



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie
Département de d'Hydraulique et de Génie Civil
MÉMOIRE

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

Présenté par :

1. Dahem El hadj Bachir
2. Belaid Nasr Eddine

Intitulé :

Valorisation de la poudrette de caoutchouc en domaine routier

Soutenue le : 27/05/2025

Devant le jury composé de :

Dr : Khelaifa Hamad

Président

Dr : Ammari Mohammed Seghir

Examineur

Dr : FETHIZA ALI Boubaker

Encadreur

Année académique : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remercîments

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Louange à lui pour ses bénédictions constantes tout au long de ma vie. Ma confiance en lui m'a rendu fort dans les moments difficiles et ses conseils me conduisent d'un succès à l'autre.

Alhamdulillah, je tiens à remercier mon superviseur, le Dr FETHIZA ALI Boubaker, pour son soutien continu et ses encouragements.

Un chaleureux merci à nos chers parents qui ont été une source constante de motivation tout au long de nos années d'études. Puissent-ils être fiers de nous. Nous exprimons également notre profonde gratitude envers notre famille pour le soutien moral et financier qu'elle nous a généreusement offert durant toute cette période.

Leur amour durable nous a permis de continuer même lorsque nous avons remis en question nos capacités.

Merci pour tout le monde.

Je tiens à remercier tous ceux qui nous ont aidés à travers leur consultation dans mes carrières à l'université et je n'oublierai pas nos meilleurs amis qui nous ont aidés par leur soutien.

Alors tout simplement... merci infiniment à vous tous.

Résumé

Les températures élevées sur les routes, surtout en été, entraînent une détérioration de l'état des routes, comme des fissures et des déformations longitudinales. Il est donc nécessaire de trouver des résolutions pratiques à ces difficultés. Ce travail vise à améliorer les caractéristiques du bitumen pour optimiser ses durabilités, en intégrant des résidus industriels (le caoutchouc NR) dans le bitume selon des dosages précis. Nous examinons aussi l'influence de ces déchets locaux (NR) sur l'enrobé. Les tests que nous avons réalisés ont démontré que ces additifs modifient de manière efficace les caractéristiques du bitume et améliorent simultanément les propriétés des enrobés.

Mots clé: Bitume, enrobé, caoutchouc, TBA, Marshall

ملخص

تؤدي درجات الحرارة المرتفعة على الطرق، وخاصة في فصل الصيف، إلى تدهور حالة الطرق، مثل ظهور التشققات والتشوهات الطولية. ومن الضروري إذن إيجاد حلول علمية لهذه الصعوبات.

يهدف هذا العمل إلى تحسين خصائص القار من أجل رفع أدائه، وذلك من خلال إضافة المخلفات الصناعية (فتاة المطاط) وفقاً لنسب دقيقة.

وقد اثبتت الاختبارات التي اجريناها على فتاة المطاط ان هذه المواد المضافة تعمل على تعديل خصائص القار بشكل فعال

الكلمة المفتاحية: القار، المطلي، المطاط، درجة التليين، مارشال

Liste des abréviations

BMP : Bitume modifié en polymère

NR : poudrette de caoutchouc (nitrile rubber)

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

GPC : Chromatographie sur Gel Perméable

IC : Indice d'instabilité colloïdale

IP : Indice de pénétrabilité

PAV : Pressure Aging Vassel

Pen25: Pénétration à 25 ° C

RTFOT: Rolling Thin Film Oven Test

SAEL : Société d'application d'élastomère

TBA : Température bille et anneau

Liste des figures

Chapitre 1: Généralités sur les bitumes

Figure 1.1. Schematisation de la composition d'un petrol brut.	7
Figure 1.2 : Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole.....	8
Figure 1.3. Structure des asphaltènes selon	11
Figure1.4 Schématisation de la structure colloïdale d'un bitume routie.....	11
Figure1.5. Différents composants du bitume.....	11
Figure1.6.Essai de pènètrabillité pour le bitume	15
Figure1.7.Détermination du point de ramollissement	16
Figure1.8.Prencipe de l'essai de ductilité	17
Figure1.9.L'essai RTFOT	18
Figure1.10.L'essai PAV(Pressure Aging vessel – EN14769)	19

Chapitre 2 :les énrobes bitumineux

Figure2.1.Fissures transversales	22
Figure 2.2: Fissures longitudinales.....	22
Figure 2.3 : Fissures de rives.....	23
Figure 2.4: Fissures de gel.....	23
Figure 2.5: Faièncage.....	24
Figure 2.6: Phénomène d'ornièrage.....	24
Figure 2.7: Chaussée souple.....	26
Figure 2.8: Chaussée rigide.....	27
Figure 2.9: Chaussée semi-rigide.....	28
Figure 2.10: Constitution d'une structure de chaussée souple.....	28
Figure 2.11: Les granulats.....	30
Figure 2.12: Les deux familles de granulats.....	30
Figure 2.13: Les tamis utilizes selon les classes graulaires.....	31
Figure 2.14: Essai Marshall.....	33
Figure 2.15: Essai Duriez.....	34
Figure 2.16 : Essai de fluage.....	34
Figure 2.17: Essai dornièrage (NF P98-253-1).....	35
Figure 2.18:CANTABRO	36
Figure 2.19: traction directe.....	36
Figure 2.20: retrait thermique empêché (AASHTO, TP10-93).....	37
Figure 2.21 : Rupture par Compression Diamétrale.....	38

Figure 2.22 : détermination d'aliénabilité.....	38
Figure 2.23: Essai de résistance au dé enrobage.....	39
Figure 2.24: Essai de stabilité.....	39
Figure 2.25: compression simple ou répété.....	40

Chapitre 4 : Matériaux utilisés et Méthodes d'essais

Figure 4.1: Courbe granulometrie.....	54
Figure 4.2: Le bitume.....	55
Figure 4.3: Poudrette de caoutchouc NR.....	55
Figure 4.4: Courbe granulométrique de la poudrette de caoutchouc (NR).....	56
Figure 4.5: Appareillage de modification.....	56
Figure 4.6: Appareillage de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille.....	57
Figure 4.7: Température de ramollissement Bille Anneau.....	58
Figure 4.8: stabilité au stockage.....	59
Figure 4.9 : Essai Marshall pour les enrobés.....	60

Chapitre 5: Influence du poudrette de caoutchouc sur les bitumes

Figure 5.1 Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité des bitumes.....	61
Figure 5.2 Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité.....	62
Figure 5.3 Influence du temps de malaxage sur la TBA des bitumes.....	63
Figure 5.4 Influence de la teneur en NR sur la TBA des bitumes.....	64
Figure 5.5 Les résultats de la susceptibilité thermique	65
Figure 5.6 : Prélèvement d'éprouvettes pour l'essai de stabilité au stockage.....	66

Chapitre 6 : Influence NR sur les enrobés bitumineux

Figure 6.1 : Courbe granulométrique.....	69
Figure 6.2 : Matériels utilisés pour fabrication les éprouvettes.....	71
Figure 6.3 Stabilité Marshall.....	72

Liste des tableaux :

Chapitre 1: Généralités sur les bitumes

Tableau 1.1 : Spécifications du bitume	12
--	----

Chapitre 4 : Matériaux utilisés et Méthodes d'essais

Tableau 4.1: Analyse chimique sommaire des différents types de granulats.....	52
---	----

Tableau 4.2 : Résultats de l'analyse granulométrique.....	53
---	----

Tableau 4.3 : Caractéristique des granulats.....	54
--	----

Chapitre 5: Influence du poudrette de caoutchouc sur les bitumes

Tableau 5.1 : Variation de la pénétrabilité à 25 °C pour les différents mélanges...	61
---	----

Tableau 5.2 : Variation de TBA pour les différents mélanges.....	63
--	----

Tableau 5.3 : La susceptibilité thermique (120 minute).....	65
---	----

Tableau 5.4 : Les résultats de la stabilité au stockage des bitumes modifiés.....	67
---	----

Chapitre 6 : Influence NR sur les enrobés bitumineux

Tableau 6.1 : différentes classes de granulats.....	68
---	----

Tableau 6.2: composition de la formule utilisée.....	70
--	----

Tableau 6.3 : Résultats Marshall.....	71
---------------------------------------	----

Tables des Matières

Remercîments	
Résumé.....	ii
List des abréviations.....	iii
Liste des Figures	iv.v
Liste des tableaux	vi

Introduction Générale.....	1.2
----------------------------	-----

Partie 1 : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre 1: Généralités sur les bitumes

1.1: Introduction	5
1.2. Propriétés physiques des liants hydrocarbures :.....	5
1.3. Types de liants hydrocarbonés :.....	5
1.4 Définition de bitume :.....	6
1.5. Avantages et inconvénients des bitumes:.....	6
1.6 Fabrication des bitumes:.....	7
1.6.1. La distillation :.....	8
1.6.1.1 Distillation à la pression atmosphérique:.....	8
1.6.1.2 Distillation sous vide:.....	8
1.6.2. L'extraction (Désasphaltage) :.....	8
1.6.3. Le Soufflage :.....	9
1.6.4. Le Craquage :.....	9
1.7 Caractéristiques chimiques du bitume :.....	9
1.7.1. Composition chimique :.....	9
1.7.2 Les asphaltènes :.....	10
1.7.3 Les maltènes :.....	10

1.8 Les spécifications des bitumes :	12
1.8.1. Classification des bitumes :	12
1.8.2. Normes et classifications courantes:	13
1.8.2.1 Bitumes routiers (EN 12591):	13
1.8.2.2 Bitumes modifiés (EN 14023):	13
1.8.2.3 Bitumes industriels (EN 13304):	13
1.8.3. Choix du bitume selon l'application :	13
1.9 Vieillissement des bitumes :	13
1.9.1. Facteurs influençant le vieillissement du bitume :	13
1.9.2. Types de vieillissement :	14
1.9.2.1 Vieillissement à court terme (pendant la mise en œuvre):	14
1.9.2.2 Vieillissement à long terme (en service) :	14
1.9.3. Conséquences du vieillissement :	14
1.9.4. Méthodes de réduction du vieillissement :	14
1.10. Essais classiques sur le bitume :	15
1.11. Conclusion.....	19

Chapitre 2: les énrobes bitumineux

2.1 Introduction :	20
2.2 Qualité requises pour les énrobes bitumineux :	20
2.2.1. Propriétés mécaniques et physiques :	20
2.2.2. Durabilité et vieillissement :	20
2.2.3. Caractéristiques de mise en œuvre:	21
2.2.4. Respect des normes environnementales :	21

2.2.5. Adaptabilité aux usages spécifiques :	21
2.3 Les dégradations de chaussées :	21
2.3.1 Les fissures :	21
2.3.2. Le faïençage :	24
2.3.3. Dégradation par orniérage :	24
2.4 Différents types des chaussées (souple , rigide et semi rigide):	25
2.4.1. Chaussée souple :	25
2.4.2. Chaussée rigide :	26
2.4.3. Chaussée semi-rigide :	27
2.5 Les structures de chaussées :	28
2.5.1. Couche de surface :	29
2.5.2. Couche d'assise:	29
2.5.3. Couche de forme :	29
2.5.3.1. Fonctions principales de la couche de forme :	29
2.6 Composition de l'enrobé Granulats :	29
2.6.1 Propriétés des Granulats:	29
2.6.1.1. FAMILLES DE GRANULATS :	30
2.6.1.2. LES ESSAIS SUR LES GRANULATS :	30
2.6.2 Les essais sur les enrobés bitumineux :	33
2.7. Conclusion :	40

Chapitre 3 : La modification des bitumes

3.1 Introduction :	41
3.2 Les objectifs de la modification :	41
3.3. Notions de compatibilité :	43
3.3.1. Principaux aspects de la compatibilité du bitume :	43
3.3.1.1. Compatibilité avec les polymères (bitumes modifiés) :	43
3.3.1.2. Compatibilité avec les granulats :	43

3.3.1.3.Compatibilité avec les additifs et les agents de vieillissement :	43
3.3.1.4.Compatibilité des bitumes entre eux :	43
3.3.2. Tests et méthodes d'évaluation de la compatibilité :	44
3.4. Mécanisme de la modification :	44
3.4.1 Principes de la modification du bitumen :	44
3.4.2. Mécanismes de modification selon le type d'additif :	45
3.4.2.1. Modification par polymères (élastomères et plastomères)...	45
3.5. Fabrication des bitumes polymers :	45
3.5.1. Procédé humide :	45
3.5.1.1.Étapes du procédé humide:	45
3.5.1.2. Avantages du procédé humide :	46
3.5.1.3. Inconvénients du procédé humide:	46
3.5.2. Procédé sec:	46.
3.5.2.1.Étapes du procédé sec :	46
3.5.2.2. Avantages du procédé sec :	47
3.5.2.3.Inconvénients du procédé sec :	47
3.6. Essais spécifiques aux liants modifiés :	47
3.6.1 Observation microscopique :	47
3.6.1.1.Méthodes d'observation :	47
3.6.1.2.Résultats attendus :	48
3.7.2 Stabilité au stockage :	48
3.7.2.1.Importance de la stabilité pendant le stockage :	48
3.7.2.2.Normes et tests :	49
3.7.2.3.Facteurs influençant la stabilité :	49
3.7.2.4.Défis et solutions :	49
3.8 Les bitumes caoutchoucs :	49

3.8.1.Caractéristiques des bitumes caoutchoucs :.....	49
3.8.2.Applications des bitumes caoutchoucs :.....	50
3.8.3.Méthodes de fabrication des bitumes caoutchoucs :.....	51
3.8.4.Avantages des bitumes caoutchoucs :.....	51
3.8.5.Inconvénients des bitumes caoutchoucs :.....	51
3.9 Conclusion :.....	51

Partie II : Etude Expérimental

Chapitre 4 : Matériaux utilisés et Méthodes d'essais

4.1 Introduction :.....	52
4.2. Présentations des Matériaux :.....	52
4.2.1 Les granulats :.....	52
4.2.1.1. Analyse chimique sommaire :.....	52
4.2.1.2. Analyse granulométrique :.....	53
4.2.1.3. Caractéristiques des granulats :.....	54
4.2.2 Le bitume :.....	55
4.2.3. Poudrette de caoutchouc :.....	55
4.3. La modification :.....	56
4.4. Programme expérimental :.....	57
4.4.1 Pénétrabilité (NF EN 1426) :.....	57
4.4.2 Température de ramollissement Bille Anneau (NF EN 1427) :....	58
4.4.3 Essai de stabilité au stockage :.....	59
4.4.4 Essai Marshall pour les enrobés :.....	60
4.5. Conclusion :.....	60

Chapitre 5: Influence du poudrette de caoutchouc sur les bitumes

5.1 Introduction :.....	61
-------------------------	----

5.2 Consistances des bitumes modifiés. :	61
5.2.1 Pénétrabilité à 25 °C :	61
5.2.1.1 Variation du temps de malaxage en fonction de la pénétrabilité .	61
5.2.1.2. Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité :	62
5.2.2. Température de ramollissement Bille Anneau :	63
5.2.2.1 Influence du temps de malaxage sur la TBA :	63
5.2.2.2. Influence de la teneur en NR sur la TBA :	64
5.2.3 Susceptibilité thermique (IP) :	65
5.2.4. Stabilité au stockage :	66
5.3. Conclusion :	67

Chapitre 6 : Influence NR sur les enrobés bitumineux

6.1 Introduction :	68
6.2. Etude de Formulation de l'enrobé :	68
6.2.1.Courbe granulométrique du mélange :	68
6.2.2Teneur en liant :	69
6.2.3.Mode de fabrication des éprouvettes :	70
6.3.Influence de l'ajout de caoutchouc (NR) sur les caractéristiques Marshall.....	71
6.3.1. Stabilité Marshall (SM) :	72
6.4.Conclusion :	72
Conclusion Générale.....	74
Références bibliographiques.....	77

Introduction

Introduction Générale

Face à l'augmentation du trafic et aux situations climatiques graves, il sera indispensable de disposer d'une route plus durable. Cela implique l'utilisation d'un bitume efficace aux variations de température et possédant une grande adhérence aux granulats. Autrement dit, l'emploi du bitume modifié (BmP) est désormais indispensable afin de la réalisation de routes.

Il y a une multitude d'additifs disponibles pour optimiser les caractéristiques des bitumes. Les polymères sont fréquemment utilisés comme additifs pour la transformation des bitumes, notamment les plastomères et les élastomères. Cependant, la majorité de ces derniers sont des matériaux vierges. Il est difficile de se procurer des polymères vierges et leur coût peut être prohibitif lorsqu'ils sont utilisés comme agents modifiants. Nous essaierons des additifs efficaces, simples à ajouter dans le bitume et plus économiques.

Cette mémoire a pour objectif d'améliorer les caractéristiques de l'enrobé et du bitume modifié par l'incorporation de résidus industriels (la poudre de caoutchouc).

Ce travail se structure de la manière suivante :

La première section met l'accent sur la revue de littérature, présentant les concepts fondamentaux liés aux bitumes, ainsi que l'introduction des caractéristiques des bitumes modifiés, les propriétés des granulats et leur rôle dans l'enrobé. S'ensuit une présentation générale sur les enrobés à base de bitume. Et en conclusion, un récapitulatif de diverses recherches menées sur la modification des revêtements bitumineux.

Introduction Générale

La seconde partie se focalise sur l'expérimentation :

Le premier chapitre traite de l'origine des matériaux usages dans ce projet, ainsi que de leurs diverses propriétés mécaniques et physiques.

En second lieu, un chapitre traite de l'impact de la changement sur la durabilité du bitume .

Troisièmement, un segment se dédie à la formulation de l'enrobé bitumineux et à l'examen de l'impact des bitumes modifiés sur les propriétés de l'enrobé à travers la mise en œuvre de tests mécaniques.

Elle conclut par une synthèse globale.

Partie 1 :

Etude bibliographie

CHAPITRE 01 : Généralités sur les bitumes

1.1 Introduction

Les liants hydrocarbonés sont des substances utilisées dans diverses applications industrielles et en particulier dans la fabrication de matériaux de construction tels que les bitumes et les enrobés. Ils sont principalement constitués de composés organiques issus de la distillation du pétrole, ce qui les rend particulièrement efficaces pour la fabrication de mélanges d'enrobés routiers [1]. Les liants hydrocarbonés proviennent généralement de la distillation du pétrole brut ou de ses dérivés. Ils sont principalement composés de bitume ou d'asphalte, qui sont des mélanges complexes d'hydrocarbures lourds (paraffines, naphthènes, aromatiques). La composition des liants peut varier en fonction de leur origine et du procédé de fabrication.

1.2. Propriétés physiques des liants hydrocarbures

- **Viscosité** : Les liants hydrocarbonés ont une viscosité élevée, ce qui leur permet de s'adapter aux besoins spécifiques des applications, comme dans les enrobés routiers où une certaine fluidité est nécessaire pour le travail à chaud.
- **Température d'application** : Les liants hydrocarbonés doivent être chauffés pour être utilisés. La température d'application est généralement comprise entre 140°C et 180°C, selon le type de liant et son usage.
- **Adhérence** : Un bon liant doit avoir une bonne adhérence avec les matériaux qu'il lie, comme les granulats dans les enrobés routiers.

1.3. Types de liants hydrocarbonés

- Le bitume**: Le bitume est un liant hydrocarboné dérivé du pétrole, obtenu par distillation. À température ambiante, il est solide et inerte, mais il devient visqueux et adhésif lorsqu'il est chauffé. Ses propriétés imperméables, malléables et adhésives en font un matériau largement utilisé dans la construction routière, où il sert de liant dans les enrobés bitumineux. Il est également employé pour l'étanchéité des toitures et autres surfaces.
- Le goudron**: Le goudron est un produit dérivé de la distillation de la houille (charbon) ou du bois. De couleur noire et visqueuse, il a été couramment utilisé au début du XX^e siècle pour les revêtements routiers et les produits d'étanchéité. Cependant, en raison de sa toxicité et de son caractère cancérigène, son utilisation a été progressivement abandonnée au profit du bitume depuis les années 1980.
- Les liants naturels**, qui se trouvent dans la nature et qui sont utilisés depuis des temps très anciens. C'est la roche asphaltique telle qu'elle se présente dans le gisement et qui, après broyage est dénommée asphalte.. [2].

1.4 Definition de bitume

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

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

Selon la spécification européenne EN 12591, le bitume est défini comme un matériau pratiquement non volatil, adhésif et hydrophobe, dérivé du pétrole brut ou présent dans l'asphalte naturel, qui est entièrement soluble dans le toluène ou presque (99 % pour un bitume routier), et très visqueux à température ambiante.

Diverses natures de pétroles bruts existent mais ils ne sont pas tous nécessairement propres à produire du bitume, mais pour obtenir une quantité importante il faut choisir un pétrole suffisamment lourd, autrement dit, celui qui présente une quantité importante en produits lourds asphaltiques [3].

1.5. Avantages et inconvénients des bitumes

Avantages :

- Excellente durabilité et résistance aux intempéries.
- Grande adhérence avec les matériaux de construction.
- Flexibilité et capacité d'absorption des déformations sous charge.

Inconvénients :

- Sensibilité aux variations de température (risque de ramollissement à haute température ou de rigidité à basse température).
- Impact environnemental, en particulier en termes de production et de recyclage.

1.6 Fabrication des bitumes

Les bitumes utilisés de nos jours pour le revêtement des routes et certains usages industriels sont fabriqués en raffinerie à partir d'un brut réduit, qui est lui-même issu de la distillation des pétroles bruts [04].

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

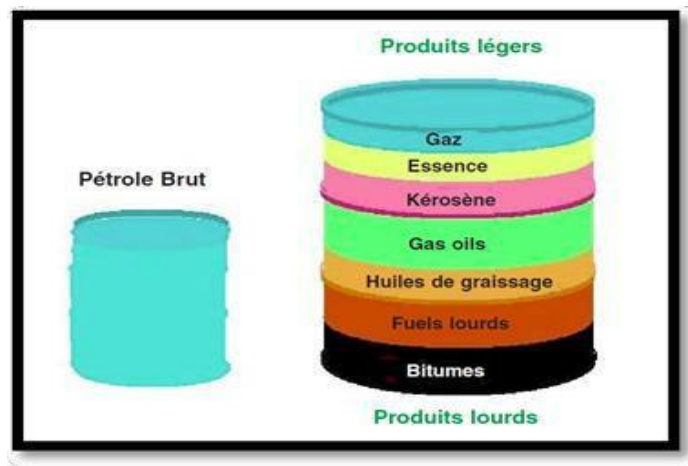


Figure 1.1. Schématisation de la composition d'un pétrole brut

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

Pour fabriquer des bitumes de spécifications données, la première condition consiste à choisir un pétrole brut suffisamment lourd, autrement dit, celui qui présente après distillation atmosphérique une quantité de résidu (brut réduit) la plus importante. Il est à signaler que sur les 1300 pétroles bruts référencés dans le monde, 10% sont aptes à donner des bitumes respectant les spécifications d'usage [04].

Selon les diverses origines de ces pétroles, il a été adopté des méthodes particulières de fabrication pour obtenir des produits bitumineux de qualité [05]

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

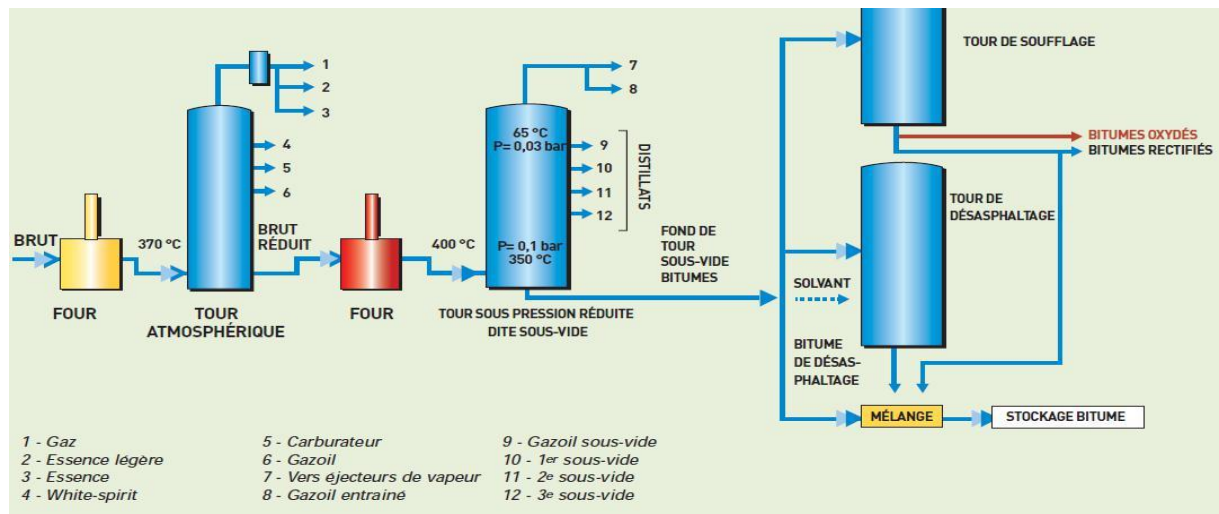


Figure 1.2 : Fabrication des bitumes par raffinage du pétrole.

1.6.1. La distillation

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

1.6.1.1 Distillation à la pression atmosphérique

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

1.6.1.2 Distillation sous vide

Cette opération est nécessaire pour obtenir des produits lourds, donc on commence par la distillation sous pression atmosphérique de brut choisi. Le fond de la colonne est alors envoyé à la distillation sous vide qui consiste à la séparation des différents constituants en jouant sur les paramètres : débit, pression et température.

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

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

1.6.2. L'extraction (Désasphaltage)

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

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

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

1.6.3. Le Soufflage

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

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

Dans la pratique, on distingue :

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

1.6.4. Le Craquage

Le craquage est un traitement des fonds de colonne sous vide à des hautes températures comprises entre 450 et 500°C et à des pressions allant de 2 à 25 bar.

Dans ces conditions, certaines grosses molécules des fractions lourdes se craquent pour former des molécules plus petites, tandis que les plus stables résistent au traitement. Ces bitumes n'ont pas d'application routière. [06]

1.7 Caractéristiques chimiques du bitume

Le bitume est un matériau hydrocarboné obtenu principalement par distillation du pétrole brut. Ses caractéristiques chimiques varient en fonction de son origine et de son mode de production. Voici ses principales propriétés chimiques :

1.7.1. Composition chimique

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

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

Ils ont des masses molaires et des structures chimiques variées. Les molécules de ces composés sont constituées de quatre principaux types d'hydrocarbures: paraffiniques, naphthéniques, aromatiques et oléfiniques. Il faut également préciser que parmi les différentes molécules présentes dans les bitumes, rares sont celles constituées d'un seul des quatre types de motifs cités. Compte tenu de cette diversité, il n'est pas réaliste de vouloir déterminer la composition exacte des bitumes, mais il y a eu des tentatives [04].

1.7.2 Les asphaltènes :

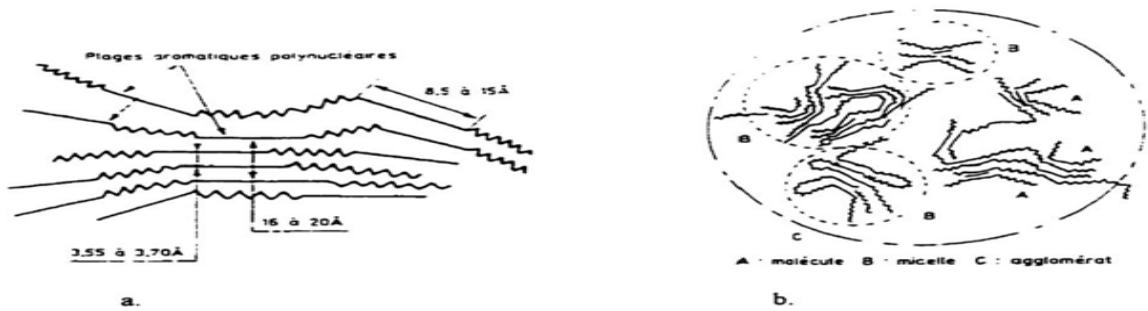
Ce sont des solides amorphes noirs ou bruns, que contiennent du Carbone, de l'hydrogène, de l'azote du soufre et de l'oxygène. Ce sont des matériaux aromatiques complexes très polaires (masse moléculaire entre 1000 et 100000 g/mole dans la majorité des cas). Leur taille varie de 5 à 30 nm. La teneur varie de 5 à 25 % du bitume total. Le rapport (hydrogène/carbone) H/C est de 1,1 [04].

1.7.3 Les maltènes :

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

- a) **Les résines:** Solides ou semi solides bruns noirs, solides comme les asphaltènes. Ils sont composés de carbone, d'hydrogène, de faibles quantités d'oxygène, de soufre et d'azote, de nature très polaires (masse moléculaire entre 500 et 50000 g/mole). Le rapport H/C est de 1,3 à 1,4. Dans les bitumes routiers, la teneur habituelle des résines est de 13 à 25% [07].
- b) **Les aromatiques:** Ce sont des liquides visqueux bruns noirs. Ce sont des composés naphthéniques aromatiques de faible masse moléculaire (300 à 2000 g/mole) constitués de chaînes carbonées non polaires. Ils constituent 40 à 65 % du bitume total, le rapport C/H est de l'ordre de 0.7, la teneur en soufre peut atteindre 2 à 3 %.
- c) **Les saturés:** Ils sont constitués d'hydrocarbures aliphatiques. Ce sont des huiles visqueuses non polaires de couleur blanche ou paille. La masse moléculaire est similaire aux aromatiques. Elle représente 5 à 20 % du bitume [06]. Le rapport atomique C/H est de 0.5 [05]. La proportion des différentes familles dépend de l'origine du brut, du mode de fabrication. D'une façon significative de la méthode de séparation, de grade et l'état de vieillissement du bitume.

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



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

(b). Microstructure d'asphaltènes selon Yen.

Figure 1.3. Structure des asphaltènes selon [08], [09].

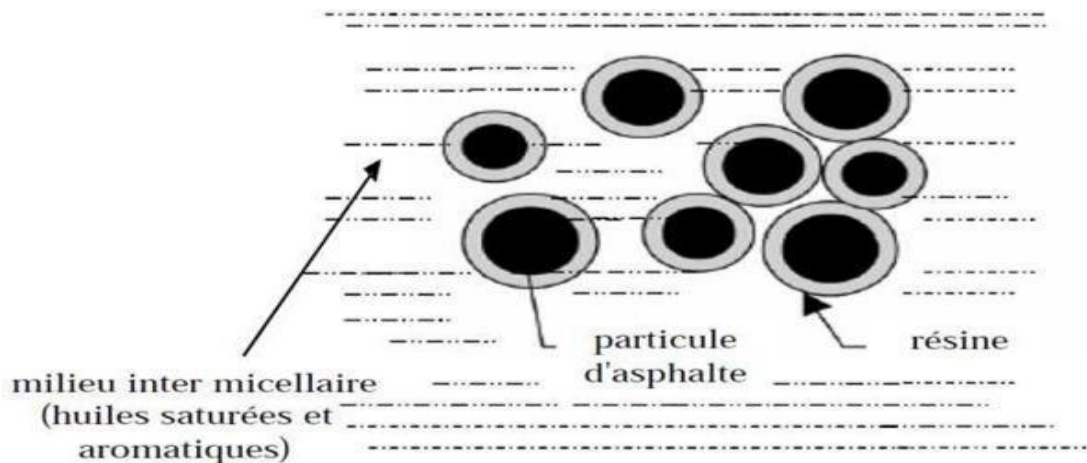


Figure 1.4 Schématisation de la structure colloïdale d'un bitume routier. [09].

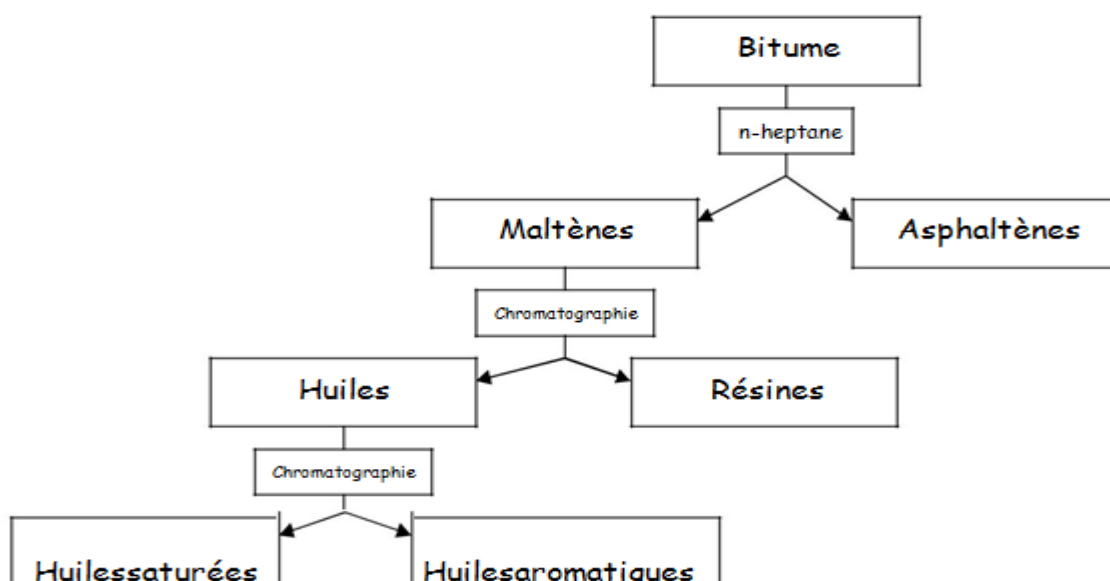


Figure 1.5. Différents composants du bitume [09].

1.8 Les spécifications des bitumes

Les bitumes sont classifiés selon leurs propriétés physiques et chimiques pour répondre aux exigences des applications routières et industrielles. Voici les principales spécifications utilisées pour caractériser un bitume :

1.8.1. Classification des bitumes

Les bitumes peuvent être classés en fonction de plusieurs critères :

- **Selon leur origine :**
 - **Bitumes purs** (issus directement du raffinage du pétrole).
 - **Bitumes modifiés** (améliorés par des polymères ou d'autres additifs).
- **Selon leur grade de pénétrabilité :** Mesure la dureté du bitume à température ambiante.
- **Selon la viscosité :** Classification utilisée aux États-Unis (VG – Viscosity Graded Bitumen).
- **Selon la performance :** Système PG (Performance Grade) utilisé pour prendre en compte les conditions climatiques et le trafic.

L'ensemble des classes de bitumes ainsi que leurs spécifications selon la norme NF EN 12591 (Décembre 1999).

Tableau 1.1. Spécifications du bitume.

Spécifications des bitumes routiers	Unité	Désignation des classes appropriées			
		20/30	35/50	50/70	70/100
Pénétrabilité à 25 °C	X 0.1 mm	20-30	35-50	50-70	70-100
Point de ramollissement	°C	55-63	50-58	46-54	43-51
Résistance au durcissement RTFOT à 163 °C	%	0,5	0,5	0,5	0,5
Pénétrabilité restante après durcissement, minimum	%	55	53	50	46
Point de ramollissement après durcissement, minimum	°C	57	52	48	45
Augmentation du point de ramollissement, maximum	°C	8	8	9	9
Point d'éclair, minimum	°C	240	240	230	230
Solubilité, minimum	% (m/m)	99,0	99,0	99,0	99,0
Teneur en paraffine, maximum	% (m/m)	4,5	4,5	4,5	4,5

1.8.2. Normes et classifications courantes

1.8.2.1 Bitumes routiers (EN 12591)

- **35/50** (bitume dur, adapté aux climats chauds).
- **50/70** (très utilisé en Europe).
- **70/100** (plus souple, utilisé dans les climats tempérés).
- **160/220** (bitume très mou, adapté aux basses températures).

1.8.2.2 Bitumes modifiés (EN 14023)

- **PMB 25/55-65** (fortement modifié, haute élasticité).
- **PMB 45/80-55** (résistant aux variations de température).

1.8.2.3 Bitumes industriels (EN 13304)

- Utilisés pour l'étanchéité, les membranes et l'isolation.

1.8.3. Choix du bitume selon l'application

- **Routes en climat chaud** → Bitume dur (35/50 ou VG-30).
- **Routes en climat froid** → Bitume plus souple (70/100 ou VG-10).
- **Trafic intense** → Bitume modifié (PMB 45/80-55).
- **Étanchéité des bâtiments** → Bitume industriel.

Les spécifications des bitumes permettent de garantir leur adéquation aux conditions d'utilisation, en tenant compte des contraintes climatiques et mécaniques.

1.9 Vieillessement des bitumes

Le vieillissement du bitume correspond à l'évolution de ses propriétés physico-chimiques sous l'effet des conditions environnementales et mécaniques. Ce phénomène peut altérer ses performances et sa durabilité, notamment dans les applications routières. [10]

1.9.1. Facteurs influençant le vieillissement du bitume

Le vieillissement du bitume est principalement causé par :

- **L'oxydation** : Réaction chimique avec l'oxygène, entraînant un durcissement progressif.

- **L'évaporation des fractions légères** : Perte des composants volatils, augmentant la rigidité.
- **Les contraintes mécaniques** : Effets du trafic et des charges répétées.
- **Les variations de température** : Alternance chaud/froid provoquant des fissurations.
- **Les rayons UV** : Accélération du processus d'oxydation et dégradation des liaisons chimiques.

1.9.2. Types de vieillissement

1.9.2.1 Vieillissement à court terme (pendant la mise en œuvre)

- Se produit principalement lors du stockage et de l'application du bitume chaud.
- Lié à l'évaporation des huiles légères et à une oxydation rapide sous l'effet des températures élevées.
- Mesuré en laboratoire par le test RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test - EN 12607-1).

1.9.2.2 Vieillissement à long terme (en service)

- Se produit progressivement sous l'effet de l'oxygène, de la température et du trafic.
- Entraîne une augmentation de la dureté et une perte de ductilité du bitume.
- Simulé en laboratoire par le test PAV (Pressure Aging Vessel - EN 14769).

1.9.3. Conséquences du vieillissement

- **Augmentation de la rigidité** → Réduction de la capacité à absorber les déformations.
- **Réduction de l'adhérence** → Diminution de l'adhésion entre le bitume et les granulats.
- **Formation de fissures** → Fragilisation du revêtement, menant à des fissures thermiques et de fatigue.
- **Perte d'élasticité** → Réduction de la capacité du bitume à reprendre sa forme initiale.

1.9.4. Méthodes de réduction du vieillissement

- **Utilisation d'additifs antioxydants** (polyphénols, phosphites).
- **Ajout de polymères** (SBS, EVA) pour améliorer la flexibilité et la résistance à l'oxydation.
- **Utilisation de bitumes modifiés** avec des huiles régénérantes.
- **Mise en œuvre contrôlée** pour limiter l'exposition excessive à la chaleur.
- **Entretien préventif** des revêtements routiers (scellement des fissures, recharges en bitume).

1.10. Essais classiques sur le bitume

Pour évaluer la qualité et les performances du bitume, plusieurs essais normalisés sont réalisés en laboratoire. Ces tests permettent de caractériser ses propriétés physiques et son comportement face aux conditions d'utilisation.

a. Essai de pénétrabilité (NF EN 1426)

C'est la mesure de la pénétration (exprimée en dixièmes de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100 g, et à 25°C. Dans ces conditions, plus un bitume est dur, plus sa pénétration est faible.

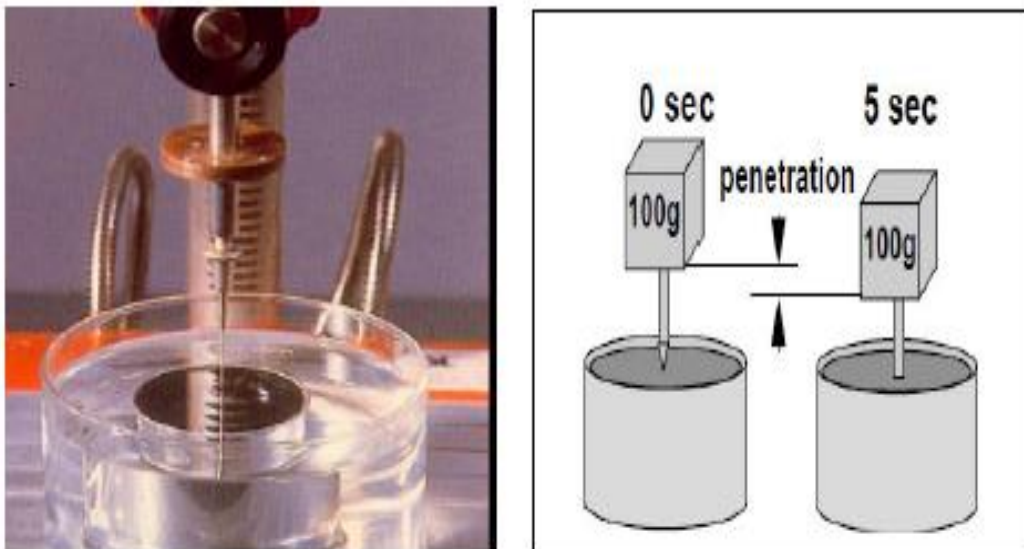


Figure 1.6: Essai de pénétrabilité pour le bitume

b. Essai du Point de Ramollissement (TBA - Anneau et Bille) (NF EN 1427)

Cet essai est de déterminer la température (notée TBA) pour laquelle une bille d'acier normalisée traverse un échantillon de bitume maintenu dans un anneau métallique.

Il caractérise la consistance du matériau : plus la température bille et anneau est faible, plus le bitume est susceptible .

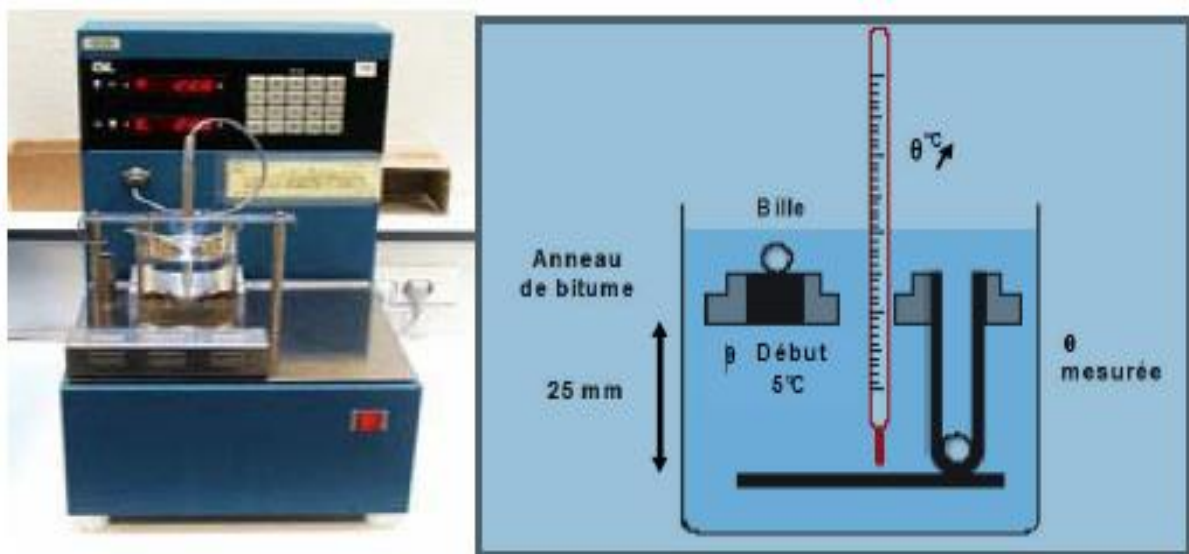


Figure 1.7 Détermination du point de ramollissement

c. Essai de Ductilité (NF EN 13398)

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

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

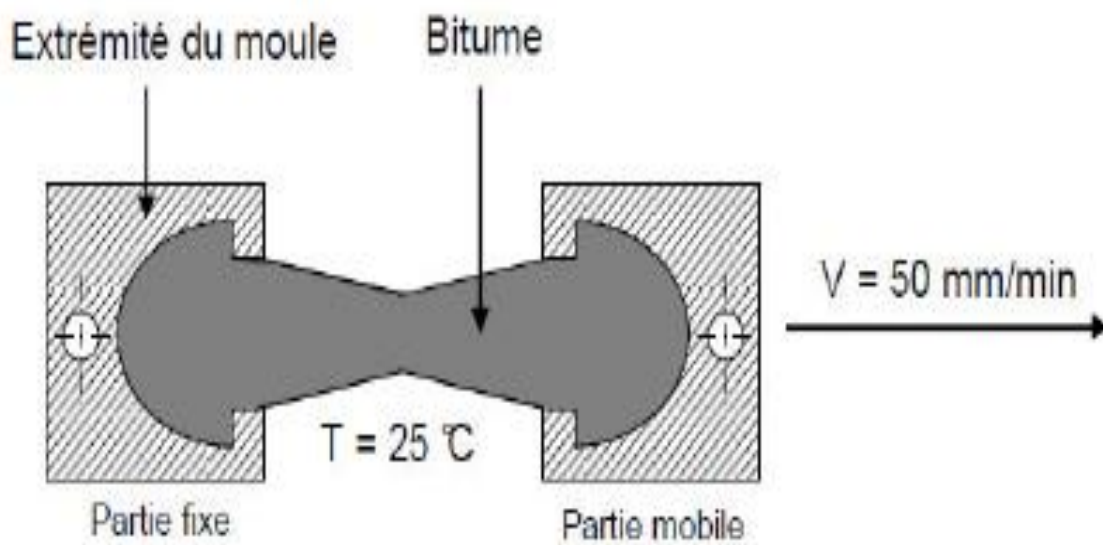


Figure 1.8: Principe de l'essai de Ductilité

d. Essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test - EN 12607-1)

Cet essai est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes à l'enrobage. En effet, lors de la fabrication d'un enrobe, les granulats chauffés aux environs de 165°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui repartit en film mince autour du granulat, ce contact induisant un vieillissement du liant. Pour l'essai RTFOT, dans des conditions d'essai précises, le bitume placé en film mince, est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après RTFOT, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobe, que celles obtenues sur le bitume d'origine.

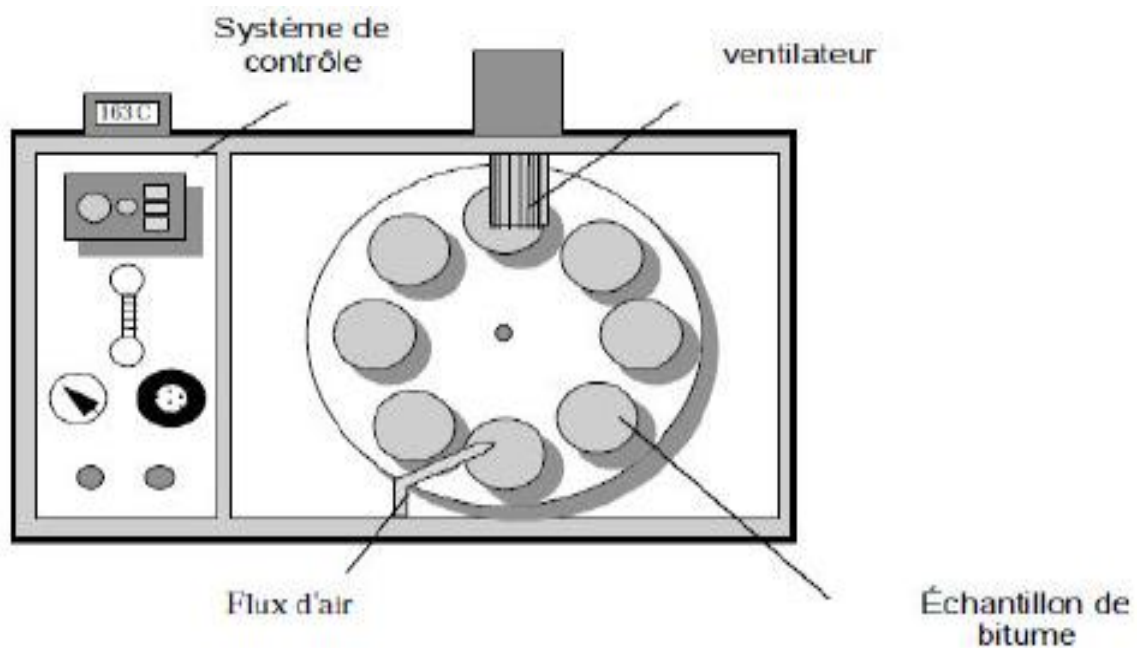


Figure 1.9: L'essai RTFOT

e. Essai PAV (Pressure Aging Vessel - EN 14769)

L'essai permet de caractériser le vieillissement des bitumes in-situ (après 3 à 5 années de service). Le résidu de l'essai RTFOT est chauffé et versé dans des plateaux métalliques (coupelles contenant environ 50g de liant) qui constituent les éprouvettes de l'essai PAV. Ces plateaux sont rangés dans un rack qui sera placé dans un récipient dans une enceinte thermique. A la température de l'essai (100°C).

On mesure alors les propriétés habituelles du liant, pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après PAV, sont alors comparées aux valeurs initiales et aux valeurs obtenues après RTFOT. Une schématisation de cet essai est présentée (figure 1.10)



Figure 1.10: L'essai PAV (Pressure Aging Vessel - EN 14769)

Conclusion :

Le bitume est un matériau essentiel dans de nombreux domaines, notamment dans la construction routière et les travaux d'étanchéité. Issu principalement du raffinage du pétrole, il se distingue par ses propriétés physiques uniques telles que sa viscosité, son imperméabilité, sa plasticité et sa capacité à résister aux agressions chimiques. En fonction de son origine et de ses traitements, le bitume peut être modifié pour répondre à des exigences spécifiques, notamment en termes de performance mécanique et de durabilité. Sa polyvalence, combinée à une grande disponibilité, fait du bitume un matériau incontournable dans les infrastructures modernes. Toutefois, son impact environnemental et les exigences de performance croissantes poussent aujourd'hui à explorer des alternatives plus durables et des procédés de formulation innovants.

Chapitre 2: les enrobes bitumineux

2.1 Introduction :

Les routes constituent un élément essentiel de l'infrastructure de tout pays et se déclinent en diverses catégories, selon leur utilisation prévue et les conditions de l'environnement qui les entoure. L'enrobé, principal matériau utilisé dans la construction routière, est composé d'un mélange de bitume et d'agrégats. La préparation de l'enrobé repose sur une phase de mélange du bitume, issu de la distillation d'huile, avec des agrégats soigneusement sélectionnés et classés en fonction de leurs propriétés physiques. Cette composition varie en fonction du type de voie à construire, des conditions climatiques et du volume de trafic prévu. Les bitumes et les matériaux granulaires font l'objet de tests stricts pour assurer la qualité et la durabilité des routes. Ces contrôles comprennent l'analyse de la densité, de la flexibilité, de la résistance à la corrosion et à la diffraction, entre autres critères, permettant d'évaluer les performances du bitume dans différentes situations telles que la chaleur, la pression et l'humidité. [11]

2.2 Qualité requises pour les énrobes bitumineux

Les enrobés bitumineux doivent répondre à plusieurs exigences techniques pour garantir la durabilité, la sécurité et la performance des chaussées. Voici les principales qualités requises :

2.2.1. Propriétés mécaniques et physiques

- **Résistance à la fatigue** : Capacité à supporter les charges répétées du trafic sans se fissurer.
- **Résistance à l'orniérage** : Capacité à résister aux déformations sous l'effet du passage des véhicules lourds.
- **Bonne adhérence** : Assure l'adhérence des pneus pour éviter le risque d'accidents, en particulier sous la pluie.
- **Module de rigidité élevé** : Permet de mieux répartir les charges et d'assurer une bonne stabilité de la chaussée.

2.2.2. Durabilité et vieillissement

- **Résistance aux intempéries** : Bonne tenue face aux variations de température, à l'eau et au gel/dégel.
- **Résistance à l'oxydation** : Le liant bitumineux doit conserver ses propriétés dans le temps.
- **Bonne tenue aux agents chimiques** : Résistance aux hydrocarbures, sels de déneigement et autres agents chimiques.

2.2.3. Caractéristiques de mise en œuvre

- **Bonne ouvrabilité** : Facilité de mise en œuvre et de compactage pour obtenir une structure homogène.
- **Température d'application adéquate** : Le bitume doit être suffisamment fluide pour assurer un bon enrobage des granulats.
- **Bonne compacité** : Évite la formation de vides et améliore la durabilité.

2.2.4. Respect des normes environnementales

- **Faible émission de composés volatils** : Réduction des gaz polluants et des fumées toxiques lors de la pose.
- **Utilisation de matériaux recyclés** : De plus en plus d'enrobés incluent des granulats recyclés pour limiter l'impact environnemental.
- **Réduction du bruit** : Certains enrobés sont conçus pour diminuer les nuisances sonores liées au trafic.

2.2.5. Adaptabilité aux usages spécifiques

- **Enrobés drainants** : Permettent l'évacuation rapide de l'eau pour éviter l'aquaplaning.
- **Enrobés à faible bruit** : Conçus pour réduire le bruit de roulement des véhicules.
- **Enrobés à haute performance** : Renforcés pour les zones à forte sollicitation (autoroutes, aéroports, ports).

2.3 Les dégradations de chaussées

2.3.1 Les fissures :

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

a) Les fissures transversales :

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



Figure 2.1. Fissures transversales

b) Fissures longitudinales :

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



Figure 2.2 : Fissures longitudinales

c) Fissures de rives :

Les fissures de rives sont des fissures longitudinales (parallèles à l'axe de la chaussée) qui apparaissent le long des bords de la chaussée, généralement à proximité immédiate de l'accotement. Elles sont l'un des désordres les plus fréquents observés sur les chaussées bitumineuses.



Figure 2.3 : Fissures de rives

d) Fissures de gel :

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

- Rectiligne et localisée au centre de la chaussée,
- D'apparence lézardée sans localisation précise sur la chaussée. [12]



Figure 2.4: Fissures de gel

2.3.2. Le faïençage :

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



Figure 2.5: Faïençage

2.3.3. Dégradation par orniérage :

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

L'orniérage constitué la cause principale de dégradation déchaussées souples. La sensibilité des chaussées souples à l'orniérage dépend des caractéristiques des chaussées, de la teneur en liant, du type et de la granulométrie, la figure 3.9 illustrent exemple d'une chaussée atteinte d'orniérage. [12]

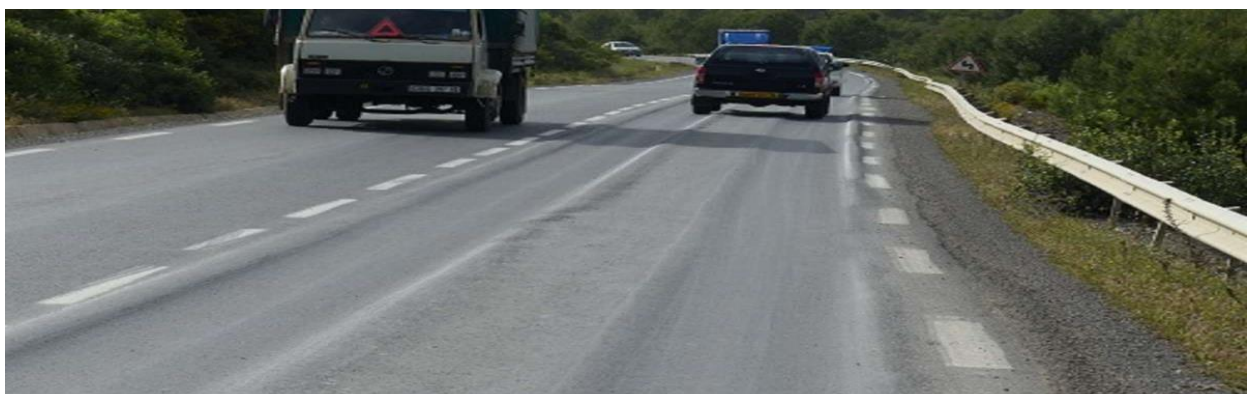


Figure 2.6: Phénomène d'orniérage

En autre terme, l'orniérage est le premier mode de déformation des chaussées souples, du fait le recours aux techniques de modification de consistance de couche de roulement est d'une issue déterminante. Pour cela, on essaye d'étudier en détail ce type de déformation afin d'adopter un tel remède approprié [12].

2.4 Différents types des chaussées (souple , rigide et semi rigide)

2.4.1. Chaussée souple

2.4.1.1. Définition

Les chaussées souples sont constituées de plusieurs couches de matériaux granulaires et d'un revêtement bitumineux en surface. Elles sont dites "souples" car elles se déforment légèrement sous les charges sans se fissurer brutalement.

2.4.1.2. Composition

- **Couche de roulement** : Enrobé bitumineux (asphalte).
- **Couche de base** : Matériaux granulaires traités ou non au liant hydraulique.
- **Couche de fondation** : Granulats compactés ou grave non traitée.
- **Sol support** : Sol naturel ou compacté selon sa portance.

2.4.1.3. Avantages

- Coût de construction généralement inférieur à celui des chaussées rigides.
- Facilité de réparation et d'entretien (reprofilage, renouvellement du revêtement).

Confort de roulement grâce à sa souplesse et sa capacité d'absorption des vibrations.

2.4.1.4. Inconvénients

- Moins résistante aux charges lourdes et au trafic intense.
Sensible aux conditions climatiques (forte chaleur, gel-dégel).
- Entretien plus fréquent pour éviter l'apparition d'orniérage et de fissures.

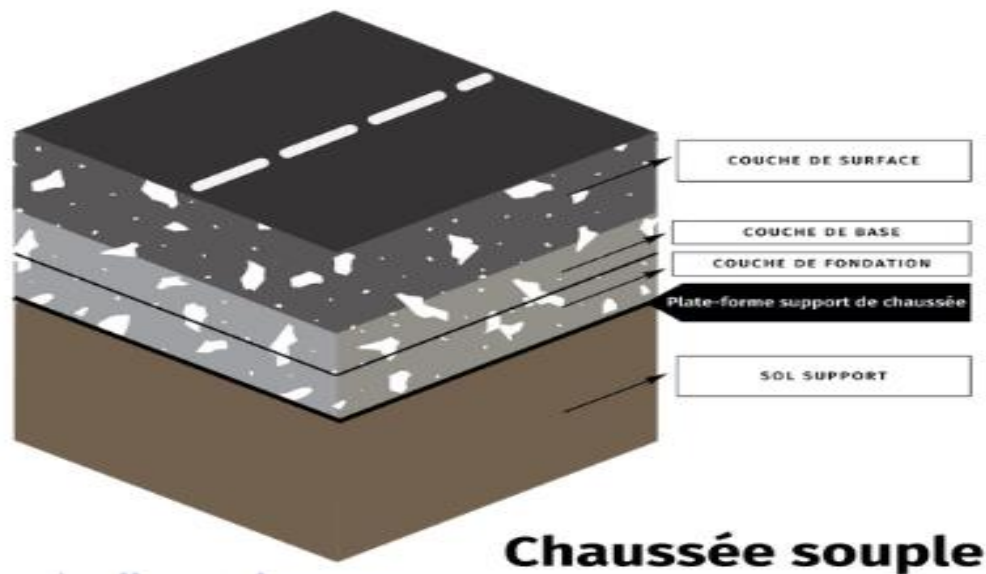


Figure 2.7: Chaussée souple

2.4.2. Chaussée rigide

2.4.2.1. Définition

Les chaussées rigides sont principalement constituées d'une dalle en béton de ciment posée directement sur le sol ou sur une couche de fondation. Elles sont appelées "rigides" car elles supportent les charges du trafic en répartissant les efforts sur une large surface.

2.4.2.2. Composition

- **Dalle en béton de ciment** (non armé, armé continu ou à joints).
- **Couche de fondation** : Matériaux traités ou non, assurant l'homogénéité du support.
- **Sol support** : Sol naturel amélioré ou compacté.

2.4.2.3. Avantages

- Très grande durabilité (peut dépasser 30 ans avec un bon entretien).
- Bonne résistance aux charges lourdes et aux conditions climatiques.
- . Moins d'entretien que les chaussées souples

2.4.2.4. Inconvénients

- Coût de construction initial élevé.
- Nécessite des joints de dilatation pour gérer les contraintes thermiques
- Réparation complexe et coûteuse en cas de dégradation.

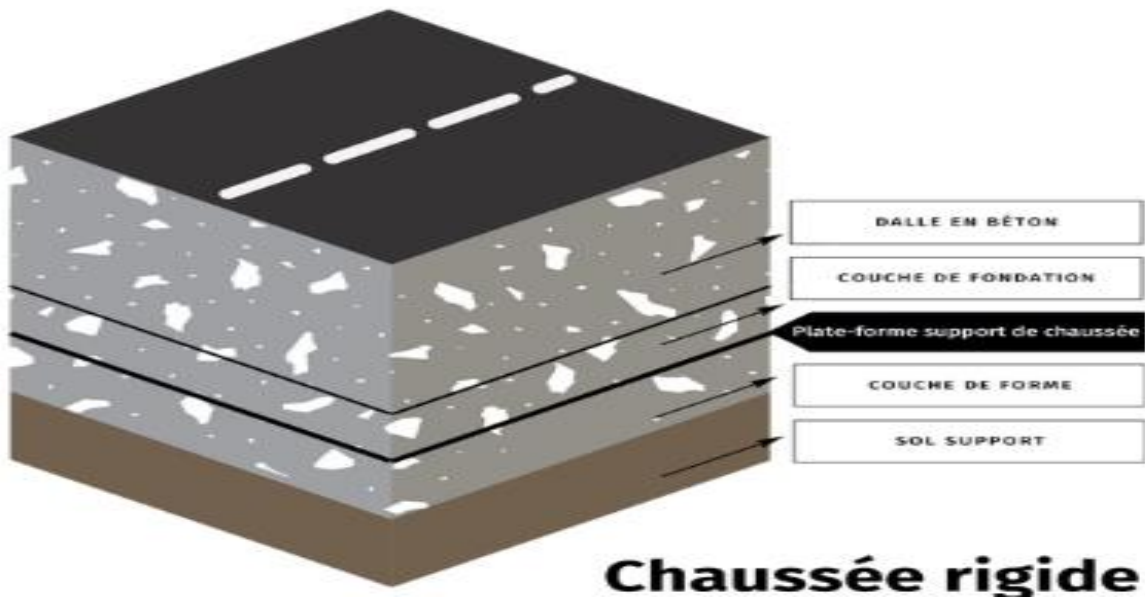


Figure 2.8: Chaussée rigide

2.4.3. Chaussée semi-rigide

2.4.3.1. Définition

Les chaussées semi-rigides combinent les caractéristiques des chaussées souples et rigides. Elles sont constituées d'une base en grave-bitume ou grave traitée aux liants hydrauliques, recouverte d'une couche d'enrobé bitumineux.

2.4.3.2. Composition

- **Couche de roulement** : Enrobé bitumineux.
- **Couche de base** : Grave traitée au ciment ou grave-bitume.
- **Couche de fondation** : Granulats compactés ou grave non traitée.
- **Sol support** : Sol naturel ou compacté.

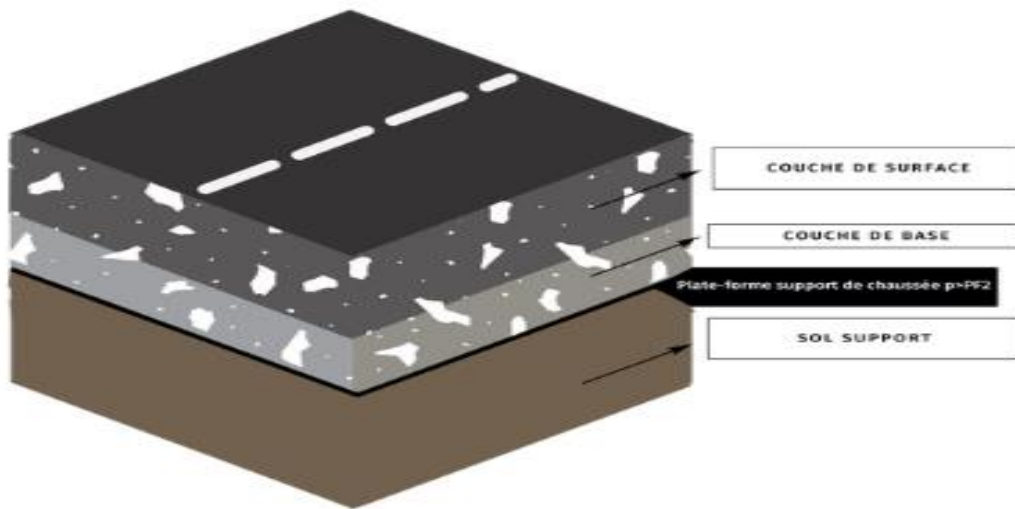
2.4.3.3. Avantages

- Meilleure résistance aux charges lourdes par rapport aux chaussées souples.
- Moins rigide qu'une chaussée en béton, réduisant le risque de fissuration brutale.
- Bon compromis entre coût et durabilité.

2.4.3.4. Inconvénients

- Sensible aux fissurations dues à la rigidité partielle de la base.
- Risque de remontée de fissures depuis la couche de base vers la surface.

- Nécessite un bon dimensionnement pour éviter la dégradation prémature.



Chaussée semi-rigide

Figure 2.9: Chaussée semi-rigide

2.5 Les structures de chaussées

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

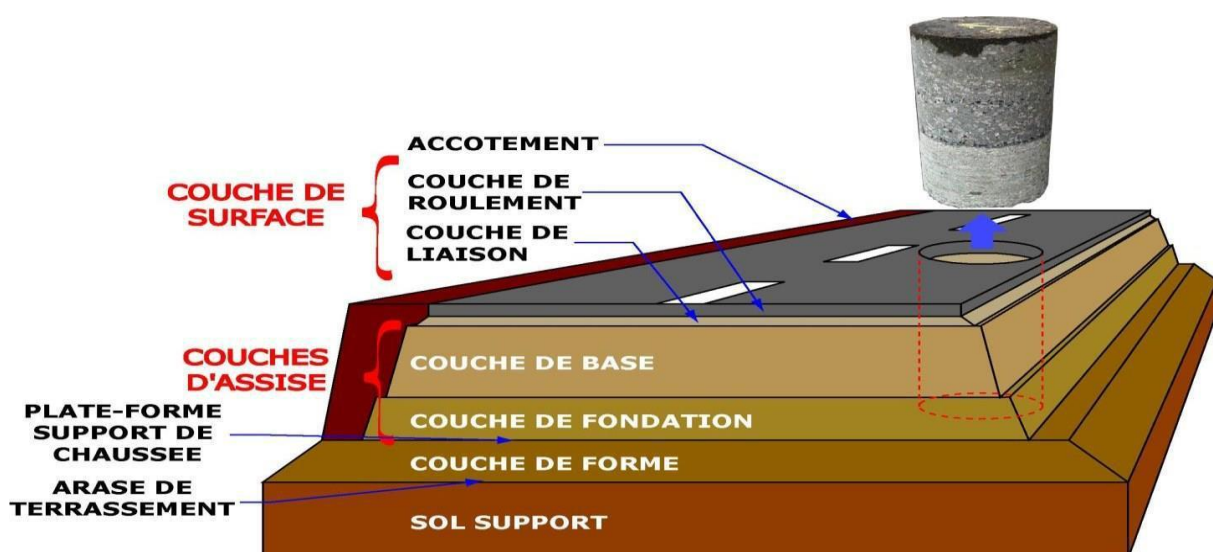


Figure 2.10. Constitution d'une structure de chaussée souple [12].

2.5.1. Couche de surface

On appelle « couche de surface » d'une chaussée la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat.

La couche de surface peut être composée :

- de la couche de liaison aux couches d'assise
- de la couche de roulement

2.5.2. Couche d'assise

Dans la structure d'une chaussée, la couche d'assise d'une chaussée désigne l'association de la couche de fondation et de la couche de base.

2.5.3. Couche de forme

La couche de forme est de structure plus ou moins complexe suivant la qualité du sol. La couche de forme est une couche intermédiaire située entre la partie supérieure du terrassement (PST) et les couches constitutives du corps de chaussée. [13].

La couche de forme permet d'adapter les caractéristiques du terrain naturel, sur lequel elle est mise en œuvre, aux différentes contraintes de la future chaussée :

- portance nécessaire
- évacuation des eaux de ruissellement
- profil de la chaussée

2.5.3.1. Fonctions principales de la couche de forme :

- **Amélioration de la portance** : Elle renforce la capacité portante du sol en répartissant les charges de trafic, assurant ainsi la stabilité de la chaussée.
- **Drainage** : Elle facilite l'évacuation des eaux de ruissellement, prévenant ainsi l'accumulation d'eau qui pourrait endommager les couches supérieures.
- **Protection contre le gel** : En étant composée de matériaux insensibles au gel, elle protège la chaussée des effets néfastes du gel et du dégel.

2.6 Composition de l'enrobe Granulats

L'enrobé est un matériau qui est chauffé lors de sa confection pour permettre le parfait enrobage des gravillons et du sable par le bitume qui sans cette opération reste à son état de viscosité naturelle. Cette particularité de confection donne à l'enrobé une facilité de mise en œuvre et permet la réalisation de profil de voirie varié. Le puzzle d'agrégat recherché par chaque formulation permet un compactage et un dimensionnement propre à ses utilisations. [11]

2.6.1 Propriétés des Granulats

On appelle granulats un ensemble de grains minéraux, de dimension comprise entre 0 et 125mm, de provenance naturelle ou artificielle destinés à la confection : [14]

- Des mortiers des bétons.
- Des couches de fondation, des couches de base de roulement de chaussée.
- Des assises de ballastes de voies ferrées.

Les granulats utilisés dans les travaux de génie civil doivent répondre à des impératifs de qualité et de caractéristiques propres à chaque usage.

Leur nature et leur forme varient en fonction des gisements et des techniques de production.



Figure 2.11. Les granulats

2.6.1.1. FAMILLES DE GRANULATS [14]

On peut classer les granulats en deux grandes familles :

- Granulats naturels ;
- Granulats artificiels légers.

La figure suivante représente ces deux familles avec plus de détails :

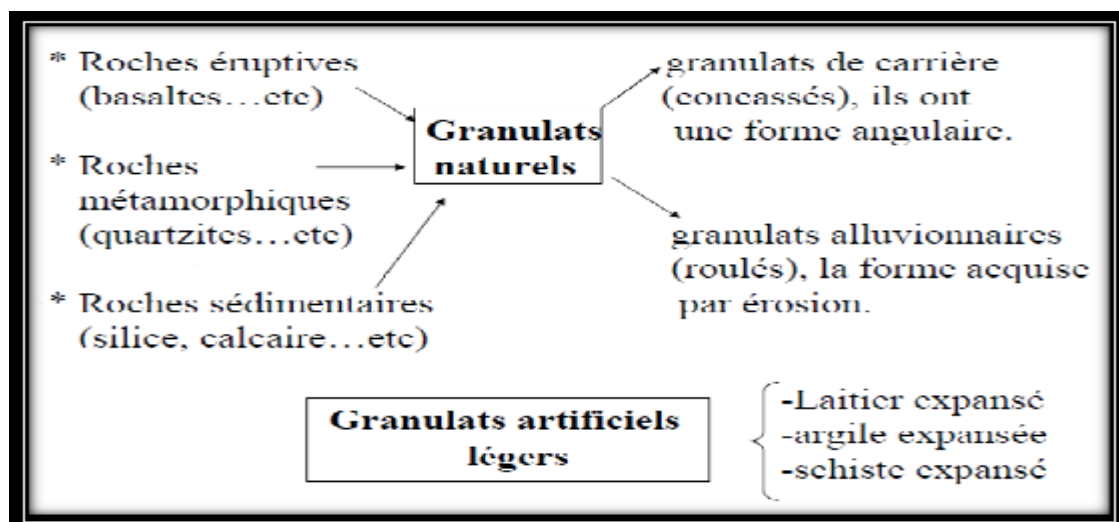


Figure 2.12. Les deux familles de granulats

2.6.1.2. LES ESSAIS SUR LES GRANULATS

a. Analyse granulométrique (EN FN 933-1 - mai 2012)

- **But de l'essai** : L'analyse granulométrique consiste à classer en classes granulaires un échantillon d'essai ou une masse de concassé ou roulé.

L'essai à pour but de déterminer en poids la distribution des grains du matériau, on sépare par tamisage les plus gros éléments jusqu'à 0,08mm puis par sédimentation les éléments inférieurs à 0,08mm.

- **Principe d'essai** : L'analyse granulométrique consiste à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas.

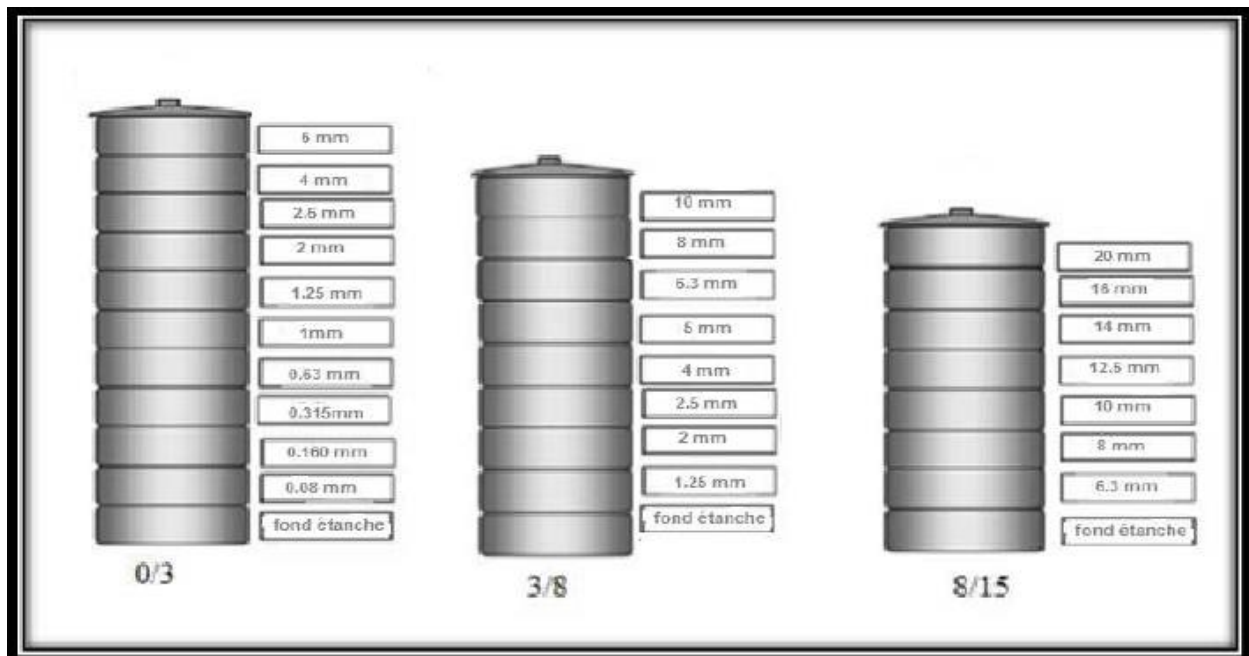


Figure 2.13. Les tamis utilisés selon les classes granulaires

On trace la courbe granulométrique après le calcul du pourcentage des tamisates partiels par la formule suivante :

$$Tamisa(i)\% = 100 - refus(i)\%$$

- En abscisse : les dimensions des mailles en échelle logarithmique ;
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique ;
- La courbe doit être tracée de manière continue.

b. Propreté superficielle (NF P 18-591 septembre 1990)

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral des particules inférieures à 0,5mm mélangées ou adhérentes à la surface des granulats supérieurs à 2mm. Ces particules sont séparées par lavage sur le tamis correspondant.

c. Essai d'aplatissement (EN FN 933-3 mars 1997)

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement

des granulats. Ce coefficient permet de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.

d.Essai Los Angeles (NF P 18-573 Décembre 1990)

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat. Ce mode opératoire s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des chaussées .

e.Essai micro-deval en présence d'eau (MDE) (NF P 18-572 Décembre 1990)

L'essai micro-Deval en présence d'eau a pour but la détermination de la résistance à l'usure par le frottement réciproque des éléments d'un granulat.

f.Essai d'équivalent de sable à 10 % des fines (NF P 18-572 Décembre 1990)

L'essai consiste à verser un échantillon de sable et une petite quantité de solution floculante dans une éprouvette graduée et d'agiter de façon à détacher les revêtements argileux des particules de sable de l'échantillon. On complète alors le sable en utilisant le reste de solution floculante afin de faire remonter les particules fines en suspension au-dessus du sable. Après 20 minute, les hauteurs des produits sont mesurées. L'équivalent de sable est le rapport hauteur du sable sur hauteur totale, exprimé en pourcentage.

g.Analyse chimique sommaire (NF P15-461version 1964)

L'analyse chimique des granulats a pour objectif de déterminer les proportions des composants suivants :

- Les insolubles
- Les carbonates (CaCO_3)
- Les chlorures (NaCl)
- Les sulfates (CaSO_4)

Ces tests permettent d'évaluer l'efficacité et la compatibilité des granulats entre eux, ainsi qu'avec le liant utilisé.

2.6.2 Les essais sur les enrobés bitumineux

A. Essai Marshall :

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

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

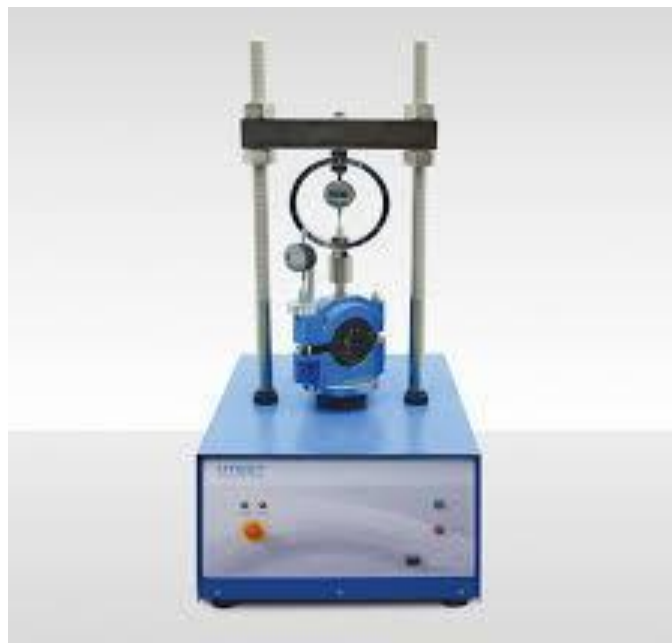


Figure 2.14: Essai Marshall

B. Essai Duriez :

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



Figure 2.15: Essai Duriez

C. Essai de fluage :

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



Figure 2.16 : Essai de fluage

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

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

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



Figure 2.17 : Essai d'orniérage (NF P 98-253- 1)

E. Essai CANTABRO :

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

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



Figure 2.18: CANTABRO

F. Essai de traction directe :

L'essai consiste en un essai de traction réalisé à température et vitesse de déformation constantes. Pendant l'expérience, les paramètres enregistrés sont la contrainte et la déformation. La contrainte maximale, également connue sous le nom de contrainte de rupture, ainsi que la déformation associée, permettent d'accéder directement à la résistance en traction du matériau étudié dans les conditions spécifiques (température, vitesse) .



Figure 2.19: traction directe

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

L'Essai de retrait thermique empêché est une méthode standardisée par l'AASHTO TP10-93 pour évaluer la tendance d'un matériau, en particulier le bitum, à se rétracter lorsqu'il est soumis à des variations de température. L'objectif est de mesurer l'effet de la température sur les changements de volume et de déterminer comment ces changements affectent la performance du matériau dans des conditions climatiques variables.



Figure 2.20: retrait thermique empêché (AASHTO, TP10-93)

H. Essai de Rupture par Compression Diamétrale :

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



Figure 2.21 : Rupture par Compression Diamétrale.

I. Essai de détermination d'aliénabilité :

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



Figure 2.22 : détermination d'aliénabilité

J. Essai de résistance au dé enrobage :

Il permet de contrôler l'influence de l'eau ou d'une solution d'eau salée sur un échantillon d'enrobé à froid. Déterminer visuellement si un échantillon d'enrobé à froid est sensible au Dés enrobage sous l'action de l'eau bouillante d'une part et d'une solution d'eau salée d'autre part.



Figure 2.23 : Essai de résistance au dé enrobage.

K. Essai de stabilité :

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



Figure 2.24 : Essai de stabilité

L. Essai de compression simple ou répété :

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

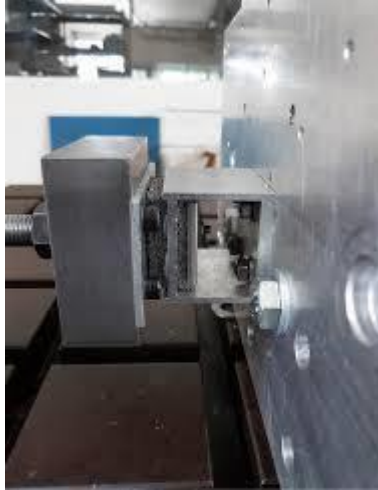


Figure 2.25: compression simple ou répété

2.7. Conclusion

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

Chapitre 3 :

La modification des bitumes

3.1 Introduction :

Les techniques de modification dans le domaine du bitume polymère et de la récupération des déchets sont essentielles à la réalisation de plusieurs objectifs, y compris l'amélioration de la qualité des routes et la contribution à la préservation de l'environnement et à une économie durable. La modification vise à améliorer les caractéristiques du bitume et à l'utiliser de manière plus efficace et durable, en ajoutant certains matériaux qui améliorent les performances, réduisent les coûts ou améliorent la durabilité environnementale. Le mécanisme de modification comprend l'utilisation de polymères, qui modifient et améliorent les caractéristiques du bitume telles que son élasticité et sa résistance à la corrosion et à la fissuration. En outre, le bitume polymère est utilisé dans la récupération des déchets bitumineux, où le bitume utilisé est recyclé à partir de méthodes de remplacement, ce qui réduit les coûts, réduit les déchets et conserve les ressources naturelles. Les domaines d'application du bitume polymère et de la récupération des déchets incluent la construction de nouvelles routes et l'entretien des routes existantes, le développement de matériaux de construction durables et respectueux de l'environnement et l'amélioration globale de la durabilité de l'infrastructure. La réalisation de ces objectifs contribue à améliorer la qualité de vie et à préserver les ressources naturelles pour les générations actuelles et futures. [15]

3.2 Les objectifs de la modification :

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

Ces objectifs dépendent aussi des domaines d'application et des techniques projetés: enduits superficiels, tapis minces, enrobés drainants, couches de roulement pour routes à trafic intense, couche d'assise pour routes à trafic intense, membranes anti-fissures, chapes d'étanchéité d'ouvrages d'art [16]

- **Enduits superficiels ; enrobés ultra-minces (1-2 cm), très minces (2-3 cm)**
 - Amélioration des performances en résistance face aux efforts de traction et de cisaillement;
 - Assurer la durabilité;
 - Eviter le ressuage;
 - Améliorer l'adhésivité/tenue à l'eau

- **Enrobés ouverts**
 - Améliorer les caractéristiques anti-dérapantes;
 - Augmenter la viscosité aux températures d'application.

- **Enrobés épais (> 5cm), enrobés minces (3 à 4cm)**
 - Assurer la résistance à l'orniérage;
 - Améliorer le comportement à basse température;
 - Améliorer le comportement à la fatigue.

- **Couche d'assise de chaussée**
 - Augmenter la résistance à la fatigue sous les chargements répétés du trafic;
Apport d'une certaine flexibilité.

- **Renforcement des chaussées**
 - Minimiser l'épaisseur du rechargement.

- **Membranes anti-fissures, imperméable**
 - Augmenter la capacité d'allongement.

3.3. Notions de compatibilité

La compatibilité du bitume est un concept clé en génie civil et en science des matériaux, notamment dans le domaine des enrobés et des revêtements routiers. Elle fait référence à la capacité d'un bitume à interagir de manière homogène et stable avec d'autres composants, comme les polymères, les additifs et les granulats, pour garantir de bonnes performances mécaniques et de durabilité. [17]

3.3.1. Principaux aspects de la compatibilité du bitume :

3.3.1.1. Compatibilité avec les polymères (bitumes modifiés) :

- Les polymères (ex. : SBS, EVA) sont souvent ajoutés pour améliorer l'élasticité et la résistance du bitume.
- Une bonne compatibilité signifie que le polymère se disperse de manière stable sans séparation de phase.

3.3.1.2. Compatibilité avec les granulats :

- Dépend des propriétés chimiques du bitume et de la nature des granulats (calcaires, siliceux).
- Influence l'adhésion entre le bitume et les granulats, impactant la résistance au décollement et à l'humidité.

3.3.1.3. Compatibilité avec les additifs et les agents de vieillissement :

- Certains additifs (antioxydants, agents d'adhésion) améliorent la durabilité du bitume.
- Un bitume incompatible avec ces additifs peut entraîner une dégradation prématurée.

3.3.1.4. Compatibilité des bitumes entre eux :

- Dans certains cas, on mélange des bitumes de différentes sources ou grades.
- Une mauvaise compatibilité peut provoquer une séparation des phases et une perte des performances.

3.3.2. Tests et méthodes d'évaluation de la compatibilité :

Les essais pour évaluer la compatibilité sont:

- **Essai de séparation de phases** : pour vérifier la stabilité d'un bitume modifié.
- **Indice de compatibilité (IC)** : évalue la miscibilité entre un bitume et un polymère.
- **Essai d'adhésion bitume-granulats** : mesure la résistance au décollement sous l'effet de l'eau.

3.4. Mécanisme de la modification

La modification des bitumes vise à améliorer leurs performances en optimisant leurs propriétés rhéologiques, mécaniques et de durabilité. Ce processus repose sur l'ajout de polymères, d'additifs ou d'autres agents modificateurs afin d'obtenir un liant plus résistant aux contraintes climatiques et mécaniques. [17]

3.4.1 Principes de la modification du bitumen

Le bitume est un matériau thermo-sensible et viscoélastique, ce qui signifie que ses propriétés varient en fonction de la température et du temps de sollicitation. La modification a pour but de :

- Améliorer la résistance au vieillissement (oxydation, durcissement).
- Accroître la cohésion et l'adhérence avec les granulats.
- Renforcer la résistance aux déformations permanentes (orniérage).
- Maintenir une bonne flexibilité à basse température (éviter la fissuration).

3.4.2. Mécanismes de modification selon le type d'additif

3.4.2.1. Modification par polymères (élastomères et plastomères)

Les polymères sont les modificateurs les plus courants (ex. : SBS – Styrène Butadiène Styrène).

Leurs effets :

- Formation d'un réseau tridimensionnel dans la matrice du bitume.
- Amélioration de la résistance aux hautes températures (moins d'orniérage).
- Augmentation de l'élasticité et réduction de la fragilité à basse température.
- Modification des propriétés viscoélastiques, permettant une meilleure réponse aux charges.

Le polymère gonfle en absorbant les fractions légères du bitume, ce qui crée une phase continue renforçant la cohésion et la stabilité du mélange.

3.5. Fabrication des bitumes polymères

La modification des bitumes avec des polymères peut être réalisée selon deux principales méthodes :

1 Le procédé humide (*Wet Process*)

2 Le procédé sec (*Dry Process*)

Ces deux techniques diffèrent en termes de mélange, d'intégration du polymère et d'application.

3.5.1. Procédé humide

Le procédé humide consiste à incorporer le polymère directement dans le bitume chaud avant son utilisation dans la formulation du mélange bitumineux.

3.5.1.1. Étapes du procédé humide

*Préparation du bitume : Chauffage à une température comprise entre 160 et 190°C.

* Ajout du polymère : Incorporation progressive sous agitation mécanique.

* Mélange et homogénéisation :

- Utilisation d'un mélangeur à haut cisaillement pour bien disperser le polymère.
- Maintien du mélange à 180-200°C pendant 1 à 4 heures pour permettre l'absorption du polymère par le bitume.

- * Stabilisation : Ajout éventuel d'additifs pour éviter la séparation de phase.
- * Stockage et contrôle qualité : Vérification de la viscosité, de l'adhérence et de la stabilité thermique. [18]

3.5.1.2. Avantages du procédé humide

- Meilleure dispersion et interaction entre le polymère et le bitume.
- Amélioration significative des propriétés rhéologiques du bitume.
- Augmentation de la résistance aux orniérages et fissurations.

3.5.1.3. Inconvénients du procédé humide

- Nécessite des équipements spécialisés pour le mélange.
- Coût plus élevé en raison du temps de malaxage prolongé et des besoins en stabilisation.

3.5.2. Procédé sec

Le procédé sec consiste à ajouter le polymère directement dans le mélange d'agrégats avant l'ajout du bitume chaud.

3.5.2.1. Étapes du procédé sec

- * Préparation des agrégats : Chauffage des granulats à 150-180°C.
- * Ajout du polymère : Mélange du polymère (sous forme de granulés ou de poudre) avec les agrégats secs.
- * Enrobage avec le bitume chaud : Le bitume est ajouté après que le polymère ait été dispersé avec les granulats.
- * Compactage et mise en œuvre : La réaction entre le polymère et le bitume se produit pendant le compactage du mélange sur la route. [19]

3.5.2.2. Avantages du procédé sec

- Plus simple et économique, ne nécessitant pas de modification des centrales d'enrobage.
- Permet d'incorporer certains déchets plastiques recyclés (ex. : poudre de pneus usagés).
- Facilité d'application et possibilité d'adaptation sur site.

3.5.2.3. Inconvénients du procédé sec

- Moins de contrôle sur la dispersion du polymère dans le bitume.
- Amélioration des propriétés du bitume moins efficace que le procédé humide.
- Sensibilité accrue au vieillissement et aux conditions climatiques.

3.6. Essais spécifiques aux liants modifiés

3.6.1 Observation microscopique

L'observation microscopique des liants bitumineux modifiés est essentielle pour évaluer la dispersion et l'interaction entre le bitume et le polymère, ce qui influence directement les propriétés mécaniques et la durabilité du matériau. [19]

3.6.1.1. Méthodes d'observation :

a. Microscopie optique de fluorescence par réflexion :

- **Principe** : Cette technique exploite la propriété de fluorescence de certains polymères, comme le SBS (polystyrène-butadiène-styrène), qui émettent une fluorescence verte lorsqu'ils sont seuls et jaune lorsqu'ils sont intimement mélangés à certains constituants du bitume.
- **Application** : En excitant l'échantillon avec une lumière bleue intense, on peut observer la distribution et la dispersion du polymère au sein du bitume.
- **Avantages** : Cette méthode permet une observation directe sans
- préparation complexe de l'échantillon et offre une visualisation claire des phases polymère et bitume.

b. Microscopie infrarouge (FTIR) couplée à un microscope :

- **Principe :** Cette technique permet d'identifier les différentes phases présentes dans le liant en fonction de leurs signatures spectrales spécifiques.
- **Application :** En focalisant le faisceau infrarouge sur une zone de l'échantillon, on peut obtenir des informations sur la composition chimique locale et la distribution des phases.
- **Avantages :** Elle offre une analyse chimique détaillée à l'échelle microscopique, permettant de différencier les phases bitume et polymère.
- **Référence :** "Nouvelle approche de caractérisation chimique des liants modifiés"

3.6.1.2. Résultats attendus :

- **Dispersion du polymère :** Une dispersion homogène du polymère dans le bitume est souhaitable pour garantir une amélioration uniforme des propriétés mécaniques.
- **Interaction bitume-polymère :** Des interactions fortes entre le bitume et le polymère sont favorables à la cohésion du matériau, ce qui améliore sa résistance aux déformations et sa durabilité.

En somme, l'observation microscopique est une étape cruciale pour comprendre la microstructure des liants bitumineux modifiés et optimiser leurs performances pour des applications routières exigeantes.

3.7.2- Stabilité au stockage

La stabilité des liants bitumineux modifiés pendant le stockage est un facteur crucial pour garantir la qualité et la performance de ces matériaux dans les applications d'ingénierie.

3.7.2.1. Importance de la stabilité pendant le stockage :

- **Prévention de la séparation de phases :** Une bonne stabilité empêche la séparation entre les composants du bitume et du polymère, maintenant ainsi une distribution homogène du polymère dans le bitume.
- **Maintien des propriétés mécaniques :** La stabilité assure la conservation des propriétés mécaniques des liants, telles que l'élasticité et la rigidité, contribuant ainsi à améliorer la résistance aux fissures et aux déformations.

3.7.2.2. Normes et tests :

Des normes internationales, telles que la NF EN 13399, définissent les méthodes de mesure de la stabilité des liants bitumineux modifiés pendant le stockage à des températures élevées.

3.7.2.3. Facteurs influençant la stabilité :

- **Composition du polymère :** Les caractéristiques du polymère utilisé, comme le degré d'interaction chimique avec le bitume, affectent la stabilité du liant.
- **Température :** Des températures élevées augmentent la probabilité de séparation de phases, ce qui impacte négativement la stabilité du liant.
- **Durée :** Un stockage prolongé augmente la probabilité de séparation de phases, affectant ainsi la stabilité du liant.

3.7.2.4. Défis et solutions :

- **Défis :** L'utilisation de certains polymères peut entraîner une instabilité du liant pendant le stockage, nécessitant une surveillance attentive des conditions environnementales.
- **Solutions :** La stabilité peut être améliorée en ajustant la composition du polymère, en contrôlant la température pendant le stockage et en utilisant des additifs qui améliorent la dispersion et l'interaction entre les composants du liant.

3.8 Les bitumes caoutchoucs

Les bitumes caoutchoucs sont des bitumes qui ont été modifiés en y incorporant des caoutchoucs naturels ou synthétiques. Cette modification vise à améliorer certaines propriétés du bitume, notamment la résistance aux variations de température, l'élasticité et la résistance aux fissures. [20]

3.8.1. Caractéristiques des bitumes caoutchoucs :**a. Amélioration de l'élasticité :**

Les caoutchoucs ajoutés permettent d'améliorer l'élasticité du bitume, rendant le matériau plus flexible et capable de mieux résister aux variations de température sans se fissurer.

b. Amélioration de la résistance à l'usure :

Les bitumes caoutchoucs ont de meilleures propriétés de résistance à l'usure, ce qui les rend particulièrement adaptés pour les applications sur les routes à fort trafic ou les environnements agressifs.

c. Résistance accrue aux températures extrêmes :

En intégrant des caoutchoucs, ces bitumes présentent une meilleure performance à des températures très élevées ou très basses, car les caoutchoucs modifient les points de fusion du bitume et le rendent moins susceptible de se ramollir ou de devenir trop cassant.

d. Amélioration de la résistance aux fissures :

Grâce à leur flexibilité accrue, les bitumes caoutchoucs offrent une meilleure résistance aux fissures, en particulier dans des conditions de température variables.

e. Propriétés viscoélastiques :

Les bitumes caoutchoucs possèdent des propriétés viscoélastiques, ce qui leur permet de se déformer sous des charges sans se casser, tout en retournant à leur forme originale après l'élimination de la contrainte.

3.8.2.Applications des bitumes caoutchoucs :

- **Revêtements routiers :** Utilisés dans la construction et la réparation de routes, ces bitumes offrent une grande durabilité et une meilleure résistance aux conditions climatiques extrêmes.
- **Construction d'infrastructures de transport :** En raison de leur résistance à l'usure, ces bitumes sont également utilisés dans les parkings, les aéroports et d'autres infrastructures à fort trafic.
- **Applications dans les revêtements industriels :** Ils sont également utilisés pour des revêtements résistant aux produits chimiques ou à l'abrasion dans l'industrie. [21]

3.8.3.Méthodes de fabrication des bitumes caoutchoucs :

a. Procédé humide :

Le caoutchouc est mélangé avec le bitume dans une phase liquide à température élevée. Ce processus permet une homogénéisation complète des composants.

b. Procédé sec :

Le caoutchouc est dispersé dans le bitume sous forme de particules solides. Ce procédé est généralement moins coûteux mais peut nécessiter un meilleur contrôle de la qualité de la dispersion. [21]

3.8.4.Avantages des bitumes caoutchoucs :

- **Amélioration de la durabilité des chaussées :** La flexibilité et la résistance accrues contribuent à une réduction des réparations et à une plus longue durée de vie des revêtements.
- **Réduction des coûts d'entretien :** Grâce à leur meilleure résistance à l'usure, les bitumes caoutchoucs nécessitent moins de maintenance et sont donc plus rentables sur le long terme.
- **Performances dans des conditions extrêmes :** Ils sont particulièrement performants dans des environnements à forte chaleur ou de froid extrême.

3.8.5.Inconvénients des bitumes caoutchoucs :

- **Difficulté d'application :** Certains types de bitumes caoutchoucs peuvent nécessiter des équipements spéciaux pour leur application en raison de leur viscosité modifiée.

3.9 Conclusion

La modification des bitumes est une avancée technologique majeure qui répond aux défis posés par les conditions climatiques variées et les exigences de trafic élevé. En intégrant des matériaux tels que les polymères, cette pratique permet de concevoir des infrastructures routières plus performantes, durables et économiques.

Partie 2: Etude Expérimentale

Chapitre 4 :
Matériaux utilisés et
Méthodes d'essais

4.1 Introduction

Cette section a été consacrée à définir et identifier les composants fondamentaux impliqués dans la composition des matériaux étudiés : les granulats, le bitume et la poudrette de caoutchouc.

Pour chaque composant, des tests physiques, chimiques et mécaniques ont été effectués afin de caractériser les matériaux et de les classer conformément à une norme.

4.2. Présentations des Matériaux

4.2.1 Les granulats

Les granulats examinés dans cette étude sont ceux que les entreprises utilisent le plus fréquemment pour construire les chaussées. Les types de granulats 0/3, 3/8 et 8/15 inclus dans notre recherche proviennent de la carrière de Hoaoud El-Hamra, située dans la wilaya de Ouargla. Les résultats de l'analyse chimique de ces granulats sont présentés dans le tableau suivant, fourni par l'entreprise Souf pour goudron et huiles à Hassi Khalifa.

4.2.1.1. Analyse chimique sommaire

Les résultats de l'analyse chimique sont récapitulés dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1. Analyse chimique sommaire des différents types de granulats.

Constituants (%)	0/3	3/8 et 8/15
Insolubles (SiO ₂ +Silicate)	26.30	13.47
Sulfates	1.68	0.23
Carbonates (CaCO ₃)	66.40	73.38
Chlorures (NaCl)	0.012	0.004

Le sable broyé de Haoud El-Hamra présente une teneur élevée en carbonates, avec 66,40 % de CaCO₃, ce qui nous permet de le qualifier de sable calcaire.

Nous observons que les trois catégories de granulés montrent une distribution granulométrique homogène.

4.2.1.2. Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2. Résultats de l'analyse granulométrique.

Tamis[mm]	Fractions Tamissat%		
	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
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		

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

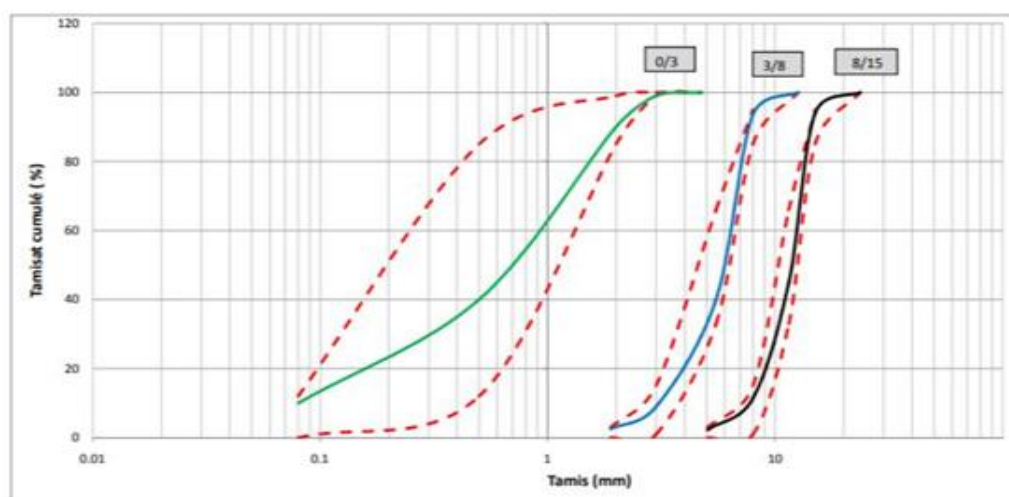


Figure 4.1: Courbe granulometrie.

Il est évident que notre sélection de matériaux granulaires est adéquate. Ces matériaux possèdent d'excellentes caractéristiques intrinsèques et de fabrication, ce qui permet de respecter les spécifications.

4.2.1.3. Caractéristiques des granulats

Les résultats sont donnés par le tableau 4.3 :

Tableau 4.3. Caractéristiques des granulats.

Essai	Référence	0/3	3/8	8/15	Qualité
Propreté	NF P18-591	-	0.575	0.18	< 1
Aplatissement	EN FN 933-3	-	7.54	10.69	< 20
Los Angeles	NF P18-573	-	18.40	18.40	< 25
Micro-Deval Humide	NF P18-572	-	14.65	14.65	< 20
ES 10% de fines	NF P18-597	61.32	-	-	> 40
Masse volumique réelle	NF P18-554	2.58	2.62	2.62	

En somme, il apparaît que notre sélection de matériaux granulaires est satisfaisante. Ils possèdent de solides propriétés intrinsèques et de fabrication, garantissant ainsi le respect des spécifications.

4.2.2 Le bitume

L'étude expérimentale a été menée sur un bitume de classe 35/50, fourni par Naftal. Afin de le caractériser, les analyses suivantes ont été effectuées :

- Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426)
- Essai de ramollissement bille et anneau (NF EN 1427)
- Essai de stabilité au stockage
- Essai Marshall pour les enrobés



Figure 4.2: Le bitume

4.2.3. Poudrette de caoutchouc

La poudre de caoutchouc utilisée pour la fabrication du liant bitume caoutchouc a été fournie par la société Algérienne SAEL « Société d'Application d'Elastomères » avec une granulométrie de 0 - 1mm. Cette poudrette est issue de la fabrication des joints des buses hydrauliques.



Figure 4.3: Poudrette de caoutchouc NR.

L'analyse granulométrique montre que la poudrette de caoutchouc est constituée de grains inférieurs à 1 mm. La densité de la poudrette est de 1,21 g/cm³.

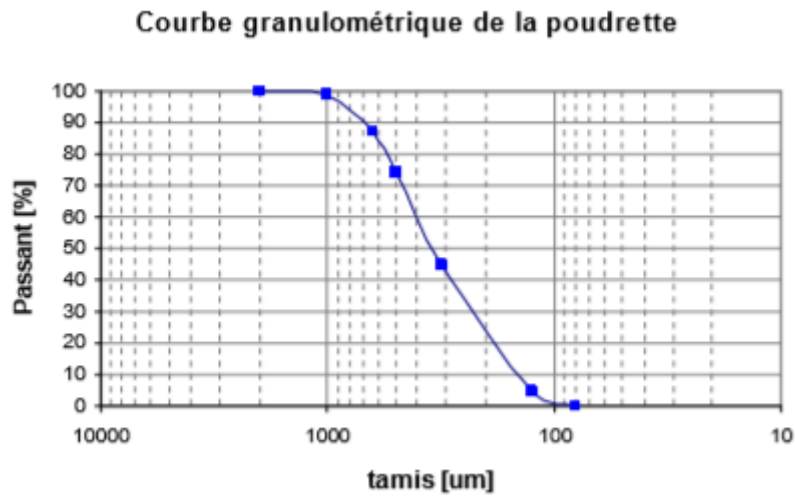


Figure 4.4 . Courbe granulométrique de la poudrette de caoutchouc (NR).

4.3. La modification

Les bitumes modifiés ont été élaborés à partir d'un bitume de grade 35/50 associée à de la poudrette de caoutchouc (NR) issue de déchets industriels. Les proportions de polymère utilisées pour la modification étaient de 2 %, 4 % et 6 % en poids du bitume. Le mélange bitume-polymère a été préparé par malaxage à une température de 175 °C, avec une vitesse de rotation de 700 tours par minute, pendant des durées de 60 min, 120min et 180min.



Figure 4.5: Appareillage de modification.

4.4. Programme expérimental

4.4.1 Pénétrabilité (NF EN 1426)

La pénétrabilité du bitume correspond à la mesure, exprimée en dixièmes de millimètres, de la profondeur à laquelle une aiguille pénètre dans un échantillon sous un poids total de 100 g (support inclus) après une durée de 5 secondes. Cette mesure est généralement réalisée à une température standard de 25°C. La valeur obtenue, exprimée en 1/10e de millimètre, sert à déterminer directement la consistance du bitume : plus celui-ci est rigide, plus la valeur de pénétrabilité est faible. L'essai de pénétrabilité peut être assimilé à une méthode indirecte pour évaluer la viscosité du bitume à 25°C. La mesure de la pénétrabilité à cette température ne présente généralement pas de difficultés particulières pour la majorité des mélanges composés de SBS et EVA. Dans ces cas, la répétabilité des résultats est équivalente à celle observée avec des bitumes non modifiés.



Figure 4.6: Appareillage de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille

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

Il s'agit de la température à laquelle une bille traverse un anneau de bitume dans des conditions précises de fabrication et de test. En d'autres termes, c'est la température à laquelle le bitume testé atteint un certain niveau de ramollissement. Toutefois, les résultats de cet essai peuvent être affectés si le bitume modifié présente une instabilité.



Figure 4.7: Température de ramollissement Bille Anneau.

4.4.3 Essai de stabilité au stockage :

Pour évaluer la stabilité au stockage, chaque mélange a été placé immédiatement après sa fabrication dans un tube cylindrique en aluminium maintenu en position verticale à une température de 165 °C pendant 48 heures. Ensuite, le tube a été refroidi dans un congélateur à une température de -5 °C. Une fois refroidi, il a été découpé en trois sections de longueur égale à l'aide d'une spatule et d'un marteau. La différence des points de TBA entre les sections inférieure et supérieure du tube a ensuite été mesurée. Si cette différence est inférieure à 2,5 °C, l'échantillon est considéré comme ayant une bonne stabilité au stockage. Cette méthode sert également à évaluer l'homogénéité et la compatibilité du bitume avec le polymère.



Figure 4.8: stabilité au stockage

4.4.4 Essai Marshall pour les enrobés :

La méthodologie algérienne de formulation recommande l'utilisation de l'essai Marshall pour déterminer la résistance des bétons bitumineux. Les éprouvettes cylindriques utilisées présentent un diamètre de 101,6 mm et une hauteur de 63,5 mm. Leur compactage est assuré par l'application de 50 coups sur chaque face à une température de 150°C.

Conformément à la norme ASTM D 1559, après une journée de stockage à température ambiante, les éprouvettes sont immergées dans un bain chauffé à 60 °C pendant 35 minutes. La stabilité Marshall correspond à la valeur maximale de force enregistrée lors de l'essai, exprimée en kN, tandis que le fluage, mesuré en mm, représente la déformation observée au moment de cette force maximale. Le rapport entre la stabilité (S) et le fluage (F) détermine le quotient Marshall (QM), qui sert à évaluer la résistance des enrobés. Une valeur élevée du quotient indique une meilleure résistance du mélange aux déformations permanentes.



Figure 4.9 : Essai Marshall pour les enrobés.

4.5. Conclusion

Après avoir réalisé les expériences requises sur le bitume pur et modifié, le chapitre suivant sera consacré à l'examen des résultats obtenus.

Chapitre 5:
Influence du poudrette
de caoutchouc sur les
bitumes.

5.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des essais standards, tels que la pénétrabilité, la température bille et anneau, ainsi que la stabilité au stockage, effectués sur le bitume 35/50 et sur les bitumes modifiés par l'ajout de poudrette de caoutchouc (NR) à différents pourcentages. Ces informations vont permettre d'évaluer les caractéristiques empiriques traditionnelles des liants examinés afin de prévoir l'effet de cette modification sur la consistance des bitumes modifiés.

5.2 Consistances des bitumes modifiés

La consistance des bitumes est évaluée à travers l'essai de pénétrabilité et le test de température Bille et Anneau (TBA).

5.2.1 Pénétrabilité à 25 °C

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

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

pénétrabilité à 25 °C	60 min	120 min	180 min
0%NR	38	36	33
2%NR	37	35	33
4%NR	34	31	28
6%NR	27	23	20

5.2.1.1 Variation du temps de malaxage en fonction de la pénétrabilité

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

Les données de pénétrabilité montrent que la pénétration diminue à mesure que le temps de mélange augmente, et ce, pour toutes les concentrations en NR. La capacité des bitumes modifiés à divers mélanges est diminuée par rapport au bitume conventionnel pour toutes les durées de malaxage, ce qui indique que le bitume se raffermi suite à la modification.

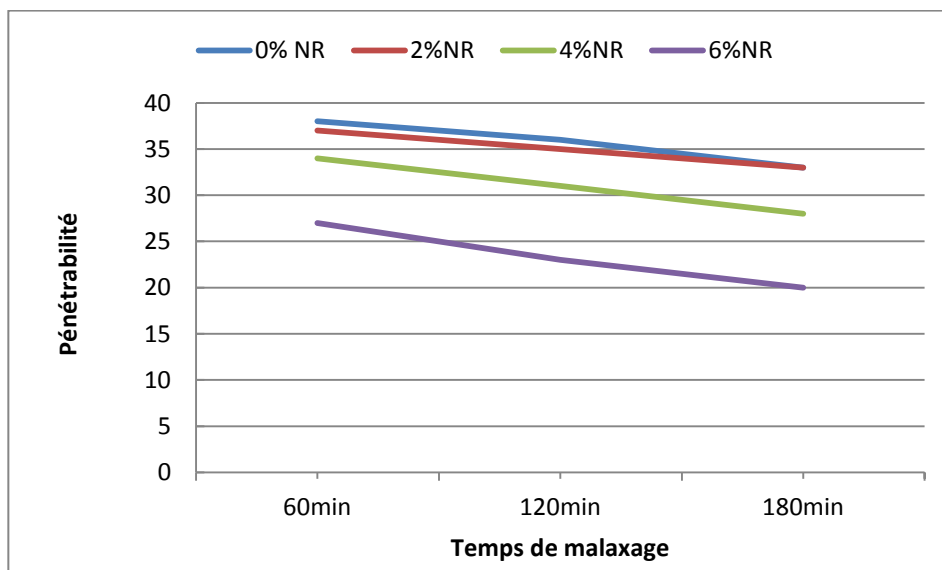


Figure 5.1 Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité des bitumes

5.2.1.2. Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité

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

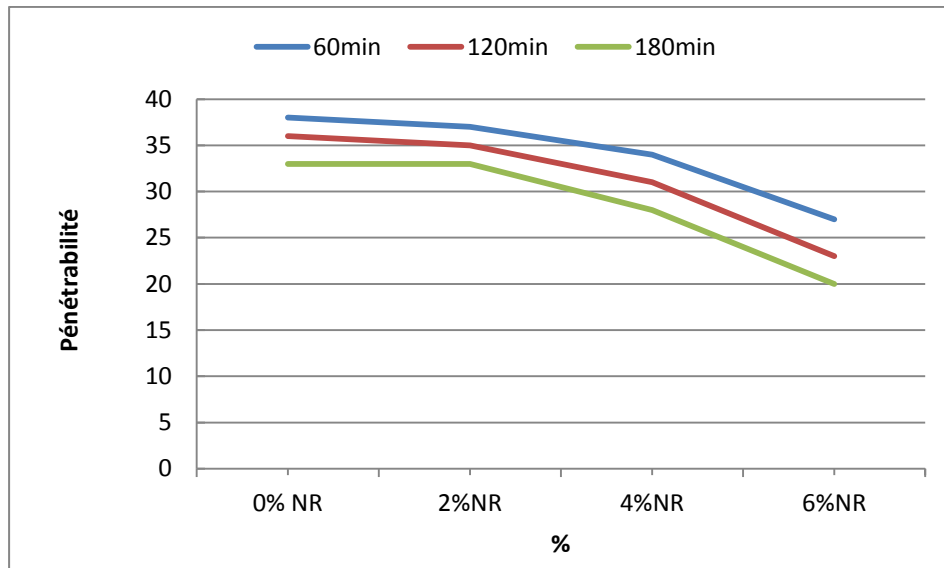


Figure 5.2 Influence de la teneur en NR sur la pénétrabilité.

La figure 5.02 indique que la capacité de pénétration décroît selon la concentration NR. Par rapport au bitume de base (0%NR), les bitumes modifiés sont plus consistants, indiquant que les bitumes modifiés avec de NR pourraient avoir une performance supérieure à haute température. En général, le renforcement de la rigidité du bitume suite à l'incorporation de résidus NR peut optimiser sa résistance aux déformations à des températures élevées.

5.2.2. Température de ramollissement Bille Anneau

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

Tableau 5.2 : Variation de TBA pour les différents mélanges

TBA (°C)	60 min	120 min	180 min
0%NR	52	54	56
2%NR	51	53	55
4%NR	53	57	60
6%NR	61	65	68

5.2.2.1 Influence du temps de malaxage sur la TBA

La figure 5.3 représente la TBA (°C) en fonction de la durée de malaxage.

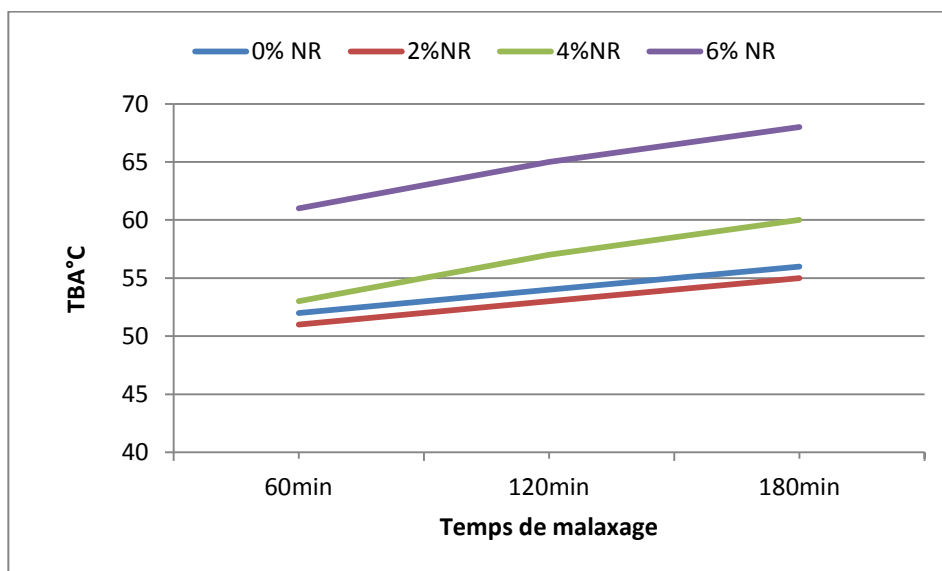


Figure 5.3 Influence du temps de malaxage sur la TBA des bitumes.

Les résultats de la figure 5.3 montrent que, pour toutes les concentrations, les courbes suivent généralement le même profil.

La TBA des bitumes, qu'ils soient purs ou modifiés avec divers mélanges, augmente avec le temps de malaxage.

5.2.2.2. Influence de la teneur en NR sur la TBA

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

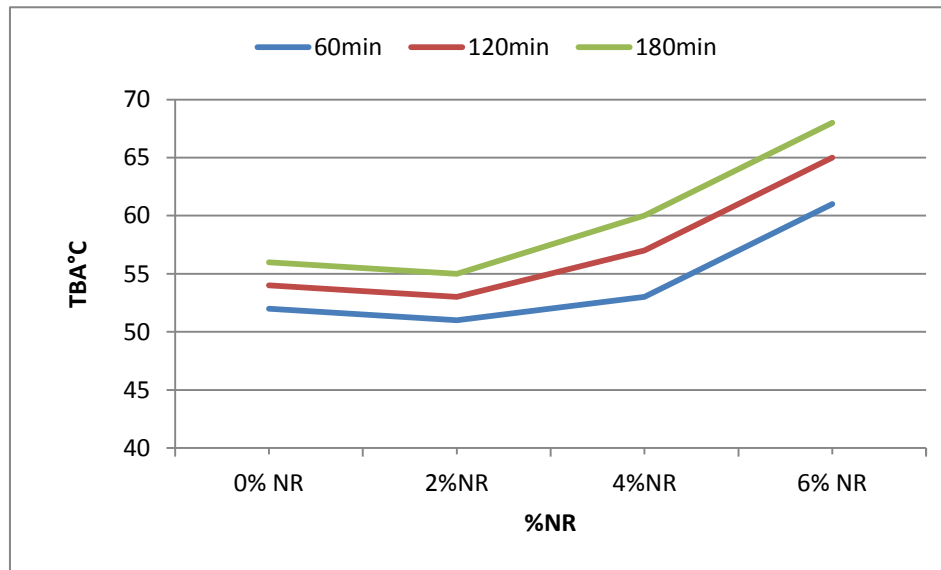


Figure 5.4 Influence de la teneur en NR sur la TBA des bitumes.

Les résultats de la figure 5.4 indiquent que la température de ramollissement croît avec une augmentation de la teneur en poudrette de caoutchouc. En effet, après l'ajout de 2% de poudre de caoutchouc (NR) pendant 180minute, la température de ramollissement augmente d'environ 12% par rapport au bitume pur. Cette augmentation dépasse 16% lorsqu'on passe à un mélange bitume + 4% NR sur la même durée. Ces résultats démontrent clairement que les additifs utilisés améliorent de manière significative les performances du bitume à haute température. L'augmentation de la température de ramollissement indique également que les bitumes modifiés par la poudre de caoutchouc renforcent la résistance à l'orniérage pour les chaussées bitumineuses réalisées avec ces matériaux recyclés.

5.2.3 Susceptibilité thermique (IP)

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

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

Les résultats de la susceptibilité thermique en fonction de la teneur en NR sont rassemblés dans le tableau 5.3 et schématisés par la figure 5.5

Tableau 5.3 : la susceptibilité thermique des bitumes (120 minute).

	0%NR	2%NR	4%NR	6%NR
La susceptibilité thermique	-0.97571	-1.25229	-0.64744	0.24688

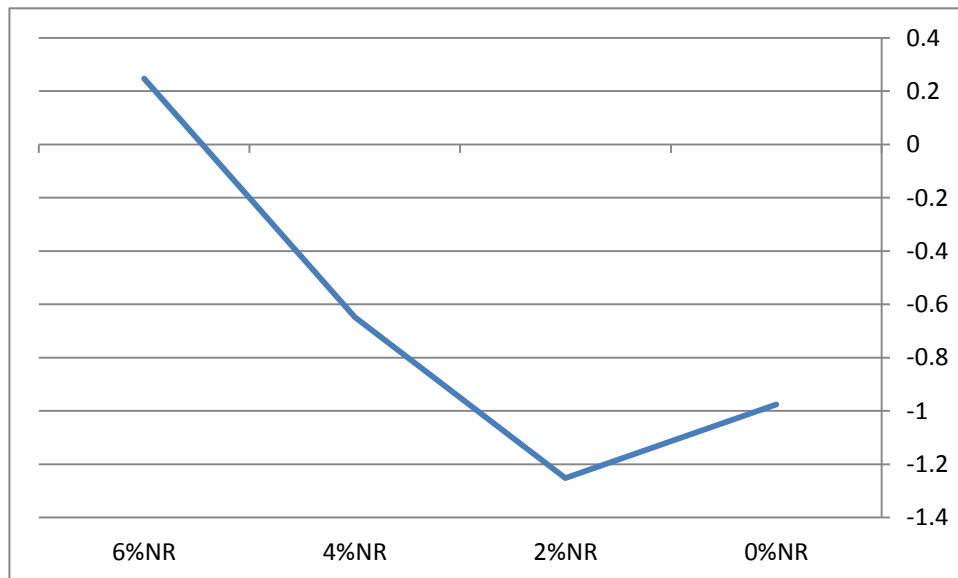


Figure 5.5 Les résultats de la susceptibilité thermique.

La figure 5.5 montre la variation de la susceptibilité thermique des bitumes modifiés, en fonction de la teneur en polymère. Il est connu que plus la valeur de l'indice de pénétrabilité augmente plus la susceptibilité thermique du liant diminue, on peut remarquer que les bitumes modifiés présentent une susceptibilité thermique moindre que le bitume pur explicité par l'augmentation

de la valeur de IP en fonction de la teneur en polymère. Ces résultats suggèrent que le bitume modifié est plus résistant à la fissuration à basse température et à la déformation permanente

5.2.4. Stabilité au stockage

Les propriétés du bitume modifié (BmP) sont fortement influencées par divers facteurs, notamment la concentration et les caractéristiques du polymère, la nature et le type de bitume, ainsi que le procédé de mélange utilisé. Bien qu'un large éventail de produits polymères soit disponible, seulement quelques types conviennent réellement à la modification du bitume.

Le bitume modifié avec des polymères (BmP) est un matériau haute performance employé dans la construction et l'entretien routier. Toutefois, sa stabilité lors du stockage et son comportement La compréhension des phénomènes de séparation de phase nécessite encore des travaux approfondis pour garantir une application du BmP qui soit à la fois plus réussie et pérenne.

Pour évaluer la stabilité au stockage, chaque mélange a été placé immédiatement après fabrication dans un tube cylindrique en aluminium, maintenu verticalement à une température de 160°C pendant deux jours. Ensuite, il a été refroidi dans un congélateur à une température de -10°C. Le tube a été découpé en trois parties égales à l'aide d'une spatule et d'un marteau. La différence de points de ramollissement entre les sections supérieure et inférieure du tube a été mesurée. Si cette différence est inférieure à 2,5°C, l'échantillon est considéré comme ayant une bonne stabilité au stockage. Cet essai sert à vérifier l'homogénéité et la compatibilité du bitume avec le polymère.



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

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

	Point de ramollissement °C			Commentaires
	Haut	Bas	Différence	
6%NR (120 min)	65	63.7	2.2	Moins de 2.5 stable

Nous avons noté une variation acceptable entre les valeurs TBA pour le haut et le bas du tube, montrant que le bitume-NR maintient son uniformité après deux jours de stockage. Cette disparité suggère que le NR est uniformément réparti dans le bitume et ne peut pas être l'échantillon qui a subi une décomposition de phase durant la conservation.

5.3. Conclusion

Les résultats des analyses traditionnelles révèlent que la modification affecte les propriétés des bitumes. La pénétrabilité des bitumes diminue, tandis que le point de ramollissement s'accroît avec l'ajout de polymères. L'ampleur de cette influence dépend de la quantité de modifiant utilisée et de la durée du mélange. Le bitume modifié par le NR n'est pas stable lors du stockage.

Chapitre 6 :

**Influence NR sur les
enrobés bitumineux.**

6.1 Introduction

Les enrobés bitumineux sont des matériaux composites utilisés principalement pour la construction de chaussées. Composés d'agrégats (graviers, sable) et de bitume comme liant, ils sont fabriqués par mélange à haute température (150-180°C). Leur structure compactée offre résistance mécanique, étanchéité et flexibilité, supportant les charges du trafic. Ils sont appliqués en couches pour réaliser des routes, parkings ou pistes d'aéroport. Des variantes (enrobés tièdes, recyclés) réduisent leur impact environnemental.

Dans ce élément, nous présentons la provenance des éléments premières des granulats, les tests de caractérisation ainsi que les essais mécaniques liés à la formulation (Marshall).

6.2. Etude de Formulation de l'enrobé

Le but central de la formulation est d'établir la composition parfaite (granulats, bitume, additifs) pour satisfaire des exigences spécifiques (trafic, climat). Assurer des qualités techniques (résistance, longévité, adhérence) grâce à des essais en laboratoire. Ajuster le coût tout en se conformant aux standards écologiques (par exemple, minimisation des émissions, recyclage). Veiller à une balance entre performance mécanique et simplicité d'application sur le site de construction. Avant de procéder à une production à grande échelle, il est nécessaire de vérifier la faisabilité pour garantir la fiabilité et la durabilité des chaussées.

6.2.1 Courbe granulométrique du mélange

(0/3, 3/8 et 8/15) qui s'intègrent parfaitement dans la plage de référence (Fuseau SETRA/LCPC BB 0/14). La granulométrie qui se trouve à l'intérieur du fuseau de spécifications est obtenue selon les proportions indiquées dans le tableau 6.1:

Tableau 6.1: différentes classes de granulats

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

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

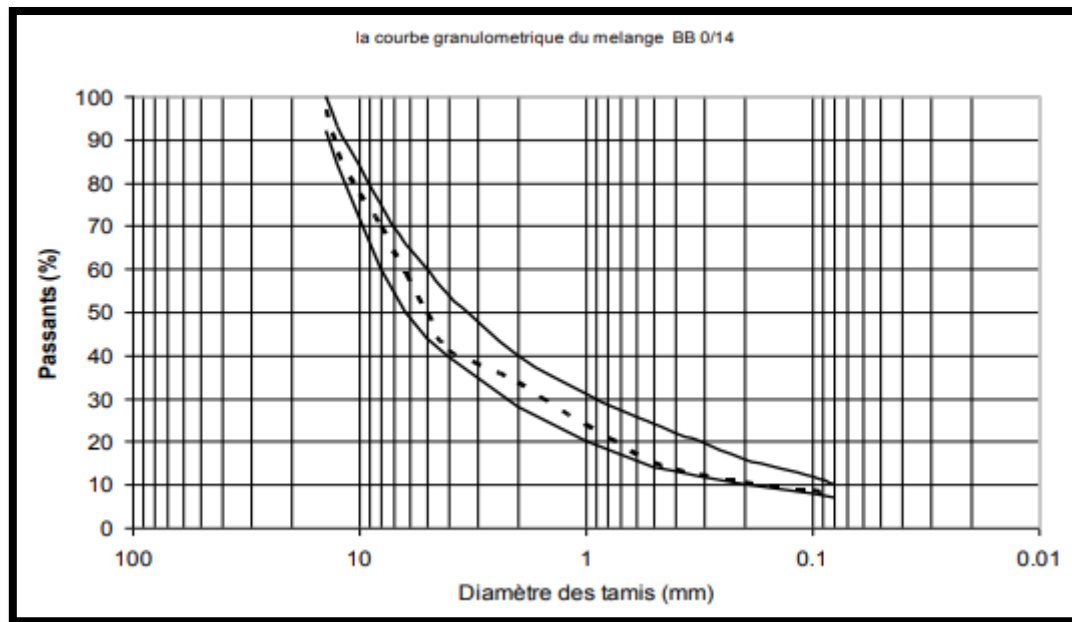


Figure 6.1 : Courbe granulométrique

Il est observable que la courbe granulométrique s'aligne bien avec l'éventail de référence recommandé en Algérie pour les bétons semi-grenus 0/14.

6.2.2. Teneur en liant

La teneur en liant correspond au pourcentage de la masse du liant par rapport à la masse des granulats secs.

Pour identifier la teneur optimale en liant, il est nécessaire de prendre en compte la ****surface spécifique des granulats**** (symbolisée par ****Σ****, en m²/kg), qui représente la surface totale exposée des granulats si ceux-ci étaient modélisés comme des sphères.

Pour une composition granulométrique donnée, la formule suivante permet d'estimer la surface spécifique Σ :

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

Avec :

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

La teneur optimale en liant, dépendant de la surface spécifique des granulats, est déterminée par la formule empirique suivante :

$$P = \alpha \cdot k \cdot \sqrt[3]{\Sigma}$$

Avec :

P : teneur en liant (%)

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

- 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 réelle des granulats « MVRg ».

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

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

Selon les spécifications, l'étude de formulation des enrobés bitumineux a fourni les résultats présentés dans le tableau 6.2, obtenus avec les matériaux suivants : bitume 35/50, sable calcaire et gravier siliceux.

Tableau 6.2: composition de la formule utilisée

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

6.2.3. Mode de fabrication des éprouvettes

La figure 6.2 illustre les différentes étapes de fabrication des éprouvettes : malaxage, moulage, compactage, puis démoulage.



Figure 6.2 : Matériels utilisés pour fabrication des éprouvettes

6.3. Influence de l'ajout de caoutchouc (NR) sur les caractéristiques Marshall

Les essais Marshall permettent d'évaluer les propriétés mécaniques des bétons bitumineux fabriqués avec des bitumes modifiés. Dans cette étude, les bitumes sont enrichis en NR à des taux de 2 %, 4 % et 6 %

L'enrobé bitumineux est compacté dans des moules à l'aide d'une dame pour fabriquer des éprouvettes cylindriques. Ces éprouvettes, maintenues à 60°C, sont ensuite placées entre les mâchoires semi-cylindriques d'une presse, qui se déplacent l'une vers l'autre à vitesse constante.

Lors de l'essai, la charge appliquée et la déformation sont mesurées jusqu'à la rupture. Classé parmi les essais à chargement unique, cette méthode, en raison des sollicitations complexes qu'elle génère, ne permet pas d'identifier une propriété intrinsèque du matériau (il s'agit d'un essai de performance). Elle permet cependant de déterminer deux indicateurs empiriques liés à la résistance à l'orniérage : le fuage (FM, en mm) et la stabilité Marshall (SM, en kN).

La stabilité de Marshall est un essai clé en génie civil mesurant la résistance maximale (en kN) d'un enrobé bitumineux à la déformation sous charge, à 60°C. Il évalue la capacité du matériau à supporter les charges de trafic sans se déformer excessivement, garantissant ainsi la durabilité des chaussées.

Les résultats des essais Marshall, obtenus pour différentes teneurs en NR, sont synthétisés dans le tableau ci-dessous

Tableau 6.3 : Résultats Marshall

Teneur en NR (%)	0 %	2 %	4 %	6 %
Stabilité (KN)	9.5	9.9	10.5	11.3

6.3.1. Stabilité Marshall (SM)

La figure 6.3. illustre l'évolution de la stabilité Marshall en fonction du pourcentage de caoutchouc intégrés dans le mélange.

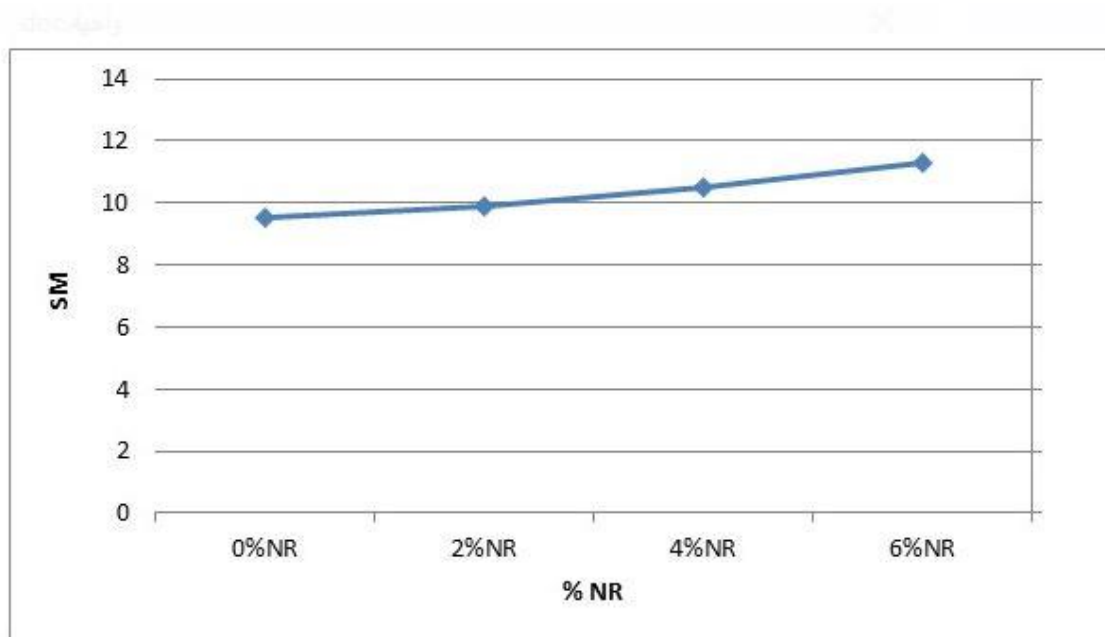


Figure 6.3. Stabilité Marshall.

Selon les données de la figure 6.3., la stabilité Marshall (SM) augmente proportionnellement à la teneur en polymère ajouté, tout en restant inférieure à celle du bitume non modifié. L'ajout de la poudrette de caoutchouc améliore cette stabilité pour toutes les teneurs testées, avec un pic atteint à 6 % NR.

6.4.Conclusion

Selon les résultats des essais réalisés, les enrobés bitumineux modifiés présentent des performances mécaniques supérieures comparativement aux enrobés conventionnels. Cette amélioration est confirmée par les données obtenues, mettant en évidence l'efficacité des modifications apportées.

Conclusion

Conclusion Générale

L'agression exercée par le trafic routier sur les chaussées, combinée aux contraintes climatiques, entraîne divers phénomènes responsables, à terme, de la dégradation de la structure : orniérage, fatigue et fissuration.

Des recherches ont démontré que le comportement du béton bitumineux dépend principalement des propriétés du bitume. À basse température, celui-ci présente un comportement fragile, favorisant ainsi l'apparition de fissures dans la chaussée. À l'inverse, à des températures élevées, le bitume adopte un comportement visqueux, ce qui peut engendrer des problèmes d'orniérage ou des déformations permanentes de la chaussée. Un bitume idéal doit donc montrer une faible sensibilité aux phénomènes de fissuration thermique à basse température et à l'orniérage à haute température.

L'enrobé bitumineux, dans sa conception traditionnelle, ne garantit pas un fonctionnement optimal des chaussées. Cependant, des études ont démontré que l'incorporation de polymères en tant que modifiants du liant améliore de manière significative les performances des infrastructures routières. Dans ce mémoire, nous avons porté notre attention sur la modification du bitume de classe 35/50, commercialisé en Algérie, par l'ajout de déchets de caoutchouc naturel (NR).

L'objectif principal de cette étude est d'améliorer les propriétés des bitumes grâce à l'intégration de ces déchets. Les caractéristiques des bitumes modifiés ont été évaluées à l'aide de méthodes conventionnelles, telles que la pénétrabilité, la température Bille et Anneau, ainsi que la susceptibilité thermique.

Par ailleurs, un essai Marshall a été réalisé sur les enrobés afin de valider les résultats obtenus.

À la lumière des résultats présentés dans ce travail, plusieurs conclusions majeures peuvent être tirées.

I - Les bitumes modifiés

1. Les analyses classiques ont révélé que l'ajout de déchets de caoutchouc naturel (NR) modifie significativement les propriétés des bitumes. Les bitumes ainsi modifiés se révèlent plus rigides que les bitumes purs. Cela se traduit par une diminution de leur pénétrabilité, tandis que leur point de ramollissement augmente avec l'incorporation de polymères.

2. Les résultats des tests expérimentaux confirment que les bitumes modifiés, grâce à leur moindre susceptibilité thermique, affichent des performances nettement supérieures à celles des bitumes conventionnels.

II - Les enrobés bitumineux

Les observations menées sur les enrobés bitumineux révèlent que les bétons bitumineux modifiés offrent de meilleures performances mécaniques par rapport aux versions classiques.

En vue des prochaines étapes,

nous préconisons les initiatives suivantes :

Examiner l'impact des déchets de caoutchouc naturel (NR) sur les propriétés physiques et mécaniques des enrobés bitumineux, notamment en termes de résistance à la fatigue, à l'orniérage, et autres performances associées.

Effectuer des analyses chimiques approfondies sur les bitumes modifiés, incluant des techniques comme la chromatographie et l'analyse SARA, afin de mieux comprendre les réactions entre le polymère et le bitume.

Introduire des additifs chimiques visant à améliorer la stabilité des bitumes lors du stockage.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Dony., «liants bitumes polymères : la fabrication à la mise en oeuvre en enrobés : influence de la nature du bitume sur leurs propriétés mécanique, leur micromorphologie et leur stabilité thermique», études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées 1991
- [2] Shell Bitumes (1991), « BITUMES TECHNIQUES ET UTILISATIONS ».
- [3] P. Harshad., P. J. Gundaliya. « Review on effect of aging on paving grade bitumen using different filler material ». International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 4, Issue 3, (March 2014)
- [4] Groupement professionnel des bitumes, «le bitume qu'est-ce que c'est ? « Genèse, constitution et caractéristiques du bitume », Bitume infos, N° special-1", juin 2005.
- [5] KEBAILI Nabil, "L'asphalte caoutchouc valorisation de la poudrette de caoutchouc en domaine routier", Thèse de doctorat, Faculté science appliquées, ourgla, 2017 .
- [6] K. AIT MOKHTAR, (1994) « INFLUENCE DE L'AFFINITE LIANT HYDROCARBONE GRANULAT SUR LES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MELANGES HYDROCARBONES » Thèse de Magister, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene institut de génie civil.
- [7] Ministère des Travaux Publics, Algérie. « Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud » (2004),
- [8] Yen. T.F., (1981). "Structural differences between asphaltenes isolated from petroleum And from coal liquid", Chemistry of asphaltenes, advances in chemistry Series 195, 1981, pp.39-51.
- [9] OLARD F., CHABERT D., Développement de l'essai de fatigue sur liants et mastics bitumineux, Revue générale des routes et aérodromes, N°865, pp. 69-74, 2008
- [10] Haddadi Smail- Contribution à l'étude du comportement des matériaux traités aux liants hydrocarbonés- influence des paramètres de composition- Thèse de magister- IGC- USTHB Fév. 1995.
- [11] NGUYEN H.N., Etude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume, Thèse de doctorat Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2008
- [12] M.ROBERT (J.F.LAFON), ROUTES Matériaux, Durabilité des chaussées MASTER 2 GENIE-CIVIL tome II, U.P.S. M2 UE1 2011/2012
- [13] <http://www.highwaysmaintenance.com/drainage.htm> 10 avril 2009 Avril 2009.
Guide de l'idiot sur l'entretien des routes Highwaymaintenance.com

Références bibliographiques

- [14] Jean, F., Corté, H. Di Benedetto « matériaux routiers bitumineux, constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges, ISBN 2-7462-0960-8, Lavoisier 2005
- [15] Magraman D, Amélioration des performances des enrobes bitumineux par la modification à base de polymères : poudrette de caoutchouc, thèse de magister 2009, ENSTP
- [16] PIARC, Use of modified bituminous binders, special bitumens with additives in road pavements, Laboratoire
- [17] F. Hadrzynski, et C. Such. Modélisation du comportement rhéologique des bitumes polymères, le modèle autocohérent, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 214, pp.3-18, (1998).
- [18] M.A. Elseifi, G.W. Flintsch, I.L. Al-Qadi. Quantitative effect of elastomeric modification on binder performance at intermediate and high temperatures. J Mater Civil Eng, 15 (1), pp. 32–40, (2003)
- Mohammed LIZOUL," OBSERVATION D'UN BITUME MODIFIE SOUS MICROSCOPE A EPI-FLUORESCENCE", Centre d'Etudes et de Recherches des Infrastructures de Transport], [Laboratoire Public d'Essais et d'Etudes], [Maroc].
- [20] BULLETIN D'INFORMATION TECHNIQUE 2000 « ENROBES MODIFIES AU CAOUTCHOUC ».
- [21] M. OULD-HENIA (2005), « MODELISATION ET PREDICTION DU COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES MELANGES BITUME CAOUTCHOUC », Thèse de Doctorat, ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE (génie civil).