



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued
Faculté de Technologie
Département d'Hydraulique et de Génie Civil



MÉMOIRE
Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER
Spécialité : Génie Civil

THEME :

Etude expérimental d'un béton bitumineux
modifié a la poudrette de caoutchouc

Sous la direction :

➤ Dr :Fethiza ali boubaker

Présenté par :

➤ Boughezala Abdelmoumen

➤ Allag Ahmed lamine

Année universitaire: 2025 - 2026

Résumé

Le bitume, dans sa formulation classique, montre des insuffisances face à des conditions et exigences environnementales de plus en plus sévères. En effet, avec l'augmentation constante du trafic, tant en volume qu'en charges utiles, associée à des conditions climatiques agressives, il est devenu essentiel de rechercher des liants plus performants.

Cette étude vise à analyser l'impact de poudrette de caoutchouc sur les caractéristiques physiques des bitumes modifiés ainsi que sur les propriétés mécaniques des bétons bitumineux actualisés. Les résultats obtenus indiquent que :

- L'introduction de poudrette de caoutchouc dans le bitume contribue à l'amélioration de ses propriétés physiques, notamment la pénétration, le point de ramollissement et la susceptibilité thermique.
- La modification par de poudrette de caoutchouc exerce un effet positif sur les enrobés modifiés, en particulier par l'amélioration de la stabilité Marshall.

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

ملخص

يُثبت البيتومين، بتركيبته التقليدية، عدم كفايته في ظل الظروف والمتطلبات البيئية المتزايدة الصرامة. فمع التزايد المستمر في حركة المرور، سواء من حيث الحجم أو الحمولة، بالإضافة إلى الظروف المناخية القاسية، بات من الضروري إيجاد مواد رابطة ذات أداء أعلى.

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير مسحوق المطاط على الخصائص الفيزيائية للبيتومين المعدّل وعلى الخصائص الميكانيكية للخرسانة الإسفلتية المحسّنة. وتشير النتائج إلى ما يلي:

- يُسهم إدخال مسحوق المطاط في البيتومين في تحسين خصائصه الفيزيائية، ولا سيما الاختراق، ونقطة التليين، والحساسية الحرارية.

- يُؤثر التعديل بمسحوق المطاط إيجاباً على الخلطات الإسفلتية المعدّلة، وخاصةً من خلال تحسين ثبات مارشال.

الكلمات المفتاحية: بيتومين، بيتومين مُعدّل، مطاط النتريل بوتادين (NBR)، خلطة إسفلتية، مارشال.

Dédicace

*À nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs prières et
leurs
innombrables sacrifices qui nous ont menés vers ce
succès,*

*À nos frères, sœurs et familles, pour leur soutien moral constant tout au
long de notre parcours académique,*

*À nos amis et collègues de promotion du Département de Génie Civil,
avec qui nous avons partagé des moments mémorables de labeur et de
fraternité,*

*À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'élaboration et
à la réussite de ce modeste travail de recherche.*

Remerciements

Nous tenons en premier lieu à adresser nos louanges et notre profonde gratitude à Dieu, Tout-Puissant, de nous avoir accordé la foi, la santé et la volonté nécessaires pour mener à terme ce projet de Master.

Nous exprimons notre gratitude la plus respectueuse et la plus sincère à notre encadreur, le Docteur **Fethiza Ali Boubaker**, pour avoir accepté de guider ce travail de recherche. Ses compétences scientifiques rigoureuses, son écoute bienveillante, ses précieux conseils et son soutien continu ont constitué les piliers fondamentaux de la réussite de ce mémoire.

Nos remerciements s'adressent également à l'ensemble du corps professoral et technique du Département de Génie Civil de l'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, pour la qualité remarquable de l'enseignement dispensé et pour les moyens mis à notre disposition lors de notre cursus universitaire.

Nous tenons à exprimer notre haute considération et notre respect à l'ensemble des membres du jury qui nous font l'immense honneur d'évaluer ce travail et d'apporter leur regard scientifique et constructif sur notre manuscrit.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos familles respectives et tous nos camarades qui nous ont soutenus, conseillés et encouragés avec constance et bienveillance au cours de la réalisation de cette étude expérimentale.

Table des matières

Dédicace

Remerciements

Résumés

1 Introduction aux bitumes

1.1	Introduction.	13
1.2	Définition et propriétés fondamentales.	13
1.3	Fabrication et raffinage des bitumes.	13
1.4	Composition chimique et structure colloïdale.	15
1.4.1	Les asphaltènes.	15
1.4.2	Les maltènes.	15
1.4.3	Organisation colloïdale et modèle de Yen.	16
1.5	Classification normative des bitumes routiers.	17
1.6	Essais conventionnels sur le bitume.	18

A- Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NFT66 00).

B - Essai bille anneau (NFT66 004).

C - Viscosité absolue.

D - Viscosité cinématique.

E - Détermination du point de flamme et point d'éclair envas ouvert (NF T 60-118).

F - Détermination de la recouvrance élastique (NF EN13398) .

G - Détermination de la force de ductilité.

H - Stabilité au stockage

I - Test de vieillissement à court terme (RTFOT) Rolling Thin Film Oven Test(NFT 66-032)

J - Essai de fluage et viscosité à taux zéro.

K - Température de fragilité FRAASS (NFT 66-006).

L - L'essai iPAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO) (vieillissement à long terme)

1.7	Conclusion.	18
-----	-------------	----

Table des matières

2 Les enrobés bitumineux

2.1	Introduction.	20
2.2	Typologie et conception des structures de chaussées.	20
2.2.1	Chaussées souples.	21
2.2.2	Chaussées rigides.	21
2.2.3	Chaussées semi-rigides et composites.	21
2.3	Architecture multicouche des structures de chaussées.	22
2.4	Pathologies et dégradations des enrobés bitumineux.	23
2.4.1	Les fissurations de fatigue et d'origine thermique.	23
2.4.2	Les déformations permanentes par orniérage.	24
2.4.3	Le désenrobage par l'action destructrice de l'eau.	24
2.5	Composition de lenrobe	24
2.6	Les granulats : ossature minérale de lenrobe	24
2.6.1	Classification et origines	24
2.6.2	Qualités requises	25
2.6.3	Rôle dans lenrobe	25
2.6.4	Essais de caractérisation	25
2.7	Formulation de lenrobe	25
2.7.1	Objectifs	26
2.7.2	Méthodes de formulation	26
2.8	Influence des paramètres de formulation	26
2.9	Essais sur les enrobes	26
2.10	Propriétés essentielles des enrobes	26
2.11	Conclusion.	28

3 La modification des bitumes

3.1	Introduction et finalité rhéologique.	30
3.2	Objectifs fondamentaux de la modification.	30
3.3	Typologie des agents modifiants industriels.	31
3.4	Thermodynamique et cinétique de la modification.	31
3.5	Techniques et procédés de fabrication industriels.	32
3.5.1	La modification par voie humide (Wet process).	32
3.5.2	La modification par voie sèche (Dry process).	33
3.6	Essais et caractérisations spécifiques des liants modifiés.	33
3.6.1	Microscopie à force atomique et fluorescence (AFM / UV).	33
3.6.2	Essai de stabilité au stockage thermique (NF EN 13399).	34
3.6.3	Essai de force-ductilité en traction (NF EN 13589 / 13703).	35
3.7	Conclusion partielle.	35

4 Matériaux et méthodologie expérimentale

4.1	Introduction.	37
-----	---------------	----



Table des matières

4.2	Présentation des matériaux.	37
4.2.1	Le bitume : Nature et structure colloïdale.	37
4.2.2	Poudrette de caoutchouc NBR (Acrylonitrile butadiene rubber)... 38	
4.2.3	Les granulats.....	38
4.3	Essais sur le bitume modifié.	40
4.3.1	Pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426).	40
4.3.2	Température de ramollissement Bille et Anneau (NF EN 1427). . .	41
4.3.3	Essai de stabilité au stockage thermique (NF EN 13399).	41
4.4	Caractérisation du bitume de base.	42
4.4.1	Essai Marshall pour les enrobés.	42
4.5	Caractérisation de bitume de base.	43
4.6	La modification.	43
4.7	Conclusion.	44
5	Effet du NBR sur les propriétés des bitumes modifiés	
5.1	Introduction.	46
5.2	Influence de la teneur en NBR sur la pénétrabilité.	46
5.2.1	Résultats expérimentaux.	46
5.2.2	Analyse et interprétation physique.	47
5.3	Influence de la teneur en NBR sur la température de ramollissement (TRBA) 47	
5.3.1	Résultats expérimentaux.	47
5.3.2	Analyse et interprétation physique.	48
5.4	Susceptibilité thermique (Indice de pénétration IP).	48
5.4.1	Résultats expérimentaux.	49
5.4.2	Analyse et interprétation rhéologique.	49
5.5	Stabilité au stockage.	50
5.5.1	Résultats expérimentaux.	50
5.5.2	Analyse et interprétation thermodynamique.	51
5.6	Conclusion.	51
6	Étude expérimentale sur les enrobés bitumineux	
6.1	Introduction.	54
6.2	Étude de formulation de l'enrobé.	54
6.2.1	Courbe granulométrique du mélange.	54
6.2.2	Teneur en liant.	55
6.2.3	Mode de fabrication des éprouvettes.	56
6.3	Influence de l'ajout de poudrette de caoutchouc sur les caractéristiques Marshall.	58
6.3.1	La stabilité Marshall (SM).	58



Table des matières

6.3.2	Le fluage Marshall FM.	.59
6.4	Conclusion.	.61
Conclusion générale.....		63
Références bibliographiques		

Table des figures

1.1	Schéma de principe global du raffinage pétrolier et des chaînes de production industrielle du bitume routier..	.14
1.2	Représentation conceptuelle d'une micelle d'asphaltènes peptisée par une couronne de résines selon Yen [4]..	.16
1.3	Macrostructure hiérarchisée des asphaltènes : molécule unitaire, nanoagrégat et cluster colloïdal [4]..	.16
2.1	Coupes schématiques comparatives illustrant la répartition des contraintes au sein des chaussées souples et rigides..	.21
2.2	Coupe géotechnique transversale détaillée d'une structure de chaussée souple avec illustration des profils d'assise et des géotextiles de drainage..	.22
2.3	Atlas schématique des principales pathologies routières : orniérage, fissuration en peau de crocodile, fissuration thermique et nids-de-poule..	.23
2.4	Machine normalisée de l'essai Los Angeles pour la mesure de la résistance aux chocs et à la fragmentation des granulats routiers (NF EN 1097-2)	.25
3.1	Architecture macromoléculaire séquencée du copolymère styrène-butadiène-styrène (SBS) illustrant les domaines polystyréniques d'ancrage et la chaîne élastique de polybutadiène [2]..	.32
3.2	Schéma industriel du procédé de modification par voie humide (<i>wet process</i>) illustrant l'intégration de la poudrette d'élastomère et l'homogénéisation sous cisaillement intense [14]..	.32
3.3	Schéma conceptuel du procédé de modification par voie sèche (<i>dry process</i>) montrant l'introduction directe du modifiant sur les granulats chauds en centrale [14]..	.33
3.4	Topographies nanoscopiques par Microscopie à Force Atomique (AFM) révélant la microstructure en « abeille » des asphaltènes et la répartition du réseau de polymère dispersé [14]..	.34
3.5	Principe du tube de sédimentation normalisé en aluminium utilisé pour le contrôle de la stabilité au stockage et de la séparation de phase (NF EN 13399)..	.34
3.6	Ductilomètre dynamométrique instrumenté pour l'enregistrement simultané de la courbe force-allongement lors de l'essai de force-ductilité..	.35



Table des figures

4.1	Échantillon de bitume routier pur de grade 40/50 lors de son conditionnement thermique à l'état fluide pour les essais de caractérisation initiale..	.37
4.2	Morphologie macroscopique de la poudrette granulaire de caoutchouc NBR (différentes granulométries et teintes) avant son incorporation dans le liant chaud..	.38
4.3	Appareillage normalisé de pénétration à l'aiguille (pénétromètre) illustrant les conditions d'essai rigoureuses (25 °C, charge de 100 g pendant 5 s)..	.38
4.4	Principe et dispositif expérimental de l'essai Bille et Anneau pour la détermination de la Température de Ramollissement (TRBA), montrant l'état initial et le point d'affaissement final..	.41
4.5	Série de tubes normalisés en aluminium sur portoir dédiés à l'évaluation de la stabilité au stockage thermique et de la ségrégation de phase après 72 heures en étuve à 180 °C..	.41
4.6	Vue d'ensemble de l'instrumentation de laboratoire mobilisée pour la caractérisation physico-chimique et rhéologique du liant de base..	.42
4.7	Schéma conceptuel du malaxeur à haut cisaillement (<i>high-speed shear mixer</i>) illustrant le mécanisme d'incorporation et de dispersion colloïdale du NBR dans la matrice bitumineuse à 175 °C..	.42
5.1	Courbe d'évolution de la pénétrabilité à l'aiguille à 25 °C illustrant la rigidification croissante de la matrice bitumineuse par le NBR..	.46
5.2	Évolution linéaire croissante de la Température de Ramollissement (TRBA) en fonction du dosage en élastomère NBR..	.47
5.3	Évolution de l'Indice de Pénétration (IP) mettant en évidence la transition vers une structure colloïdale de type gel à faible sensibilité thermique..	.49
5.4	Évolution du gradient thermique de séparation (Δ TRBA) illustrant l'apparition de l'instabilité colloïdale au-delà de 6 % de NBR..	.50
6.1	Courbe granulométrique du mélange et fuseau de référence LCPC BB 0/14..	.54
6.2	Matériels utilisés pour la fabrication des éprouvettes..	.58
6.3	Stabilité Marshall..	.59
6.4	Fluage Marshall..	.60

Liste des tableaux

1.1	Spécifications normalisées des classes de bitumes routiers purs selon la norme NF EN 12591 [1]..	17
2.1	Matrice comparative synthétique des performances et de l'économie des différentes typologies d'infrastructures routières [7]..	21
4.1	Matrice expérimentale et paramètres opératoires stricts régissant le protocole de modification thermomécanique du liant par le NBR..	39
4.2	Propriété physique de bitume.	43
5.1	Évolution expérimentale de la pénétrabilité à 25 °C en fonction du dosage massique en NBR..	46
5.2	Évolution de la Température de Ramollissement Bille et Anneau (TRBA) selon l'ajout de NBR..	48
5.3	Valeurs calculées de l'Indice de Pénétration (IP) en fonction de la teneur en NBR..	49
5.4	Différence de TRBA (Δ TRBA) après l'essai normalisé de stabilité au stockage thermique..	50
6.1	Composition pondérale du mélange granulaire..	55
6.2	Composition de la formule utilisée..	56
6.3.1	Résultats de la Stabilité Marshall..	59
6.3.2	Résultats de fluage Marshall..	60

Introduction

L'augmentation continue du trafic routier, conjuguée à l'intensification des phénomènes climatiques extrêmes, soumet aujourd'hui les revêtements bitumineux à des exigences de performance toujours plus rigoureuses. Afin de relever ces défis, l'amélioration des propriétés des liants hydrocarbonés est devenue une nécessité technique. Dans cette perspective, la modification des bitumes, notamment par l'intégration de polymères et de matériaux recyclés, s'impose comme une solution durable et performante. Ce travail s'inscrit dans cette démarche de recherche et de valorisation des déchets. Il a pour objectif d'analyser l'effet de l'ajout de poudrette de caoutchouc sur les performances rhéologiques et mécaniques des mélanges bitumineux. Pour atteindre cet objectif, ce mémoire est structuré en deux grandes parties:

La première partie : Elle est entièrement dédiée à une étude bibliographique portant sur les thèmes suivants :

- Composition chimique et structure colloïdale des bitumes (purs ou modifiés) ;
- Les différents types de bitumes ;
- Classification des bitumes routiers ;
- Types de chaussées et sollicitations auxquelles elles sont soumises;
- Composition des enrobés;
- Les différents polymères utilisés pour la modification des bitumes;
- L'importance du recyclage des déchets industriels dans le domaine routier et son impact positif sur l'environnement.

La deuxième partie Cette section présente l'étude expérimentale consacrée à:

- La caractérisation des propriétés physiques du bitume pur et de la poudrette de caoutchouc utilisés;
- La détermination de l'influence de la teneur en poudrette de caoutchouc et de la durée de malaxage sur les propriétés physiques du bitume modifié;
- La détermination de l'influence de la teneur en poudrette de caoutchouc sur les caractéristiques Marshall de l'enrobé bitumineux.

Ce mémoire se termine par une conclusion et des perspectives.

Chapitre 01 :

Les bitumes

1.1 Introduction

Le bitume est un liant hydrocarboné viscoélastique thermodépendant de premier ordre, issu des résidus lourds du raffinage pétrolier. En ingénierie du génie civil, il exerce un rôle prépondérant en assurant l'agglomération et la cohésion des squelettes minéraux dans les revêtements routiers, ainsi que la protection étanche des toitures et des ouvrages souterrains. À température ambiante, le bitume se présente sous la forme d'un pseudo- solide thermoplastique de couleur noire ou brune ; sous l'effet de l'élévation thermique, il se ramollit progressivement jusqu'à atteindre un état de fluidité propice au pompage et à l'enrobage minéral. Ses caractéristiques exceptionnelles d'adhésivité superficielle, d'imperméabilité absolue à l'eau et de résistance à la corrosion chimique et atmosphérique en font un matériau irremplaçable. Néanmoins, en raison de l'immense diversité géologique des pétroles bruts d'origine et de la variabilité des procédés de raffinage en usine, il convient d'employer le terme *bitumes* au pluriel, tant leurs signatures rhéologiques et physico-chimiques s'avèrent hétérogènes.

1.2 Définition et propriétés fondamentales

Conformément aux spécifications rigoureuses de la norme européenne **NF EN 12597**, le bitume est défini comme un liant organique pratiquement non volatil, fortement adhésif et imperméable, entièrement soluble dans le trichloroéthylène (ou le toluène), et dont la consistance rhéologique présente une extrême sensibilité aux gradients de température et aux temps de chargement [1]. Sa nature intrinsèquement viscoélastique lui confère une dualité comportementale remarquable : il réagit tel un solide purement élastique face à des sollicitations mécaniques rapides à haute fréquence (passage instantané des essieux routiers) et s'écoule tel un fluide visqueux newtonien ou non-newtonien face à des sollicitations lentes ou sous un fort rayonnement solaire thermique [2].

1.3 Fabrication et raffinage des bitumes

L'intégralité des bitumes routiers de qualité industrielle est issue du fractionnement et de la distillation du pétrole brut en raffinerie. L'objectif industriel consiste à extraire les coupes légères à forte valeur ajoutée (gaz, essences, gazole) pour concentrer les composés hydrocarbonés lourds. Quatre procédés fondamentaux régissent cette production [3] :

- a. **La distillation directe (Atmosphérique et sous vide)** : Le pétrole brut est initialement vaporisé dans une colonne de distillation atmosphérique (350 °C) pour séparer les gaz, naphthas et kérosènes. Le résidu lourd atmosphérique est ensuite dirigé vers une colonne de distillation sous vide (pression réduite de 1 à 7 kPa et température d'environ 400 °C). La réduction drastique de la pression permet d'extraire les huiles

Chapitre 01 :Les bitumes

de graissage sans risquer le craquage thermique indésirable des molécules. Le résidu fond de tour sous vide constitue le bitume pur de distillation directe.

- b. Le soufflage (Oxydation bitumineuse) :** Afin de modifier la dureté et d'élever la température de ramollissement du liant, le résidu sous vide est soumis à une injection continue d'air sous pression à l'intérieur d'une colonne d'oxydation maintenue entre 260 °C et 300 °C. Ce processus exothermique provoque la déshydrogénation et la polycondensation des huiles aromatiques et des résines, qui se convertissent en asphaltènes de haute masse molaire, générant des bitumes soufflés ou semi-soufflés à faible susceptibilité thermique.
- c. Le désasphaltage au solvant :** Ce procédé d'extraction liquide-liquide est mis en œuvre pour traiter les résidus lourds sous vide très visqueux. Le résidu est mis en contact avec un solvant léger en phase supercritique (propane, butane ou pentane liquide). Par différence d'affinité chimique, le solvant dissout les huiles lourdes (désasphaltées) tout en précipitant une résine noire extrêmement lourde et dure : la poix d'asphaltènes, ou bitume de précipitation.
- d. Le craquage thermique ou catalytique :** Réalisé sous haute pression et haute température (450 °C à 550 °C), ce procédé scinde les longues chaînes aliphatiques pour maximiser le rendement en carburants légers. Le résidu de craquage obtenu présente une très forte aromaticité et une sensibilité thermique aiguë ; il est principalement employé en tant que liant d'appoint ou bitume industriel [3].

Bien que des gisements de bitumes naturels existent à travers le globe (comme le lac d'asphalte de Trinidad ou les roches bitumineuses de Seyssel), l'ultra-majorité des liants routiers modernes provient de la filière du raffinage industriel. Le schéma de la figure 1.1 résume la chaîne de transformation en raffinerie.

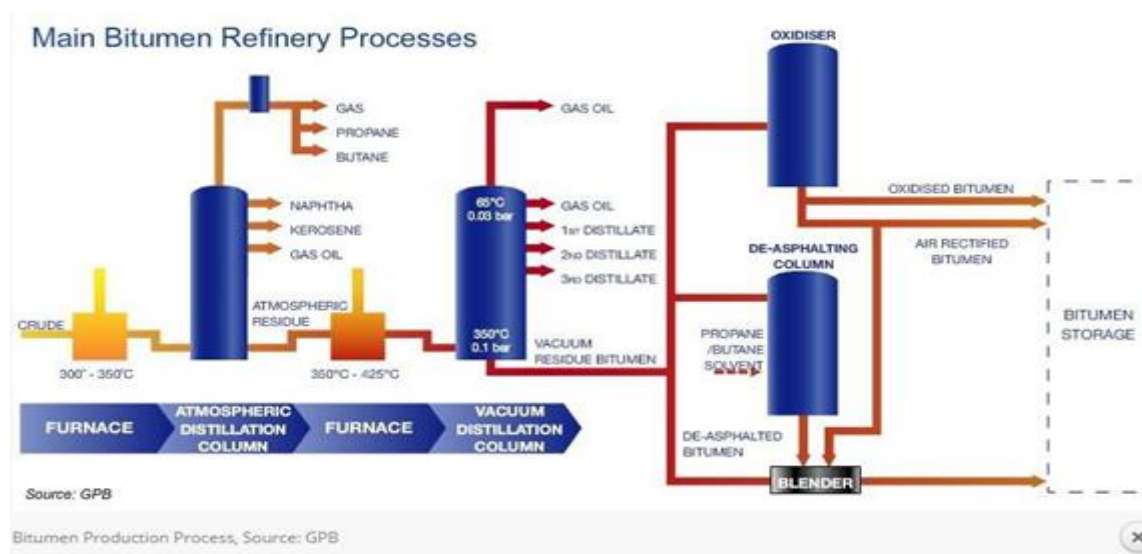


Figure 1.1 – Schéma de principe global du raffinage pétrolier et des chaînes de production industrielle du bitume routier.

1.4 Composition chimique et structure colloïdale

À l'échelle moléculaire, le bitume est un mélange d'une grande complexité, regroupant des dizaines de milliers d'espèces chimiques distinctes. L'analyse élémentaire quantitative révèle une composition prédominée par les hydrocarbures : le carbone s'inscrit dans une fourchette de 79 % à 88 %, et l'hydrogène de 7 % à 13 %. On relève en outre la présence incontournable d'hétéroatomes polaires : le soufre (pouvant atteindre 8 %), l'oxygène (2 % à 8 %), l'azote (0,5 % à 2 %) ainsi que des complexes organométalliques traces contenant du vanadium, du nickel et du fer [3]. Ces hétéroatomes, bien que minoritaires, confèrent aux molécules une forte polarité de surface qui gouverne l'adhésivité du liant sur les roches minérales [4].

Dès 1837, Boussingault réalisa la première séparation analytique du bitume. Au cours du XX^e siècle, l'analyse fractionnée normalisée (chromatographie SARA de Nellensteyn et Corbett) s'est imposée en séparant le bitume pur par précipitation sélective dans le *n*-heptane en deux entités fondamentales : les asphaltènes et les maltènes [5].

1.4.1 Les asphaltènes

Les asphaltènes constituent la fraction la plus lourde, la plus polaire et la plus rigide du liant, représentant entre 5 % et 25 % de sa masse totale [2]. Sur le plan expérimental, ce sont des solides noirs amorphes, infusibles et cassants, insolubles dans les alcanes normaux légers (tel le *n*-heptane ou le pentane aromatiques comme le toluène ou le benzène [4]. Leur masse molaire apparente, mesurée par cryoscopie ou spectrométrie de masse, s'étend de 800 à plus de 300 000 g/mol en raison d'une formidable propension à l'auto-association macromoléculaire par empilement de cycles aromatiques polycondensés [4]. Le rapport molaire atomique H/C des asphaltènes oscille entre 1,0 et 1,2, confirmant un haut degré d'insaturation et une forte densité de structures aromatiques polycycliques [4]. Les asphaltènes sont les responsables directs de la dureté, de la viscosité apparente et de la consistance rhéologique globale du bitume.

1.4.2 Les maltènes

La fraction malténique (ou phase continue dispersante) englobe l'ensemble des composés solubles dans le *n*-heptane. De masse molaire modérée (inférieure à 1250 g/mol), les maltènes se subdivisent par élution chromatographique sur alumine et gel de silice en trois grandes familles chimiques [2] :

- **Les huiles saturées (Saturés)** : Composées d'hydrocarbures aliphatiques linéaires (paraffines normaux et iso) et cycliques (naphtènes). De couleur blanche ou jaune pâle, elles présentent un rapport H/C proche de 2,0 et représentent entre 5 % et 20 % du bitume. Elles constituent l'agent **fluidifiant** qui abaisse la viscosité dynamique à chaud [4].

Chapitre 01 :Les bitumes

- **Les huiles aromatiques (Aromatiques) :** Liquides visqueux de couleur brun foncé, de rapport H/C voisin de 1,5, constitués de cycles naphthéno-aromatiques. Représentant la fraction ultra-majoritaire du liant (40 % à 65 %), elles apportent au bitume sa grande ductilité, sa souplesse et son pouvoir solvant vis-à-vis des autres constituants [4].
- **Les résines polaires (Résines) :** Solides pâteux de couleur brun très foncé à noir, enrichis en hétéroatomes (O, S, N). Dotées d'une forte polarité intrinsèque (rapport H/C de 1,3 à 1,4), les résines jouent le rôle capital d'*agents peptisants* (tensioactifs naturels). Elles s'adsorbent physiquement à la périphérie des feuillets d'asphaltènes, abaissant l'énergie d'interface et empêchant leur floculation macroscopique au sein des huiles [5].

1.4.3 Organisation colloïdale et modèle de Yen

Le bitume n'est donc en aucun cas une solution vraie homogène, mais un véritable système colloïdal dispersé. Ce modèle conceptuel, formalisé par Nellensteyn et parachevé par le modèle de Yen et Mullins [4], décrit l'organisation supramoléculaire interne (Figures 1.2 et 1.3). Au cœur du système, les molécules planes polyaromatiques d'asphaltènes s'empilent par forces de Van der Waals ($\pi - \pi$ stacking) pour former des nanoagrégats solides (1 à 5 nm). Ces noyaux d'asphaltènes sont entourés par une couronne sphérique protectrice de molécules de résines polaires : l'ensemble forme une *micelle*.

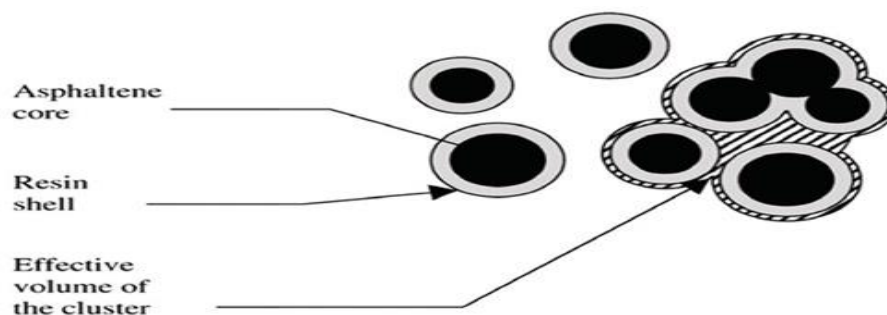


Figure 1.2 – Représentation conceptuelle d'une micelle d'asphaltènes peptisée par une couronne de résines selon Yen [4]

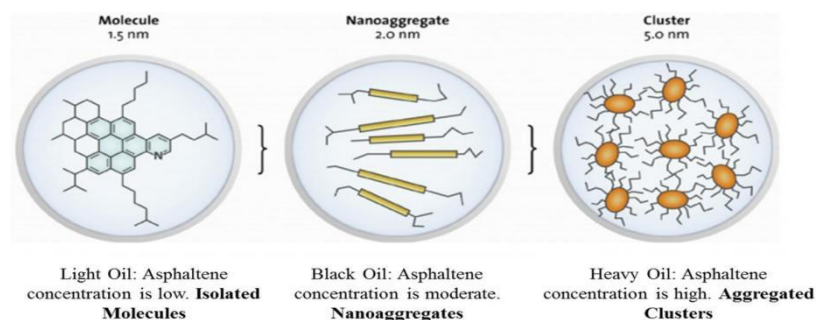


Figure 1.3 – Macrostructure hiérarchisée des asphaltènes : molécule unitaire, nanoagrégat et cluster colloïdal [4]

Chapitre 01 :Les bitumes

L'état d'équilibre colloïdal dépend du rapport de concentration et de l'aromaticité du milieu malténique :

- **La structure de type Sol** : Lorsque la phase malténique est riche en huiles aromatiques et résines, les micelles d'asphaltènes sont parfaitement isolées et libres de se mouvoir. Le bitume présente un comportement fluide, très sensible à la température et quasiment newtonien.
- **La structure de type Gel** : Lorsque la teneur en asphaltènes est élevée ou que les maltènes sont paraffiniques, le pouvoir solvatant est insuffisant. Les micelles s'agglomèrent en un réseau tridimensionnel lâche (clusters colloïdaux). Le bitume adopte un comportement fortement élastique et thixotropique, typique des bitumes soufflés ou modifiés.

1.5 Classification normative des bitumes routiers

La sélection d'un liant bitumineux pour un projet routier obéit aux critères prescrits par la norme européenne harmonisée **NF EN 12591** [1]. Les bitumes purs sont répertoriés en grades empiriques définis par les fourchettes d'acceptation de leur pénétrabilité à 25 °C et de leur t Table 1.1 – Spécifications normalisées des classes de bitumes routiers purs selon la norme

NF EN 12591 [1].

Grade de bitume	Pénétrabilité à 25 °C (0,1 mm)	Point de ramollissement TRBA (°C)
20/30	20 à 30	55 à 63
35/50	35 à 50	50 à 58
50/70	50 à 70	46 à 54
70/100	70 à 100	43 à 51
160/220	160 à 220	35 à 43

La lecture de ce tableau normatif met en évidence une corrélation physique directe : plus le chiffre de pénétrabilité est faible, plus le liant est dur et consistant, ce qui s'accompagne d'une élévation automatique de sa température de ramollissement. L'ingénieur routier effectue sa sélection en fonction du climat et de la sévérité des sollicitations [6,7] :

- **Grades durs (20/30 et 35/50)** : Indispensables pour les couches de roulement et de liaison soumises à un trafic lourd à circulation lente (voies de bus, carrefours giratoires, gares de péage) ainsi que pour les chaussées situées en milieu chaud saharien ou tropical, où la haute dureté du liant prévient l'orniérage par fluage.
- **Grades intermédiaires (50/70 et 70/100)** : Recommandés pour les bétons bitumineux denses et les graves-bitumes sous un climat tempéré standard.



Chapitre 01 :Les bitumes

- **Grades mous (160/220) :** Réservés à la confection d'enrobés coulés à froid, d'émulsions bitumineuses de répandage ou aux revêtements routiers soumis à un climat de haute montagne très rigoureux.

1.6 Essais conventionnels sur le bitume

- A Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NFT66 004).
- B - Essai bille anneau (NFT66 004).
- C - Viscosité absolue.
- D - Viscosité cinématique.
- E - Détermination du point de flamme et point d'éclair envas ouvert (NF T 60-118).
- F - Détermination de la recouvrance élastique (NF EN13398) .
- G - Détermination de la force de ductilité.
- H - Stabilité au stockage.
- I - Test de vieillissement à court terme (RTFOT) Rolling Thin Film Oven Test(NFT 66-032)
- J - Essai de fluage et viscosité à taux zéro.
- K - Température de fragilité FRAASS (NFT 66-006).
- L - L'essai iPAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO) (vieillissement à long terme).

1.7 Conclusion

L'exploration méticuleuse de la chimie et de la physique du bitume pur atteste de l'extrême sophistication de ce matériau de construction. Sa microstructure colloïdale, gouvernée par la peptisation des micelles d'asphaltènes au sein d'une phase malténique huileuse et résineuse, dicte de manière univoque son comportement rhéologique macroscopique viscoélastique. Les essais normalisés fondamentaux (pénétrabilité, TRBA, ductilité) offrent à l'ingénieur les outils métrologiques indispensables pour qualifier le liant et prédire sa réponse face aux charges et à la chaleur. C'est sur ce socle de connaissances théoriques que repose la formulation des enrobés bitumineux, développée dans le chapitre suivant.

Chapitre 02 :

Les enrobés bitumineux

2.1 Introduction

Les enrobés bitumineux représentent le summum technologique des matériaux d'ingénierie routière pour la confection des couches de surface et d'assise des chaussées modernes. Leur emploi universel découle d'une adéquation parfaite entre des caractéristiques mécaniques de portance exceptionnelles, un fort pouvoir imperméabilisant, une mise en œuvre industrielle optimisée et un coût de cycle de vie économique. Sur le plan de la mécanique des solides composites, un béton bitumineux est une matrice minérale dense constituée de granulats rocheux concassés à granulométrie continue (représentant 90 % à 95 % de la masse totale) enrobés et liés intimement par un film continu de liant hydrocarboné (le bitume, constituant les 5 % à 10 % résiduels).

Le comportement mécanique de ce composite est fondamentalement gouverné par la viscoélasticité et la susceptibilité thermique du mastic bitumineux (bitume enrichi en fines minérales) qui lie les grains. Sous des températures hivernales négatives, le module de rigidité de l'enrobé s'accroît brutalement, augmentant sa fragilité et sa propension au micro-fissurage thermique. À l'opposé, sous les canicules estivales, l'abaissement du module de cisaillement du liant réduit les forces de frottement intergranulaires, favorisant le fluage plastique et la formation d'ornières sous le passage répété des essieux lourds. Cette sensibilité thermique constitue le principal défi technique du géotechnicien en milieu aride et saharien.

2.2 Les différents types de chaussées

Le dimensionnement mécanique d'une infrastructure routière vise à concevoir un ensemble de couches de fondation et de surface capables d'amortir et de dissiper dans le sol support les contraintes de compression et de traction par flexion induites par les roues des véhicules [7]. Le choix du type de chaussée résulte d'une analyse multicritère rigoureuse intégrant la portance de la plateforme (indice CBR), le trafic pondéré cumulé, le régime pluviométrique et thermique, ainsi que l'économie locale. On distingue quatre grandes familles d'ouvrages routiers (Figure 2.1 et Tableau 2.1).

Chapitre 02 : Les enrobés bitumineux

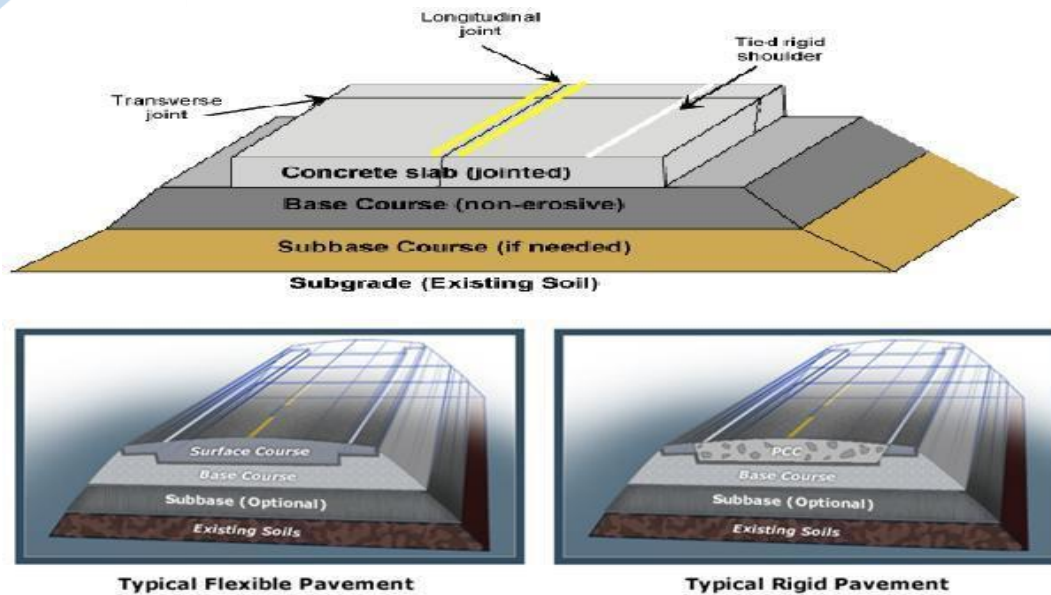


Figure 2.1 – Coupes schématiques comparatives illustrant la répartition des contraintes au sein des chaussées souples et rigides.

2.2.1 Chaussées souples

Constituées de couches bitumineuses sur des couches granulaires non traitées, elles diffusent progressivement les contraintes. Si leur coût initial est modéré et leur confort élevé, elles présentent une sensibilité accrue aux conditions climatiques extrêmes, notamment à lorniérage en période chaude, ce qui peut limiter leur durabilité dans certaines régions [19,23].

2.2.2 Chaussées rigides

Elles reposent sur une dalle en béton de ciment qui travaille en plaque. Leur grande rigidité leur confère une excellente capacité portante et une longue durée de vie, mais leur coût initial et la complexité des réparations sont des freins à leur généralisation [19]

2.2.3 Chaussées semi-rigides et composites

Les structures semi-rigides associent une assise traitée aux liants hydrauliques à un revêtement bitumineux, tandis que les chaussées composites superposent une base rigide et une couche bitumineuse. Ces solutions hybrides visent à cumuler les avantages des deux systèmes [19].

Table 2.1– Comparaison synthétique des types de chaussées

Type	Coût initial	Durabilité	Entretien
Souple	Moyen	Moyenne	Fréquent
Semi-rigide	Moyen	Bonne	Modéré
Rigide	Élevé	Très bonne	Faible
Composite	Élevé	Excellente	Modéré

2.3 Architecture multicouche des structures de chaussées

Une chaussée routière n'est pas un bloc monolithique, mais un millefeuille géotechnique dont l'architecture obéit à un gradient décroissant de rigidité (Figure 2.2). De la surface vers les profondeurs du sol, l'ouvrage se décompose en cinq entités fonctionnelles [7] :

- **La couche de roulement (Épaisseur nominale de 3 à 6 cm) :** Tapis bitumineux de haute technicité en contact direct avec les pneumatiques. Elle a pour missions impératives d'assurer l'adhérence par temps de pluie (macrorugosité et microrugosité), d'absorber les bruits de roulement, de résister au cisaillement tangentiel et de former un écran d'étanchéité imperméable protégeant les assises de l'infiltration d'eau.
- **La couche de liaison (4 à 8 cm) :** Interface de transition chargée d'homogénéiser la surface de la fondation et d'encaisser les contraintes de cisaillement horizontales.
- **La couche de base (8 à 20 cm) et la couche de fondation (15 à 40 cm) :** Constituant l'*assise de chaussée*, elles apportent l'essentiel de la résistance mécanique en flexion et diffusent le cône de contraintes pour que la pression transmise au sol support reste inférieure à sa limite de plasticité.
- **La couche de forme (20 à 50 cm) :** Couche d'adaptation géotechnique (graves traitées à la chaux ou au ciment) insérée lorsque le sol naturel présente une faible portance
- **Le sol support (Plateforme PST) :** Horizon géologique naturel terrassé et compacté qui supporte l'ensemble du poids de la structure et du trafic.

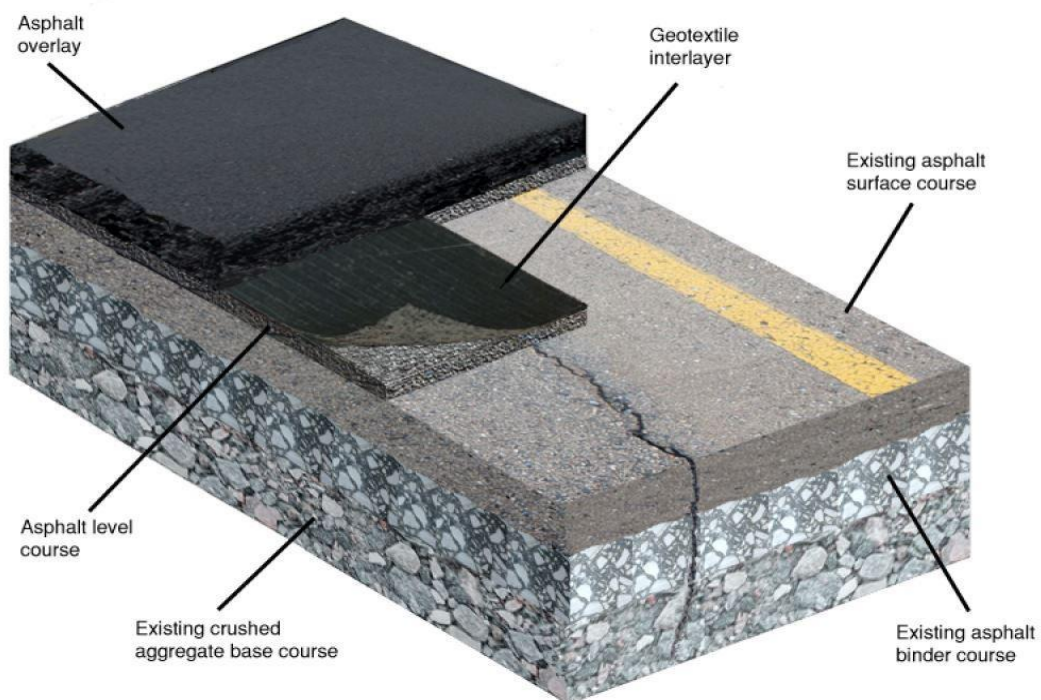


Figure 2.2 – Coupe géotechnique transversale détaillée d'une structure de chaussée souple avec illustration des profils d'assise et des géotextiles de drainage.

2.4.Dégradations des chaussées et lien avec la formulation

Sous la conjonction impitoyable de la fatigue mécanique cyclique du trafic lourd, des intempéries pluviales et des gradients thermiques journaliers et saisonniers, les revêtements bitumineux développent des pathologies caractéristiques (Figure 2.3). L'identification de ces désordres constitue le point de départ de l'analyse causale en formulation [10].



Figure 2.3 – Atlas schématique des principales pathologies routières : orniérage, fissuration en peau de crocodile, fissuration thermique et nids-de-poule.

2.4.1 Les fissurations de fatigue et d'origine thermique

La fissuration en *peau de crocodile* (faïençage) apparaît dans les zones de passage des roues sous l'effet de la fatigue en flexion répétée. Lorsque la contrainte de traction à la base de la couche d'enrobé excède sa résistance limite, des microfissures s'initient et remontent vers la surface [9]. Ce phénomène destructeur est fortement amplifié par les fissures transversales thermiques résultent quant à elles d'un phénomène de retrait thermique entravé. Lors d'un refroidissement brutal hivernal, le bitume perd son aptitude à la relaxation viscoélastique ; les contraintes internes générées fracturent net la chaussée sur toute sa largeur [10].

Par le vieillissement oxydatif du liant ou l'emploi d'un bitume d'origine excessivement dur

2.4.2 Les déformations permanentes par orniérage

L'orniérage se définit comme une dépression longitudinale continue en creux qui se forme dans les traces de guidage des essieux lourds. Cette pathologie majeure présente un risque mortel pour la sécurité routière par aquaplaning par temps de pluie. Sur le plan mécanique, l'orniérage possède deux origines distinctes :

- L'orniérage par fluage plastique (instabilité de l'enrobé de surface) : par temps très chaud ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$), le bitume se liquéfie partiellement et agit comme un lubrifiant. Si la formulation granulaire manque d'angularité ou que la teneur en bitume est trop élevée, les granulats s'écartent et refluent latéralement sous la charge des pneus.
- L'orniérage par tassement structural : induit par un sous-dimensionnement général de l'assise ou un compactage insuffisant lors de la mise en œuvre.

2.4.3 Le désenrobage par l'action destructrice de l'eau

Le *désenrobage* (ou décohésion par l'eau) caractérise la perte totale d'adhésion physico-chimique à l'interface entre le granulat minéral et le film de bitume. Les molécules d'eau, présentant une tension superficielle et une polarité bien supérieures aux chaînes hydrocarbonées, s'insinuent par capillarité à la surface minérale (notamment sur les roches acides polaires comme le granite ou le quartz) et détachent le bitume. Il en résulte un effritement granulaire rapide (ravèlement en surface) et la formation brutale de nids-de-poule sous les chocs hydrauliques répétés des pneumatiques [10].

2.5 Composition de l'enrobé

Un enrobé bitumineux est composé, en masse, de 90-95 % de granulats, 4-7 % de bitume, 2-8 % de fillers et éventuellement d'additifs (polymères, fibres, chaux, caoutchouc) [6.11]. Chaque constituant joue un rôle spécifique : les granulats apportent la résistance mécanique, le bitume la cohésion, les fillers modifient la viscosité du mastic, et les additifs améliorent les performances ciblées.

2.6 Les granulats : ossature minérale de l'enrobé

Les granulats représentent la part majoritaire de l'enrobé et conditionnent la stabilité, la durabilité et la texture de surface [12]. Leur étude détaillée est donc un préalable à toute formulation.

2.6.1 Classification et origines

- Par taille : gravillons ($d > 2\text{ mm}$), sables ($0,0632\text{ mm}$), fillers ($d < 0,063\text{ mm}$).
- Par origine : alluvionnaires roulés, concassés de carrière, recyclés
- Par nature pétrographique : calcaires, siliceux, basaltiques, granitiques.

2.6.2 Qualités requises

- Résistance mécanique élevée (faible coefficient Los Angeles).
- Faible absorption d'eau. — Propreté (équivalent de sable élevé).
- Angularité favorisant l'interlocking (indice d'aplatissement limité).
- Bonne résistance au polissage (PSV) pour les couches de roulement.

2.6.3 Rôle dans l'enrobé

Les granulats assurent la transmission des charges, la stabilité au cisaillement par frottement interne (interlocking) et la résistance à lorniérage. Les granulats concassés, de par leur angularité, offrent un meilleur enchevêtrement que les roulés, ce qui améliore significativement la stabilité de l'enrobé [12].

2.6.4 Essais de caractérisation

Les principaux essais normalisés (NF EN) sont : analyse granulométrique (933 1), Los Angeles (1097-2), Micro-Deval (1097-1), équivalent de sable (933-8), indice de forme (933-4), masse volumique (1097-6) et coefficient de polissage PSV (1097 8). La figure 2.4 illustre l'essai Los Angeles.



Figure 2.4 – Machine normalisée de l'essai Los Angeles pour la mesure de la résistance aux chocs et à la fragmentation des granulats routiers (NF EN 1097-2).

2.7 Formulation de l'enrobé

La formulation vise à déterminer la combinaison optimale des constituants pour répondre aux exigences mécaniques, de durabilité et de mise en œuvre [20,21]. Elle repose sur des méthodes empiriques et rationnelles.

2.7.1 Objectifs

- Stabilité mécanique et résistance à lorniérage.
- Compacité suffisante pour garantir l'étanchéité.
- Résistance à la fatigue et à la fissuration.
- Résistance à l'eau (sensibilité au désenrobage)
- Maniabilité à la mise en œuvre.

2.7.2 Méthodes de formulation

- Méthode Marshall (NF EN 12697-34) : essai de compression diamétrale permettant de déterminer la teneur optimale en bitume par analyse de la stabilité et du fluage
- Presse à compactage giratoire (PCG) (NF EN 12697-31) : simule le compactage réel sous trafic
- . — Méthode Duriez (NF P 98-251-1) : évalue la sensibilité à l'eau par comparaison des résistances à sec et après immersion.

Les enrobés denses classiques utilisent une courbe granulaire continue; les enrobés drainants, une granularité discontinue pour créer un réseau de vides communicants [13].

2.8 Influence des paramètres de formulation

- Teneur en bitume : un excès provoque le ressuage et l'orniérage; un manque, fissuration et ravèlement.
- Granulométrie : une courbe discontinue ou mal équilibrée augmente les vides et favorise la ségrégation.
- Compactage : un compactage insuffisant accroît la perméabilité et réduit la durée de vie. Ces observations confirment que la durabilité d'un enrobé est directement liée à la rigueur de sa formulation et de sa mise en œuvre.

2.9 Essais sur les enrobés

Les essais normalisés (NF EN 12697) comprennent l'essai Marshall (figure 2.5), la PCG, l'essai Duriez, la traction indirecte, l'orniérage, la fatigue et la mesure du module complexe [14].

1/ essai Duriez :

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

2/ L'essai Marshall :

Les enrobés bitumineux sont compactés dans des moules à l'aide d'une dame en vue de réaliser des éprouvettes cylindriques. Ces éprouvettes (température : 60°C) sont placées entre les deux mâchoires semi-cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse

Chapitre 02 : Les enrobés bitumineux

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



Figure 1.3. Principe de l'essai Marshall

3/ La Presse à Cisaillement Giratoire :

La presse à cisaillement giratoire permet d'étudier l'aptitude au compactage des enrobés hydrocarbonés par l'estimation du pourcentage de vides en fonction de l'épaisseur de la couche d'enrobé. Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre. On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression, verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1° (externe) ou $0,82^\circ$ (interne) et soumise à un mouvement circulaire. Ces différentes actions exercent un compactage. On observe l'augmentation de compacité en fonction du nombre de tours. ce mode de compactage traduit la relation linéaire qui existe entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur de chantier et le nombre de girations. Alors que la méthode Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de giration. Cette courbe du pourcentage de vides en fonction du nombre de girations décrit la maniabilité du mélange, qui permet d'exercer une discrimination entre :

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

4/ L'essai de compression diamétrale :

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

5/ L'essai de traction directe :

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

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

6 / Essai de fluage statique uniaxial :

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

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

2.10 Propriétés essentielles des enrobés

Les propriétés fondamentales sont : rigidité, cohésion, souplesse, viscoélasticité, résistance à l'eau et à la fatigue, durabilité. Le module complexe E^* , mesuré à différentes températures et fréquences, est l'indicateur phare du comportement thermo-mécanique [15].

2.11 Conclusion

La maîtrise des enrobés bitumineux exige une connaissance approfondie des granulats, du bitume et de la formulation. Cependant, face à des conditions de service toujours plus sévères, le bitume pur montre rapidement ses limites. C'est pourquoi le chapitre suivant est consacré aux techniques de modification des bitumes, qui permettent d'élargir le domaine de performance des liants rupture est faible.

Chapitre 03 :

La modification

des bitumes

3.1 Introduction

Malgré des qualités indéniables, le bitume pur conventionnel de raffinage présente une courbe viscoélastique et une plage de plasticité relativement limitées face aux contraintes du génie routier contemporain. L'augmentation fulgurante du trafic lourd, l'apparition de nouvelles charges dynamiques à l'essieu (super-singles à haute pression de gonflage) ainsi que la sévérité croissante des aléas climatiques (canicules sahariennes extrêmes, gels brutaux) contraignent les liants purs à atteindre leurs limites rhéologiques ultimes. Ce dépassement de capacité se manifeste par l'orniérage prématuré, la fissuration par fatigue et le faïençage.

Afin de franchir ces barrières technologiques, la recherche en science des matériaux a mis au point des liants de spécialité : les bitumes modifiés par addition de polymères (Bitumes-Polymères BmP) ou d'élastomères recyclés. La modification consiste à incorporer, sous haute température et cisaillement intense, un composé macromoléculaire synthétique capable d'interagir avec la structure colloïdale du bitume de base. L'objectif fondamental est de doter la matrice hydrocarbonée d'une véritable élasticité de déformation (recouvrance après sollicitation) et d'un comportement quasi-solide aux hautes températures estivales, tout en préservant une excellente flexibilité et dissipation d'énergie sous les froids hivernaux.

3.2 Objectifs fondamentaux de la modification

L'incorporation d'agents modifiants au sein d'un liant routier obéit à un cahier des charges fonctionnel et rhéologique de très haut niveau, visant à [13] :

- **Élever considérablement la résistance à l'orniérage à haute température** : Augmentation spectaculaire de la température de ramollissement (TRBA) et du module complexe de cisaillement G^* , permettant d'éviter l'écoulement visqueux sous charge caniculaire.
- **Abaisser le seuil de fragilité à basse température** : Réduction de la rigidité cassante hivernale pour autoriser la relaxation des contraintes de retrait thermique et empêcher la fissuration.
- **Accroître l'élasticité et la recouvrance élastique (Elastic recovery)** : Diminution drastique de l'angle de phase δ (pour s'approcher d'un comportement élastique pur où $\delta \rightarrow 0^\circ$), garantissant un retour instantané de la chaussée à sa géométrie initiale après le franchissement d'un essieu.
- **Renforcer la résistance à la fatigue en flexion cyclique** : Allongement significatif de la durée de vie sous chargements dynamiques répétés.
- **Améliorer l'adhésivité active et passive liant-roche minérale** : Renforcement de la résistance au désenrobage sous l'action délétère de l'eau et de la pression hydrodynamique des pneus.

Chapitre 03 : La modification des bitumes

- **Freiner le cinétisme du vieillissement thermo-oxydatif** : Protection des chaînes hydrocarbonées contre l'oxydation ultraviolette et atmosphérique en service.

3.3 Domaines d'application

Les bitumes modifiés sont utilisés pour les autoroutes à fort trafic, les pistes aéroportuaires, les ouvrages d'art, les zones industrielles et les régions à climat extrême. Le surcoût initial est compensé par une durée de vie accrue et une maintenance réduite [31].

3.4 Typologie des agents modifiants industriels

Le secteur de l'ingénierie routière exploite différentes classes de polymères et de modifiants synthétiques, choisis selon les performances visées [13] :

- **Les élastomères thermoplastiques (Le SBS de référence)** : Les copolymères séquencés de styrène-butadiène-styrène (SBS) constituent l'élite incontestée de la modification routière. À température ambiante, les domaines rigides de polystyrène s'associent physiquement pour ancrer les blocs souples et élastiques de polybutadiène, générant un véritable maillage tridimensionnel réversible à chaud (Figure 3.1) [2].
- **Les plastomères (EVA, Polyéthylène PE)** : Le copolymère éthylène-acétate de vinyle (EVA) ou les polyéthylènes d'apport forment une phase plastique cristalline rigide au sein du bitume. Ils augmentent avec force la dureté et la résistance à l'orniérage, mais n'apportent que peu de retour élastique.
- **La poudrette de caoutchouc recyclé (Pneumatiques usagés)** : Issue du broyage cryogénique ou mécanique de pneus hors d'usage, cette poudrette vulcanisée riche en noir de carbone et en caoutchouc naturel/synthétique (SBR, NBR) gonfle dans les huiles malténiques pour créer un liant de haute viscosité, doté d'un excellent amortissement phonique et d'une grande résistance à la fissuration [14].
- **Les polymères de recyclage et déchets plastiques (PE, PP)** : L'incorporation de déchets plastiques broyés constitue une voie d'avenir prometteuse alliant valorisation écologique de l'économie circulaire et renforcement mécanique des enrobés [14].

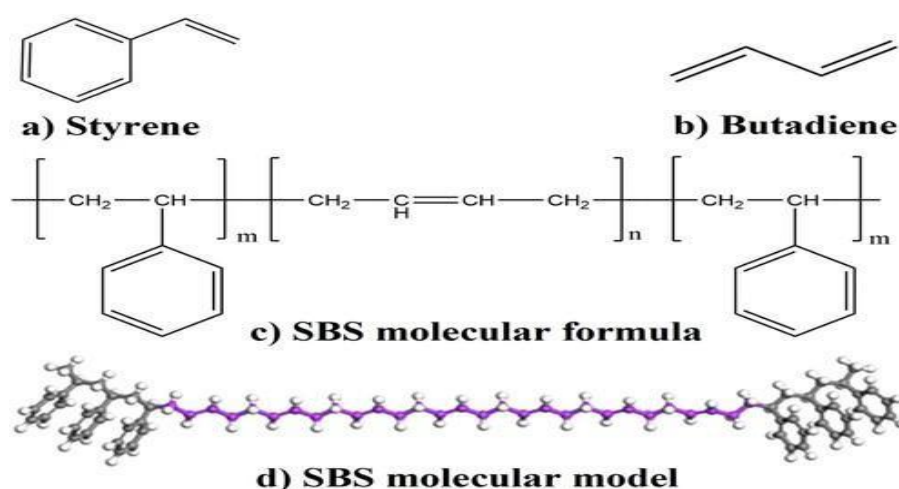


Figure 3.1 – Architecture macromoléculaire séquencée du copolymère styrène-butadiène-styrène (SBS) illustrant les domaines polystyréniques d'ancrage et la chaîne élastique de polybutadiène [2].

3.5 Techniques et procédés de fabrication industriels

L'obtention de cette dispersion colloïdale intime impose des équipements de malaxage spécialisés. Deux filières technologiques coexistent dans l'industrie routière [14] :

3.5.1 La modification par voie humide (Wet process)

La voie humide représente le standard de haute technicité. Le polymère brut (poudrette ou granulés) est introduit dans une cuve de malaxage contenant le bitume chaud. Le mélange est ensuite forcé à traverser un moulin colloïdal d'homogénéisation à rotor-stator tournant à une vitesse extrême (3000 à 4000 tr/min). L'entrefer millimétrique soumet le liant à un taux de cisaillement mécanique colossal qui déchiquette les particules de polymère à l'échelle micrométrique, maximisant la surface de solvation (Figure 3.2). Après une phase de maturation en cuve agitée de quelques heures, on obtient un liant fini aux propriétés élastiques exceptionnelles, prêt à l'emploi.



Figure 3.2 – Schéma industriel du procédé de modification par voie humide (*wet process*) illustrant l'intégration de la poudrette d'élastomère et l'homogénéisation sous cisaillement intense [14].

3.5.2 La modification par voie sèche (Dry process)

Plus économique en termes d'investissement de centrale, la voie sèche consiste à introduire les granules de polymère ou la poudrette de caoutchouc directement dans le tambour malaxeur de la centrale d'enrobage, au contact immédiat des granulats minéraux surchauffés (180 °C), quelques secondes avant l'injection du bitume pur (Figure 3.3). Bien que ce procédé élimine le besoin de cuves de stockage chauffées et agitées, le temps de contact très court empêche la réalisation d'une solvation complète et d'un réseau continu à l'échelle colloïdale. Les performances mécaniques obtenues restent de ce fait généralement en retrait par rapport à la voie humide [13].

Chapitre 03 :La modification des bitumes

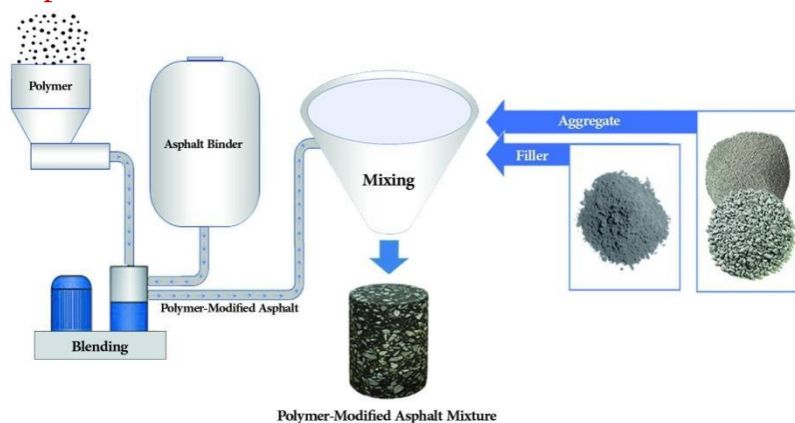


Figure 3.3 – Schéma conceptuel du procédé de modification par voie sèche (*dry process*) montrant l'introduction directe du modifiant sur les granulats chauds en centrale [14].

3.6 Essais et caractérisations spécifiques des liants mo- difiés

Les bitumes modifiés affichant un comportement non-newtonien et thixotropique très prononcé, leur évaluation exige l'emploi d'appareillages de pointe dépassant le cadre des essais empiriques usuels [14].

3.6.1 Microscopie à force atomique et fluorescence (AFM / UV)

La microscopie à force atomique (AFM) et la microscopie optique à fluorescence en rayonnement ultraviolet constituent les outils de diagnostic suprêmes pour cartographier la morphologie biphasique interne du liant (Figure 3.4). Sous excitation UV, la phase polymère gonflée de maltènes apparaît en jaune fluorescent sur un fond noir constitué de la phase bitumineuse riche en asphaltènes. L'ingénieur peut ainsi vérifier visuellement l'inversion de phase : un maillage jaune continu interconnecté certifie la réussite absolue de la modification [14].

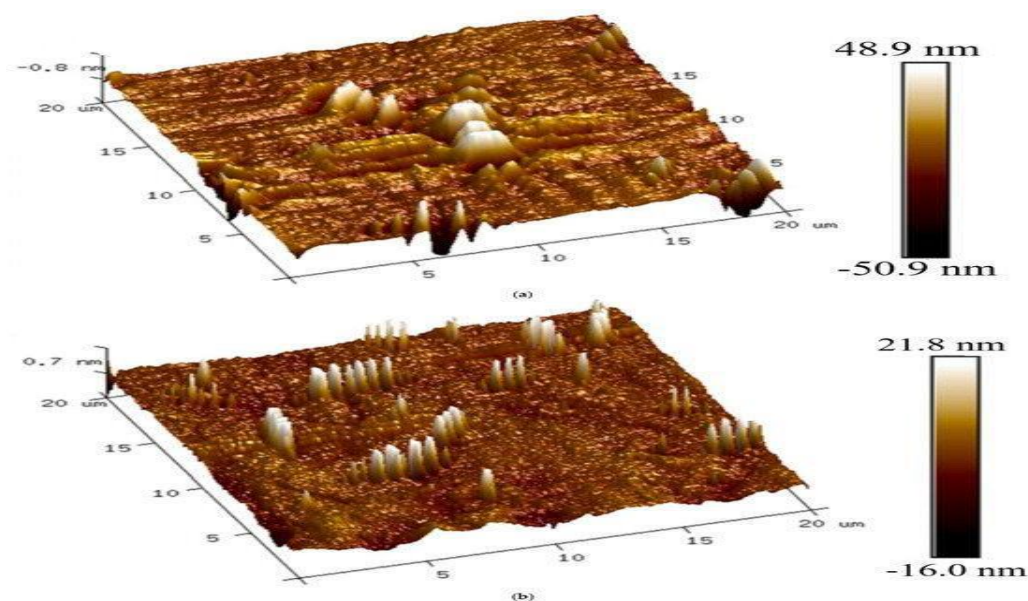


Figure 3.4 – Topographies nanoscopiques par Microscopie à Force Atomique (AFM) révélant la microstructure en « abeille » des asphaltènes et la répartition du réseau de polymère dispersé [14].

3.6.2 Essai de stabilité au stockage thermique (NF EN 13399)

Le système bitume-polymère étant thermodynamiquement métastable, la différence de densité et de polarité entre les chaînes de polymère et le bitume peut provoquer un phénomène de ségrégation par crémage ou sédimentation lors d'un stockage prolongé à chaud en l'absence d'agitation mécanique. L'essai normalisé de stabilité au stockage consiste à maintenir le liant en repos absolu dans un tube vertical en aluminium à 180 °C pendant 72 heures (Figure 3.5). Le tube est ensuite congelé et sectionné en trois parties. On détermine l'écart absolu de température de ramollissement ($\Delta TRBA$) entre le haut et le bas du tube. La norme impose un $\Delta TRBA \leq 5$ °C pour certifier l'homogénéité et la compatibilité industrielle du mélange [8].

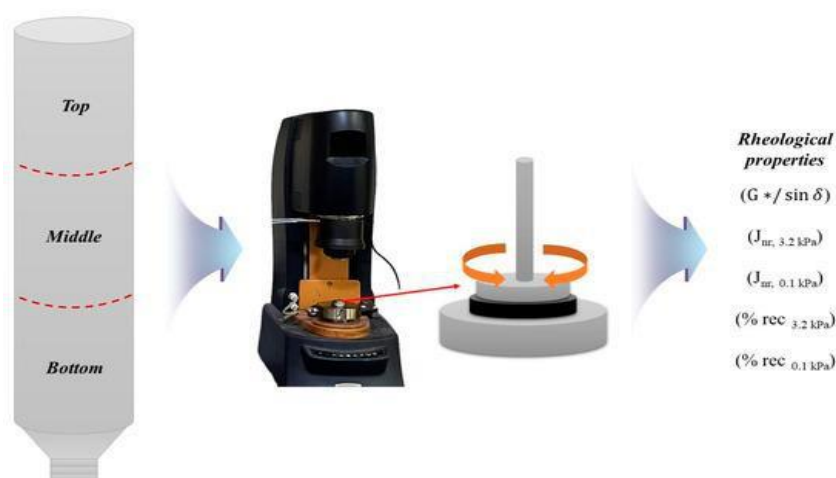


Figure 3.5 – Principe du tube de sédimentation normalisé en aluminium utilisé pour le contrôle de la stabilité au stockage et de la séparation de phase (NF EN 13399).

3.6.3 Essai de force-ductilité en traction (NF EN 13589 / 13703)

L'essai de force-ductilité (Figure 3.6) couple le principe de l'étirement uniaxiale en bain thermostaté à un capteur dynamométrique d'enregistrement continu de la force de traction [8]. La courbe force-allongement générée permet d'isoler un premier pic (seuil d'écoulement plastique de la matrice bitumineuse) suivi d'un second plateau ou d'un second pic caractéristique de la mise en tension du réseau élastique tridimensionnel du polymère. L'intégrale de la courbe force-déplacement calcule le travail total de déformation (énergie de rupture en joules), paramètre capital quantifiant la ténacité et la résistance à la propagation des fissures du liant modifié.



Figure 3.6 – Ductilomètre dynamométrique instrumenté pour l'enregistrement simultané de la courbe force-allongement lors de l'essai de force-ductilité.

3.7 Conclusion

L'état de l'art scientifique de la modification des liants routiers démontre de manière éclatante l'efficacité de la structuration polymérique. En créant un réseau élastique tri-dimensionnel par solvatation et inversion de phase, la modification thermomécanique à haut cisaillement permet de franchir le mur thermique du bitume pur. Le liant acquiert une élasticité de recouvrance et un module de raideur à haute température qui annihilent le risque d'orniérage sur chaussée. C'est en s'appuyant sur ces principes théoriques et méthodologiques que s'articule la démarche expérimentale originale de ce mémoire : la formulation d'un bitume routier modifié par l'élastomère synthétique NBR, dont les matériaux bruts et les protocoles d'élaboration sont rigoureusement décrits dans le chapitre suivant.

Chapitre 04:

Matériaux utilisés et

Méthodes d'essais

4.1 Introduction

Cette nouvelle section présente les différents éléments des règles et méthodes applicables à la préparation du bitume modifié. Nous aborderons ensuite les principes fondamentaux adoptés pour l'allocation des bitumes modifiés lors de chaque modification d'un dispositif et la détermination du mode de fonctionnement suivant. Un article sur la perméabilité et la température de choc a permis de décrire les propriétés physiques, tandis que les méthodes RTFOT et PAV ont été utilisées pour simuler le brai et la fluorescence à longue portée.

4.2 Présentations des Matériaux

4.2.1 Le bitume

L'étude expérimentale a été menée sur du bitume de grade 35/50, couramment utilisé dans la construction des couches de surface des routes et des aéroports en Algérie.



Figure 4.01: Le bitume

4.2.2 Poudrette de caoutchouc NBR (Acrylonitrile butadiene rubber)

Ce caoutchouc acrylonitrile butadiène (NBR) est issu du broyage des semelles de chaussures. Il s'agit d'un déchet industriel en poudre noire provenant de la société Industrial Rubber Applications Company (Algérie).



Figure 4.02: Poudrette de caoutchouc NBR.

L'analyse granulométrique montre que la poudrette de caoutchouc est constituée de grains inférieurs à 0,8 mm. La densité de la poudrette est de 1,25 g/cm³.

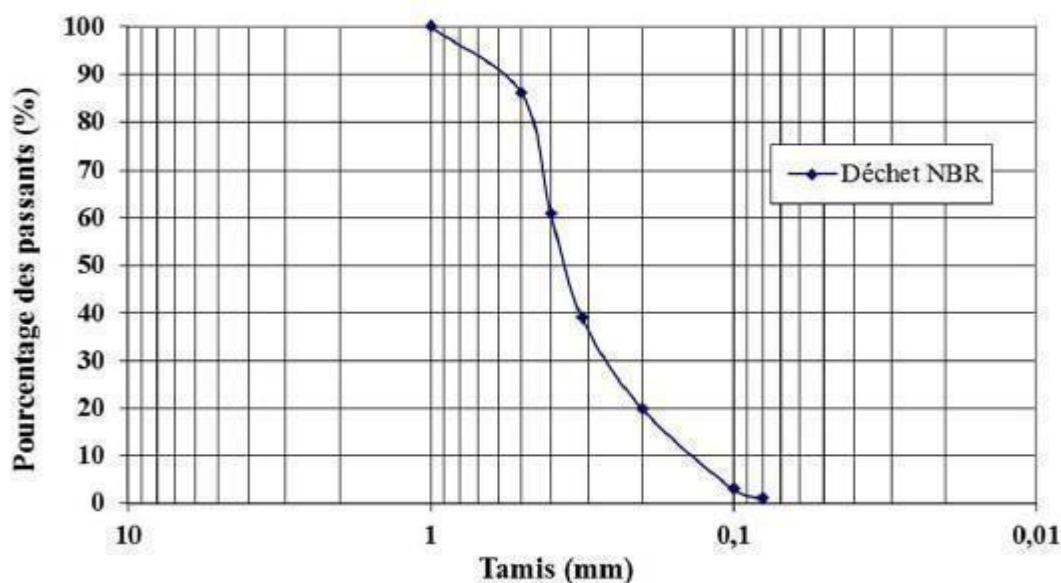


Figure 4.03: Granulométrie du NBR.

4.2.3. Les granulats

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

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

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

Chapitre 04 : Matériaux utilisés et Méthodes d'essais

Tableau 4.1 : Les résultats de l'analyse chimique des granulats.

Norme	Essais	Tamis(mm)	Résultat			Spécifications
			0/3	3/8	8/15	
EN FN 933-1	Analyse granulométrique	20			100.00	
		16			83.00	
		14			62.00	
		12.5		100.00	40.00	
		10		99.94	11.00	
		8		90.00	7.00	
		6.3	100.00	62.00	3.00	
		5	99.81	37.00		
		4	99.42	19.00		
		2.5	90.00	6.00		
		2	85.00	0.10		
		1.25	71.00	0.00		
		1	60.00			
		0.63	59.00			
		0.315	40.00			
		0.16	34.00			
		0.08	22.00			
NF P15-461	Analyse Chimique(%)	Insolubles	26.30	13.47		
		Sulfates	1.68	0.23		
		carbonates	66.40	73.38		
		chlorures	0.012	0.004		
NF P18 -591	Propreté	P (%)	-	0.575	0.18	< 1%
EN FN 933 - 3	Aplatissement	A (%)	-	7.54	10.69	< 20%
NF P18 -573	Los Angeles	LA (%)	-	18.40		< 25%
NF P18 -572	Micro-Deval Humide	MDE(%)	-	14.65		< 20%
NF P18 -597	ES a 10%de fines	ES (%)	61.32	-	-	> 40%
NF P18 -554	Masse volumique réelle	MVR(g/cm ³)	2.58	2.62	2.62	

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

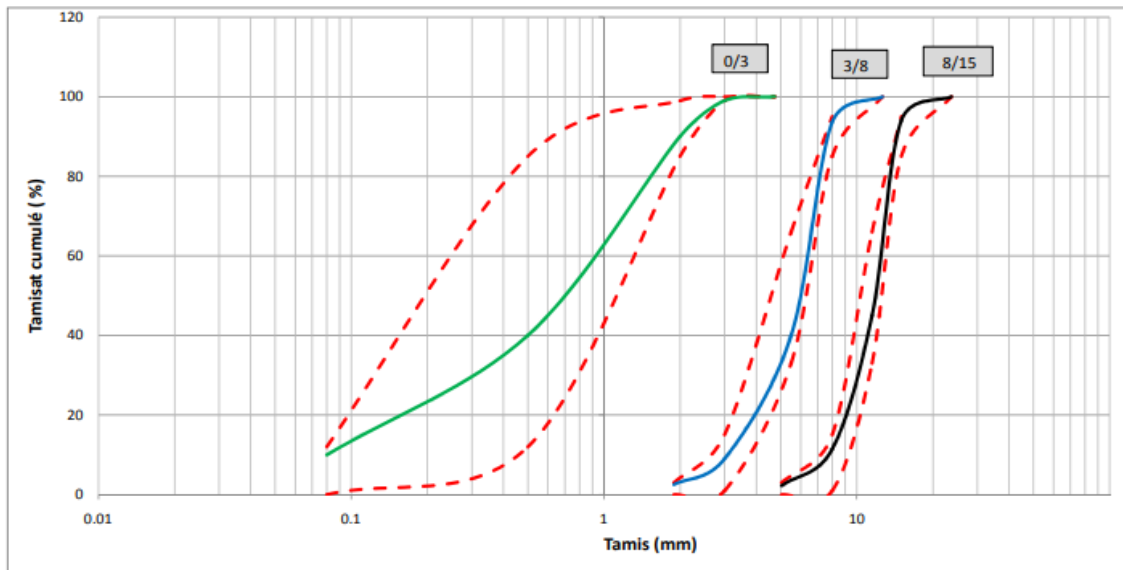


Figure 4.3: Courbe granulometrie

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

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

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

4.3 Essais sur le bitume modifié

4.3.1 Pénétrabilité (NF EN 1426)

La pénétration du bitume est mesurée en déterminant la profondeur de pénétration d'une aiguille de 100 grammes (avec son support) dans un échantillon de bitume après 5 secondes. La mesure de la pénétration à 25 °C est la plus courante. Les mesures de pénétration, exprimées en fractions de millimètre, permettent une détermination directe de la viscosité du bitume. Dans ces conditions, plus le bitume est dur, plus sa valeur de pénétration est faible

Le test de pénétration peut être considéré comme une mesure indirecte de la viscosité du bitume à 25 °C

La détermination de la pénétration à 25 °C ne pose généralement pas de problème pour la plupart des mélanges à base de SBS et d'EVA. Dans ces cas, la précision de répétabilité de ce test est comparable à celle obtenue avec du bitume pur.



Figure 4.04: Pénétromètre analogique

4.3.2 Température de ramollissement Bille Anneau (NF EN 1427)

C'est la température à laquelle s'enfonce une bille à travers un anneau de bitume dans des conditions définies de fabrication et d'essai. Par voie de conséquence, il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement. Les résultats de cet essai peuvent être perturbés dans les cas d'instabilité du bitume modifié.



Figure 4.5: Température de ramollissement Bille Anneau

4.3.3 Essai de stabilité au stockage

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

ayant une bonne stabilité au stockage si la différence est inférieure à 2,5°C. Ce test est utilisé pour contrôler l'homogénéité et la compatibilité du bitume avec le polymère



Figure 4.6: stabilité au stockage

4. 4 Essai sur les enrobés bitumineux modifiés

4.4.1 Essai Marshall pour les enrobés

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

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

Conformément à la norme ASTM D 1559. Après une journée de conservation à la température ambiante, les éprouvettes sont immergées dans un bain de 60°C pendant 35 min.

La stabilité marshall est la valeur (en KN) qui correspond à la force maximale enregistrée durant l'essai, alors que le fluage (en mm) est la déformation mesurée à la force maximale. Le rapport entre la stabilité (S) et le fluage (F) définit ainsi le quotient marshall (QM) qui permet d'évaluer la résistance des éprouvettes d'enrobés. Une valeur plus grande du quotient indique que le mélanges sont plus résistants aux déformations permanente



Figure 4.7 : Essai Marshall pour les enrobés.

4.5 Caractérisation de bitume de base

Les caractéristiques physiques du bitume de base sont données dans le tableau suivant, ce tableau montre que les caractéristiques de ce bitume répondent aux spécifications préconisées dans la norme NF EN 12591 « Spécifications des bitumes routiers » pour la classe 35/50.

Tableau 4.02: Propriété physique de bitume

Type d'essai		Résultat	Specification
Pénétrabilitéà 25 °C (1/10 mm)		45	35 - 50
Température bille et anneau « TBA » (°C)		51	50 - 58
Indice de pénétrabilité « IP »		-1.032	$-3 \leq IP \leq +7$
Ductilité (cm)		>100	100
Après RTFOT	Pénétrabilitéà 25 °C (1/10 mm)	26	
	TBA (°C)	60	> 52
	Pénétrabilitérestante [%]	66.66	> 53
	ΔTBA [°C]	7	

4.6 La modification

Le bitume modifié a été préparé à partir de bitume de grade 35/50 et de poudre de caoutchouc nitrile butadiène (NBR) (déchet industriel). Les teneurs en polymère utilisées pour la modification étaient de 2 %, 4 %, 6 % et 8 % en poids du bitume. Le mélange bitume-polymère a été homogénéisé à 180 °C à 600 tr/min pendant 2 heures.



Figure 4.08: Appareillage de modification

4.7 Conclusion

Après avoir effectué les tests requis sur le bitume pur et modifié, nous présenterons les résultats obtenus dans le chapitre suivant.

Chapitre 05:

Effet du NBR sur les propriétés des bitumes modifiés

5.1 Introduction

Ce chapitre examine l'effet de l'introduction de déchets locaux, notamment de poudre de caoutchouc non réactif (NBR), sur les propriétés physiques du bitume de type 35/50. Les bitumes modifiés ont été caractérisés à l'aide d'essais conventionnels, tels que l'essai de pénétration à 25 °C, la température de ramollissement bille-anneau et la sensibilité thermique

5.2 Influence de la poudrette (NBR) sur les bitumes

L'essai de pénétrabilité à l'aiguille et l'essai de ramollissement bille et anneau (TBA) sont les deux principaux essais réalisés pour caractériser le comportement des bitumes.

5.2.1 Pénétrabilité à 25 °C

Les résultats de la pénétrabilité en fonction de la durée de malaxage et de la teneur en poudrette de caoutchouc sont rassemblés dans le tableau 5.01 :

Tableau 5.01 : Les résultats de la pénétrabilité pour les différents mélanges

Teneur en NBR (%)	Pénétrabilité à 25 °C (0,1 mm)
0	45
2	41
4	37
6	33
8	29

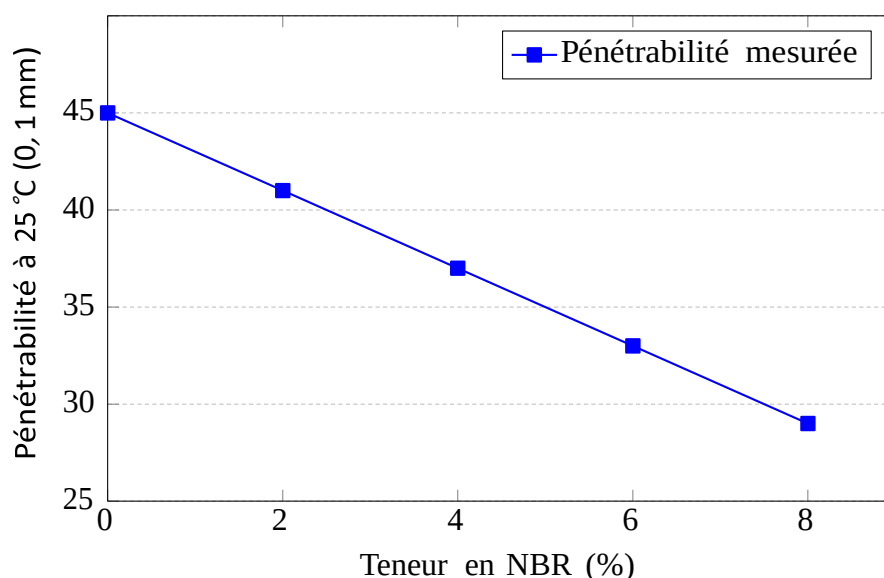


Figure 5.1 – Courbe d'évolution de la pénétrabilité à l'aiguille à 25 °C illustrant la rigidification croissante de la matrice bitumineuse par le NBR.

5.2 Analyse et interprétation physique

L'observation directe de la courbe expérimentale (Figure 5.1) révèle une diminution linéaire et strictement monotone de la pénétrabilité à mesure que le pourcentage d'incorporation de NBR s'élève. La valeur passe de 45 unités pour le bitume blanc d'origine à 29 unités pour un taux de 8 % de NBR, représentant un durcissement global de plus de 35 %.

Sur le plan physico-chimique et microstructural, ce phénomène s'explique par la forte affinité moléculaire entre les chaînes macromoléculaires du copolymère NBR et les fractions aromatiques et saturées (maltènes) du bitume chaud [2]. Lors du malaxage à haut cisaillement, les grains de NBR gonflent par solvation en absorbant les huiles légères. De ce fait, la phase bitumineuse résiduelle continue se trouve appauvrie en maltènes et enrichie en micelles d'asphaltènes rigides [4]. Cette réorganisation colloïdale accroît la cohésion intermoléculaire et la viscosité apparente du liant à température ambiante, entravant l'enfoncement vertical de l'aiguille. D'un point de vue géotechnique et routier, ce durcissement constitue un avantage de premier ordre, car il dote le mastic bitumineux d'une excellente résistance initiale aux contraintes de cisaillement et de poinçonnement induites par les pneumatiques.

5.3 Influence de la teneur en NBR sur la température de ramollissement (TRBA)

La Température de Ramollissement Bille et Anneau (TRBA) est l'indicateur rhéologique fondamental permettant de statuer sur la tenue à la chaleur du liant et d'identifier le seuil thermique d'équiviscosité ($800 \text{ Pa} \cdot \text{s}$) où le matériau perd sa consistance viscoélastique de service. Les essais ont été menés selon la norme **NF EN 1427** sous un gradient de chauffe constant de $5^\circ\text{C}/\text{min}$ [8].

5.3.1 Résultats expérimentaux

Le tableau 5.2 et la figure 5.2 présentent l'accroissement mesuré de la température de ramollissement en fonction des taux de NBR.

Table 5.2 – Évolution de la Température de Ramollissement Bille et Anneau (TRBA) selon l'ajout de NBR.

Teneur en NBR (%)	T RBA	(°C)
0	51	
2	55	
4	59	
6	63	
8	67	

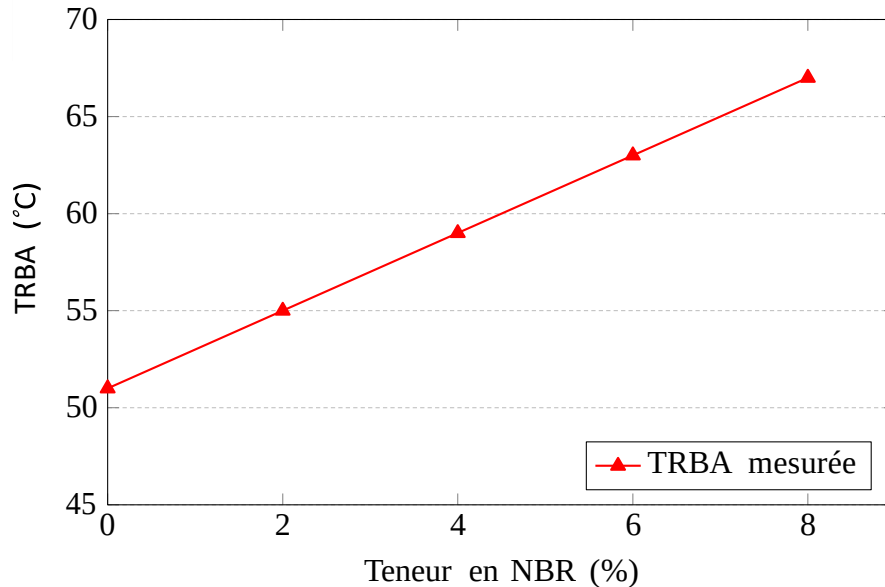


Figure 5.2 – Évolution linéaire croissante de la Température de Ramollissement (TRBA) en fonction du dosage en élastomère NBR.

5.3.2 Analyse et interprétation physique

Les résultats expérimentaux (Figure 5.2) mettent en lumière un accroissement spectaculaire et continu de la TRBA. Partant d'une valeur initiale de 51 °C pour le liant de grade 40/50 pur, la TRBA grimpe à 63 °C pour 6 % de NBR (+12 °C) et culmine à 67 °C pour un taux de substitution de 8 % (+16 °C de gain absolu).

Cette élévation remarquable de l'équiviscosité thermique prouve que le maillage tri-dimensionnel élastomérique formé par le NBR au sein du bitume oppose une barrière physique extrêmement robuste face aux sollicitations thermiques [13]. Sous l'effet des fortes chaleurs estivales, le réseau élastique absorbe et redistribue l'énergie cinétique intermoléculaire, empêchant l'affaissement visqueux naturel de la matrice. En génie routier saharien, un tel gain de TRBA est décisif : il garantit que le liant ne ramollira pas sous un fort rayonnement solaire (où les enrobés de surface atteignent couramment 60 °C à 65 °C), éradiquant ainsi l'apparition des déformations plastiques permanentes sous forme d'ornières [7].

5.4 Susceptibilité thermique (Indice de pénétration IP)

La susceptibilité thermique définit l'ampleur de la variation de consistance d'un liant face aux fluctuations de la température. Elle est évaluée quantitativement par l'Indice de Pénétration (IP) de Pfeiffer, calculé rigoureusement à partir de la pénétrabilité à 25 °C (Pen) et de la TRBA par la formule mathématique empirique :

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

5.4.1 Résultats expérimentaux

Les valeurs calculées de l'Indice de Pénétration pour chaque formulation de liant composite sont détaillées dans le tableau 5.3 et tracées sur la figure 5.3.

Table 5.3 – Valeurs calculées de l'Indice de Pénétration (IP) en fonction de la teneur en NBR.

Teneur en NBR (%)	Indice de Pénétration (IP)
0	-1,22
2	-0,74
4	-0,26
6	0,38
8	0,70

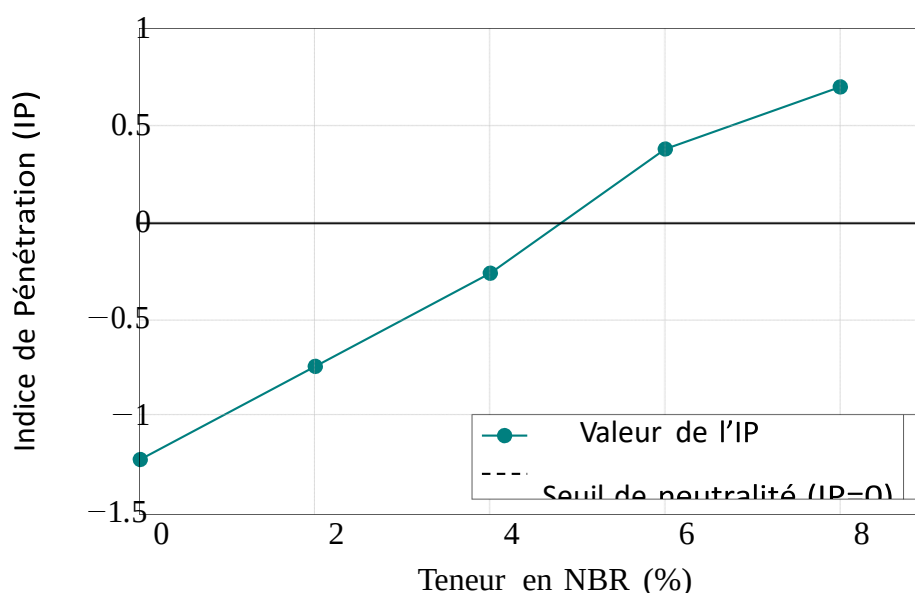


Figure 5.3 – Évolution de l'Indice de Pénétration (IP) mettant en évidence la transition vers une structure colloïdale de type gel à faible sensibilité thermique.

5.4.2 Analyse et interprétation rhéologique

L'analyse de l'indice de Pfeiffer (Figure 5.3) révèle une transition rhéologique majeure. Le bitume pur d'origine présente un IP négatif (-1,22), typique d'une structure colloïdale de type « sol » ou « sol-gel » conventionnelle à susceptibilité thermique élevée [4]. L'addition de caoutchouc synthétique NBR engendre une remontée spectaculaire de cet indice. Dès

6 % de NBR, l'indice bascule en zone positive (+0, 38) et culmine à +0, 70 pour 8 % de polymère.

En rhéologie des liants hydrocarbonés, un $IP > 0$ caractérise l'avènement d'une structure colloïdale de type « gel » fortement élastique [4]. Le liant acquiert un plateau de plasticité étendu : la courbe viscosité-température s'aplatit considérablement. En termes d'ingénierie routière, ce gain d'IP signifie que l'enrobé modifié conservera une souplesse et une ductilité suffisantes par temps très froid (prévention de la fissuration thermique ou par choc hivernal), tout en conservant une rigidité intacte sous la canicule estivale.

5.5 Stabilité au stockage

Le maintien d'une homogénéité parfaite de la dispersion polymérique durant les phases de stockage prolongé en cuve chaude est un prérequis normatif et industriel incontournable (**NF EN 13399**) [8]. L'essai évalue la propension thermodynamique du polymère à se séparer par sédimentation ou crémage sous l'effet gravitationnel et de la loi de Stokes après un repos ininterrompu de 72 heures en étuve à 180 °C.

5.5.1 Résultats expérimentaux

Le tableau 5.4 et la figure 5.4 synthétisent les écarts de température de ramollissement mesurés entre la section haute et la section basse des tubes en aluminium ($\Delta TRBA = |TRBA_{\text{haut}} - TRBA_{\text{bas}}|$).

Table 5.4 – Différence de TRBA ($\Delta TRBA$) après l'essai normalisé de stabilité au stockage thermique.

Teneur en NBR (%)	Δ TRBA (°C)
2	1,5
4	2,3
6	3,7
8	5,4

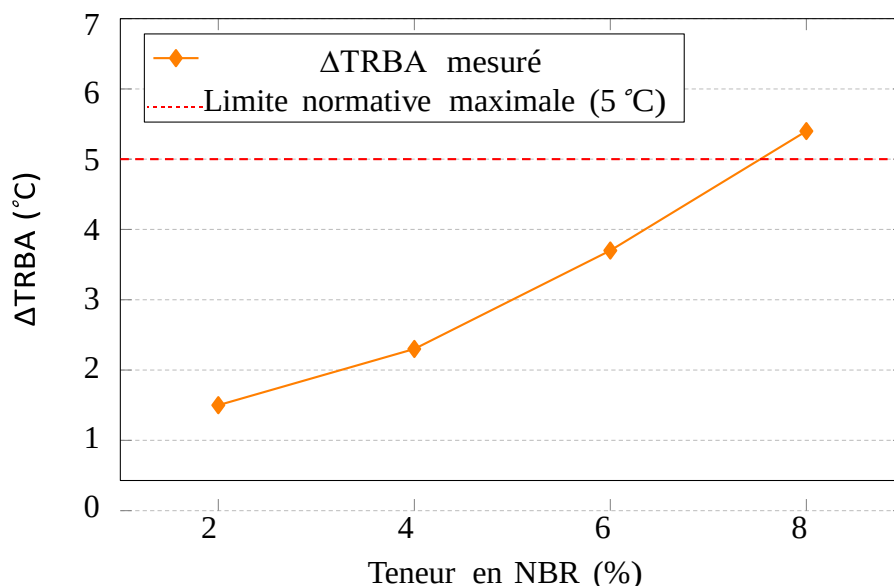


Figure 5.4 – Évolution du gradient thermique de séparation ($\Delta TRBA$) illustrant l'apparition de l'instabilité colloïdale au-delà de 6 % de NBR.

5.5.2 Analyse et interprétation thermodynamique

L'examen de l'évolution du $\Delta TRBA$ (Figure 5.4) démontre que le gradient de séparation augmente avec l'accroissement de la fraction volumique de polymère dispersé. Pour les teneurs d'incorporation de 2 %, 4 % et 6 %, le liant conserve une homogénéité de phase tout à fait satisfaisante. À 6 % de NBR, le $\Delta TRBA$ enregistré s'établit à 3,7 °C, restant nettement en deçà du plafond normatif strict fixé à 5 °C par la norme NF EN 13399.

En revanche, à une teneur de substitution de 8 %, on enregistre un $\Delta TRBA$ critique de 5,4 °C, violant la tolérance normative. Cette valeur indique le franchissement du seuil de solubilité et de compatibilité thermodynamique du système. À ce taux de chargement élevé, les maltènes disponibles sont entièrement épuisés par la solvation, et la viscosité dynamique de la phase continue ne parvient plus à contrer la coalescence et la floculation des amas macromoléculaires de NBR sous l'effet de la pesanteur. Sur le plan industriel et logistique, ce constat est fondamental : il impose de plafonner le dosage en poudre NBR autour de 6 % pour garantir une parfaite stabilité de stockage en cuve sans nécessiter d'agitation continue lourde.

5.6 Conclusion

La campagne de caractérisation rhéologique et conventionnelle menée au sein de ce cinquième chapitre met en exergue l'impact hautement positif et synergique de la poudrette d'élastomère synthétique NBR sur le bitume routier 40/50. L'incorporation conférant :

- **Une rigidification cohésive accrue** : Baisse linéaire de la pénétrabilité de 45 à 29 dixièmes de millimètre, augmentant le module initial de cisaillement ;
- **Une résistance thermique de haut niveau** : Élévation spectaculaire de la TRBA de 51 °C à 67 °C (+16 °C), immunisant la couche de roulement contre l'affaissement plastique estival et le phénomène d'orniérage saharien ;
- **Une excellente stabilité face aux amplitudes thermiques** : Passage de l'Indice de Pfeiffer d'un régime « sol » (-1, 22) à un régime « gel » positif (+0, 70), garantissant une élasticité préservée par temps froid et une inertie à la chaleur estivale.

L'investigation thermodynamique de la stabilité au stockage à chaud (180 °C) a permis d'identifier avec exactitude la limite d'incorporation industrielle. Tandis que le liant modifié à 6 % de NBR atteste d'une parfaite homogénéité de phase ($\Delta TRBA = 3,7\text{ °C} \leq 5\text{ °C}$), la formulation à 8 % marque l'apparition d'une démixtion par floculation ($\Delta TRBA = 5,4\text{ °C}$).

Par conséquent, l'analyse globale désigne sans ambiguïté le dosage de 6 % **de poudrette NBR** comme la **teneur optimale de formulation**. Ce taux réalise l'équilibre parfait en offrant un saut qualitatif exceptionnel des propriétés rhéologiques (pénétrabilité de 33, TRBA de 63 °C, IP positif à +0, 38) tout en assurant une parfaite sécurité et stabilité de stockage industrie.

Chapitre 06 :

Etude

expérimentale

sur les enrobés

bitumineux

Chapitre 6 : Etude expérimentale sur les enrobés bitumineux

6.1 Introduction

Ce chapitre expose l'étude expérimentale menée sur les enrobés bitumineux incorporant du NBR. Les essais réalisés visent à évaluer l'impact de différentes proportions de NBR sur les caractéristiques Marshall des mélanges bitumineux. L'analyse se concentre principalement sur l'évolution de la stabilité, afin de déterminer l'effet du NBR sur les performances globales de l'enrobé. Les résultats obtenus permettront d'identifier le comportement mécanique des enrobés modifiés et d'apprécier la pertinence de l'emploi du NBR dans le secteur des infrastructures routières.

6.2. Etude de Formulation de l'enrobé

L'étude de formulation de l'enrobé constitue une phase cruciale dans la conception des chaussées routières. Elle vise à définir la composition idéale du mélange bitumineux en vue d'atteindre des performances mécaniques, économiques et environnementales optimales

6.2.1 Courbe granulométrique du mélange

Conformément aux protocoles de formulation en usage dans les laboratoires de travaux publics de notre pays, nous avons retenu un mélange granulaire constitué de trois fractions distinctes : 0/3, 3/8 et 8/15. Cette combinaison a fait l'objet d'une analyse rigoureuse afin de s'inscrire de manière optimale dans le fuseau de référence SETRA/LCPC applicable au Béton Bitumineux (BB 0/14). Les proportions pondérales adoptées pour parvenir à cette courbe granulométrique sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 6.1 : Composition pondérale du mélange granulaire.

Fraction	Pourcentages Pondéraux (%)
0/3	36
3/8	30
8/15	34

La figure ci-dessous présente le mélange 0/14 ainsi que le fuseau de spécification correspondant.

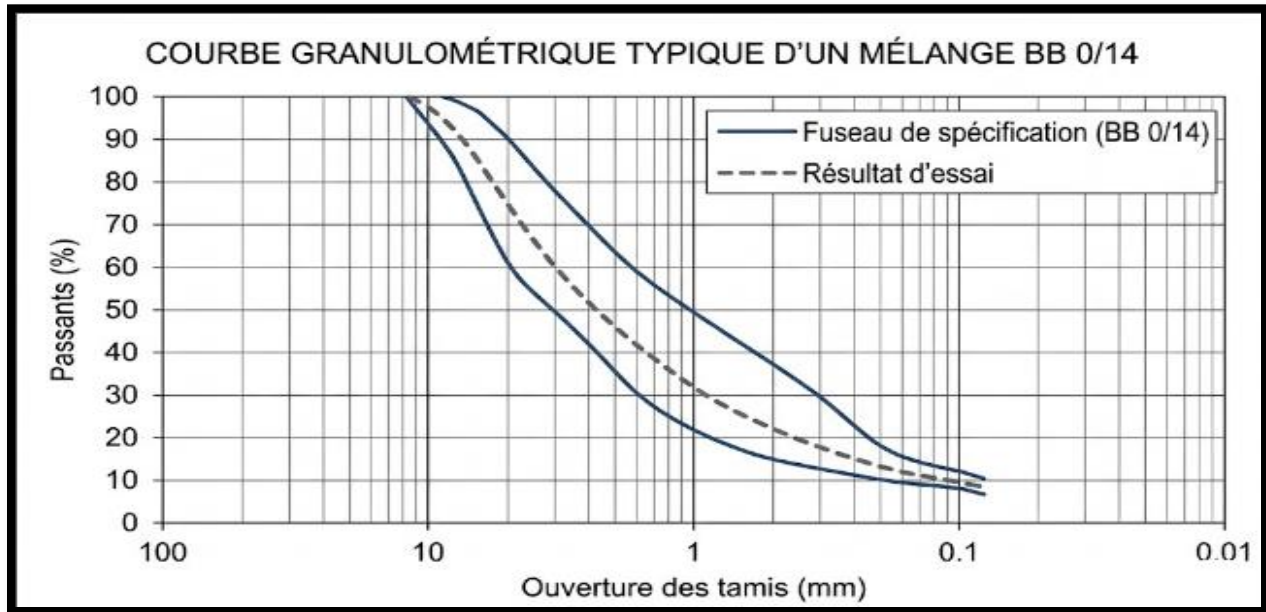


Fig 6.1 : Courbe granulométrique du mélange et fuseau de référence LCPC BB 0/14.

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

6.2.2. Teneur en liant

La proportion de liant (bitume) constitue un élément essentiel dans la formulation des enrobés. Son optimisation est nécessaire afin d'atteindre un équilibre optimal entre les performances mécaniques (cohésion, stabilité) et la longévité de la chaussée (résistance à la fatigue et au vieillissement). Un dosage insuffisant expose l'enrobé à des risques de désenrobage (séparation entre le bitume et les granulats) ainsi qu'à la fissuration. À l'inverse, un excès de liant favorise l'apparition d'orniérage (déformation permanente) et de ressuage (remontée du bitume en surface).

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

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

Avec :

- G : des éléments supérieurs à 6.3 mm,
- S : des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm,

Chapitre 6 : Etude expérimentale sur les enrobés bitumineux

- s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm,
- f : des éléments inférieurs à 0.08 mm,

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

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

Avec :

P : teneur en liant (%)

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

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

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

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

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

Conformément aux spécifications, l'étude de formulation des bétons bitumineux a fourni les résultats présentés dans le tableau 6.2, pour les matériaux employés (bitume 35/50, sable calcaire et gravier siliceux).

Tableau 6.2: composition de la formule utilisé

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
% du mélange	36	30	34
Teneur en liant (%)	5,84		

6.2.3. Mode de fabrication des éprouvettes



Chapitre 6 : Etude expérimentale sur les enrobés bitumineux

La fabrication des éprouvettes représente une étape essentielle dans le cadre de l'étude expérimentale, car elle doit assurer à la fois la représentativité et la reproductibilité des résultats. Le protocole mis en œuvre est conforme aux prescriptions de la norme NF EN 12697-30 (ou à la norme Marshall correspondante). Ainsi que le montre la figure RR, le processus de production se décompose en quatre phases principales :

Le malaxage : Les granulats, préalablement pesés et portés à une température située entre 160 °C et 170 °C, sont introduits dans le malaxeur. Le bitume (qu'il soit pur ou modifié par l'ajout de poudrette de caoutchouc) est ensuite incorporé. Le malaxage se poursuit jusqu'à l'obtention d'un enrobage complet et homogène de l'ensemble des fractions granulaires par le liant.

Le moulage : Le mélange chaud est versé dans des moules cylindriques normalisés, préchauffés afin d'éviter tout choc thermique. Une attention particulière est accordée à l'arasement du mélange, de manière à garantir une répartition uniforme de la matière.

Le compactage : Cette étape est déterminante pour reproduire les conditions de mise en œuvre sur le terrain. Les éprouvettes sont compactées à l'aide d'une dame Marshall automatique. Le nombre de coups appliqués (généralement 50 ou 75 par face) varie en fonction de l'intensité de trafic visée pour la formulation étudiée.

Le démoulage : Après le compactage, les éprouvettes sont laissées à température ambiante pendant au moins 24 heures, afin de permettre la stabilisation de la structure interne de l'enrobé. Une fois refroidies, elles sont extraites des moules à l'aide d'un extracteur hydraulique, et sont alors prêtes pour les essais de caractérisation (stabilité, fluage et masse volumique).

Chapitre 6 : Etude expérimentale sur les enrobés bitumineux

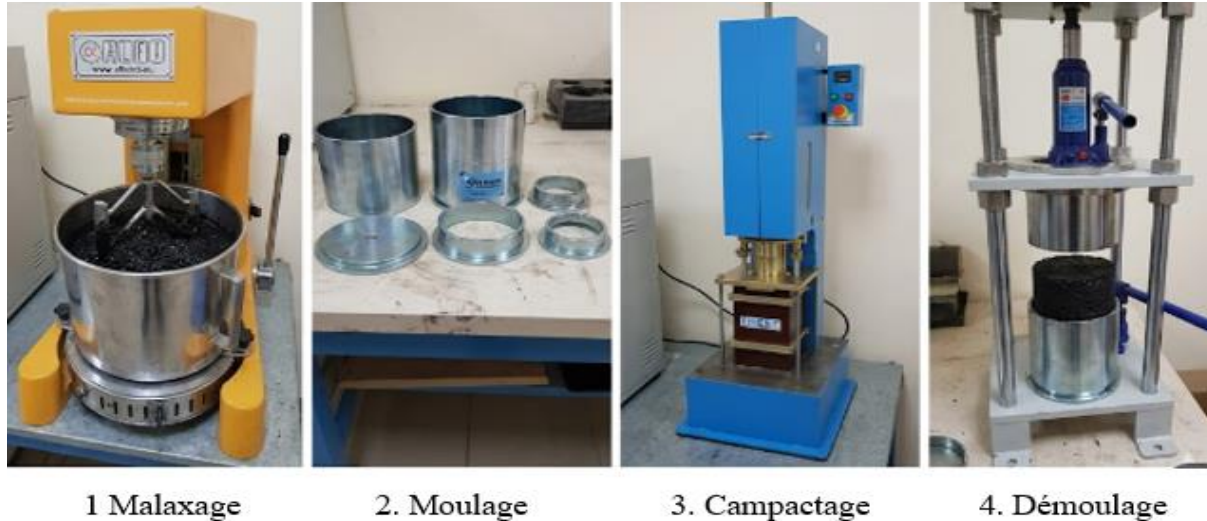


Figure 6.2 : Matériels utilisés pour fabrication des éprouvettes

6.3. Influence de l'ajout de poudrette de caoutchouc sur les caractéristiques Marshall

L'essai Marshall permet d'évaluer la résistance à la déformation plastique et les caractéristiques volumétriques des enrobés. L'introduction de la poudrette de caoutchouc (par voie sèche ou humide) modifie sensiblement le squelette granulaire et les propriétés viscoélastiques du liant.

Les bitumes utilisés dans cette partie sont modifiés avec du NBR à 2%, 4%, 6%.

L'enrobé bitumineux est compacté dans des moules à l'aide d'une dame pour former des éprouvettes cylindriques. Ces dernières, maintenues à une température de 60°C, sont placées entre les deux mâchoires semi-cylindriques d'une presse qui se rapprochent l'une de l'autre à vitesse constante. Durant l'essai, la charge et la déformation sont enregistrées jusqu'à la rupture. Cet essai appartient à la catégorie des essais à chargement unique qui, en raison de la complexité des sollicitations générées, ne permet pas de déterminer une propriété intrinsèque du matériau (essai de performance). Il aboutit à la détermination directe de deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage : le fluage FM (en mm) et la stabilité Marshall SM (en kN). La stabilité Marshall (SM) représente la résistance à l'écrasement de l'éprouvette à 60°C au moment de la rupture.

6.3.1. la stabilité Marshall (SM)

Les résultats de l'essai Marshall pour chaque teneur en NBR sont récapitulés dans le tableau 6.3.1 :

Chapitre 6 : Etude expérimentale sur les enrobés bitumineux

tableau 6.3.1 : Résultats de Stabilité Marshall

Teneur en NBR (%)	0 %	2 %	4 %	6 %
Stabilité (KN)	9.6	10.1	10.7	11.8

La figure 6.3 illustre l'évolution de la stabilité Marshall en fonction du dosage en NBR.

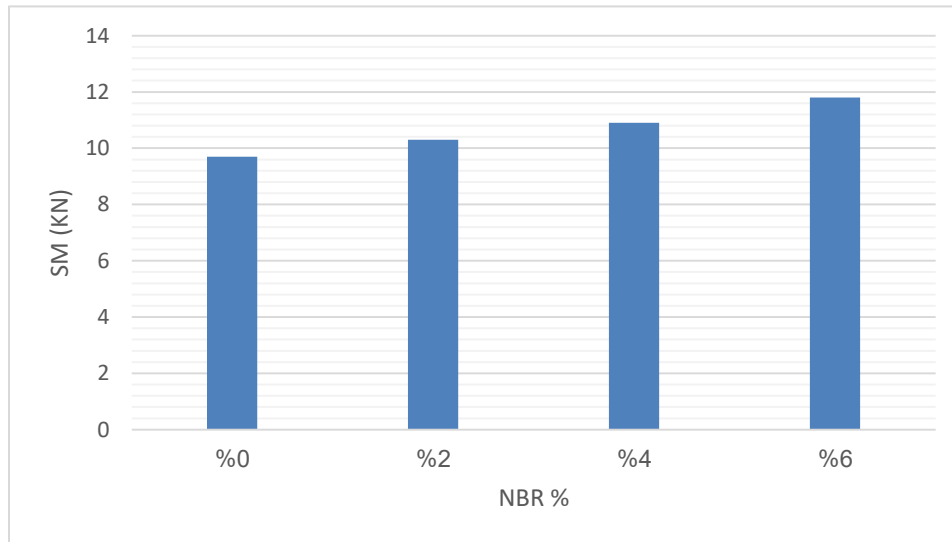


Figure 6.3 Stabilité Marshall.

On constate une hausse progressive de la stabilité lorsque la proportion de NBR passe de 0 % à 6 %. En l'absence de NBR (0 %), la stabilité Marshall est d'environ 9,5 kN. L'incorporation de 2 % de NBR entraîne une légère augmentation, atteignant environ 10 kN. Cette progression se confirme avec des valeurs d'environ 10,7 kN à 4 % et près de 11,8 kN à 6 % de NBR.

La résistance accrue des mélanges modifiés au NBR, par rapport au bitume ordinaire, est due à l'élasticité de ce caoutchouc. Au contact du bitume, les molécules de NBR se dilatent pour former un réseau tridimensionnel flexible au sein du liant. Cette structure améliore la capacité du mélange à absorber et à redistribuer les contraintes sous charge, retardant ainsi l'apparition de microfissures et augmentant sa résistance à la déformation sous charges répétées ou continues.

6.3.2. Le fluage Marshall FM

Les résultats du fluage Marshall pour chaque proportion de NBR sont résumés dans le tableau 6.3.2 et schématisés sur la figure 6.5

Chapitre 6 : Etude expérimentale sur les enrobés bitumineux

tableau 6.3.2 : Résultats de fluage Marshall

Teneur en NBR (%)	0 %	2 %	4 %	6 %
FM (mm)	3.9	3.7	3	2.5

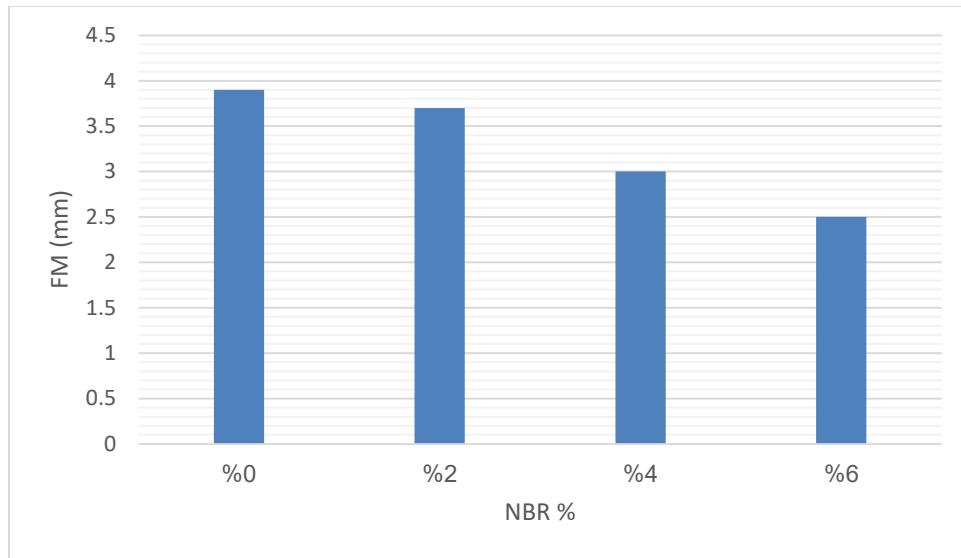


Figure 6.4. Fluage Marshall.

Le graphique (Figure 6.4) représente l'évolution du fluage Marshall (FM en mm) en fonction du pourcentage de NBR incorporé dans le mélange bitumineux, pour des teneurs de 0%, 2%, 4% et 6%.

On observe une tendance nettement décroissante du fluage avec l'augmentation du taux de NBR. À 0% de NBR, le fluage atteint sa valeur maximale d'environ 3,85 mm, correspondant au comportement du bitume conventionnel non modifié. À 2% de NBR, FM diminue légèrement à environ 3,65 mm, indiquant un début d'amélioration de la rigidité du mélange. À 4%, la valeur chute plus sensiblement à environ 3,0 mm, révélant une réduction notable de la déformabilité. Enfin, à 6% de NBR, FM atteint sa valeur minimale d'environ 2,45 mm, soit une réduction globale d'environ 36% par rapport au mélange témoin.

Cette diminution progressive du fluage signifie que l'ajout de NBR rigidifie le mélange bitumineux et réduit sa susceptibilité à la déformation permanente, notamment sous charges répétées. Un fluage plus faible est généralement associé à une meilleure résistance à l'orniérage. En conclusion, le NBR améliore le comportement mécanique du bitume, et le dosage de 6% apparaît comme le plus efficace pour limiter le fluage et accroître la durabilité de la chaussée.

6.4. Conclusion

Cette étude expérimentale a permis d'examiner l'impact de l'incorporation de NBR sur les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux au moyen des essais Marshall. Les résultats obtenus indiquent que l'ajout de NBR améliore de manière notable les performances du mélange asphaltique, en particulier en ce qui concerne la stabilité et la résistance aux déformations permanentes. L'analyse des données a mis en évidence une hausse progressive de la stabilité Marshall à mesure que la proportion de NBR augmentait, ce qui reflète un renforcement de la cohésion interne du mélange ainsi qu'une meilleure adhérence entre le bitume et les granulats. Cette amélioration s'explique principalement par les propriétés élastiques et la rigidité que le NBR confère au liant bitumineux. De plus, l'introduction de NBR contribue à diminuer la sensibilité de l'enrobé aux températures élevées et à accroître sa résistance à l'orniérage, ce qui peut allonger la durabilité des chaussées. Néanmoins, un dosage trop important risque d'entraîner une rigidité excessive du mélange et de favoriser l'apparition de fissures, soulignant ainsi la nécessité de définir une teneur optimale en NBR.

Conclusion



Conclusion

Conclusion

Cette étude a mis en évidence la contribution significative de l'incorporation de poudre de caoutchouc (NBR) à l'amélioration des performances des liants hydrocarbonés et des enrobés bitumineux. Face aux limitations du bitume pur face à l'accroissement du trafic et aux variations climatiques, le bitume modifié s'impose désormais comme une solution incontournable. Les principales conclusions de ce travail peuvent être résumées comme suit :

Amélioration des propriétés physiques :

L'ajout du polymère NBR modifie la structure rhéologique du bitume en diminuant sa pénétrabilité et en augmentant son point de ramollissement (TBA). Ces évolutions traduisent une meilleure rigidité à haute température, réduisant ainsi les risques d'orniérage, tout en atténuant la sensibilité thermique du matériau.

Optimisation des performances mécaniques : Les essais réalisés sur les enrobés bitumineux démontrent que l'introduction du caoutchouc améliore nettement la stabilité Marshall. Cette augmentation de la capacité portante permet au revêtement de mieux résister aux charges lourdes et répétitives, garantissant ainsi une durabilité accrue des infrastructures routières.

Bibliographie

- [1] Normes européennes NFEN12591 et NFEN12597, Bitumes et liants bitumineux – l’aiguille), NFEN1427 (Bille et Anneau TRBA), NFEN13589 (Ductilité à traction) Guide technique méthodologique, Ministère de l’Équipement, des Transports et du road bitumens, Fuel, vol. 82, n° 14, pp. 17091719, 2003.
- [2] J. Read et D. Whiteoak, The Shell Bitumen Handbook, 5e
- [3] LCPC/IFSTTAR, Manuel de référence pour l’essai et le contrôle en laboratoire des
- [4] T.F. Yen et O.C. Mullins, Asphaltenes and Asphalts: The colloidal aspect of precipitation, Analytical Chemistry, vol. 41, n° 4, pp. 576579, 1969.
- [5] L.W. Corbett, Composition of asphalt based on generic fractionation using solvent Compounding (NBR synthetic rubber), Rapra Technology Ltd, Shawbury, 1995.
- illustrés des désordres et guidés l’entretien, Ministère des Transports, 2005.
- Terminologie et spécifications des bitumes routiers purs, AFNOR, Paris.
- [6] J.-P. Kerzreho, Les enrobés bitumineux: constitution, formulation mécanique et mise
- [7] SETRA-LCPC, Conception et dimensionnement rationnel des structures de chaussées: mélange bitumineux à chaud (Partie 31: Presse à compactage giratoire PCG, Partie
- [8] Normes européennes de caractérisation des liants: NFEN1426 (Pénétrabilité à édition refondue, Thomas Telford Publishing, Londres, 2003.
- [9] J. Bonnot, Comportement sous sollicitations des chaussées souples et semi-rigides, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n° 217, pp. 1529, 1998.
- [10] SETRA-LCPC, Dégradations des chaussées minérales et bitumineuses Catalogue
- [11] Association Française de Génie Civil (AFGC), Recommandations pour la formulation
-



Bibliographie

- [12] Normes européennes NFEN12697, Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour enrobés bitumineux, Éditions de l'IFSTTAR, 2012.
- macrostructure, Elsevier Science, New York, 1991.
- [13] G.D. Airey, Rheological properties of styrene butadiene styrene (SBS) polymer modified
- [14] J.R. White et S.K. De, Rubber Technologist's Handbook: Elastomer Properties and en œuvre, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie Civil, C5425, 2015.
- et NFEN13399 (Stabilité au stockage thermique), AFNOR, Paris.
- Tourisme, Paris, 1994.
- 34: Essai Marshall), AFNOR, Paris.
- rationnelle et la mise en œuvre des enrobés bitumineux, Paris, 2018.
-