de cette distillation à basse pression sont par la suite employés pour la fabrication de lubrifiants [14].

I-3.2 Soufflage

Les bitumes oxydés ou bitumes soufflés, destinés à des applications industrielles, sont produits par l'introduction d'air dans le résidu de la distillation sous vide à une température généralement élevée (environ 280°C). Le but principal de cette méthode de production est l'amélioration des propriétés du bitume [14].

I-3.3 Désalphaltage

On recourt à cette méthode quand les résidus issus de la distillation à basse pression contiennent un volume important de fractions lubrifiantes. Cela implique le passage d'un flux ascendant de solvant à travers le résidu sous vide, facilitant donc la dissolution des fractions bitumineuses qui sont ensuite collectées. L'écart de solubilité entre les diverses fractions facilite le choix du solvant adéquat pour obtenir la sorte de bitume souhaitée [14].

I-3.4 Craquage

C'est un processus de raffinage visant à convertir, en présence d'un catalyseur, les longues chaînes d'hydrocarbures lourds en hydrocarbures légers destinés à la production de carburant. Il convient de noter qu'à des températures élevées (450 à 550°C) et sous pression atmosphérique, les grandes molécules d'hydrocarbures sont décomposées pour former de petites molécules ayant un indice d'octane élevé [7].

I-4. Structure et composition chimique du bitume

I-4.1. Structure des bitumes

Le bitume est une combinaison complexe de divers hydrocarbures qui peuvent être répartis en deux catégories :

I-4.1.1. Asphaltènes

Il s'agit de solides qui se précipitent dans un pétrole brut ou du bitume suite à l'ajout d'un solvant tel que l'heptane ou le pentane. Ils constituent généralement entre 5 et 30 % du bitume. Il s'agit de composés ayant une structure condensée, cyclique et aromatique [15].

Les asphaltènes apparaissent comme des solides noirs et friables, quasiment non solubles. Selon la méthode employée, leur masse moléculaire peut varier de 800 à 300 000 g/mol. Les Asphaltées sont composées de carbone et d'hydrogène, présentant un rapport H/C habituellement de 1,1 [16].

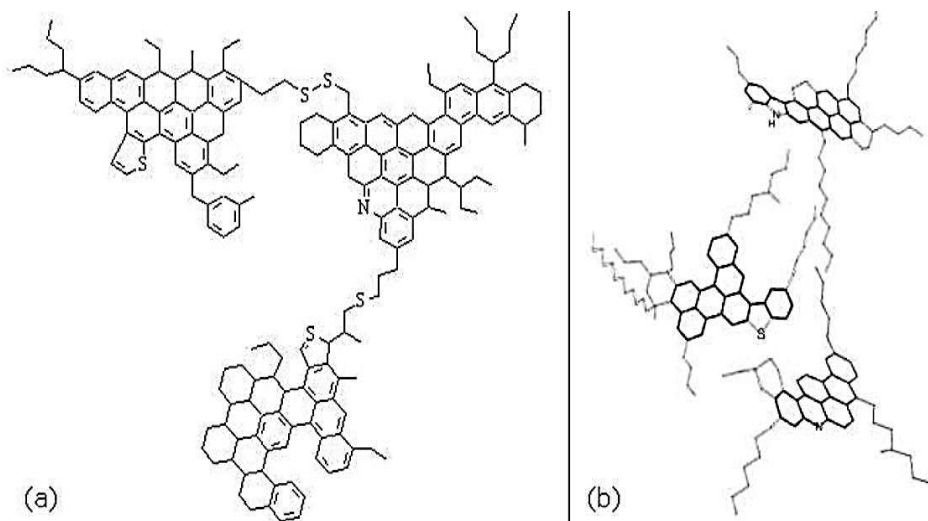


Figure I.3: Structure hypothétique des asphaltènes des bitumes, a) : d'après Yen, b) : d'après Groenzin et Mullins [17].

I-4.1.2 Maltènes

Les molécules plus légères que les asphaltènes forment un produit huileux dans lequel ces dernières sont en suspension. Grâce à la chromatographie liquide, il est possible de diviser les maltènes en trois sous-catégories d'hydrocarbures en fonction de leur polarité croissante : saturés, aromatiques et résines [18].

(a) Saturés

Il s'agit d'huiles presque transparentes ou légèrement teintées de jaune, composées principalement de molécules paraffiniques et cycliques naphténiques. Elles constituent généralement moins de 10% du bitume. Le ratio atomique de carbone à hydrogène est de 0,5. La composition des différentes familles est déterminée par la source du brut et le procédé de fabrication. D'une manière significative, cela dépend de la méthode de séparation, de la qualité et du degré de vieillissement du bitume [19].

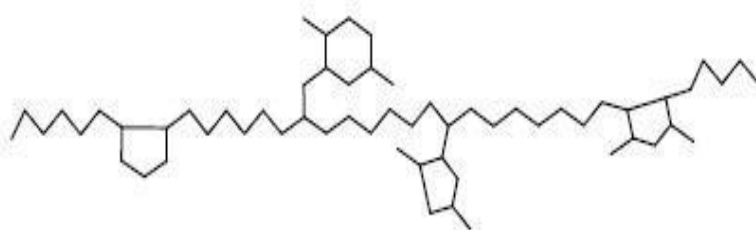


Figure I.4: Structure pour la fraction saturée des bitumes [19].

(b) Aromatiques

Il s'agit d'huiles visqueuses de teinte rouge-brun foncé, contenant 30% de leurs atomes de carbone dans des cycles aromatiques. Elles constituent de 50 à 70% de la composition d'un bitume. Leur masse moléculaire se situe dans la même gamme que celle des composés saturés [7].

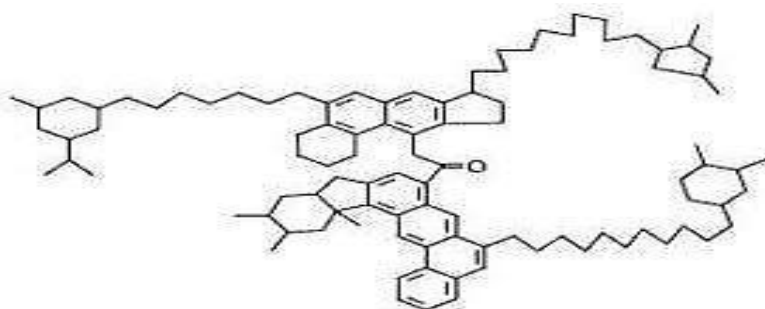


Figure I.5: Structure pour la fraction aromatique des bitumes [19].

(c) Résines

Elles possèdent indéniablement un caractère plus marqué sur le plan aromatique. Le schéma des résines est nettement plus compliqué (Figure I.6) que celui des huiles et leur poids moléculaire moyen est supérieur. Les résines jouent un rôle crucial en ce qui concerne

la stabilité colloïdale du bitume. Elles jouent un rôle de tensioactif qui favorise la stabilisation de la dispersion d'asphaltènes dans une matrice maltène [20].

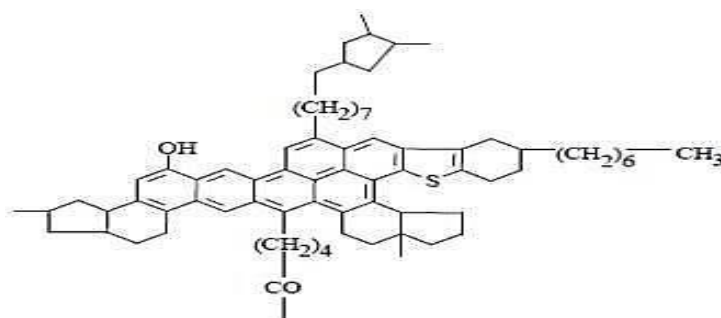


Figure I.6: Structure pour la fraction des résines des bitumes [15].

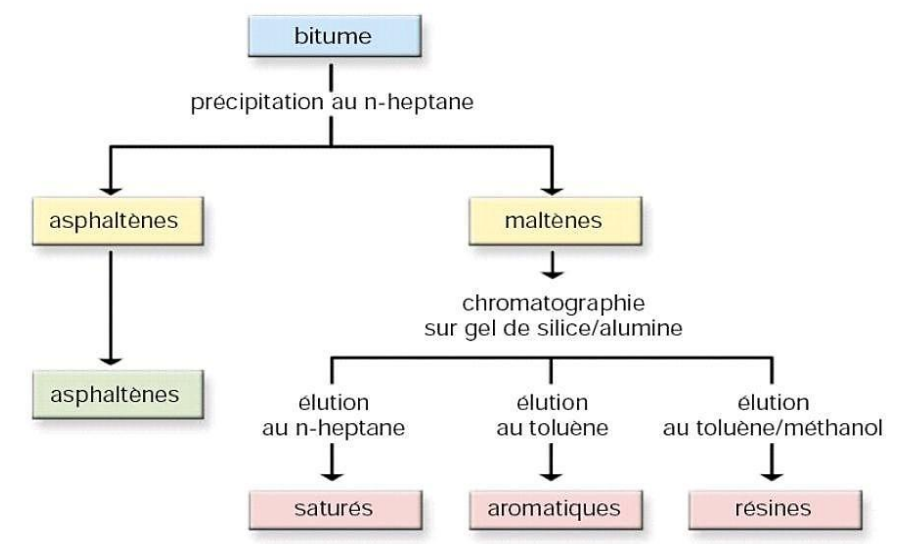


Figure I.7: Schéma de séparation chimique des constituants du bitume [21].

En procédant à la précipitation de l'heptane normal, on obtient les asphaltènes, qui sont insolubles. À température ambiante, les asphaltènes apparaissent comme un matériau solide, noir et friable, avec un point de ramollissement élevé. Plus le bitume est dur, plus le taux d'asphaltènes sera élevé.

Les maltènes, qui sont d'apparence huileuse et se dissolvent dans l'heptane, peuvent être divisés en trois phases lors de leur passage sur une colonne chromatographique :

- Une première extraction à l'heptane normal permet de récupérer les huiles saturées.
- Une seconde élution avec du toluène permet de récupérer les huiles aromatiques et naphthéno-aromatiques.
- Une troisième élution en utilisant un mélange de toluène et de méthanol facilite l'extraction des résines.

I-4.2. Composition chimique des bitumes

Le tableau I.1 représente les éléments composant le bitume avec leur concentration

Tableau I.1: Analyse élémentaire des bitumes issus du traitement du brut pétrolier [20].

Eléments	Concentration en % en masse
Carbone	82-88
Hydrogène	8-11
Soufre	0-6
Oxygène	0-1.5
Azote	0-1
Ainsi que des traces de nombreux métaux	

Les bitumes contiennent également des traces de métaux tels que le vanadium (10-2000 ppm) et le nickel (20-200 ppm), mais aussi de l'aluminium, du silicium, du chrome, du cuivre, du zinc, du plomb, entre autres. Les composés de bitume sont constitués de structures hydrocarbonées réparties en quatre catégories listées dans le tableau I.2. Cependant, il est peu courant de trouver des molécules formées exclusivement d'un seul motif.

Tableau I.2: Motifs hydrocarbonés composant la molécule de bitume [7].

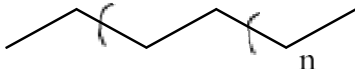
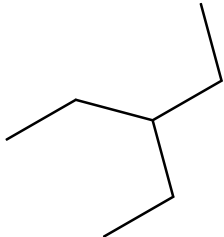
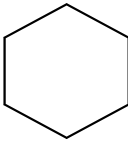
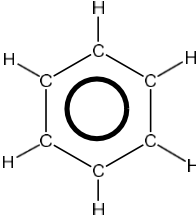
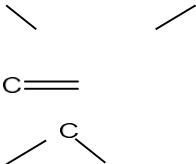
Paraffiniques saturés linéaires ou ramifiés (chaînes linéaires sans cycle)	Chaines linéaires  Ramifiées 
Naphténiques saturés cycliques (cycles à liaisons simples)	
Aromatiques: présence d'au moins un cycle avec doubles liaisons de type benzène	 Benzène
Oléfines : chaînes contenant une ou plusieurs doubles liaisons	

Tableau I.3: Composition chimique (bitumes 40/50) selon certains chercheurs algériens [22].

Bitume	Saturés (%)	Aromatiques (%)	Résines (%)	Asphaltènes (%)
40/50	10.97 à 19.0	30.40 à 50.19	20.41 à 30.50	17.91 à 35.55

I-5 Différents types de bitumes

I-5.1 Bitumes purs

En fonction de leur processus de fabrication, on peut produire des bitumes à consistance variable. Cette consistance est mesurée par le test de pénétration. Il y a plusieurs classes distinctes [23] :

- Bitumes très durs (20/30)
- Bitumes durs (35/50)
- Bitumes semi-durs (50/70)
- Bitumes semi-mous (70/100)
- Bitumes mous (160/220)
- Bitumes très mous (300/350).

I-5.2 Cut-backs

Il s'agit de bitumes fluidifiés, obtenus par l'association du bitume soit avec des fractions légères issues de la distillation du pétrole comme le kérosène, soit avec des huiles légères ou plus fréquemment moyennes, dérivées de la distillation de la houille dans le but de diminuer leur viscosité. Cette méthode offre notamment la possibilité de les exploiter à une température considérablement inférieure à celle requise pour l'application du bitume pur [23].

I-5.3 Émulsions

Les émulsions de bitume se définissent comme des dispersions de petites particules de bitume dans l'eau, généralement réalisées à l'aide d'un agent émulsifiant qui est une forme de savon résineux assurant la stabilité du produit. Les émulsions suppriment les risques d'incendie et l'impact toxique. Les cutbacks ne font pas exception à cette règle [23].

I-6 Propriétés des bitumes

Le bitume a été retenu comme matière première clé dans la construction routière en raison de sa flexibilité, de ses qualités d'adhésion, de plasticité, d'élasticité, d'insolubilité dans l'eau et de résistance à divers agents chimiques [24,16].

I-6.1 Réactivité

Habituellement, le bitume est chimiquement inerte face à la majorité des composés hydrocarbonés ; cependant, les composés aromatiques peuvent interagir notamment avec l'oxygène. Ce type de réaction est d'ailleurs utilisé pour préparer les bitumes soufflés ou oxydés. En plus des réactions d'oxydation, des réactions de condensation peuvent se produire à des températures au-dessus de 160°C en présence de H₂S.

I-6.2 Cohésion

Même sous des conditions spécifiques appliquées à la route, l'asphalte ne se décompose pas. La capacité du bitume à s'écouler lentement dans l'enrober, plutôt qu'à se briser, est due à sa ductilité, tandis que sa ténacité garantit une résistance adéquate face aux tensions de traction.

I-6.3 Viscoélasticité

Le bitume ne se classe ni comme un fluide newtonien, ni comme un solide élastique ; son comportement est intermédiaire et dépend de la température et de la charge appliquée. Le bitume, grâce à sa viscoélasticité, possède des caractéristiques mécaniques de flexibilité et de rigidité. De façon simplifiée, le bitume peut être perçu comme un solide ou un liquide visqueux à haute température (> 80°C), un liquide ou un solide viscoélastique de 0°C à 80°C, et un solide élastique fragile à basse température (<0°C). La Fig I.8 résume le comportement du bitume en fonction de la température [24].

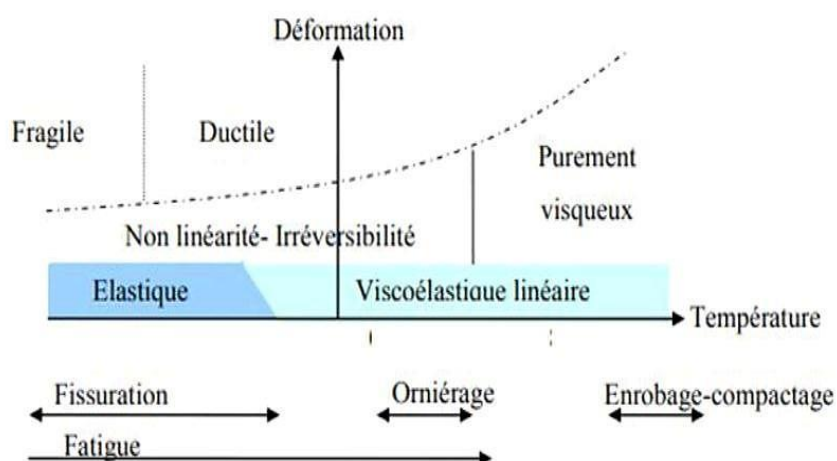


Figure I.8 Classe de comportement du bitume en fonction de la température [24].

I-6.4 Adhésion

Le bitume possède d'excellentes propriétés adhésives dans des conditions propices. Des éléments externes comme les précipitations, le taux d'humidité, le pH de l'eau, la saleté, la résistance, les surfaces, l'absorption, le niveau d'humidité, la forme et les aléas climatiques peuvent fortement impacter cette procédure. Toutefois, lorsque de l'eau est présente, l'adhérence ne pose pas de problèmes. La majorité des granulats employés dans l'édification des routes ont une charge négative peu élevée à la surface.

La faible force de dispersion est responsable de l'adhérence des granulats de bitume. L'eau étant très polaire, elle se fixe fermement à l'agrégat, déplaçant ainsi le revêtement bitumineux [16].

I-6.5 Vieillissement du bitume

On distingue le vieillissement réversible et le vieillissement irréversible. L'oxydation au niveau moléculaire est généralement liée au processus irréversible de vieillissement. Avec le temps, cette oxydation renforce la viscosité du bitume. L'effet de l'organisation moléculaire est généralement lié au phénomène du vieillissement réversible. Avec le temps, les molécules de bitume se repositionneront progressivement elles-mêmes dans un système plus compact et davantage lié. Cela donne lieu à un matériau plus rigide. On peut renverser ce vieillissement en chauffant et en agitant.

On ne mesure pas directement le vieillissement du bitume ; au contraire, on évalue les effets du vieillissement en exposant des échantillons de bitume à un vieillissement simulé, suivi de tests physiques standard comme la viscosité, le rhéomètre dynamique à cisaillement (DSR), le rhéomètre à faisceau de flexion (BBR) et l'essai de traction directe (DTT) [16].

I-7 Applications du bitume**I-7.1 Applications routières**

La plupart des bitumes sont employés dans la construction routière, grâce à leurs caractéristiques viscoélastiques qui influencent le comportement mécanique de la structure de la chaussée. Il offre également une étanchéité grâce à sa résistance à la majorité des produits chimiques courants, notamment l'eau. On fait appel aux bitumes non modifiés, aux bitumes fluides et fluxés, sans oublier les émulsions [25, 26].

I-7.2 Applications hydrauliques

Depuis l'Antiquité la plus reculée, les qualités du bitume en termes d'imperméabilité sont reconnues. Des structures hydrauliques à base de bitume datant de 3000 ans, comme les digues du Tigre situées à Assur en Mésopotamie, sont encore visibles aujourd'hui et demeurent en bon état.

Dans le domaine hydraulique, les bitumes peuvent être employés sous forme pure ou comme membranes bitumineuses préfabriquées, d'asphalte coulé ou encore en revêtement étanche pour l'intérieur des barrages et pour les canaux [25].

I-7.3 Applications industrielles

Le bitume est utilisé de multiples façons dans l'industrie, pas seulement pour la construction de routes et l'hydraulique. On fait fréquemment appel à des produits particuliers [26] pour les bâtiments, les ouvrages d'art et les trottoirs ; l'isolation thermique et acoustique des bâtiments ; les peintures, encres et vernis ; le secteur du caoutchouc (qui favorise le démoulage) ; Application de revêtement sur le papier d'emballage (pour son étanchéité) ...

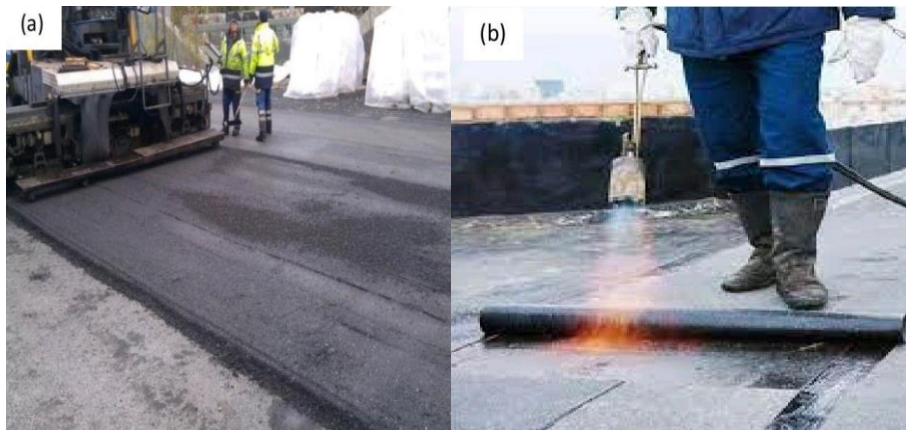


Figure I.9 :(a) Béton bitumineux à l'émulsion (b) isolation bâtiment (**photo original**)

I-8. Comportement des bitumes purs

Le graphique I.10 facilite l'identification des principaux comportements des bitumes selon l'amplitude de la déformation $|\epsilon|$ et la température T , pour une vitesse de déformation déterminée. On identifie [27] :

- Les zones fragiles et ductiles, où l'on peut évaluer la résistance à la traction σ_p ;
- La rupture fragile, qui peut être définie par la ténacité K_c ou l'énergie de rupture G_c (Rupture Linéaire Mécanique).
- Le comportement élastique linéaire, défini par les modules E et G ,

- Le domaine viscoélastique linéaire, défini par les modules complexes E^* et G^* ;
- Le comportement purement visqueux (Newtonien), déterminé par la viscosité η ;
- Pour des déformations d'environ quelques pourcents, le domaine ou le comportement se révèle fortement non linéaire.

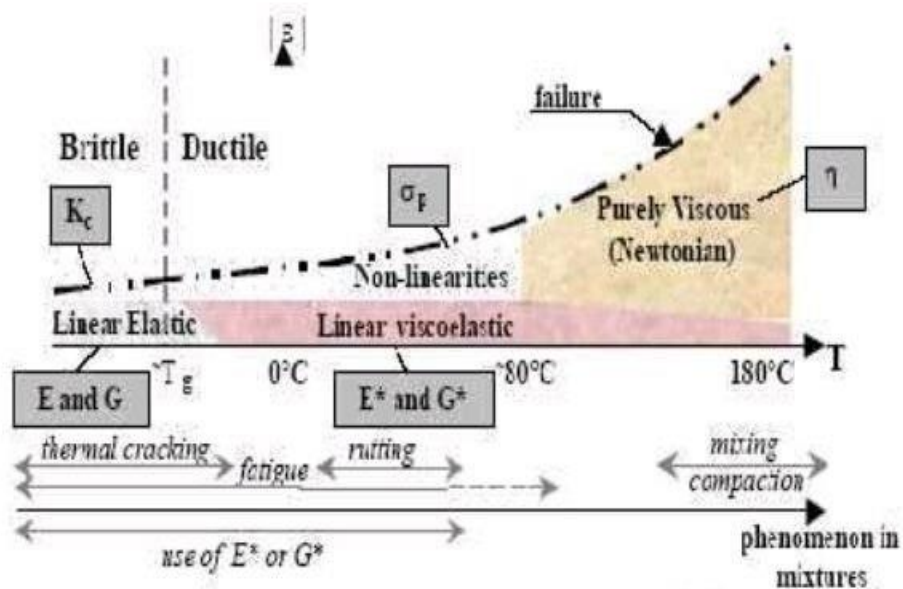


Figure I. 10 : Classes de comportement des bitumes en fonction de $|\epsilon|$ et T [27].

I-9. Conclusion

Il est établi que le bitume est un matériau viscoélastique et une combinaison complexe d'hydrocarbures. Il y a diverses formes de bitume et sa composition change en fonction de sa provenance et du processus de production. On remplace le bitume pur par divers additifs afin d'optimiser ses caractéristiques d'utilisation, en particulier avec des polymères.

CHAPITRE II :
LES POLYMERES
ET POLYMES SBS

II-1 Introduction

Afin de réduire l'usure des revêtements routiers, manifestée par les phénomènes d'orniérage et de désenrobage, causés par les conditions climatiques et l'intensité croissante du trafic, plusieurs nations ont alloué une importante. L'accent est mis sur l'utilisation de bitume modifié pour obtenir un produit plus robuste et plus pérenne, entraînant ainsi une réduction des coûts d'entretien et des dépenses. Hélas, notre pays n'est pas dans ce cas et est encore loin d'appliquer une politique de récupération des déchets industriels [28].

II-2 Définition

Un polymère est défini comme une molécule de grande taille composée d'unités élémentaires nommées monomères (ou motifs monomères) reliées par des liaisons covalentes [29]. Ces unités sont généralement organisées en un matériau constitué de la répétition massive de petites molécules à faible masse moléculaire, appelées monomères, qui sont liées entre elles par des connexions primaires. Le monomère est considéré comme une molécule fondamentale [30].

La polymérisation est le processus d'assemblage des monomères pour former des polymères (Fig II .1).

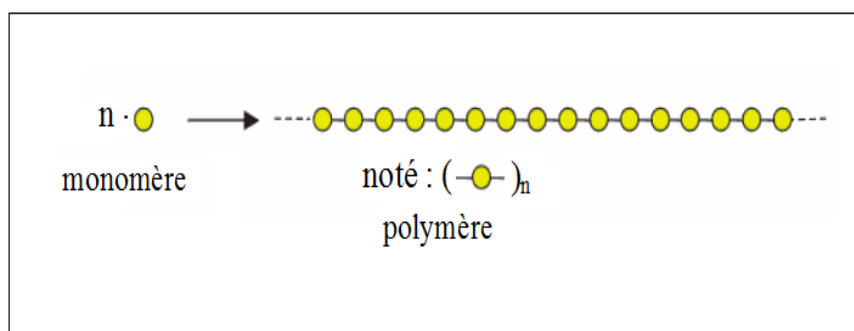


Figure II.1 : Schématisation de la synthèse d'un polymère [30].

On désigne la lettre n par « degré de polymérisation » ou « indice de polymérisation ». Lorsque n prend des valeurs élevées ($n > 100$), on fait référence à des macromolécules. On peut caractériser le polymère en fonction de son degré de polymérisation ou de sa masse moléculaire [30].

Les polymères peuvent provenir de sources naturelles (animales ou végétales) ou être de nature synthétique. Par exemple, les macromolécules naturelles incluent le caoutchouc, les polysaccharides, le glycogène, l'ADN, les protéines, etc., tandis que les macromolécules

synthétiques sont représentées par des matériaux tels que le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polychlorure de vinyle, le polytétrafluoroéthylène, les polyesters, les polycarbonates et les polysiloxanes [29].

II-3 Structure des polymères

Il est possible d'observer une grande diversité dans les architectures des polymères. Ils peuvent être de nature linéaire, ramifiée ou réticulée. Généralement, ils sont amorphes, bien qu'ils puissent parfois être, au moins en partie, cristallisés [29].

II-3.1 Polymères linéaires

Les polymères linéaires se composent de longues chaînes de monomères connectés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Ces macromolécules sont reliées entre elles par des liaisons secondaires, garantissant ainsi la stabilité du polymère. Cette évolution se produit à ce qu'on appelle la température de transition vitreuse. La transition vitreuse fait référence à l'émergence de mouvements de longs segments de chaîne et signale la transition de l'état vitreux vers l'état caoutchouteux. **La figure II .2** présente divers exemples de polymères à chaîne linéaire [29].

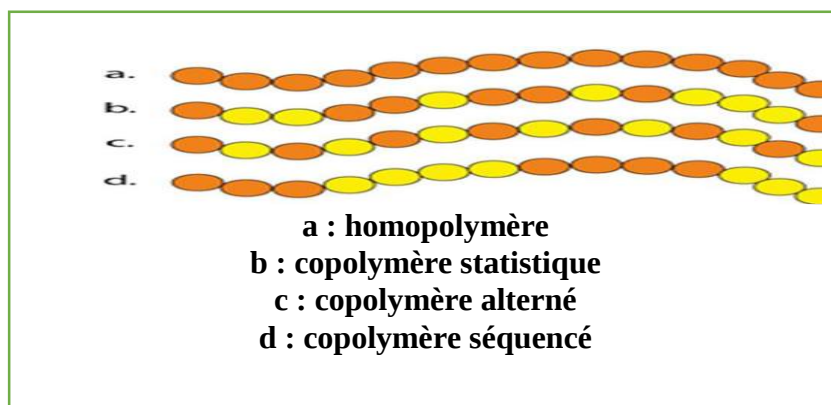


Fig II.2 : Polymères linéaires [29].

II-3.2 Polymères ramifiés

Au cours de la polymérisation, des chaînes homo-polymériques ou co-polymériques peuvent se fixer sur d'autres chaînes. Au-delà de la température de transition vitreuse, ces

matériaux manifesteront un comportement visqueux plus prononcé que les polymères linéaires [29].

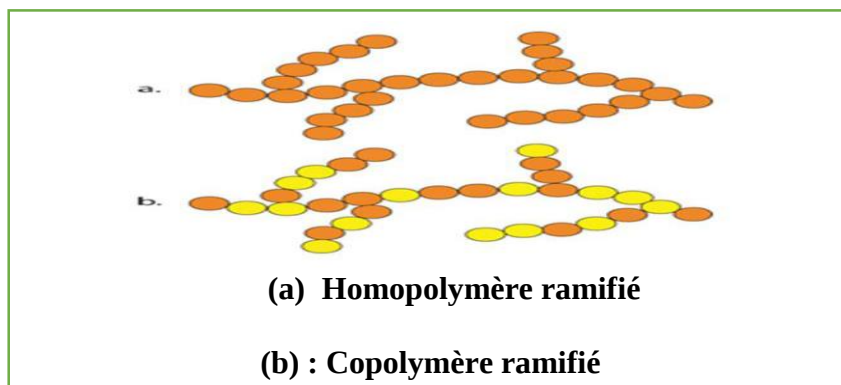


Fig II.3 : Polymères ramifiés [29].

II-3.3 Polymères réticulés

La réticulation se réfère à l'établissement de liaisons chimiques dans diverses directions de l'espace lors d'une polymérisation, d'une polycondensation ou d'une polyaddition, menant à la création d'un réseau [29].

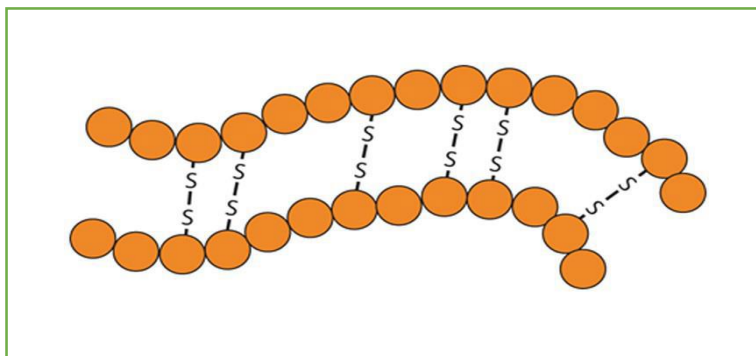


Fig II.4: Polymère réticulé avec ponts di-sulfure reliant deux chaînes [29].

II-4 Les différentes classes des polymères

On peut proposer diverses classifications des composés macromoléculaires en fonction du critère choisi, que ce soit l'origine, le genre d'architecture, la structure chimique des motifs ou les types de polymérisation utilisés comme fondement de la classification.

II-4.1 Classification selon l'origine

On peut classer les polymères en fonction de leur origine comme suit :

- **Polymères naturels** : On les extrait de plantes et d'animaux, tels que les polysaccharides, les protéines et les acides nucléiques. On les désigne aussi sous l'appellation de biopolymères. Ils sont habituellement biodégradables, tels que : acides nucléiques, protéines, caoutchouc naturel, laine et soie [31].



Figure II.5 Polymères naturels (caoutchouc naturel, coton, résine naturelle) [31].

- **Polymères semi-synthétiques** : On les appelle aussi polymères artificiels, car ils sont issus de la modification chimique de polymères naturels. Par exemple : le caoutchouc subit un processus de vulcanisation afin de produire un polymère de caoutchouc vulcanisé dérivé de la cellulose, tel que l'acétate de cellulose et le nitrate de cellulose, également semi-synthétiques [31].
- **Polymères synthétiques** : Il s'agit de polymères produits par l'homme. Ces derniers sont généralement dérivés du pétrole brut dont la fraction naphta est principalement convertie en éthylène, propylène et benzène par vapocraquage. C'est de ces gaz que provient la polymérisation des quatre principales catégories de polymères illustrées dans la Fig II.6 [31].

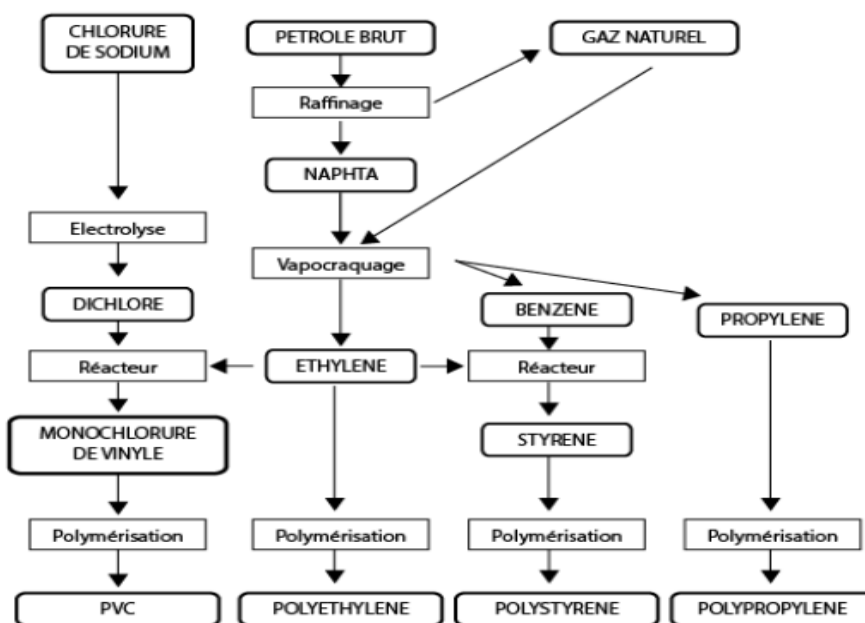


Fig II.6- Schéma représentant le processus de vapocraquage utilisé pour extraire des grands volumes de polymères synthétiques à partir du pétrole brut et du gaz naturel [31].

II-4.2 Classification selon la structure

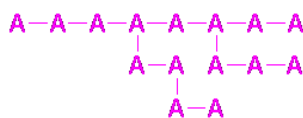
a) Les homopolymères

Les homopolymères sont des polymères caractérisés par la présence d'une unique unité de répétition. Comme l'indique la Fig II.7, plusieurs structures sont envisageables pour ces polymères [32].

a)



b)



c)

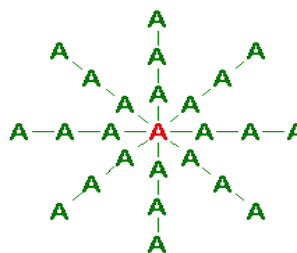


Fig II.7- Homopolymère (a) linéaire ; (b) greffé et (c) étoilé [32].

b) Les copolymères

Les copolymères sont des polymères comportant plusieurs unités récurrentes. À l'instar des homopolymères, les copolymères peuvent être répartis en diverses catégories (**Tab II.1**).

Tableau II.1 : Modes et enchainements des copolymères [32].

Type de copolymère	Enchainement des unités constitutives
Aléatoire (Statistique)	-A - A - B - A - A - B - B - B - A - B-
Alterné	-A - B - A - B - A - B - A - B - A - B - A-
Séquencé	-A - A - A - A - A - B - B - B - B - B - B-
Greffé	

Au-delà des homo et copolymères mentionnés, on trouve également des polymères réticulés (en trois dimensions). **Fig II.7** présente différentes architectures de polymères, y compris la structure dendritique. C'est Paul Flory qui a été le premier à parler de la possibilité de créer des dendrimères à partir de monomères multifonctionnels dans son ouvrage fameux « Principles of Polymer Chemistry » [33].

II-4.3 Classification selon le comportement thermique

On classe généralement les polymères en trois catégories en fonction de leurs caractéristiques thermodynamiques :

a) Thermoplastiques : ils deviennent flexibles et malléables lorsqu'ils sont exposés à la chaleur et se solidifient lorsqu'ils sont refroidis. Ces matériaux gardent leurs caractéristiques et sont aisément recyclables. Leurs polymères de base se composent de macromolécules linéaires reliées par des liaisons peu résistantes, susceptibles d'être brisées sous l'influence de la chaleur ou d'importantes contraintes [34].

b) Thermodurcissables : les produits thermodurcissables sont ceux dont le processus de transformation, grâce à une réaction chimique, donne naissance à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermo durcies ou thermo rigides. Dans ce contexte, les chaînes sont nombreuses, plus brèves et plus réactives. Ces dernières vont se lier chimiquement, provoquant une réaction qui génère des liaisons chimiques rigides et implique toutes les molécules présentes pour constituer un réseau tridimensionnel [35].

c) Élastomères : ils sont produits par la réticulation (ou vulcanisation) de polymères linéaires, une méthode qui entraîne une densité nettement inférieure à celle des polymères thermodurcissables. Cela aboutit à l'établissement d'une structure partiellement tridimensionnelle. On distingue trois principales catégories d'élastomères :

*Élastomères à applications générales comme :

- Caoutchouc naturel (NR).
- Polyisoprène (IR).
- Copolymère de styrène et de butadiène (SBR).

*Élastomères destinés à des applications spécifiques

- Polychloroprène (CR).
- Copolymère d'acrylonitrile et de butadiène (NBR).
- Thermoplastiques élastomères (TPE).

II-4.4 Classification selon le comportement physique

a) Les polymères cristallins

Dans une phase cristalline, les molécules sont organisées et mises en ordre (voir **Fig II.8**). De manière générale, ces polymères présentent une rigidité appréciable, une robustesse mécanique notable et une capacité de déformation appréciable. Pour ce type, on ne note pas de température qualifiée de température de transition vitreuse **T_g**, qui correspond à des mouvements segmentaires des chaînes. Le polymère se transforme directement en un état liquide à la température **T_f** [36, 37].

b) Les polymères amorphes

Lorsque l'on chauffe un polymère amorphe, une température **T_g** est observée, entraînant une augmentation rapide de la viscosité du polymère qui se transforme en un état

caoutchouteux (toujours considéré comme solide) au sens intuitif du terme. Cependant, il y a une diminution significative du module de Young puisque le polymère passe de l'état liquide visqueux à cet état. Le matériau présente une variation continue de densité. La phase amorphe ne possède pas de températures de fusion [36,37].

c) Les polymères semi-cristallins

On trouve à la fois T_g et T_f . La température de transition vitreuse se réfère aux sections en phase amorphe, tandis que la température de fusion est liée à la transformation d'état dans les phases cristallines. Cette température de fusion n'est pas clairement définie [36,37].

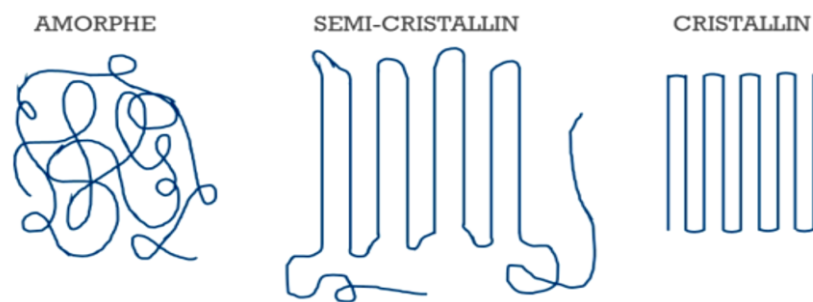


Fig II.8-Schéma simplifié des trois états structuraux des polymères [36,37].

II-5 Domaine d'utilisation

- Textiles et habillement : fibres de textile, matières non tissées, skaï, cuir synthétique.
- Articles de maroquinerie et de chaussure : simili cuir, skaï, mousses isolantes.
- Mobilier : simili cuir, skaï, colles, vernis, mousses.
- Objets domestiques : poubelles, seaux, vaisselle.
- Activités de loisirs : cannes à pêche, coques de navires, piscines, bandes magnétiques, DVD.
- Emballage pour aliments (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boîtes d'œufs) ou pour l'industrie (flacons de détergents, sacs et sachets, casiers, sacs poubelles).
- Transport, y compris automobile : pare-chocs, carrosserie, optiques, tableaux de bord, revêtements intérieurs, réservoirs à essence.
- Secteur électrique et électronique : boîtiers, gainage de câbles, façades des téléviseurs.
- Secteur de la chimie : tuyauteries, réservoirs, revêtements.

- Bâtiments et travaux publics : peinture, isolation, revêtement de sol, tuyaux, géotextiles.
- Agriculture : arrosage, irrigation, serres, bâches.
- Hygiène : lunettes, lentilles optiques, prothèses, équipement hospitalier, couches [38].

II-6 Les polymères utilisés pour modifier le bitume

II-6.1 Polymères thermoplastiques

Tab II.2 présente les polymères thermoplastiques les plus couramment utilisés dans le cadre de la modification du bitume. L'idée d'utiliser des plastomères en tant que polymères pour produire des Bitume Modifié par Polymère (BMP) a émergé face aux coûts exorbitants des polymères styréniques et aux problèmes de dégradation liés à leur insaturation.

À l'inverse, les plastomères poly-oléfiniques sont économiques et largement disponibles et possèdent également une stabilité supérieure à celle des styréniques. L'incorporation de polymères polyoléfiniques tend généralement à renforcer la rigidité du bitume tout en offrant une résistance appréciable à l'orniérage. C'est pourquoi les plastomères occupent une position dominante dans les bitumes modifiés polymères, représentant approximativement 15% du marché de référence.

Bien que le PE et le PP soient les plastomères les plus fréquemment utilisés, leur nature non polaire provoque des incompatibilités avec le bitume, exacerbées par leur propension à la cristallisation qui restreint considérablement l'interaction avec ce dernier et complique l'augmentation de son élasticité.

Dans le but de prévenir les problèmes de compatibilité et de cristallisation, tout en renforçant la stabilité du mélange PMB lors du stockage, d'autres catégories de thermoplastiques ont été incorporées en ajoutant des groupes acétate qui génèrent d'Éthylène Acétate de Vinyle (EVA) contenant plus de 14 % de groupe acétate, ainsi qu'Éthylène Méthacrylate (EMA) et éthylène-butyle-acrylate (EBA) [39].

II-6.2 Elastomères thermoplastiques

Les élastomères thermoplastiques ont la capacité de résister à une déformation permanente due à l'étirement et peuvent retrouver leur forme d'origine. Habituellement, les modificateurs utilisés sont des copolymères séquencés de mono- ou dioléfiniques, qui sont des élastomères thermoplastiques. On cite souvent le Styrène Butadiène Styrène (SBS), le

Styrène Styrène (SIS) et le Styrène Ethylène Butylène Styrène (SEBS) parmi les plus réputés. Ces polymères présentent une configuration ou morphologie qui se situe entre celle des thermoplastiques et des élastomères [39] :

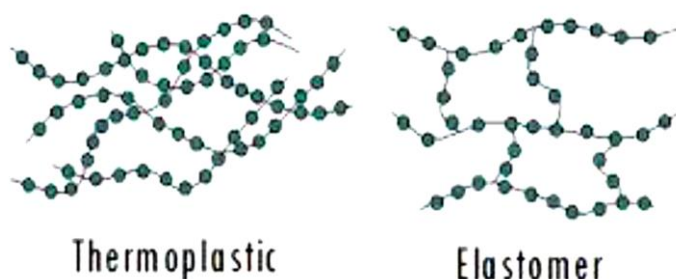


Fig II.9- Configuration des macromolécules thermoplastique et élastomère [39].

II-6.3 Caoutchouc naturel

Le latex de caoutchouc naturel est exploité dans le secteur du bitume depuis plus de trois décennies et on lui attribue la capacité d'optimiser les performances du liant bitumineux en augmentant la sensibilité thermique, la flexibilité, la stabilité et le décapage.

De plus, le caoutchouc naturel liquide s'est révélé être plus performant car il se combine plus aisément avec un liant, produisant ainsi un mélange homogène. Ainsi, le caoutchouc naturel présente d'avantages par rapport à sa forme conventionnelle, et les caractéristiques du mélange sont similaires à celles produites avec des caoutchoucs synthétiques. [40,41].

Bien que l'emploi du caoutchouc naturel pour modifier les liants bitumineux présente des bénéfices, certains inconvénients restreignent son application à grande échelle industrielle. De plus, des incertitudes demeurent concernant les performances et les caractéristiques mécaniques du béton bitumineux sur toute la gamme de températures de performance. En outre, le caoutchouc naturel est un biomatériau plus difficile à obtenir comparativement à d'autres biopolymères, ce qui a conduit à sa commercialisation sous forme de caoutchouc synthétique [42].

II-6.4 Caoutchouc synthétique

Les caoutchoucs synthétiques sont fabriqués dans des usines de production en les synthétisant à partir du pétrole et d'autres minerais, comme souligné dans la section « Généralités sur les polymères » [27].

Tableau II.2 – Types de polymères utilisés pour BMP [39].

<u>Polymères thermoplastiques</u>	Polyéthylène (PE) Polyéthylène basse densité (PEBD) Polyéthylène haut densité (PEHD) Polyéthylène linéaire basse densité (PELBD) Polypropylène (PP) Ethylène-Vinyle-Acétate (EVA) Polychlorure de vinyle (PVC) Ethylène-Butyle-Acrylate (EBA)
Elastomères thermoplastique	Styrène-Butadiène-Styrène (SBS) Styrène-Isoprène-Styrène (SIS) styrène Ethylène/Butylène Styrène (SEBS)
Caoutchouc naturel et synthétique	Caoutchouc styrène butadiène (SBR) Caoutchouc naturel (NR) Poly dioléfines Caoutchouc de pneu récupéré

II-7 Polymère SBS

II-7.1 Définition

SBS est un copolymère formé de l'élastomère PB et du thermoplastique PS. Trois segments constituent la chaîne principale du SBS. Au centre se trouve une rangée de PB, avec une rangée de PS de chaque côté. Les chaînes de PS s'assemblent pour constituer des nœuds de réticulation.

À température ambiante, le SBS ressemble à du caoutchouc, mais lorsqu'il est chauffé, les nœuds du PS se dispersent, permettant au SBS d'être traité comme un plastique [43].

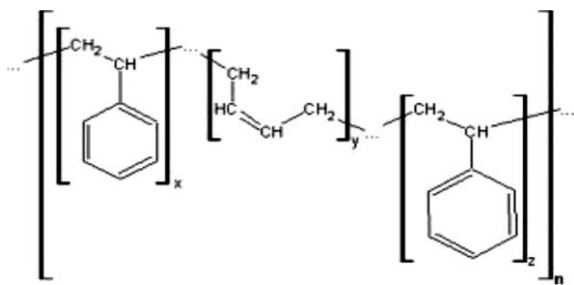


Fig.II.10 Structure chimique du SBS [43].

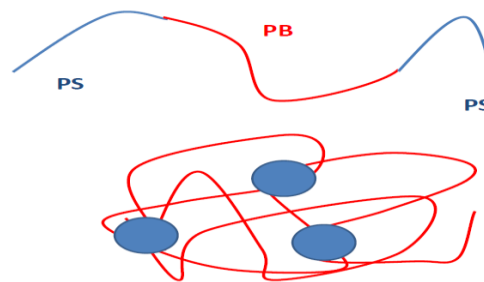


Fig. II.11 Schéma du SBS [43].

II-7.2 Synthèse du SBS

On obtient principalement les copolymères tri-séquencés styréniques par méthode anionique.

a). Les linéaires : deux techniques sont présentées en illustration [44].

- Insertion du monomère styrène suite à la polymérisation intégrale du butadiène sur un copolymère bi-séquencé « vivant » en utilisant le Butyl-Lithium comme initiateur dans le cyclohexane ;
- Association de copolymères bi-séquencés « vivants » en présence de 1,2 dibromoéthane.
- **(b). On peut obtenir des étoilés** en désactivant un copolymère monofonctionnel à l'aide de l'agent de couplage SiCl_4 , avec BuLi comme amorceur et le cyclohexane comme solvant [45].

II-7.3 Structure et propriété

Les chaînes médianes sont en poly diène tandis que les chaînes terminales sont en polystyrène. Composés de segments de polymères non compatibles (le polybutadiène caoutchouc et le polystyrène thermoplastique), les SBS présentent à température ambiante des propriétés élastiques similaires à celles des caoutchoucs vulcanisés, notamment un faible module, une grande capacité d'allongement avant rupture, une résilience élevée et une faible rémanence (pour un pourcentage spécifique de PB) [46].

Ce phénomène peut être compris en considérant la présence de domaines de polystyrène disposés régulièrement qui, en reliant les séquences élastiques, assument une fonction de réticulation (similaire à celle du soufre dans le caoutchouc vulcanisé), bien qu'il ne s'agisse pas d'une réticulation chimique mais physique, et donc susceptible d'être influencée par la

température. En fait, ce processus à deux étapes à température ambiante (le polybutadiène présente une T_g de -90°C tandis que le polystyrène a une T_g d'environ 100°C) se transforme en phase homogène au-delà de 90°C lorsque l'agitation thermique des macromolécules rompt la cohésion des micro domaines de polystyrène [42].

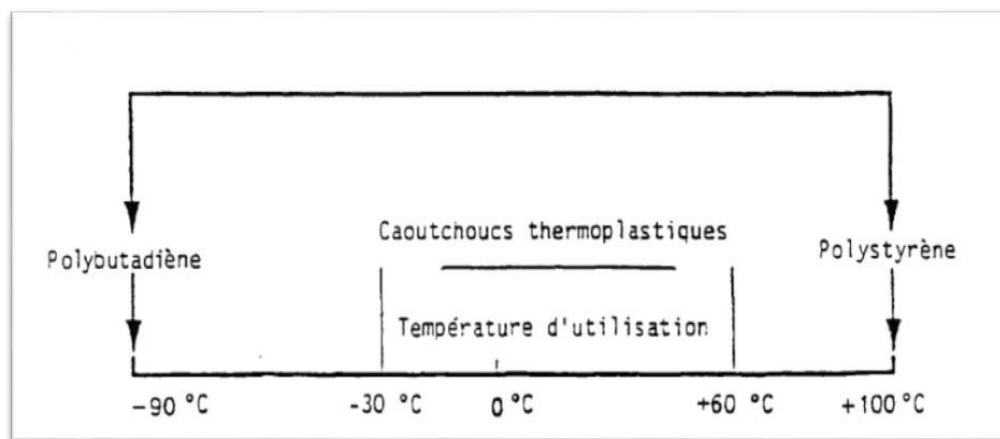


Figure II.12: Températures de transition vitreuse de copolymère SBS [42].

Par conséquent, à mesure que la température augmente, les domaines se dispersent progressivement ; les blocs terminaux ne sont plus attachés à un domaine lorsqu'ils se ramollissent. Le SBS agit en tant que matériau plastique. Ainsi, ce phénomène de « comportement plastique à haute température » et « élastique à plus basse température » est entièrement réversible. À température ambiante, les copolymères de composition globale identique mais de structure étoilée, comportant 3 à 4 séquences de polystyrène, présentent les propriétés mécaniques optimales.

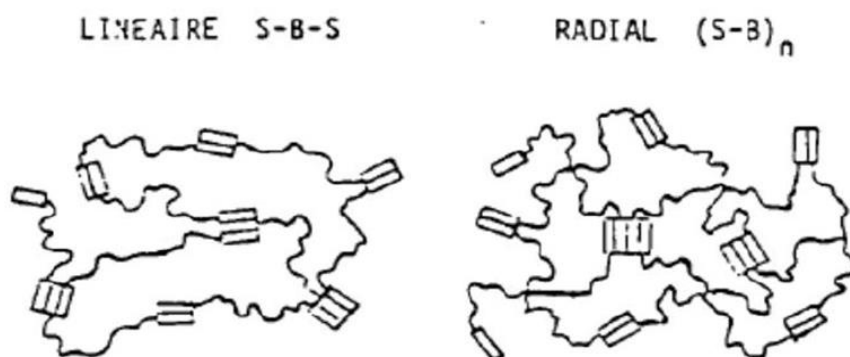


Figure II.13: Représentation schématique des structures linéaire et en étoile des SBS [46].

La structure moléculaire, le poids moléculaire ainsi que les proportions de styrène et de diène influencent tous la performance de ces polymères.

II-7.4 Le rôle du SBS dans la modification des bitumes

Voici les rôles essentiels du SBS dans l'altération des bitumes :

- **Amélioration de la flexibilité** : Le SBS offre une souplesse exceptionnelle, parfaite pour les membranes d'étanchéité exposées aux fluctuations de température.
- **Accroissement de la souplesse** : Cela permet au bitume de retrouver sa forme originale après une tension, diminuant ainsi les fissures.
- **Résistance face au vieillissement et aux contraintes** : La configuration des polymères SBS améliore l'efficacité des enrobés, y compris sur les viaducs ou routes à trafic élevé.
- **Extension de la plasticité** : Cela confère au bitume une meilleure résistance face aux températures élevées (moins de ramollissement) et basses (moins de fragilité) [48].

II-8 Conclusion

Les polymères, qui sont souvent substitués à des substances naturelles dans diverses industries, sont couramment employés dans la production de liants bitumineux depuis de nombreuses années.

Les polymères restent à ce jour l'adjuvant non bitumineux le plus couramment utilisé. On utilise couramment les polymères élastomères, comme les élastomères de caoutchouc styrène-butadiène et le caoutchouc granulaire, tout comme les polymères plastomères, incluant l'acétate d'éthylène vinyle, le polyéthylène et le polypropylène.

L'emploi d'un polymère recyclé présente un double bénéfice. D'une part, cela règle le problème de son élimination, d'autre part, il est plus rentable d'utiliser des polymères usés plutôt que neufs. Par conséquent, le coût final du liant subit une nette diminution. En outre, ce genre de bitume possède d'excellentes propriétés et performe nettement mieux que le bitume conventionnel lorsqu'il s'agit de routes soutenant des poids lourds, ou même dans des usages spécifiques comme les circuits et les pistes d'aéroport [50].

CHAPITRE III :
MODIFICATION DES
BITUMES PAR
POLYMERS

III-1 Introduction

Les liants modifiés sont des liants bitumineux dont les caractéristiques ont été altérées grâce à l'utilisation d'un agent chimique. Cet agent, ajouté au bitume standard, modifie sa composition chimique et/ou ses propriétés physiques et mécaniques. Lorsque son grade est soigneusement sélectionné pour le produit bitumineux spécifique (qu'il s'agisse d'enrober ou d'enduit) et dans un contexte précis, le bitume pur répond dans la plupart des situations à l'objectif est de préserver les propriétés d'adhérence et les caractéristiques mécaniques souhaitées. Cependant, alors que les conditions de circulation se détériorent et que des exigences d'économie sont imposées, certaines limitations s'appliquent à l'usage des bitumes non modifiés.

Ainsi, une approche consiste à tenter d'améliorer certaines propriétés du liant afin d'augmenter les performances des produits bitumineux fabriqués.

L'amélioration des caractéristiques des bitumes par modification de leur structure ou incorporation d'additifs fait partie des recherches anciennes. Cependant, c'est autour de la trentaine d'années que l'on peut retracer l'essor véritable de recherches, dans diverses directions, concernant les produits et procédés destinés à modifier les caractéristiques et propriétés des bitumes utilisés pour la route.

L'évolution notable des liants modifiés ou contenant des additifs grâce à des procédés industrialisés et contrôlés date des années 70 en Europe, plus précisément en Allemagne, en France et en Italie. C'est à cette époque que sont apparues les applications d'enrobés au bitume polymère et de revêtements bitumineux basés sur des produits synthétiques introduits lors du malaxage [50].

III-2 Principaux types bitumes-polymères

Pour qu'un polymère soit performant, sa compatibilité avec la matrice bitumineuse est indispensable. Le polymère doit renforcer la tenue du bitume à des températures hautes sans le rendre excessivement visqueux lors du malaxage, ni trop rigide lors de températures plus basses.

Si ce bitume est destiné à être employé dans le revêtement routier, il doit pouvoir être mélangé avec des équipements standard. Quoi qu'il en soit, le bitume doit être accessible, économique et stable lors de son entreposage et de son utilisation.

Les difficultés principales liées aux bitumes modifiés par des polymères sont dues à la faible solubilité de certains polymères dans la matrice bitumineuse, ce qui peut entraîner une séparation de phases.

On utilise principalement les groupes de polymères suivants pour modifier les bitumes :

- Polymères thermoplastiques ;
- Caoutchouc naturel et synthétique ;
- Caoutchoucs thermoplastiques ;
- Polymères thermodurcissables [51,7].

III-3 Types de polymères utilisés pour la modification des bitumes

III-3.1 Polymère thermoplastiques

Les polymères thermoplastiques se distinguent par leur capacité à se ramollir lorsqu'ils sont chauffés et à durcir lorsqu'ils sont refroidis. Les polymères principaux de ce groupe, testés en tant que modificateurs, incluent le polyéthylène (PE), le polypropylène atactique et isotactique (PPa, PPI), le chlorure de polyvinyle (PVC), le polystyrène (PS), éthylène acétate de vinyle (EVA) et éthylène-acrylate de méthyle (EMA). Le PE, l'EVA et l'EMA sont déployés à grande échelle dans le secteur industriel [51,27].

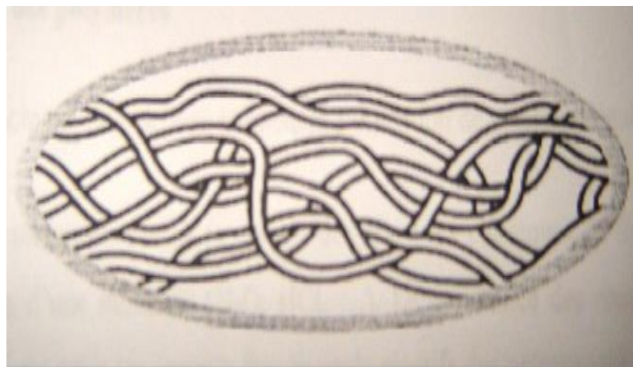


Figure III.1 : Thermoplastique [27].

III-3.2 Caoutchoucs naturels et synthétiques

On a procédé à des tests sur les bitumes avec différents types de caoutchouc, qu'ils soient naturels (NR) ou synthétiques, tels que le polybutadiène, le poly isoprène, le caoutchouc butyle, le caoutchouc styrène-butadiène (SBR) et le polychloroprène. Le caoutchouc naturel est susceptible de se dégrader et de s'oxyder. Son poids molaire est trop important pour qu'il

puisse être directement intégré au bitume. Le caoutchouc naturel doit être partiellement dégradé

et mécaniquement homogénéisé. Les latex permettent une meilleure dispersion des caoutchoucs naturels et synthétiques.

En général, les caoutchoucs synthétiques dérivés des poly dioléfinés s'intègrent plus aisément dans les matrices bitumineuses comparativement aux poly-mono-oléfinés et octroient des propriétés d'élasticité plus manifestes que les matériaux thermoplastiques. La présence de doubles liaisons dans toutes les chaînes entraîne une dégradation partielle du polymère par chauffage ou oxydation. Les doubles liaisons représentent, entre autres, des points de départ pour la réaction de vulcanisation. L'ajout de soufre au mélange de bitume et de caoutchouc permet la production d'un bitume vulcanisé doté d'une ductilité et d'une élasticité accrues. D'autre part, le caoutchouc peut être utilisé directement sous forme de poudrette vulcanisée. Pour garantir une répartition uniforme dans la matrice bitumineuse, il est essentiel d'avoir recours à des températures hautes et de prolonger les cycles de malaxage. Le caoutchouc partiellement dévulcanisé fonctionne en tant que liant hétérogène et joue essentiellement le rôle d'une charge flexible [51,27].

III-3.3 Caoutchoucs thermoplastiques

Les adjuvants pour les bitumes, appelés élastomères thermoplastiques, sont des copolymères de mono et dioléfinés sous forme de blocs. Le styrène est la mono-oléfine le plus couramment employée, tandis que le butadiène et l'isoprène sont fréquemment utilisés en tant que dioléfinés. Ces copolymères à blocs se présentent sous la forme de SBS (ou SIS), où S correspond au polystyrène, B au polybutadiène et I au poly isoprène. Ces copolymères se caractérisent par leur concentration en styrène, leur masse moléculaire et leur agencement (**Figure III.2**) .

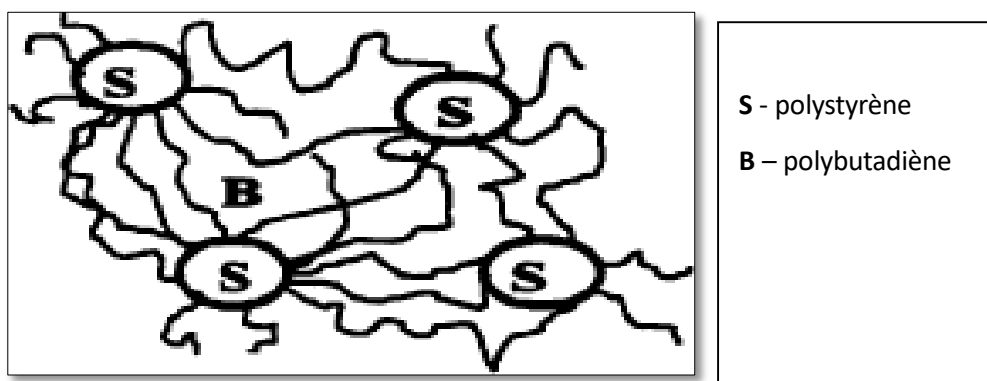


Figure III.2 : Structure du caoutchouc thermoplastique (SBS) [7].

Les élastomères thermoplastiques, qui combinent les caractéristiques d'élasticité et de résilience avec les propriétés de mise en œuvre des thermoplastiques, ont attiré l'attention du secteur industriel depuis environ quinze ans. Ces caractéristiques sont associées à la structure spécifique de ces copolymères qui donne lieu à une microstructure unique. Les matériaux acquièrent leur robustesse et leur flexibilité grâce à la réticulation physique des molécules en un réseau en trois dimensions. Ils deviennent liquides et façonnables à des températures élevées ($> 100^{\circ}\text{C}$).

III-3.4 Polymères thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables ne deviennent pas flexibles lorsqu'ils sont exposés à la chaleur. En raison de leur coût prohibitif et de la complexité de leur application, ils ne sont pas fréquemment employés dans le revêtement des routes. Cependant, les caractéristiques qu'ils maintiennent dans le bitume sont remarquables.

Les produits les plus réputés reposent sur des résines époxy. On les utilise en combinant deux éléments, l'un comprenant de la résine et l'autre un agent de durcissement, qui interagissent chimiquement pour créer une structure tridimensionnelle robuste. En étant combinées avec une quantité importante de bitume, les résines époxy révèlent davantage les caractéristiques des résines thermodurcissables modifiées que celles des bitumes. L'association des deux éléments (résine et durcissant) dans les résines thermodurcissables restreint la longévité du liant. Le bitume modifié ne présente pas d'écoulement visqueux ; il devient particulièrement résistant aux agressions chimiques, y compris celles des solvants et des combustibles. Depuis sa mise sur le marché, le bitume époxy est employé pour revêtir des zones spécifiques dans les aéroports et les ponts [48,50].

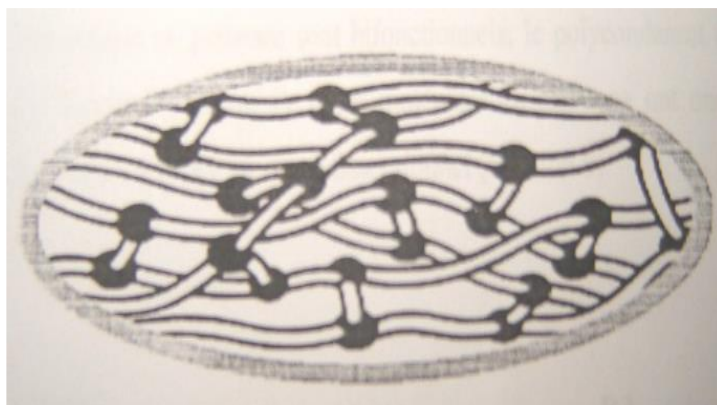


Figure III.3: Thermodurcissables [27].

III-4 Compatibilité des mélanges bitumes-polymères

Les difficultés principales rencontrées lors de la préparation et de l'application des mélanges bitume-polymère (BMP) incluent :

- L'homogénéisation du polymère dans le bitume.
- La constance des compositions obtenues.

L'adéquation des combinaisons de bitume et de polymères repose non seulement sur la composition du pétrole brut dont provient le bitume, mais également sur le processus de fabrication de ce dernier [26].

Le rôle des composants du bitume qui fonctionnent comme agents de solubilisation ou de gonflement pour les polymères est primordial. De plus, le bitume approprié pour l'association avec du SBS devrait présenter une forte teneur en aromatiques et une faible présence d'asphaltènes.

Des essais effectués sur des combinaisons obtenues à partir de fractions de bitume ont démontré une incompatibilité des polymères au sein des asphaltènes, tandis qu'une dispersion efficace a été observée dans les aromatiques et les résines [26].

Dans quelques situations, on incorpore des fractions pétrolières spécifiques au bitume afin de renforcer sa compatibilité avec les polymères. Effectivement, l'incorporation d'huile aromatique dans les compositions bitume-SBS indique que les niveaux d'aromatiques et de résines du bitume devraient être adéquats pour provoquer la peptisation des asphaltènes et du caoutchouc. On utilise également les huiles pyrolytiques et les résidus issus des acides gras en tant qu'agents faisant office de comptabilisation.

On note une relation complexe entre la composition chimique des bitumes de route, leur structure colloïdale et leurs caractéristiques physiques et rhéologiques. Toute altération de la composition chimique de la matrice bitumineuse par un procédé physique ou chimique entraîne inévitablement un changement de sa structure [26].

L'association à chaud des bitumes et des polymères donne lieu à :

- Un mélange non homogène ; le polymère et le bitume ne sont pas compatibles. Les phases sont distinctes et les caractéristiques d'un bitume routier ne sont pas réalisées.
- Un mélange homogène ; une compatibilité parfaite (situation peu fréquente). Dans ce cas, les huiles de bitume enveloppent entièrement le polymère et suppriment toutes les interactions entre molécules. Le liant présente une stabilité remarquable, cependant la modification de ses caractéristiques d'application est minime comparativement à celle du bitume d'origine. Seule la viscosité est accrue.
- Un mélange micro-homogène formé de deux phases distinctes étroitement imbriquées. Il s'agit de la compatibilité recherchée qui confère réellement au bitume des propriétés modifiées. Donc, ce n'est pas dans un système de ce type, le polymère adéquat se dilate en intégrant une partie des fractions huileuses du bitume, créant ainsi une phase polymère distincte de la phase résiduelle, soit le résultat escompté. Du bitume constitué des fractions plus lourdes du liant (le surplus d'huiles, les résines et les asphaltènes).

III-5 Fabrication des bitumes modifiés avec polymères

On a développé différentes techniques pour la fabrication de polymères-bitume. Parmi les facteurs principaux influençant la répartition des polymères dans la matrice bitumineuse figurent la dimension des particules de polymère, la température et le niveau de cisaillement exercé sur les mélanges.

En général, la température de mélange se situe entre 150°C et 200°C, voire davantage. Le temps de mélange peut aller de quelques minutes à plusieurs heures. On obtient une durée de mélange idéale lorsque les caractéristiques souhaitées du bitume-polymère, à l'instar du point de ramollissement, de la pénétration et de la viscosité se stabilisent. Les BMP ne sont pas fabriqués dans les raffineries en utilisant des méthodes particulières, mais par des entreprises expertes en construction de routes [51,27].

III-6 Stockage des bitumes modifiés par les polymères

En général, comme l'indique la **Fig III.4**, le bitume modifié doit être entreposé dans des réservoirs spéciaux, horizontaux ou verticaux, dont la capacité peut atteindre jusqu'à 72 m³. Pour éviter la formation de polygones, un mécanisme de brassage peut être activé pendant 5 à 10 minutes chaque heure.

Le stockage du bitume nécessite beaucoup d'énergie, car les bitumes purs doivent être conservés à des températures élevées, variant de 130°C à 150°C pour ceux ayant une pénétrabilité douce de 160/220 °C, et de 175°C à 190°C pour ceux plus durs (pénétrabilité de 10/20). L'objectif est de conserver la viscosité du bitume à un niveau qui facilite son pompage en douceur.

L'emploi du bitume modifié au lieu du bitume traditionnel offre de multiples bénéfices. Néanmoins, toutes les propriétés des combinaisons de bitume et de polymères ne sont pas bénéfiques. L'un des principaux soucis réside dans l'instabilité lors du stockage.

L'incompatibilité entre le bitume et le polymère peut entraîner une séparation de phases si le matériau est conservé à une température élevée (160-200C°) sans mouvement. Dans ce cas, une phase chargée de polymère se déplace vers le haut du réservoir de stockage, tandis qu'une phase chargée de bitume se divise dans la partie basse. Cela donne eu à un matériau hétérogène et peut entraîner des complications du fait de la viscosité très élevée de la pièce à teneur polymère très importante [52].



Figure III. 4– Réservoirs verticaux pour PMB [52].

III-7 Objectif de modification

Le bitume modifié par les polymères (BMP) est un bitume standard auquel on a ajouté un polymère [53]. Le but de la modification est de :

- Diminuer la sensibilité à la chaleur [54] et la déformation permanente (l'orniérage) [55].
- D'améliorer leur résistance à la fissuration à basse température [56].
- Accroître la cohésion maximale et/ou « l'étendue de cohésion » pour assurer une consistance adéquate sur toute la plage de températures d'utilisation.
- Accroître la résistance des matériaux à basse température (la résistance à la fatigue). Ce capital est dépensé progressivement au fur et à mesure que demandes répétées en raison du trafic.
- Le perfectionnement de la résistance au désenrobage (l'adhérence) sur le revêtement routier.
- D'améliorer la durabilité au vieillissement [57], tant lors de la mise en œuvre que dans les conditions d'usage.
- Les bitumes modifiés par des polymères (BMP) représentent une option appropriée pour l'édification de chaussées sollicitées, en particulier pour les routes à fort trafic, les trottoirs perméables et autres types de revêtements. La **figure III.5** met aussi en évidence l'emploi des BMP en tant que charge importante dans les revêtements.



Figure III.5: Travailleur appliquant un BMP en revêtement imperméable à un toit [53].

III-8 Mécanisme de modification des bitumes modifiés polymères

On attribue généralement l'amélioration des caractéristiques des bitumes à l'incorporation de polymères, principalement due au gonflement de ces derniers par les huiles présentes dans

le bitume. Pour être utilisé comme modificateur de bitume, un polymère doit être au moins gonflable, voire soluble, dans les fractions hydrocarbonées de faibles masses moléculaires du liant [58]. Cette caractéristique autorise l'approche du liant « bitume-polymère » comme un système à deux phases.

- Une phase polymère saturée par une fraction huileuse légère du bitume.
- Une phase plus abondante en résines et en asphaltènes que le bitume initial, qui sont les éléments agissant avec le polymère intégré et qui participent à la modification des caractéristiques du bitume.

L'introduction de polymères expansibles dans le bitume entraîne une hausse de la viscosité et du caractère « gel » de l'agent modifié. Même en petite quantité, le polymère gonflé confère au bitume une plus grande élasticité et résistance à l'écoulement. Par conséquent, les liants modifiés se réfèrent aux liants bitumineux dont la composition chimique et/ou les caractéristiques physiques et mécaniques ont été altérées par l'incorporation d'un polymère dans le bitume de base.

Essentiellement, le gonflement du polymère est un processus de diffusion où les huiles (fraction maltène) du bitume se déplacent vers les particules de polymère, ce qui provoque le gonflement de celui-ci [59]. Le gonflement est influencé par plusieurs facteurs, dont le genre de bitume, l'origine et la composition du caoutchouc, le procédé de fabrication du caoutchouc, ainsi que la dimension et la morphologie des particules de caoutchouc [60,61].

L'explication de la dispersion du polymère dans le bitume est également fournie en considérant trois paramètres influents [62] :

- **La température** : l'accélération de la diffusion du bitume dans les particules polymères s'intensifie avec la montée de la température, ce qui influence le moment où le cisaillement commence à agir efficacement.
- **La dimension des particules** : plus elles sont petites, plus importante est la surface d'échange et plus rapide est la diffusion du bitume à l'intérieur des particules (étapes 1 et 2).
- **Le cisaillement** : malgré le gonflement, les molécules gagnent en mobilité du fait de leur rupture (étapes 3 et 4).

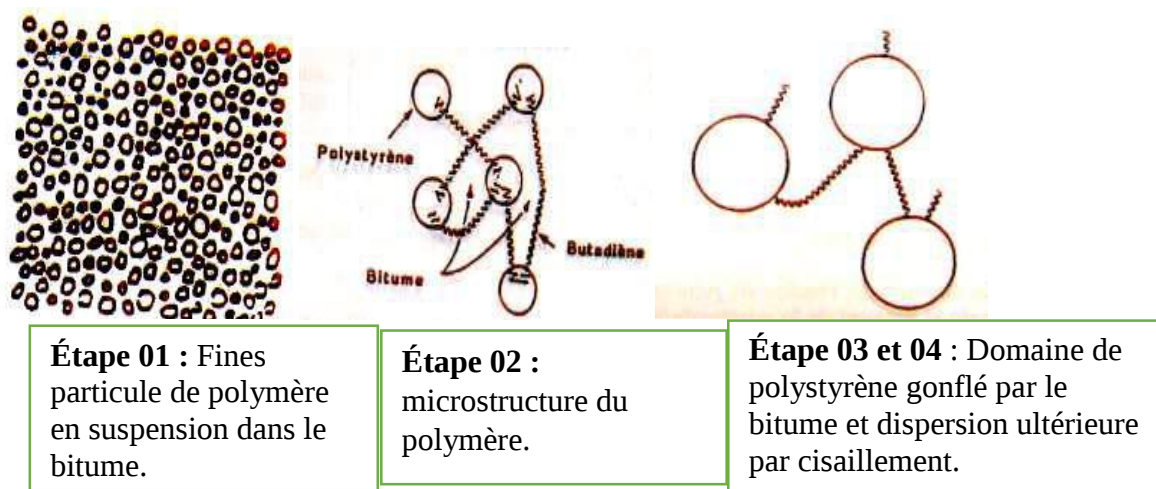


Figure III.6: Mécanismes de la dispersion d'un copolymère (polystyrène – butadiène) dans le bitume [62].

III-9 Domaine d'utilisation

L'utilisation principale des bitumes modifiés par des polymères est dans les couches de roulement, afin d'accroître la sécurité et le confort des utilisateurs et des résidents en renforçant la résistance à l'arrachement, la résistance à l'eau et la cohésion. On recherche aussi à diminuer l'orniérage et garantir une longévité élevée sous un trafic intense, ainsi que des caractéristiques de surface. Cette application a conduit à la conception de revêtements adaptés à différents besoins, comme les revêtements drainants, les revêtements fins, les ultrafins, et ainsi de suite.

Les enrobés de liaison sont employés pour les voies à fort trafic ou requérant des caractéristiques spécifiques en ce qui concerne la résistance aux déformations permanentes. On utilise les bitumes spéciaux et les bitumes polymères pour satisfaire à ces besoins spécifiques.

Les enrobés employés comme base pour des sites particuliers requièrent fréquemment l'emploi de liants spécifiques, soit lorsque les analyses préliminaires de formulation avec des bitumes conventionnels ne répondent pas aux exigences technico-économiques, soit lorsque les conditions du site imposent cette nécessité. Les bitumes polymères sont aussi utilisés dans divers secteurs, comme les liants pour les revêtements superficiels, les enrobés à froid et les couches d'accrochage (sous forme d'émulsions), sans oublier leur rôle dans la production de complexes anti-remontées de fissure [7].

III-10 Etude avancée sur les bitumes modifiés hybrides

III-10.1 Définition des bitumes modifiés hybrides

Les liants bitumineux hybrides modifiés sont obtenus en combinant plusieurs sortes de modifiants, y compris des polymères tels que le Styrène-Butadiène-Styrène (SBS), avec des additifs chimiques comme les acides poly phosphoriques (PPA) ou des matériaux secondaires (comme le caoutchouc recyclé, les plastiques ou les charges minérales).

Cette modification combinée vise à tirer parti des effets complémentaires de chaque composant pour considérablement améliorer les propriétés rhéologiques, mécaniques et thermiques du bitume. Le polymère apporte essentiellement une plus grande élasticité et une résistance supérieure aux fissures, alors que les additifs chimiques renforcent la rigidité et la résistance à des températures élevées. Pour leur part, les matériaux secondaires participent au renforcement mécanique et à la stabilité du système.

Cette méthode qualifiée d'hybride s'appuie sur une synergie entre divers modificateurs, offrant un matériau plus efficace et plus résistant que les bitumes modifiés traditionnels utilisant un seul additif. De ce fait, les bitumes hybrides offrent généralement une résistance supérieure à l'orniérage, une amélioration du rebond ainsi qu'une stabilité de stockage accrue [63,64].

III-10.2 Composition et rôle des additifs dans les bitumes modifiés hybrides

Les bitumes hybrides modifiés sont des bitumes de base auxquels on ajoute divers types d'additifs dans le but d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques, thermiques et rhéologiques. La composition générale se base essentiellement sur trois catégories : les polymères, les additifs chimiques et les matériaux secondaires ou charges.

III-10.2.1 Polymères

Les bitumes sont principalement modifiés par des polymères, dans le but d'optimiser leurs caractéristiques mécaniques et élastiques. Le Styrène-Butadiène-Styrène (SBS) est le plus répandu parmi ces matériaux, un copolymère tri bloc qui crée une structure tridimensionnelle au sein de la matrice bitumineuse. Le SBS fonctionne en formant une phase élastomère dispersée dans le bitume, ce qui améliore sa capacité à se déformer de manière réversible [63].

III-10.2.2 Additifs chimiques (le soufre dans les bitumes modifiés)

Le soufre est parfois utilisé comme additif chimique ou agent de réticulation dans les bitumes modifiés, notamment en présence de polymères tels que le Styrène-Butadiène-Styrène (SBS). Il agit principalement comme agent de vulcanisation ou de réticulation, permettant de créer des liaisons chimiques entre les chaînes polymériques et la matrice bitumineuse [63, 65, 67].

Rôle du soufre

* Agent de réticulation (crosslinking) : Le soufre favorise la formation de ponts chimiques entre les chaînes de polymères (SBS) et certaines fractions du bitume.

*Amélioration de la stabilité au stockage : Dans les bitumes modifiés au SBS, un problème fréquent est la séparation de phase (décantation du polymère). Le soufre réduit ce phénomène en renforçant l'interaction entre phases.

*Augmentation des performances mécaniques : Grâce à la réticulation, le bitume devient plus structuré.

*Influence sur l'élasticité : Le soufre peut améliorer le retour élastique jusqu'à un certain dosage, mais un excès peut rendre le bitume trop rigide et réduire l'élasticité.

*** Remarque importante**

Utilisation du soufre doit être contrôlée car : un dosage élevé peut fragiliser le liant

- Il peut réduire la flexibilité à basse température
- Il nécessite un bon contrôle de la température de malaxage

III-10.2.3 Charges et matériaux secondaires

Parmi les charges et matériaux secondaires, on retrouve le caoutchouc recyclé, les matières plastiques ainsi que diverses charges minérales.

Dans certains cas, la stabilisation du mélange est assurée. Ces matériaux fonctionnent comme des agents de structuration et renforcent la rigidité générale du bitume [66].

III-10.3 Procédés de fabrication des bitumes modifiés hybrides

La production de bitumes hybrides modifiés implique l'intégration conjointe de divers modifiés (polymères, additifs chimiques et matériaux secondaires) dans un bitume standard,

dans le but d'optimiser ses caractéristiques rhéologiques et mécaniques. La méthode s'appuie sur une régulation fine de la température, du temps de mélange et de la vitesse de coupe pour garantir une dispersion uniforme et une stabilité optimale du mélange.

- **1. Préparation du bitume de base :** Le bitume de base est chauffé afin de réduire sa viscosité et permettre l'incorporation des additifs [63].

Cette phase garantit une consistance uniforme et fluide du bitume avant sa modification [63].

- **2. Incorporation des polymères :** On intègre progressivement les polymères, en particulier le Styrène-Butadiène-Styrène, au bitume chaud.

But :

- Entraînement d'un réseau polymère dispersé
- Amélioration de la souplesse et du retour à l'état initial.

Un manque de dispersion cause une instabilité du mélange [65].

- **3. Ajout des additifs chimiques :** Cette étape concerne les additifs de modification chimique (soufre).

Surplus de soufre → diminution de la souplesse [65,67].

- **4. Ajout des charges et matériaux secondaires :** Les charges (caoutchouc, plastiques recyclés, fillers minéraux) sont introduites pour renforcer le système [63].

Rôle :

- Renforcement mécanique
- Diminution du coût Amélioration de la stabilité structurale [63].
- **5. Homogénéisation finale :** Cette phase assure la stabilité du système hybride.

Rôle :

Obtenir un liant uniforme sans séparation de phases.

- **6. Refroidissement et stockage :** Le bitume modifié hybride est refroidi progressivement.
- **Schéma simplifié du procédé :**

Bitume 150–180 °C → SBS (2–8 %, high shear 3000–6000 rpm) → Charges (1–15 %)

→ Homogénéisation 30–60 min → Refroidissement + stockage

III-10.4 Propriétés et performances des bitumes modifiés hybrides

Les bitumes hybrides modifiés démontrent des caractéristiques supérieures comparativement aux bitumes purs et aux bitumes modifiés avec un seul additif. Cette amélioration découle de l'interaction entre les polymères, les additifs chimiques et les matériaux secondaires, ce qui donne au liant un équilibre plus harmonieux entre rigidité, élasticité et stabilité.

III-10.4.1 Propriétés rhéologiques

Les caractéristiques rhéologiques expliquent la manière dont le bitume réagit sous contrainte (déformation, viscosité, élasticité).

Améliorations notées :

- Augmentation de la viscosité à des températures élevées
- Diminution de la réactivité thermique
- Meilleure résistance à la déformation permanente. L'utilisation de polymères comme le Styrène-Butadiène-Styrène renforce le caractère viscoélastique du bitume en établissant un réseau polymérique organisé [63].

III-10.4.2 Propriétés mécaniques

Les bitumes hybrides montrent une amélioration notable en termes de performances mécaniques.

Principaux effets :

- Renforcement de la résistance à l'orniérage.
- Renforcement de la résistance à la fatigue.
- Amélioration de la cohésion interne du liant.

L'ajout de SBS et de produits chimiques contribue à renforcer la structure interne du bitume, ce qui améliore sa capacité à résister aux charges répétées [65].

III-10.4.3 Propriétés thermiques

Dans les systèmes hybrides, on observe une nette amélioration de l'efficacité thermique.

Améliorations :

- Élévation du point de fusion (TBA)
- Réduction de la capacité de pénétration.
- Diminution de la réactivité face aux fluctuations de température.

Des additifs tels que les acides poly phosphoriques (PPA) participent à renforcer la structure bitumineuse et à optimiser sa résistance aux températures élevées [64].

III-10.4.4 Élasticité et retour élastique

La capacité de retour élastique est une caractéristique essentielle des bitumes hybrides modifiés.

Conséquences :

- Amélioration significative du retour d'élastique grâce au SBS.
- Consolidation du réseau par l'emploi du soufre.
- Comportement plus adaptable lors de la déformation

Le système hybride favorise une récupération améliorée suite à une sollicitation mécanique, réduisant ainsi les déformations irréversibles [63,65].

III-10.4.5 Stabilité au stockage

Un des principaux soucis liés aux bitumes modifiés est la séparation de phase.

En ce qui concerne les systèmes hybrides :

- Diminution de la sédimentation du polymère.
- Amélioration de l'homogénéité du mélange
- Renforcement de la stabilité grâce aux additifs chimiques

Le soufre agit comme un agent de réticulation, améliorant ainsi la compatibilité entre les phases [67].

III-10.4.6 Durabilité globale

Les bitumes hybrides démontrent une plus grande longévité.

Bénéfices :

- Amélioration de la résistance au vieillissement.
- Diminution des fissures dues à la chaleur.
- Prolongement de la longévité des chaussées.

L'association de divers modifiants renforce la résistance générale du matériau face aux agressions d'origine climatique et mécanique [64].

III-11 Tendance actuelle

À l'heure actuelle, les bitumes hybrides modifiés subissent une transformation significative dans le secteur routier et les matériaux de construction. Ce progrès est essentiellement dû à l'augmentation des demandes en termes de durabilité, d'efficacité mécanique et de résistance aux conditions météorologiques extrêmes.

III-11.1 Passage des systèmes simples vers les systèmes hybrides

Une orientation significative est l'évolution des bitumes modifiés basés sur un seul polymère (par exemple, SBS seul) vers des compositions hybrides intégrant divers modificateurs (polymères, additifs chimiques et matériaux recyclés).

On note en particulier :

- SBS et plastomères (EVA, APP)
- SBS + caoutchouc recyclé
- SBS et additifs chimiques (PPA, soufre)

***But :** parvenir à un équilibre entre élasticité, rigidité et stabilité thermique [64].

III-11.2 Développement des formulations à haute performance

Les études en cours cherchent à optimiser la performance des routes à fort trafic.

Tendances identifiées :

- Renforcement de la résistance à l'orniérage.
- Renforcement de la résistance à la fatigue.
- Meilleure performance dans des conditions de températures extrêmes.

On observe une utilisation croissante des bitumes hybrides dans les autoroutes, les aéroports et les zones industrielles [65].

III-11.3 Utilisation croissante des matériaux recyclés

- L'incorporation de matières durables est une tendance majeure.

Exemples : Poudre de caoutchouc (pneus recyclés)

- Plastiques recyclés

Déchets industriels, cela contribue à minimiser le coût et l'impact sur l'environnement tout en optimisant certaines caractéristiques mécaniques [64].

III-11.4 Optimisation des additifs chimiques

L'utilisation d'additifs chimiques tels que le PPA et le soufre se généralise dans les systèmes hybrides.

Tendances :

- PPA (acide poly phosphorique) pour renforcer la rigidité et la stabilité thermique.
- Utilisé pour la réticulation et la stabilisation de phase, le soufre.
- Compositions contrôlées pour prévenir la fragilisation.

Ces additifs servent à améliorer la structure interne du bitume [63,65].

III-11.5 Approche basée sur la performance (Performance-Based Design)

La conception des bitumes se dirige vers une méthode axée sur la performance plutôt que sur la composition.

En d'autres termes : Les matériaux sont sélectionnés en fonction de leurs performances (TBA, retour élastique, fatigue).

Tests rhéologiques avancés (DSR, BBR) : optimisation selon les conditions climatiques et le trafic [65].

III-11.6 Développement durable et économie circulaire

Les exigences environnementales ont une forte influence sur les tendances actuelles.

Buts :

- Diminution des émissions de dioxyde de carbone

- Valorisation des déchets tels que les pneus et plastiques.
- Prolongation de la longévité des chaussées

Les bitumes hybrides s'intègrent dans une démarche d'économie circulaire [64].

III-12 Conclusion

Ce chapitre se concentre sur les recherches concernant la modification des bitumes par l'ajout de divers éléments, notamment les polymères. Les bitumes polymères modifiés (BMP) sont des systèmes moléculaires organisés et complexes, dont les propriétés dépendent étroitement du genre, de la structure et de la concentration du polymère employé [7]. Dans le but d'améliorer les caractéristiques du bitume pur, qui ne satisferait plus aux normes actuelles, l'emploi de polymères en tant qu'agents de modification se révèle avantageux.

Toutefois, il est nécessaire de suivre certaines conditions pour maximiser cette amélioration. L'évolution du bitume devrait favoriser une diminution de la déformation durable en haute température, un renforcement de la résistance à la fissuration en basse température, tout comme un comportement optimisé des revêtements face à des charges lourdes et répétées.

Il est important de souligner que l'amélioration du liant ne s'évalue pas uniquement sur la base d'une seule caractéristique de l'enrobé, mais plutôt par un ensemble de diverses caractéristiques.

CHAPITRE IV :
MATERIAUX ET
METHODES
EXPERIMENTALES

IV-1 Introduction

La modification du bitume avec des polymères est une technique ancienne (depuis les années 60) qui a donné des résultats acceptables et des bitumes appropriés aux domaines d'application. Ce travail consiste à modifier les caractéristiques d'un bitume pur par ajout du polymère (SBS) à différents pourcentages, nous utilisons la méthode de mélange à chaud pour donner une idée sur les performances à obtenir. Dans ce chapitre, nous présentons les matériaux ainsi que les méthodes de caractérisation utilisées dans notre travail.

IV-2-Matériaux

IV-2.1 Les bitumes purs

Le bitume pur utilisé dans notre partie expérimentale est présenté au **(Figure IV.1)**. Ce bitume est fourni par NAFTAL BITUMES EL EULMA de classe (40/50). Le **tableau IV.1** regroupe les principales caractéristiques du bitume pur utilisé.



Figure IV.1. Bitume pur (photo originale)

Tableau IV.1 : Spécification des bitumes purs.

Caractéristiques	Normes de Mesure	Résultats	Specifications
Pénétrabilité à 25°C	NF EN 1426	42	40-50
Point de ramollissement (TBA) en °C	NF EN 1427	52	47-60
Densité relative à 25°C	NF EN ISO 3838	1.0303	1.0-1.1

IV-2.2 Le polymère (SBS)

Le produit de modification est l'un des additif les plus utilisés pour la modification des bitumes, le copolymère Styrène Butadiène Styrène (SBS), c'est un caoutchouc synthétique dont les blocs polystyrènes sont reliés par une séquence polybutadiène. Il confère notamment au bitume ses propriétés d'élasticité, de résistance au fluage, et de durabilité.

Tableau IV 2 : Spécification physico-chimique du SBS.

Propriétés Physiques	Nom Chimique	Structure	Aspect Physique	Masse Volumique	Teneur en styrène	Teneur en Butadiène	T _g	T _f	T° Mélange	Dosage Habituelle BMP
Valeurs Typiques	Styrène butadiène styrène	S-B-S	Granulé Poudre	0.92-0.95 g/cm ³	28-35%	65-72%	≈ - 90°C	≈ 180-200 °C	170-190 °C	2%-8%



Figure IV.2. Le polymère SBS (photo originale).

IV-3 Préparation des mélanges de bitume modifié par polymère (BMP)

La fabrication constitue une étape très importante et essentielle pour la réussite de notre étude, qui nécessite un contrôle pendant l'opération sur les facteurs influant sur le mélange ; ces facteurs sont :

- Température,
- Vitesse de cisaillement (agitation),
- La durée de malaxage.

Nous avons modifié le bitume pur par Cinq teneurs de SBS, 0% et 2% et 4% et 6% et 8%.

- **Protocole de modification :**

Les étapes de la préparation du BMP sont comme suit :

1. Préchauffer le bitume dans l'étuve à 180°C pendant 3- 4h.
2. Placer le bitume sur la plaque chauffante qui permettant de régler et contrôler la température.
3. Mettre en marche le malaxeur dans le bitume à une vitesse de malaxage de 4200 tr/min.
4. Ajouter le polymère SBS avec des teneurs : 2%, 4%, 6% et 8% et maintenir la vitesse de malaxage en 4200 tr/min pendant 40 minutes jusqu'à la dissolution complète du polymère, tout en maintenant la température à 180°C.
5. Arrêter le malaxage une fois que le mélange est homogène.

La figure IV.3 illustre les étapes de préparation des mélanges BMP.



Figure IV.3 : Modification du bitume pur par SBS (photo originale).

IV-4 Techniques de caractérisation

IV-4.1 Essai de pénétrabilité

Principe de l'essai

La pénétration d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai conditionné doit être mesurée. Les conditions opératoires applicables à la pénétrabilité jusqu'à environ 330 x 0,1 mm, doivent être : température de 25°C, charge appliquée de 100 g et durée d'application de la charge de 5s. Pour les pénétrabilités prévues supérieures à approximativement 330 x 0,1 mm, la température d'essai doit être abaissée à 15 °C, alors que la charge appliquée et sa durée d'application restent inchangeables. D'autres conditions opératoires peuvent

également être appliquées, pour tenir compte d'autres usages ; par exemple les conditions opératoires 200g, 60s et 5°C peuvent être utilisées comme indication des performances à basse température [68]. Cet essai est réalisé selon la norme **NF EN 1426**.

Mode opératoire

- Préparer et chauffer les échantillons et les gobelets à une température de 180°C ;
- Remplir les gobelets avec le bitume ensuite agiter bien pour éviter les bulles d'air puis laisser refroidir à une température ambiante pendant 90 min ;
- Mettre les gobelets remplis dans un bain-marie (**Figure IV.4**) à la température choisie pendant 90min.

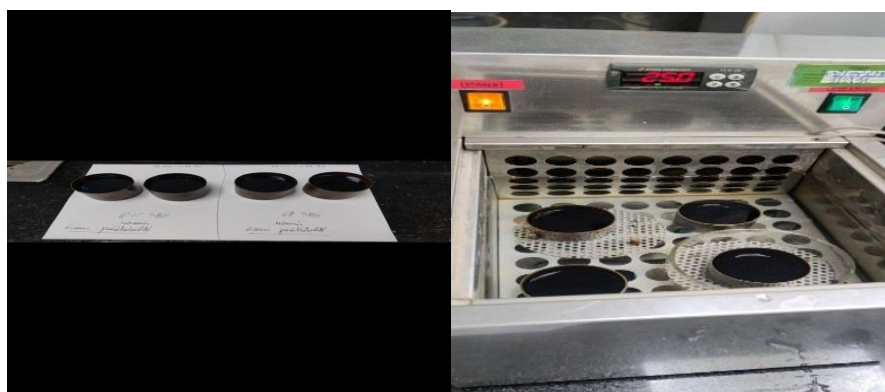


Figure IV.4 : Le dépôt des échantillons dans les gobelets et dans le bain marie (photo originale).

- Retirer les gobelets au terme de la durée de conservation dans l'eau, placer les échantillons sous l'appareil de pénétrabilité



Figure IV.5 : Pénétromètre (photo originale).

- Effectuer les mesures

NB : Le changement de température fait au niveau de bain marie.

IV-4 .2 Température de ramollissement par la méthode bille et anneau (TBA)

Principe de l'essai

Deux disques horizontaux de bitume, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, doivent être chauffés dans un bain liquide avec un taux d'élévation de la température contrôlé, alors que chacun soutient une bille d'acier. Le point de ramollissement noté doit correspondre à la moyenne des températures pour permettre à chaque bille, enveloppée de liant bitumineux de descendre d'une hauteur de $(25,0 \pm 0,4)$ mm [69]. Cet essai est réalisé selon la norme NF EN 1427

Mode opératoire

- Placer l'échantillon dans les deux anneaux après chauffage à l'étuve dans la plaque de coulage antiadhésif et laissé refroidir à l'aire ambiante pendant 30 minutes, quand les échantillons refroidis l'excédent du liant est enlevé par lame chauffante.



Figure IV.6: Préparation des échantillons dans les anneaux (photos originales).

- Pour exécuter le test, tout d'abord, le bain est préparé en remplissant d'eau distillée (TBA entre 28 et 80°C) ou du glycérol (TBA entre 80 jusqu'à 150°C).



Figure IV.7 : utilisée l'eau pour 2%; 4% ,6% **Figure IV.8 :** utilisée le glycérol pour 8%

- La température initiale du bain doit être maintenue à $(5 \pm 1) ^\circ\text{C}$ dans le cas d'eau ou chauffer doucement à $(30 \pm 1) ^\circ\text{C}$ dans le cas de glycérol.
- L'appareillage comprenant les anneaux d'échantillon est assemblé en veillant à vérifier que les dispositifs de centrage des billes et la sonde de température sont correctement positionnés.
- Un bécher en verre (**Figure IV.9**) est rempli en veillant à ce que la surface du liquide se situe à une hauteur de 50 ± 3 mm au-dessus du rebord supérieur des anneaux.
- Ensuite, les deux billes d'acier sont placées au fond du bécher à l'aide de pincettes.
- L'appareil assemblé (bécher avec le liquide d'essai, les anneaux d'échantillon, le porte-anneau et les billes, ainsi que le dispositif de centrage des billes) est immergé dans un bain-marie à la température d'essai ($5 ^\circ\text{C}$ pour l'eau et 30°C pour glycérol) pendant au moins 15 minutes.

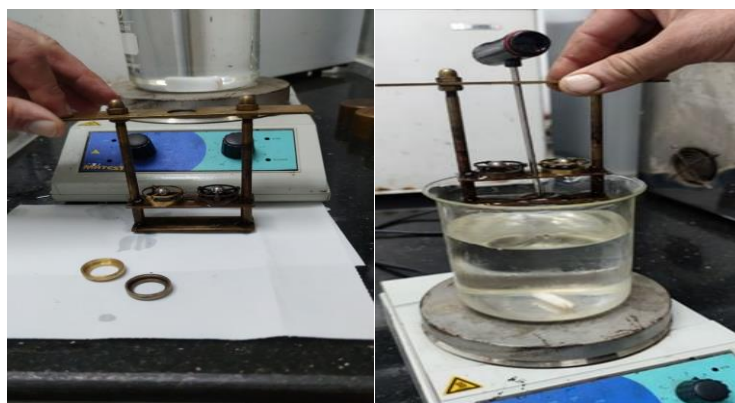


Figure IV.9: Placement des échantillons dans le bécher (teste TBA) (photos originales).

- Le processus de chauffage et l'agitateur sont activés en s'assurant que la température augmente de manière uniforme à une vitesse de 5 °C par minute.



Figure IV.10: Les étapes de test TBA (photo originale).

La température indiquée par le thermomètre est enregistrée pour chaque ensemble bille et anneau au moment où le liant bitumineux entourant la bille touche la plaque inférieure si la mesure est effectuée manuellement, ou interrompt le faisceau lumineux si un appareil automatique est utilisé [69].



Figure IV.11: La 1^{er} et 2^{ème} touche (test TBA) (photo originale).

IV-4.3 Essai de détermination de la densité relative par méthode du pycnomètre

Principe de l'essai

La masse d'un échantillon de bitume et la masse du liquide d'essai (eau) correspondant à des volumes identiques sont comparées. L'égalité des volumes est assurée par le remplissage du pycnomètre et par le débordement du liquide lorsqu'on le place dans un bain à la température de l'essai jusqu'à l'obtention de l'équilibre thermique (approximativement 30 min).

Le pycnomètre calibré est rempli approximativement aux trois quarts de sa capacité avec le liant bitumineux dont on cherche la masse volumique ; il est pesé. Le pycnomètre est rempli avec un liquide d'essai et pesé à nouveau. La densité et la masse volumique doivent être calculées par comparaison entre les deux masses. La **figure IV.12** présente le principe de l'essai de densité [70].

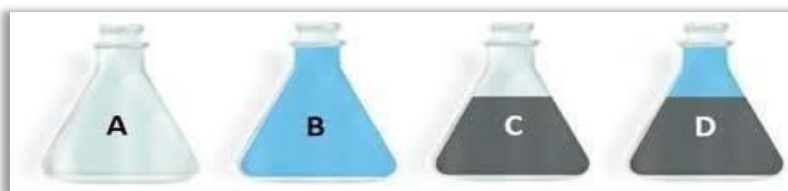


Figure IV.12: Principe de l'essai de densité [70].

A : le pycnomètre vide.

B : le pycnomètre rempli avec de l'eau.

C : le pycnomètre rempli partiellement avec l'échantillon de liant bitumineux.

D : le pycnomètre contenant le bitume et de l'eau.



Figure IV.13 : Les étapes de l'essai de densité (photo originale).

IV-4.4 Température de fragilité fraass

Le test FRAASS est un essai normalisé permettant de déterminer la température en dessous de laquelle un film de bitume risque de fissurer sous sollicitations [71]. Cet essai empirique permet donc d'obtenir une première estimation du comportement à froid du matériau et plus précisément de la limite basse d'utilisation du bitume considéré.

Le principe de l'essai consiste à placer un film de bitume de masse déterminée sur une plaque métallique souple et à le soumettre à un mouvement de flexion lent tout en diminuant progressivement la température ($1^{\circ}\text{C} / \text{min}$) (**figure IV.14**).

La température de fragilité FRAASS est atteinte lorsque que le film de bitume se fissure. Ce test est réalisé selon la norme **NF EN 12 593**.

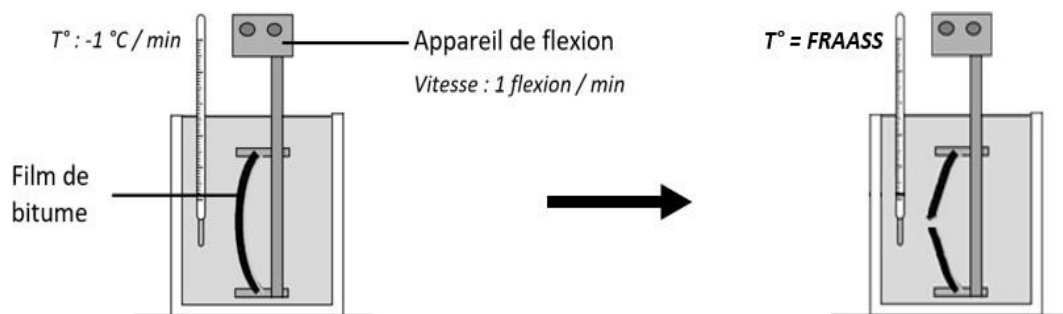


Figure IV.14 : Schéma représentatif du principe de l'essai FRAASS.

IV-4.5 Ductilité à 25°C

Cet essai associé à celui de la pénétrabilité donne une indication sur la nature du bitume. Il consiste à déterminer la distance à laquelle peut être étirée une éprouvette de bitume immergée dans un bain de 25°C de température à une vitesse spécifiée de 5cm/min et ceci au moment de la rupture du filament ainsi formé [72]. Ce test est réalisé suivant la norme **NF T 66-032**

IV-4.6 Essai de retour élastique

L'essai de retour élastique est un essai normé utilisé pour évaluer la capacité d'un liant (modifié ou non) à retrouver ses caractéristiques géométriques initiales grâce à ses propriétés élastique après avoir été étiré [73]. Ce test est réalisé selon la norme **NF EN 13 398**.

Le schéma de principe est représenté sue la **Figure V.15**. Durant l'essai une éprouvette de bitume est maintenue à température constante (25 ou 10°C) dans un bain d'eau.

L'éprouvette est ensuite étirée à une vitesse constante de 50 mm/min jusqu'à une longueur de 20 cm (L). Le fil de liant obtenu est alors coupé en son milieu et après une période de 30 minutes, la distance entre les deux demi fils (d) est mesurée. La valeur du retour élastique est mesurée via la formule suivante :

$$R_E (\%) = (d/L) * 100 \dots \dots \dots (IV.1)$$

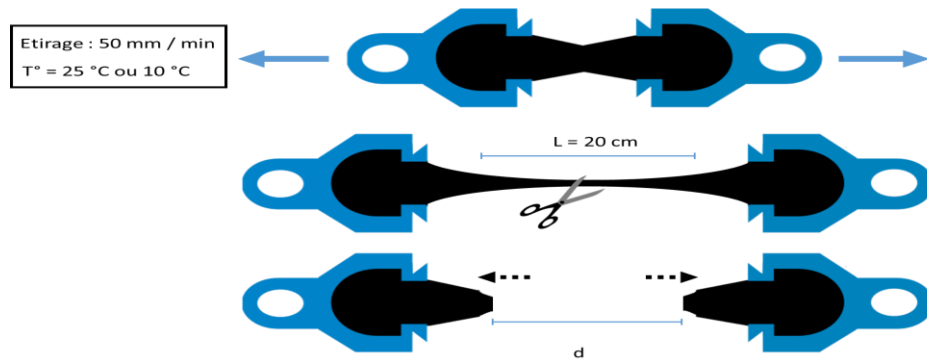


Figure IV.15 : Schéma de principe de l'essai de retour élastique [73].

Mode opération

- Malaxé le bitume modifier à fin d'obtenir un mélange homogène



Figure IV-16 : Malaxeur de bitume modifiés par (SBS) (photo original).

- Mettre l'agent démoulant sur les plaques d'éprouvette puis en verse les échantillons
- Enlever l'excédent des échantillons

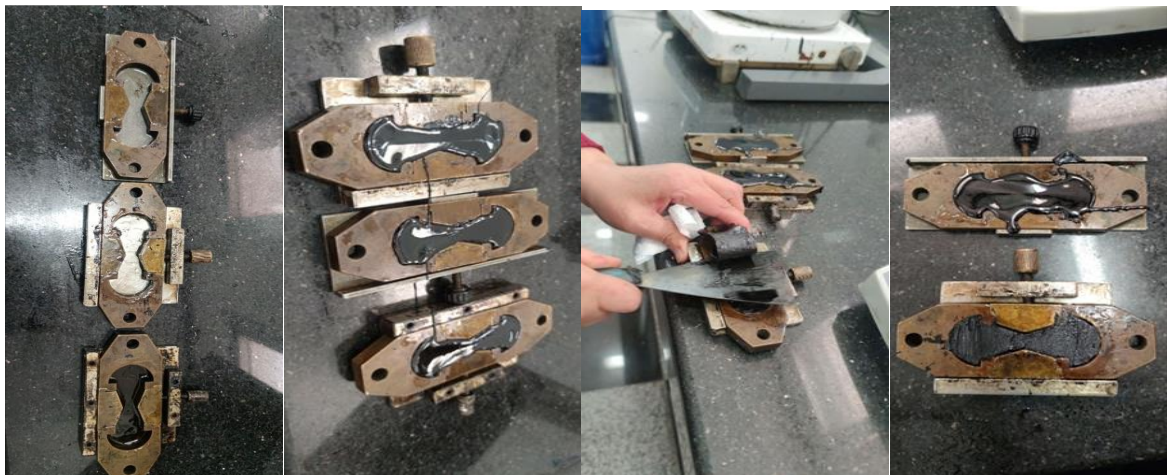


Figure IV-17 : Moule pour la confection des éprouvettes (photos originales).

- Laisser refroidir pendant 1h30min
- Mettre les éprouvettes en bain marie à une température ambiante de 25 °C pendant 30 minutes
- Placer l'éprouvette dans le ductilimètre



Figure IV.18 : L'emplacement des éprouvettes dans le ductilimètre (photo originale).

- Etirer les éprouvettes à la température d'essai $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ à une vitesse de (50 ± 2.5) mm/min jusqu'à une elongation de (200 ± 0.1) mm



Figure IV-19 : Etirement des éprouvettes à 200 mm (photo original).

- Couper l'échantillon au le milieu (100mm)



Figure IV.20 : Découpe de l'échantillon (photo original).

- Laisser reposer pendant 30 minutes afin de déterminer le retour élastique



Figure IV.21 : Retour élastique des éprouvettes (photo originale).

- Mesurer le retour élastique à l'aide d'une règle
- Appliquer l'équation suivante pour le calcul de retour élastique :

$$Re = ((R_0 - R_1) / R_0) * 100 \dots \dots \dots (IV.2)$$

IV.4-7. Stabilité au stockage

Principe de l'essai

Un échantillon homogène de bitumes modifiés est maintenu dans un récipient vertical à la température de 180°C, ou à une température prescrite par le producteur, pendant trois (03) jours. Après refroidissement, cet échantillon est divisé en trois (03) parts égales. Les deux (02) portions extrêmes (supérieure et inférieure) sont ensuite analysées par la méthode de point de ramollissement pour déterminer la stabilité au stockage [74]. Ce test est réalisé selon la norme NF EN 13 399.

Mode opération

- **Généralités** Prélever au moins 150 g d'échantillon de laboratoire conformément à l'EN 12594 et le placer dans un conteneur convenable
- **Remplissage du tube**



Figure IV.22 : Remplissage des tubes par les échantillons (**photo originale**).

- **Fermeture du tube**



Figure IV-23 : Fermeture des tubes (**photo originale**).

- **Conditions d'essai :** Dans l'heure suivant le remplissage, placer le tube en position verticale dans l'étuve préalablement chauffée. S'assurer que le tube est maintenu en position verticale avec une précision de ± 5 °C par rapport à la température choisie pendant (72 ± 1) h.



Figure IV-24 : Placement des tubes dans l'étuve pendant 72h à 180°C (photo originale).

- **Récupération de l'échantillon**

Enlever le tube de l'étuve et laisser le refroidir à température ambiante toujours dans la même position verticale.

Ôter la feuille d'aluminium qui constitue le tube pour récupérer l'échantillon de bitume modifié.

NOTE 1 Pour cette opération, il est recommandé de placer le tube dans une chambre frigorifique, par exemple pendant 30 min à -20°C, puis enlever rapidement la feuille d'aluminium.

Placer l'échantillon cylindrique récupéré horizontalement sur une surface plane propre et le couper en trois parties égales à l'aide d'un couteau chauffé.

Placer les portions supérieure et inférieure séparément dans les boîtes marquées <<haut>>et <<bas>>. Ces portions sont maintenant prêtes pour les essais ultérieurs.



Figure IV.25 : Placement et découpage des tubes en trois portions (photo originale).

- Faire l'essai par la méthode de point de ramollissement en quatre portions deux anneaux hauts et deux anneaux bas

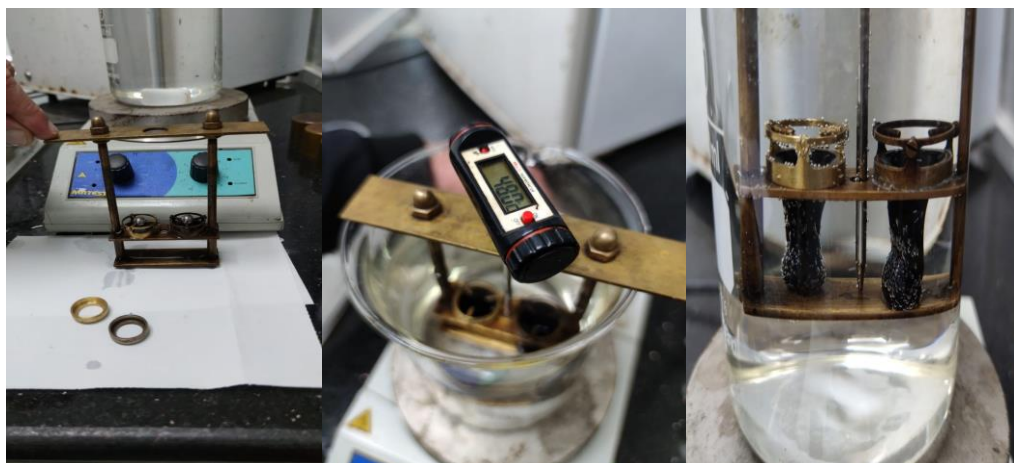


Figure IV.26 : L'essai de TBA pour déterminer la stabilité au stockage (photo originale).

IV-5 Conclusion

Ce chapitre présente les différentes méthodes et mode opératoire exécuté pour réaliser le travail expérimental. Différentes tâches ont été exécutées au sein du laboratoire des Travaux Publics de Est (LTP-E) –EL EULMA.

Une description complète est donnée pour résumer notre travail pratique en termes de préparations des échantillons, exécution des essais et analyse. Les essais réalisés dans le cadre de la présente étude se sont limités aux essais disponibles. Cependant beaucoup de difficultés ont été rencontrées afin d'effectuer certains essais. On notera toutefois les difficultés rencontrées lors de l'opération de modification et d'adjonction de mélange dans le bitume de base qui reste une opération délicate et lente et dont les résultats expérimentaux en dépendent considérablement.

Les résultats obtenus à partir des essais réalisés sur les divers échantillons se révèlent extrêmement captivants et fournissent une mine d'informations précieuses. Ces résultats seront présentés dans le chapitre suivant, accompagnés de leurs interprétations détaillées

CHAPITRE V :
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

V-1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons et discutons les résultats obtenus des essais réalisés au laboratoire sur le bitume pur 40/50 et le bitume modifié par le SBS (BMP) % à différentes teneurs en SBS : 0%, 2%, 4%, 6% et 8% du SBS. Ces essais ont pour but d'évaluer l'influence de la teneur en SBS sur les propriétés des bitumes.

V-2 Caractérisation des bitumes modifiés par polymères

V-2.1 Pénétrabilité

Le **tableau V.1** regroupe les résultats des essais de pénétrabilité obtenus pour différents taux de polymères SBS : 0%, 2%, 4%, 6% et 8%.

Tableau V.1 : Résultats de pénétrabilité des bitumes/SBS (BMP).

Teneur en SBS (%)	0	2	4	6	8
Valeur de la pénétrabilité (1/10mm)	42	35	34	33	31,5

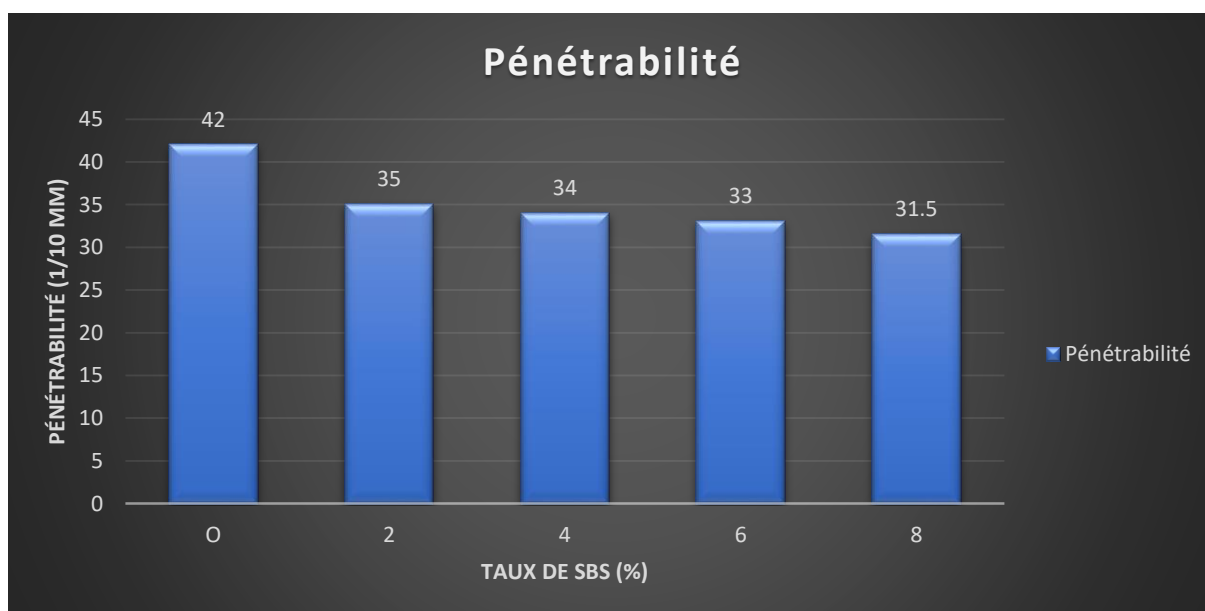


Figure V.1 Variation de la pénétrabilité des matériaux BMP en fonction du pourcentage du polymère (SBS).

La **figure V.1** représente la variation de la pénétrabilité des matériaux BMP en fonction du taux de SBS.

On remarque que la pénétrabilité diminue progressivement lorsque le pourcentage de SBS augmente

- Le bitume pur (0% SBS) possède une pénétrabilité de **42 (1/10mm)**, ce qui indique un bitume plus mou et plus déformable.
- Après l'ajout de 2% de SBS, la pénétrabilité chute à **35 (1/10 mm)**.
- A 4% et 6% de SBS, la diminution continue légèrement avec des valeurs respectives de 34 et 33 (1/10 mm).
- La plus faible valeur est obtenue à 8% de SBS avec 31.5 (1/10 mm).

Cette diminution montre que l'ajout de polymère SBS rend le bitume plus dur et plus rigide. En effet, le SBS améliore la structure du liant en augmentant sa cohésion et sa résistance à la déformation.

La diminution est plus importante entre 0% et 2% de SBS, puis elle devient plus faible pour les taux supérieurs. Cela signifie qu'une grande partie de l'effet de SBS apparaît dès les premiers pourcentages d'ajout.

D'après les résultats obtenus, l'incorporation du SBS entraîne une baisse de la pénétrabilité du bitume, passant de 42 à 31,5 (1/10mm) lorsque le taux de SBS augmente de 0% à 8%. Cette évolution indique une amélioration de la dureté et de la stabilité du liant modifié.

On peut conclure que le SBS améliore les propriétés mécaniques du bitume en le rendant plus résistant aux déformations, notamment sous l'effet des charges et des températures élevées, toutefois, il est nécessaire de choisir un taux optimal de SBS (8% dans le cas de cette étude) afin d'obtenir un bon compromis entre rigidité, élasticité et facilité de mise en œuvre

V-2.2 Point de ramollissement (TBA)

Le **tableau V.2** regroupe les résultats de l'essai de point de ramollissement (TBA) obtenus pour différents matériaux BMP en fonction des taux de polymères SBS : 0%, 2%, 4%, 6% et 8%.

Tableau V.2 : Résultats du point de ramollissement (TBA) des bitumes/SBS (BMP).

Teneur en SBS (%)	0	2	4	6	8
Valeur de TBA (°C)	50	52	55	85	99

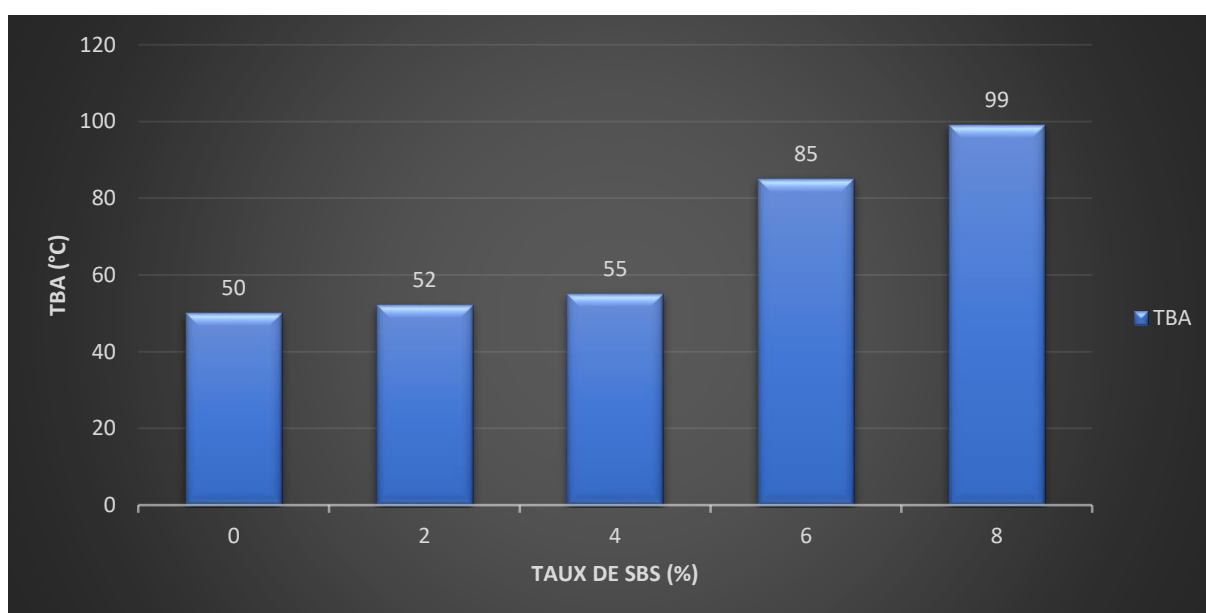


Figure V2 : Variation de point de ramollissement des matériaux BMP en fonction du pourcentage du polymère (SBS).

La **figure V.2** représente la variation du point de ramollissement des matériaux BMP en fonction du taux de SBS.

On observe une augmentation progressive du point de ramollissement avec l'augmentation du taux de SBS.

- Le bitume pur (0% de SBS) possède un point de ramollissement de 50 °C, ce qui signifie qu'il commence à se ramollir à une température relativement faible.
- Avec l'ajout de 2% de SBS, le TBA augmente légèrement à 52 °C.
- A 4% de SBS, la valeur atteint 55 °C, montrant une amélioration de la résistance thermique.
- Une augmentation très importante est observée à 6% de SBS, ou le TBA atteint 85 °C.
- La valeur maximale est obtenue à 8% de SBS, TBA= 99 °C.

Cette évolution montre que l'ajout de SBS améliore fortement la résistance du bitume aux températures élevées. En effet, le point de ramollissement du bitume augmente avec la teneur en SBS.

Le polymère forme une structure plus stable dans le liant, ce qui limite sa déformation à température élevée.

L'augmentation est faible entre 0% et 4% de SBS, puis devient très marqué à partir de 6%, ce qui indique que l'effet du SBS devient plus significatif à des pourcentages élevés.

D'après les résultats obtenus, l'incorporation du SBS entraîne une augmentation nette du point de ramollissement du bitume, passant de 50 °C pour le bitume non modifié à 99 °C pour le bitume contenant 8% de SBS.

On peut conclure que le SBS améliore fortement la stabilité thermique du bitume et le rend moins sensible aux températures élevées. Cette amélioration est favorable pour les chaussées, car elle permet de réduire les risques de déformation, d'orniérage et de ramollissement du revêtement en période chaude. Le taux de 8% de SBS donne la meilleure performance thermique parmi les formulations étudiées.

V-2.3 Retour élastique

Le **tableau V.3** regroupe les résultats des essais de retour élastique obtenus pour différents taux de polymère SBS : 0% ; 2% ; 4% ; 6% et 8%.

Tableau V.3 : Résultats de retour élastique des bitumes/SBS (BMP).

Teneur en SBS (%)	0	2	4	6	8
Valeur de retour élastique (%)	/	42	76	82	96

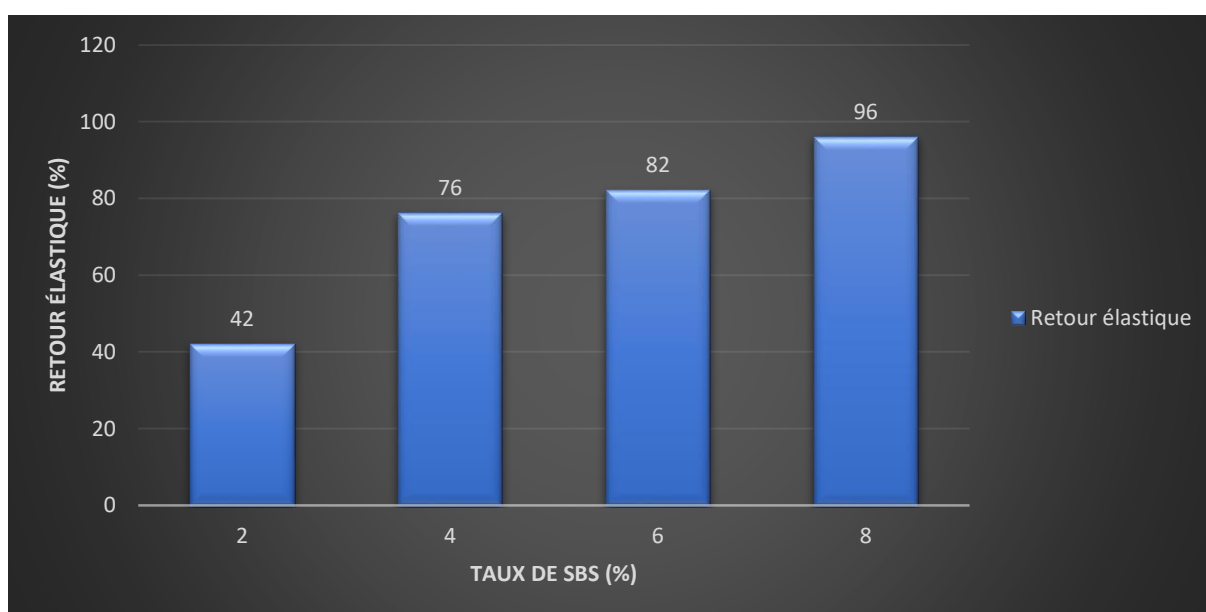


Figure V-3 : Variation de retour élastique des matériaux BMP en fonction du pourcentage du polymère (SBS).

La **figure V.3** représente la variation du retour élastique des matériaux BMP en fonction du taux de SBS.

On observe une augmentation nette de retour élastique lorsque le pourcentage de SBS augmente.

- Pour un taux de 2% de SBS, le retour élastique est de 42%. Cela montre une première amélioration du comportement élastique du bitume après l'ajout du polymère.
- A 4% de SBS, le retour élastique augmente fortement jusqu'à 76%. Cette augmentation importante indique que le SBS améliore considérablement la capacité du bitume à retrouver sa forme après déformation.
- A 6% de SBS, la valeur atteint 82%. L'amélioration continue mais avec une augmentation plus faible par rapport au passage de 2% à 4%.
- Pour 8% de SBS, le retour élastique atteint 96%, qui représente la valeur maximale obtenue.

Il y a une relation croissante entre le taux de SBS et le retour élastique : Plus la teneur en SBS augmente, plus le bitume devient élastique.

Le SBS donne au liant une meilleure capacité à reprendre sa forme initiale après déformation. Ainsi, plus le taux de SBS est élevée, plus le bitume devient élastique et résistant aux déformations permanentes.

L'augmentation la plus importante est observée entre 2% et 4%, ce qui indique que l'effet du SBS sur l'élasticité est très marqué dès les premiers dosages. A partir de 6%, l'amélioration se poursuit, mais de façon plus progressive.

L'ajout du polymère SBS améliore fortement le retour élastique du bitume. Les résultats montrent que l'augmentation de la teneur en SBS entraîne une amélioration progressive des propriétés élastiques du matériau. Le meilleur comportement est obtenu avec 8% de SBS, où le retour élastique atteint 96%.

Ainsi, le SBS permet d'obtenir un bitume plus souple, plus élastique et plus résistant aux déformations permanentes, ce qui améliore les performances mécaniques et la durabilité des chaussées.

V-2.4 Stabilité au stockage

Le **tableau V.4** regroupe les résultats de l'essai de stabilité au stockage obtenus pour différents taux de polymère SBS : 0% ; 2% ; 4% ; 6% et 8%.

Tableau V.4 : Résultats de stabilité au stockage des bitumes/SBS (BMP).

Teneur en SBS (%)	0	2	4	6	8
Valeur de stabilité au stockage (°C)	/	A=52.7 B=53.4	A=54 B=54	A=67.3 B=67.9	A=84.2 B=84.7

A : Partie inférieure (Bas) ; **B** : Partie supérieure (Haut)

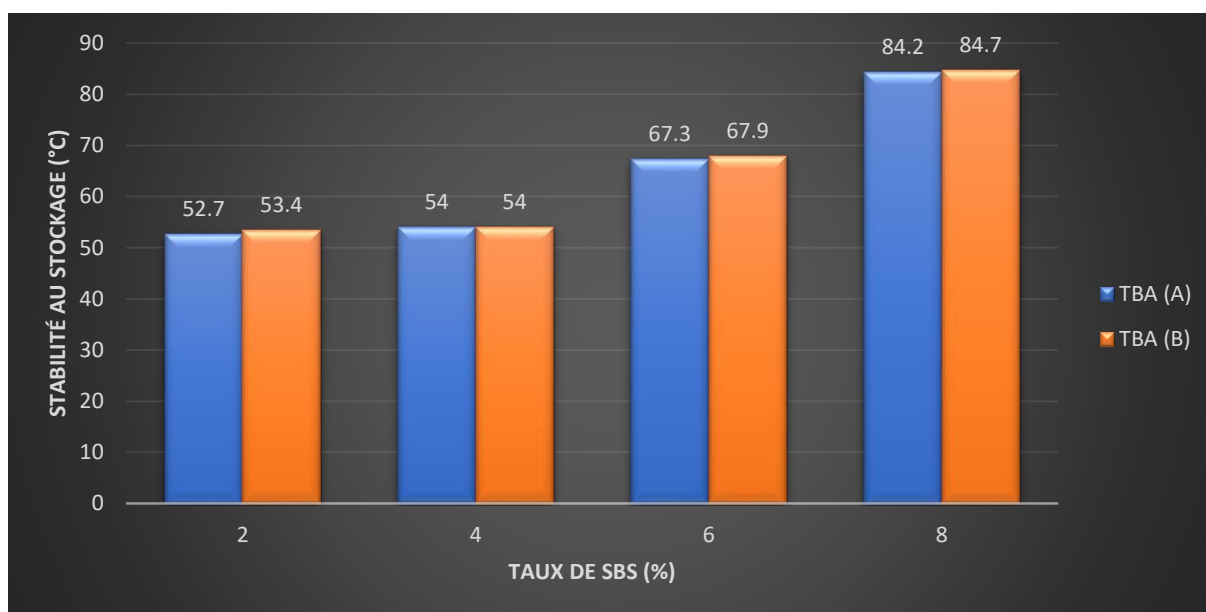


Figure V-4 : Variation de stabilité au stockage des matériaux BMP en fonction du pourcentage des polymères (SBS).

La **figure V.4** représente la variation de la stabilité au stockage des matériaux BMP en fonction du taux de SBS.

Cet essai permet d'évaluer l'homogénéité du mélange bitume-polymère après stockage à chaud. Les valeurs A et B représentent les températures de ramollissement mesurées sur deux parties de l'échantillon, la partie haute et la partie basse.

- A 2 % de SBS, les valeurs sont proches $A = 52,7^{\circ}\text{C}$ et $B = 53,4^{\circ}\text{C}$. La différence est faible, ce qui indique une bonne stabilité au stockage et une bonne homogénéité du bitume modifié.
- A 4 % de SBS, les deux valeurs sont identiques $A = 54^{\circ}\text{C}$ et $B = 54^{\circ}\text{C}$. Cela montre que le polymère est bien dispersé dans le bitume, sans séparation notable pendant le stockage.
- À 6 % de SBS, les valeurs restent également proches $A = 67,3^{\circ}\text{C}$ et $B = 67,9^{\circ}\text{C}$. On observe une augmentation importante de stabilité au stockage avec le taux de SBS, la différence entre les deux mesures reste très faible, ce qui traduit encore une bonne compatibilité entre le bitume et le polymère.
- Pour 8 % de SBS, les valeurs sont $A = 84,2^{\circ}\text{C}$ et $B = 84,7^{\circ}\text{C}$. Le point de ramollissement augmente fortement, mais l'écart entre les deux parties de l'échantillon demeure faible. Cela signifie que le mélange donne une bonne stabilité thermique ainsi qu'une bonne stabilité au stockage même avec un taux élevé de SBS.

De manière générale, l'histogramme montre que la stabilité au stockage augmente avec l'augmentation du taux de SBS. Les valeurs passent d'environ 53°C à 2 % jusqu'à environ 84°C à 8 %. Cette augmentation indique que l'ajout de SBS améliore la résistance thermique du bitume modifié. De plus, les faibles différences entre les valeurs A et B montrent que le mélange bitume-SBS est homogène et ne présente pas de séparation importante pendant le stockage.

D'après les résultats du tableau et de la **figure V.4**, on peut conclure que le bitume modifié par le SBS présente une bonne stabilité au stockage. Les valeurs mesurées pour les deux parties de l'échantillon sont très proches pour tous les taux étudiés, ce qui indique une bonne dispersion du polymère dans le bitume.

L'augmentation du taux de SBS entraîne aussi une augmentation du point de ramollissement, ce qui améliore la résistance du bitume aux températures élevées. La teneur en 8 % de SBS donne les valeurs les plus élevées, avec 84,2°C et 84,7°C, tout en conservant une bonne homogénéité. Ainsi, le SBS améliore à la fois la stabilité thermique et la stabilité au stockage du bitume modifié.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'ensemble des essais réalisés montre que **l'ajout du polymère SBS** améliore nettement **les propriétés** du bitume modifié.

Les résultats de l'essai de pénétrabilité indiquent une diminution progressive de la pénétration lorsque le taux de SBS augmente. Cette baisse traduit un durcissement du bitume et une meilleure résistance à la déformation. Le bitume devient donc moins mou et plus stable sous l'effet des charges.

L'essai du point de ramollissement TBA montre une augmentation importante de la température de ramollissement avec l'augmentation du taux de SBS. Cela signifie que le bitume modifié résiste mieux aux températures élevées et présente une meilleure stabilité thermique. Cette amélioration est particulièrement remarquable à partir de 6 % de SBS.

Les résultats du retour élastique montrent également une forte amélioration du comportement élastique du bitume. Plus le pourcentage de SBS augmente, plus le bitume retrouve sa forme initiale après déformation. Cela permet de limiter les déformations permanentes, notamment l'orniérage dans les chaussées.

Enfin, l'essai de stabilité au stockage montre que les valeurs mesurées entre les deux parties de l'échantillon sont très proches. Cela indique une bonne homogénéité du mélange bitume-SBS et une absence de séparation importante pendant le stockage. Le bitume modifié reste donc stable même avec des teneurs élevées en SBS.

En conclusion, le **SBS** améliore la dureté, la résistance thermique, l'élasticité et la stabilité au stockage du bitume. Le **taux de 8 % de SBS** présente les meilleures performances globales parmi les formulations étudiées. Toutefois, le choix du dosage optimal doit tenir compte du compromis entre les **performances recherchées**, la **facilité de mise en œuvre** et le **coût** du matériau.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Cheng, C., Gong, F., Fu, Y., Liu, J., Qiao, J., 2021. Effect of polyethylene glycol/polyacrylamide graft copolymerization phase change materials on the performance of asphalt mixture for road engineering. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol. 15, PP: 1970–1983
- [2] AL-Ghurabi, S., Al-Humeidawi, H., 2023. Evaluation of performance of hot mix asphalt contained various sizes of Reclaim asphalt pavement and polymer modified Bitumen. *Materials Today: Proceedings*; Vol.80(3),PP:2905-2910.
- [3] Mustafa Kamal, M., Arifin Hadithon, K., Abu Bakar, R., 2020. Natural Rubber Modified Asphalt. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. PP: 498, 012001;
- [4] Al-Hadidy, AI., Tan Yi-qiu., Ayman Talib Hameed., 2011. Starch as a modifier for asphalt paving materials. *Construction and Building Materials*, Vol. PP: 25, 14–20;
- [5] Yusoff, N. I. M., Ibrahim Alhamali, D., Ibrahim, A. N. H., Rosyidi, S. A. P., Abdul Hassan, N., 2019. Engineering characteristics of nanosilica/polymer-modified bitumen and predicting their rheological properties using multilayer perceptron neural network model. *Construction and Building Materials*, Vol. 204, PP: 781–799 ;
- [6] Usmani, A. M. 1996. Polymer Modification of Asphalt: Chemistry and Technology. *Polymer News*, Vol .21, PP : 262-267.
- [7] Kebaïli, N. 2017. L'asphalte caoutchouc valorisation de la poudrette de caoutchouc en domaine routier, Thèse de Doctorat. Génie Civil. Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [8] Anaclet, P., Julien, V., Mariotti, S., Backov, R., & Schmitt, V. 2017. Development of dispersible and flowable powdered bitumen. *J. Clean. Prod.*, Vol. 141, PP: 940-946.
- [9] Crucho, J., Picado-Santos, L., Neves, J., & Capitão, S. 2019. A review of nanomaterials' Effect on mechanical performance and aging of asphalt mixtures. *Appl. Sci.*, Vol. 9, PP: 1-11.
- [10] Al-Hadidy, A. I., Tan, Y.-q. 2009. Effect of polyethylene on life of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, PP: 1456-1464.
- [11] Sustic, A. 1997. Amorphous Polyalphaolefins (APAOs) as Performance Improvers in Asphalt-Containing Materials. In A. M. Usmani (Ed.), *Asphalt Science and Technology*, Marcel Dekker, PP:259-277.
- [12] Bernard Lombardi ,2005 « Bitume info Aménager, construire, innover » Vol.1, PP 1-36.
- [13] Ababsa Moussira, 2006 ; Valorisation des mélanges bitume-polymère par le procédé de lapyrolyse, Mémoire de Magister, Université Larbi Ben M'hidi Oum Elbaouaghi.
- [14] Fethi, Z. 2021. Contribution à l'étude du comportement des bitumes modifiés par l'association du NBR et de déchets plastiques These de Doctorat, Faculte de Genie Civil Universite des Siences et de laTechnologie Houari Boumediene,

- [15] Mokhtar, D. 2012. Valorisation du bitume Algérien Mémoire de Magister, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, Algeria.
- [16] Lesueur, D. 2002. La rhéologie des bitumes : Principes et modification. Rhéologie, Vol. 2, PP: 1-30.
- [17] Groenzin, H., Mullins, O. C. 2000. Molecular size and structure of asphaltenes from various sources. Energy and Fuel, Vol. 14, PP : 677-684.
- [18] Beghin, A. 2003. Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants bitumineux. Thèse de Doctorat. Université Paris 6.
- [19] Fethi, A. 2016. Contribution à l'étude du comportement du bitume modifié au vieillissement. Mémoire de Magister en génie civil, Faculté de Génie Civil Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène,
- [20] Sarr, M. 2002. Étude du comportement des bitumes utilisés en enrobés denses au Sénégal (Projet de fin d'études). Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès, Sénégal.
- [21] Trudeau, S. 2012. Introduction aux bitumes MCA, Formation technique de bitumes Québec, Québec, Canada, pp 1-31,
- [22] Merbouh, M. 2010. Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux: Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue Thèse de Doctorat. Université de Bordeaux-1, France
- [23] Belabed Saida et Zerouel Nacira ; 2006 ; Fluage des enrobés bitumineux avec ajout d'un polymère; projet de fin d'étude Université des Sciences et Technologie Houari Boumediène de Alger.
- [24] Aladekoyi, G., Olumayede., 2020. Improved Performance in Bitumen Properties through Modification with Sheared Polyethylene Waste. Sch Int J Chem Mater Sci. Vol. 3, PP : 109-119
- [25] Groupement professionnel des bitumes, 2015. Le bitume qu'est-ce que c'est ? Genèse, constitution et caractéristiques du bitume, Bitume infos, N° spécial 1.
- [26] Ben Abdallah, A., 2020. Influence du vieillissement sur l'effet mémoire des polymères. Modélisation du mécanisme de mémoire de forme. Thèse de Doctorat. Université d'Hesam, Tunisie ;
- [27] Boughamsa, W., 2008, Les Bitumes Modifiés Par des Polymères, Mémoire de Magister, Université de 20 août 1955 de Skikda.
- [28] Bensbaa, K. 2003, Etude rhéologique des liants modifiés, impact du vieillissement intégrant la démarche, haute qualité environnementale » Mémoire de Magister, Université des Sciences et Technologie Houari Boumediène de Alger.
- [29] WEISS, P. 2009-2010. La chimie des polymères/société francophone de biomatériaux dentaire. , Université Médicale Virtuelle Francophone pp 1-17,

Références bibliographiques

- [30] Djoudi, L; 2007, Etude de la stabilisation du polychlorure de vinyle (PVC) et les phénomènes de dégradation, Mémoire de Magister en Chimie, Université Mohamed Khider – BISKRA.
- [31] Arihant, E.,2022.AMU.B.SC.bachelor of science.(9th ed) .1077p
- [32] Flory,P.J 1953.Principles of Polymer Chemistry. Ithaca, NY: Cornell University Press.
- [33].Tomalia,D., Baker, H., Dewald, J., Hall, M., Kallos, G., Martin, S., Roeck, J., Ryder, J., Smith, P. 1985. A New Class of Polymers. Starburst-Dendritic Macromolecules. Polym. Journal.Vol. 17, PP: 117–132 ;
- [34] Différents types de matières plastiques. **[en ligne]**, disponible sur : [http:// : cap sciences.net /upload/ differents_plastiques](http://sciences.net/upload/differents_plastiques).
- [35] Aucun titre de diapositive Disponble sur " [http://:www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci116/notes cours/5.2polymères](http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci116/notes_cours/5.2polymeres). pp6.
- [36] Reda , A.,2014. Polymères supramoléculaires semi-cristallins à base de Polyamides et PMMA. Thèse de Doctorat. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, Français ;
- [37] Verma,. Resnick.,Walker., 2022.Prepare guide to Bitsat. “ramchhaya”4577/15, Aggarwal Road. 722p.
- [38] Haudincemef J.-Marc, 2005 ; Cour Matériaux Elaboration des Polymères pp : 1-27.
- [39] Pyshyev, S., Gunka, V., Grytsenko, Y., Bratychak, M., 2016. Polymer modified bitumen.Review. Chemistry & Chemical technology. Vol.10, PP: 631-636;
- [40] Rodrigues, C.,Hanumanthgari, R.,2015. Polymer modified bitumens and other modified binders. In The Shell Bitumen Handbook, 6th ed. London.UK.
- [41] Brasileiro, L., Moreno-Navarro, F., Tauste-Martínez, R., Matos, J., Rubio-Gámez, M. 2019. Reclaimed Polymers as Asphalt Binder Modifiers for More Sustainable Roads: A Review. Sustainability,Vol. 11, PP: 646.
- [42] Dhiman, A., Sandeep, S., 2019. Utilization of Assorted Rubber as Bitumen Stand. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering.Vol. 8, PP: 2278-3075;
- [43] H. Zhang et al. 2009, A novel type of shape memory polymer blend and the shape memory mechanism, Polymer, Vol.50 PP: 1596–1601
- [44] WANG Xiungya, LIU Zhaowei, 1984, Control of the polymerization rate and synthesis of Linear SBS thermoplastic elastomers, Chem. Eng. Res. Inst., Lanzhou Chemical Industry Corp. China,Hecheng Xiangjiao Gongye, Vol. 7(2), PP: 99–105
- [45] WANG Xiungya, LIU Zhaowei, 1984, Synthesis and properties of radial SBS block copolymers”,Hecheng Xiangjiao Gongye, Vol. 7(3), PP: 171–175
- [46] SIGWALT P. 1975, Relations entre les méthodes de synthèse, la structure des composés macromoléculaires et leurs caractéristiques plastiques ou caoutchoutiques”, RGCP, vol. 52, PP : 257–259
- [47] Notice technique, Cariflex TR, Elastomères Shell

- [48] Shell Bitumen. The Shell Bitumen Handbook, 6th edition, Thomas Telford Publishing, 2015.
- [49] McNally, 2011, Polymer Modified Bitumen: Properties and Characterisation, Woodhead Publishing.
- [50] LCPC Guide Technique, Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en technique routière. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, (1999).
- [51] Olga Solomatnikova, 1998, Comportement rhéologique et propriétés cohésives et Adhésives des liants bitumineux, Université Laval de Canada.
- [52] Bakouri, H., 2021. Modification et étude de propriétés physico-chimiques de l'amidon en présence du liquide ionique [Bmim]Cl en vue de leurs applications biomédicales. Thèse de Doctorat. Université Djillali Liabes Sidi bel abbes, Algérie ;
- [53] Gurram, R., & Sahoo, B. 2021. A study of modified characteristics in pavements by replacing bitumen with styrene butadiene rubber (sbr) latex. International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology, Vol. 8, PP: 101-109
- [54] Li, J., Zhang, Y., & Zhang, Y. 2008. The research of GMA-g-LDPE modified Qinhuangdao bitumen. Construction and Building Materials. Vol. 22, PP: 1067-1073.
- [55] Ahmedzade, P., Tigdemir, M., & Kalyoncuoglu, S. F. 2005. Laboratory investigation of the properties of asphalt concrete mixtures modified with TOP-SBS. Construction and Building Materials, Vol. 21, PP: 626-633.
- [56] Alatas, T., & Yilmaz, M. 2013. Effects of different polymers on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures. Construction and Building Materials, Vol. 42, PP: 161-
- [57] Haddadi, S., Ghorbel, E., & Laradi, N. 2008. Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA. Construction and Building Materials, Vol. 22, PP: 1212-1219
- [58] Bouchouk, K. 2022. Étude et comparaison de l'orniérage des chaussées bitumineuses avec le phénomène de fatigue [Study and comparison of rutting in bituminous pavements with fatigue phenomenon] , Thèse de Doctorat en Génie Civil). Université Larbi Tébessi – Tébessa.
- [59] Kebaili, N., Zerzour, A., & Belabdelouhab, F. 2015. Influence of Rubber Fine Powder on the Characteristics of the Bitumens in Algeria. In International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, TMREES15.
- [60] Airey GD, Rahman MM, Collop AC. 2003, Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method. Int J Pavement Eng. Vol.4, PP:105-119.
- [61] Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., & Dalmazzo, D. 2012. Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes. Procedia-Social and Behavioral Sciences, Vol.53, PP: 546-555.
- [62] Corté, J. F., & Di Benedetto, H. 2004. Matériaux routiers bitumineux [Bituminous road materials]. Editions Lavoisier.

Références bibliographiques

- [63] Read J, Whiteoak D. 2003, The Shell Bitumen Handbook. 5th ed. London: Thomas Telford.
- [64] Polacco G, Filippi S, Merusi F, Stastna J. 2015, A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. Prog Polym Sci. Vol. 45 PP: 1–43.
- [65] Airey GD. Rheological properties of polymer modified bitumens. Fuel. 2003;82(14):1709–1719.
- [66] Lu X, Isacson U. 1998, Chemical and rheological evaluation of ageing properties of SBS polymer modified bitumens. Fuel. Vol.77 PP: 961–972.
- [67] Bahia H.U, Anderson D.A.1995. The effects of polymer modification on binder rheology and pavement performance. Asphalt Paving Technology. ;64:144–175.
- [68] NF EN 1426 Essai de pénétrabilité
- [69] NF EN 1427 Essai de Température de ramollissement par bille et anneau
- [70] NF EN 15326+A1 Essai de densité relative
- [71] NF EN 12 593 Essai de Température de fragilité fraass
- [72] NF T 66-032 Essai de Ductilité à 25°C
- [73] NF EN 13 398 Essai de retour élastique
- [74] NF EN 13399 Essai de Stabilité de stockage

LES ANNEXES

Présentation de l'entreprise "NAFTAL"

Définition ET Historique de NAFTAL

NAFTAL est issue de la restructuration de la SONATRACH en 1982. A cette époque, elle avait un statut d'entreprise publique économique, depuis 1997 elle est devenue une S.P.A, filiale à 100% de SONATRACH. NAFTAL est la plus grande filiale du Groupe SONATRACH et la deuxième entreprise algérienne de par son effectif, de son chiffre d'affaires et de son capital de 15.650.000.00 DA La société compte 30.000 travailleurs et enregistre un chiffre d'affaires moyen de deux milliards et demi de Dollars.

C'est une entreprise qui couvre tous les besoins du pays en matière de produits pétroliers, en l'occurrence les carburants, le GPL, les produits aviation et marine, les pneumatiques, les bitumes et les lubrifiants, etc...

Raison sociale de NAFTAL

Entreprise nationale de commercialisation et de distribution des produits pétroliers.

Création de l'entreprise

- L'entreprise ERDP (entreprise de raffinage et de distribution des produits pétroliers) a été créée par décret N°80 - 101 du 6 Avril 1980, modifié et complété par le décret N°83 -112 du 05 février 1983 et N°87 - 189 en 1987 portant restructurations de NAFTAL ; elle est placée sous la tutelle du ministre de l'énergie et des mines.
- L'entreprise ERDP NAFTAL chargée de l'industrie de la raffinerie et de la distribution des produits pétroliers y compris les produits CLP (carburant, lubrifiant, pneumatique), GPL (gaz de pétrole liquéfié) et BTM (bitumes).
- NAFTAL entre en activité le 01 Janvier 1982.

En 1987 : L'ERDP a fait l'objet d'une restructuration qui l'a divisée en deux (02) :

1. NAFTEC

Entreprise chargée de raffinage, a pour mission d'organiser, gérer, promouvoir et développer l'industrie de raffinage.

2. NAFTAL

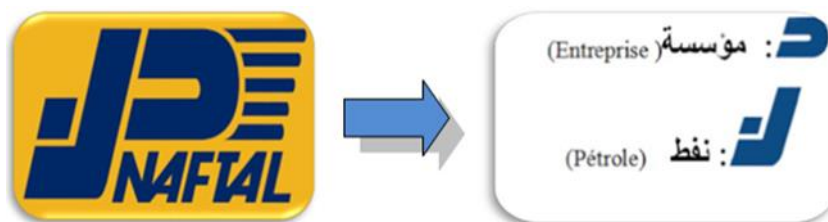
- Chargée de la commercialisation et de la distribution des produits pétroliers, elle a pour mission d'organiser et de gérer le réseau de la distribution

- A partir de 1998, elle change de statut et devient filiale à 100% de SONATRACH Son capital social est fixé à la somme de 6650 millions de dinars, il est divisé en six cent Soixante-cinq actions d'une valeur de 10 millions de dinars chacune numérotée de 1 665 entièrement détenues par SONATRACH.

Depuis sa création en 1987, NAFTAL subit continuellement des réformes de restructuration de son organisation interne et cela jusqu'en 2004 date de la dernière modification du système d'organisation qui a vu la création de 5 différentes branches autonomes les une des autres et cela pour une meilleure appréciation de la gestion interne. L'appellation de NAFTAL provient de:

NAFT : Pétrole

AL : début du mot Algérie



Les produits commercialisés par l'entreprise

La Famille de Carburant

- ✓ Essence Normale
- ✓ Essence Super
- ✓ Essence sans plomb
- ✓ Gasoil

Le Bitume

NAFTAL commercialise les produits pétroliers dont le bitume est une matière essentielle pour la construction routière

Les Lubrifiants

- ✓ Graisses
- ✓ Huiles

Les pneumatiques

Grace à ses infrastructures de Stockage et son réseau de distribution, NAFTAL commercialise des pneumatiques de grandes marques dans les catégories de véhicules les plus diverses : tourisme , poids lourd. Industriel ...

GPL

Le GPL désignant : Gaz de Pétrole Liquéfié. Dans la gamme des produits GPL, NAFTAL commercialise deux produits essentiels :

- ✓ Le butane (dans des bouteilles de 13 kg, 06 kg, 03 kg),
- ✓ Le propane (conditionné en bouteille de 35 kg).

ANNEXE I : Caractéristiques techniques des bitumes purs

Caractéristiques	Unités	Méthode normalisée de référence	Valeurs limites		
			Bitumes purs		
			40/50	60/70	80/100
Pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s	1/10 mm	NA 5192 (EN 1426)	40 à 50	60 à 70	80 à 100
Point de ramollissement bille et anneau	°C	NA 2617 (EN 1427)	47 à 61	46 à 56	41 à 51
Densité relative à 25°C (au pycnomètre)		NA 5224 (NFT 66-007)	1,0 à 1,1	1,0 à 1,1	1,0 à 1,07
Perte de masse au chauffage (163°C pendant 5 heures)	%	NA 5193	< 1	< 1	< 2
Pourcentage de pénétrabilité restante après perte de masse au chauffage par rapport à la pénétrabilité initiale		et NA 5192 (NFT 66-011)	>70	>70	>70
Point d'éclair (vase ouvert)	°C	NFT 66-118	> 250	> 230	> 230
Ductilité à 25 °C	Cm	NA 5223 (EN 66-066)	> 60	> 80	> 100
Solubilité dans le tétrachloroéthylène (C ₂ Cl ₄)	%	NA 5271 (EN 12592)	> 99,5	> 99,5	> 99,5
Teneur en paraffine	%	NA 5225(EN 12606-2)	< 4,5	< 4,5	< 4,5
Température limite de pompabilité	°C	---	140	130	120

ANNEXE II : Fiche synthèse de bitumes purs (40/50)

Nom du produit : bitume pur grade 40/50 <i>Produit obtenu par la distillation sous vide d'un résidu pétrolier</i>	
Spécifications conformément à la norme NA 5265 (EN 12591)	UTILISATION
Pénétrabilité à 25 °C, 100g, 5s 40 à 50 1/10mm (NF EN 1426) Point de ramollissement bille et anneau 47 à 60 °C (NF EN 1427) Densité relative à 25 °C (<i>au pycnomètre</i>) 1,00 à 1,10 (NFT 66007) Point d'éclair (vase ouvert) > 250 °C (NF EN 22592) Ductilité à 25 °C > 60% (NF EN 66-006) Solubilité dans le tétrachloroéthylène (C₂Cl₄) > 99 % (NF EN 12592) Teneur en paraffines < 4,5 % (NF EN 12602-2)	<u>Routière</u> : la fabrication des enrobés bitumineux à chaud. <u>Industrielle</u> : Ouvrage d'art : couvre parquet Fabrication de bitumes fluidifiés (cut-backs) Formulation des émulsions de bitumes Transformation en bitumes oxydés <u>Hydraulique</u> Sous forme de membranes bitumineuses préfabriquées
STOCKAGE	TRANSPORT
Les bitumes sont des produits pétroliers se manipulant à chaud les meilleurs moyens de chauffage sont les circuits d'huile qui consistent à former une surface de chauffe au fond du bac de stockage. L'huile permet d'atteindre sans pression dans les organes de chauffe, des températures relativement élevées jusqu'à 230°C pour les bitumes soufflés les plus durs.	Le transport des bitumes purs ne relève pas de la réglementation du transport de matières dangereuses. Le bitume pur est transporté en vrac dans des citernes ou conteneurs adaptés d'une capacité moyenne de 20 à 30 tonnes. Les citernes bitumes sont dotées d'un groupe de chauffe.
DANGEROUSITE ET RISQUES	
Les bitumes sont stockés et manipulés à des températures élevées ordinairement supérieures à 130°C ce qui présente un risque de brûlures graves. Ils présentent le risque d'éclaboussures dangereuses ou de moussage résultant du contact du bitume chaud avec une petite quantité d'eau. - A la température ambiante, les bitumes ne présentent aucun risque aigu pour la santé dû à une exposition à courte durée, ils peuvent contenir cependant de très faibles quantités d'hydrocarbures aromatiques polynucléaires (PNA poly Nuclear aromatics). - A l'état chaud, les bitumes dégagent des fumées qu'il, faut éviter d'inhaler, du fait de la présence possible d'hydrogène sulfuré résiduel dans le produit. Dans les conditions d'utilisation normales, les contacts avec la peau des bitumes sont très limités du fait des températures élevées nécessaires à la mise en œuvre du matériau. Les risques cutanés chroniques sont donc très réduits	

ANNEXE III : Fiche technique du SBS

KRATON

K0552
Europe
5/26/2015

KRATON™ D0243 E Polymer

Data Document

Identifier : K552D0d17E

Description

Kraton D0243 E polymer is a clear, diblock copolymer based on styrene and butadiene with bound styrene of 31% mass. It is supplied from Europe in the physical form identified below.

- Kraton D0243 ET - supplied as a porous pellet dusted with talc

Kraton D0243 E is used as a modifier of bitumen or thermoplastics and in compound formulations. It is also suitable as an ingredient in formulating compounds for footwear applications and may be used in formulating adhesives, sealants and coatings.

Sales Specifications

Property	Test Method	Units	Sales Specification Range	Notes
Polystyrene Content	KM 02	%m	30.0 TO 34.0	
Antioxidant	KM 08	%m	0.35 TO 0.48	A
Total Extractables	KM 05	%m	± 1.0	
Volatile Matter	KM 04	%m	± 0.3	
Ash (ET)	ISO 247	%m	0.2 TO 0.5	

■ Non-staining phenolic antioxidants

Typical Properties (These are typical values and may not routinely be measured on finished product)

Property	Test Method	Units	Typical Value	Notes
300% Modulus	ISO 37	MPa	1.0	B
Tensile Strength	ISO 37	Mpa	2	A
Specific Gravity	ISO 2781		0.94	
Vinyl content	KM03	%	± 35	
Hardness, Shore A	ISO 868	Shore A (10 sec)	70	A
Diblock content	n/a		75	

■ Estimated value

Packaging

Kraton Polymers are available in a number of different package types. For information specific to this grade, please contact your local Kraton Polymers representative.

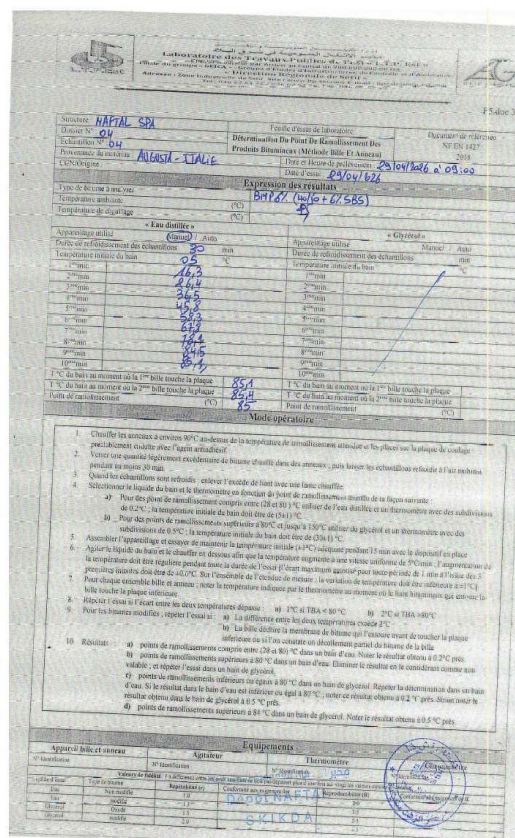
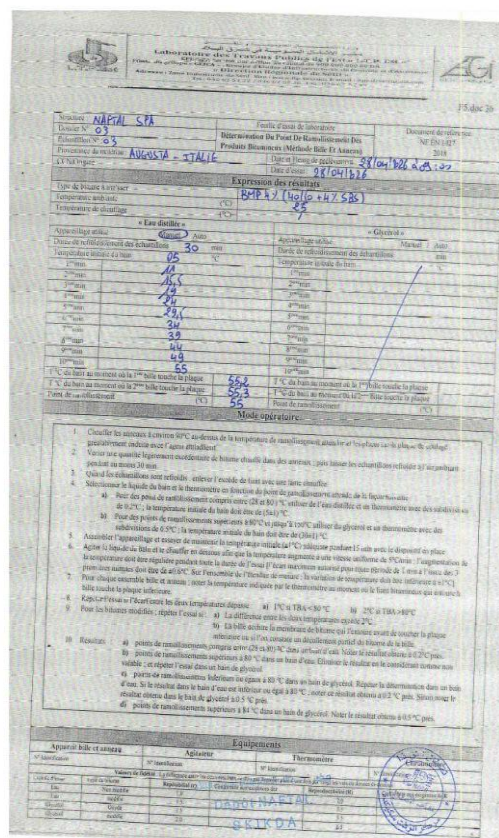
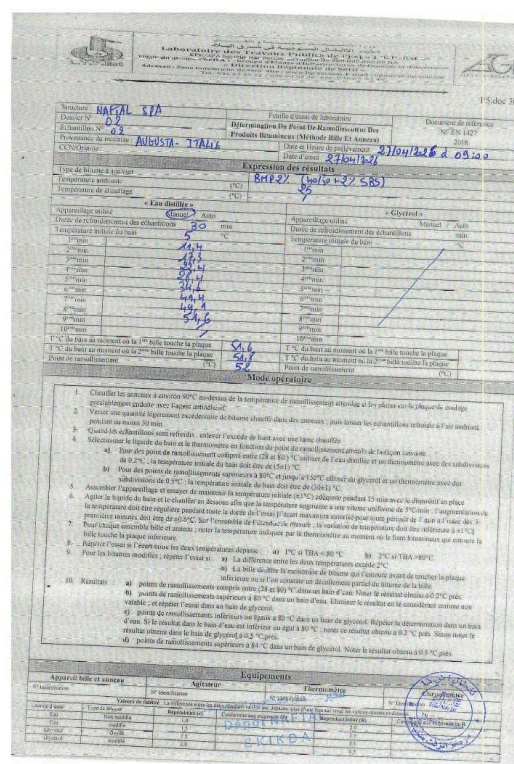
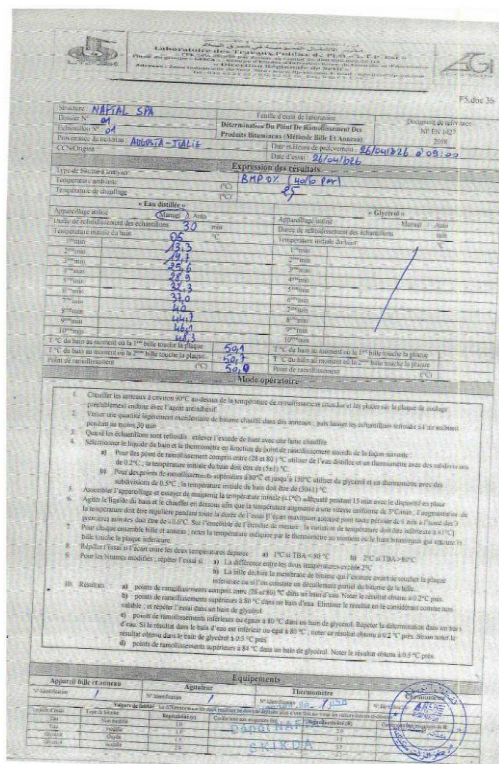
KRATON™ and the Kraton logo are either trademarks or registered trademarks of Kraton Corporation, or its subsidiaries or affiliates, in one or more, but not all countries.

©2016 Kraton Corporation

[illegible][illegible]

Nom et Prénom K. BELABED Signature	Responsable Nom et Prénom K. BELABED Signature
--	---

ANNEXE V : Résultats des essais point de ramollissement (TBA)



87

ANNEXE VI : Résultats des essais retour élastique

Structure: **ALGAL SH** F5.doc 18 / 1

Document de référence: **NF EN 13198**

Provenance du matériau: **ANASTA - ITALIE**

Données de base:

- Type de béton à analyser: **BAP 32 (10/10 + 2/5/5)**
- Température de la pâte: **25**
- Température de chauffage du béton avant l'essai: **25**
- Température de l'essai: **25**
- Date de réajustement de l'appareil: **25/04/2011**
- Date de réajustement de l'appareil dans le bain marin: **25/04/2011**
- Date de réajustement de l'appareil dans la cellule: **25/04/2011**
- Données des deux fils coupés: **80 mm**
- Ressort élastique: **80**
- Moyenne: **80**

Mode opératoire:

- Chauffer le matériau à la température requise (20 ± 0,5 °C) au-dessus du point de ramollissement attendu et remplir un récipient d'échantillon propre (exemple de tous types de produits, de grains, de moules, etc.).
- Pour les bétons modifiés par les polymères, la température ne doit pas dépasser 200 °C, quel que soit le point de ramollissement mesuré et les temps d'ajustement du béton à son état.
- La plaque de base et les pressoirs latéraux doivent être réglés d'une fine couche d'agent de démoulage; puis assembler les moules et les remplir soigneusement de béton à son état.
- Laisser les échantillons mouler pendant environ 1h à température ambiante; puis retirer l'excès d'échantillon à l'aide d'un couteau chauffé.
- Placer les moules dans le bain d'eau saturée à la température d'essai pendant (24 ± 1) min.
- Le temps entre le remplissage des moules et le début de l'allongement ne doit pas dépasser (150 ± 10) min.
- Contrôler la température de l'eau et elle ne doit pas varier de plus de ± 0,5 °C de la température d'essai spécifiée.
- Enlever la plaque de base et les pressoirs latéraux et transvaser les échantillons de béton sur les plateaux de traction.
- Enlever les échantillons à la température d'essai (20 ± 0,5 °C) à une vitesse de (20 ± 2) mm/min jusqu'à une elongation de (200 ± 1) mm.
- Au plus tard 10 s après l'arrêt du dispositif de traction, couper les fils de béton par le milieu à l'aide d'une paire de ciseaux pour obtenir deux moitiés de fils.
- Trente minutes après avoir coupé les fils de béton, utiliser une règle pour mesurer les longueurs entre les extrémités des demi-fils au millimètre près.
- Calculer le retour élastique (R_E) comme un pourcentage arrondi à 1% à l'aide de l'équation ci-dessous:

$$R_E = \frac{d}{L} \times 100$$

d: la distance entre les deux fils, en mm
L: longueur d'allongement, en cm de rupture anticipée; L est la longueur à la rupture.

Observations:

Structure: **ALGAL SH** F5.doc 18 / 1

Document de référence: **NF EN 13198**

Provenance du matériau: **ANASTA - ITALIE**

Données de base:

- Type de béton à analyser: **BAP 32 (10/10 + 2/5/5)**
- Température de la pâte: **25**
- Température de chauffage du béton avant l'essai: **25**
- Température de l'essai: **25**
- Date de réajustement de l'appareil: **25/04/2011**
- Date de réajustement de l'appareil dans le bain marin: **25/04/2011**
- Date de réajustement de l'appareil dans la cellule: **25/04/2011**
- Données des deux fils coupés: **80 mm**
- Ressort élastique: **80**
- Moyenne: **80**

Mode opératoire:

- Chauffer le matériau à la température requise (20 ± 0,5 °C) au-dessus du point de ramollissement attendu et remplir un récipient d'échantillon propre (exemple de tous types de produits, de grains, de moules, etc.).
- Pour les bétons modifiés par les polymères, la température ne doit pas dépasser 200 °C, quel que soit le point de ramollissement mesuré et les temps d'ajustement du béton à son état.
- La plaque de base et les pressoirs latéraux doivent être réglés d'une fine couche d'agent de démoulage; puis assembler les moules et les remplir soigneusement de béton à son état.
- Laisser les échantillons mouler pendant environ 1h à température ambiante; puis retirer l'excès d'échantillon à l'aide d'un couteau chauffé.
- Placer les moules dans le bain d'eau saturée à la température d'essai pendant (24 ± 1) min.
- Le temps entre le remplissage des moules et le début de l'allongement ne doit pas dépasser (150 ± 10) min.
- Contrôler la température de l'eau et elle ne doit pas varier de plus de ± 0,5 °C de la température d'essai spécifiée.
- Enlever la plaque de base et les pressoirs latéraux et transvaser les échantillons de béton sur les plateaux de traction.
- Enlever les échantillons à la température d'essai (20 ± 0,5 °C) à une vitesse de (20 ± 2) mm/min jusqu'à une elongation de (200 ± 1) mm.
- Au plus tard 10 s après l'arrêt du dispositif de traction, couper les fils de béton par le milieu à l'aide d'une paire de ciseaux pour obtenir deux moitiés de fils.
- Trente minutes après avoir coupé les fils de béton, utiliser une règle pour mesurer les longueurs entre les extrémités des demi-fils au millimètre près.
- Calculer le retour élastique (R_E) comme un pourcentage arrondi à 1% à l'aide de l'équation ci-dessous:

$$R_E = \frac{d}{L} \times 100$$

d: la distance entre les deux fils, en mm
L: longueur d'allongement, en cm de rupture anticipée; L est la longueur à la rupture.

Observations:

Structure: **ALGAL SH** F5.doc 18 / 1

Document de référence: **NF EN 13198**

Provenance du matériau: **ANASTA - ITALIE**

Données de base:

- Type de béton à analyser: **BAP 32 (10/10 + 2/5/5)**
- Température de la pâte: **25**
- Température de chauffage du béton avant l'essai: **25**
- Température de l'essai: **25**
- Date de réajustement de l'appareil: **25/04/2011**
- Date de réajustement de l'appareil dans le bain marin: **25/04/2011**
- Date de réajustement de l'appareil dans la cellule: **25/04/2011**
- Données des deux fils coupés: **80 mm**
- Ressort élastique: **80**
- Moyenne: **80**

Mode opératoire:

- Chauffer le matériau à la température requise (20 ± 0,5 °C) au-dessus du point de ramollissement attendu et remplir un récipient d'échantillon propre (exemple de tous types de produits, de grains, de moules, etc.).
- Pour les bétons modifiés par les polymères, la température ne doit pas dépasser 200 °C, quel que soit le point de ramollissement mesuré et les temps d'ajustement du béton à son état.
- La plaque de base et les pressoirs latéraux doivent être réglés d'une fine couche d'agent de démoulage; puis assembler les moules et les remplir soigneusement de béton à son état.
- Laisser les échantillons mouler pendant environ 1h à température ambiante; puis retirer l'excès d'échantillon à l'aide d'un couteau chauffé.
- Placer les moules dans le bain d'eau saturée à la température d'essai pendant (24 ± 1) min.
- Le temps entre le remplissage des moules et le début de l'allongement ne doit pas dépasser (150 ± 10) min.
- Contrôler la température de l'eau et elle ne doit pas varier de plus de ± 0,5 °C de la température d'essai spécifiée.
- Enlever la plaque de base et les pressoirs latéraux et transvaser les échantillons de béton sur les plateaux de traction.
- Enlever les échantillons à la température d'essai (20 ± 0,5 °C) à une vitesse de (20 ± 2) mm/min jusqu'à une elongation de (200 ± 1) mm.
- Au plus tard 10 s après l'arrêt du dispositif de traction, couper les fils de béton par le milieu à l'aide d'une paire de ciseaux pour obtenir deux moitiés de fils.
- Trente minutes après avoir coupé les fils de béton, utiliser une règle pour mesurer les longueurs entre les extrémités des demi-fils au millimètre près.
- Calculer le retour élastique (R_E) comme un pourcentage arrondi à 1% à l'aide de l'équation ci-dessous:

$$R_E = \frac{d}{L} \times 100$$

d: la distance entre les deux fils, en mm
L: longueur d'allongement, en cm de rupture anticipée; L est la longueur à la rupture.

Observations:

Structure: **ALGAL SH** F5.doc 18 / 1

Document de référence: **NF EN 13198**

Provenance du matériau: **ANASTA - ITALIE**

Données de base:

- Type de béton à analyser: **BAP 32 (10/10 + 2/5/5)**
- Température de la pâte: **25**
- Température de chauffage du béton avant l'essai: **25**
- Température de l'essai: **25**
- Date de réajustement de l'appareil: **25/04/2011**
- Date de réajustement de l'appareil dans le bain marin: **25/04/2011**
- Date de réajustement de l'appareil dans la cellule: **25/04/2011**
- Données des deux fils coupés: **80 mm**
- Ressort élastique: **80**
- Moyenne: **80**

Mode opératoire:

- Chauffer le matériau à la température requise (20 ± 0,5 °C) au-dessus du point de ramollissement attendu et remplir un récipient d'échantillon propre (exemple de tous types de produits, de grains, de moules, etc.).
- Pour les bétons modifiés par les polymères, la température ne doit pas dépasser 200 °C, quel que soit le point de ramollissement mesuré et les temps d'ajustement du béton à son état.
- La plaque de base et les pressoirs latéraux doivent être réglés d'une fine couche d'agent de démoulage; puis assembler les moules et les remplir soigneusement de béton à son état.
- Laisser les échantillons mouler pendant environ 1h à température ambiante; puis retirer l'excès d'échantillon à l'aide d'un couteau chauffé.
- Placer les moules dans le bain d'eau saturée à la température d'essai pendant (24 ± 1) min.
- Le temps entre le remplissage des moules et le début de l'allongement ne doit pas dépasser (150 ± 10) min.
- Contrôler la température de l'eau et elle ne doit pas varier de plus de ± 0,5 °C de la température d'essai spécifiée.
- Enlever la plaque de base et les pressoirs latéraux et transvaser les échantillons de béton sur les plateaux de traction.
- Enlever les échantillons à la température d'essai (20 ± 0,5 °C) à une vitesse de (20 ± 2) mm/min jusqu'à une elongation de (200 ± 1) mm.
- Au plus tard 10 s après l'arrêt du dispositif de traction, couper les fils de béton par le milieu à l'aide d'une paire de ciseaux pour obtenir deux moitiés de fils.
- Trente minutes après avoir coupé les fils de béton, utiliser une règle pour mesurer les longueurs entre les extrémités des demi-fils au millimètre près.
- Calculer le retour élastique (R_E) comme un pourcentage arrondi à 1% à l'aide de l'équation ci-dessous:

$$R_E = \frac{d}{L} \times 100$$

d: la distance entre les deux fils, en mm
L: longueur d'allongement, en cm de rupture anticipée; L est la longueur à la rupture.

Observations:

Résumé

Ce travail porte sur l'étude de la modification du bitume 40/50 par le polymère SBS à différents taux d'incorporation (0%, 2 %, 4 %, 6 % et 8 %). L'objectif principal est d'améliorer les propriétés physico-mécaniques du bitume afin d'augmenter ses performances en service. Plusieurs essais conventionnels ont été réalisés, notamment la pénétrabilité, le point de ramollissement, le retour élastique ainsi que la stabilité au stockage.

Les résultats obtenus montrent que l'ajout du SBS améliore la rigidité, l'élasticité et la résistance thermique du bitume modifié. Le taux de 8 % présente un comportement optimal par rapport aux autres formulations étudiées.

Mots-clés :

Bitume modifié, SBS, pénétrabilité, retour élastique, stabilité au stockage.

Abstract

This work deals with the study of the modification of 40/50 bitumen using SBS polymer at different incorporation rates (0%, 2%, 4%, 6%, and 8%). The main objective is to improve the physico-mechanical properties of bitumen in order to increase its performance in service. Several conventional tests were carried out, including penetration, softening point, elastic recovery, and storage stability.

The obtained results show that the addition of SBS improves the stiffness, elasticity, and thermal resistance of modified bitumen. The 8% rate presents optimal behavior compared to the other studied formulations.

Keywords:

Modified bitumen, SBS, penetration, elastic recovery, storage stability.

المخلص

تتناول هذه الدراسة تعديل الزفت (البيتومين) 50/40 باستعمال بوليمر SBS بنسب إضافة مختلفة (0%, 2%, 4%, 6%, 8%) يتمثل الهدف الرئيسي في تحسين الخصائص الفيزيائية والميكانيكية للزفت (البيتومين) من أجل رفع ادائه أثناء الاستعمال. تم إجراء عدة اختبارات تقليدية، من بينها اختبار الاختراق، نقطة التلين، الرجوع المرن، وكذلك ثبات التخزين.

تظهر النتائج المتحصل عليها أن إضافة بوليمر SBS تحسن من صلابة ومرونة ومقاومة الزفت (البيتومين) المعدل للحرارة كما أن نسبة 6% تظهر سلوكاً أمثل مقارنة بباقي التركيبات المدروسة.

الكلمات المفتاحية:

الزفت (البيتومين) المعدل، بوليمر SBS، الرجوع المرن، ثبات التخزين