



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



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Génie Civil

Présenté par :

- REKIBTI Lamia
- DJELLAKH Hana
- ZINE Mohammed Lamine

Intitulé :

**Utilisation de déchets industriels dans la
modification des enrobés modifiés**

Soutenue le : 04/06 /2024

Devant le jury composé de :

Dr : DJEDID Tarek	Président	Université d'Eloued
Dr : LABIODH Bachir	Examineur	Université d'Eloued
Dr : FETHIZA ALI Boubaker	Encadreur	Université d'Eloued
Dr : SEK Lakhdar	Encadreur	Université d'Eloued

Année académique : 2023/2024

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.

Sincères remerciements à nos chers parents qui nous ont constamment encouragés tout au long de nos années scolaires ; Qu'ils soient fiers de nous, et nous sommes reconnaissants à notre famille pour le soutien moral et financier qu'ils nous ont apporté tout au long de 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, leurs encouragements et leurs conseils.

Alors... merci à tous.

Résumé

L'objectif principal de cette étude est de valoriser de déchets locaux dans la modification du bitume. À cet effet, des essais classiques ont été effectués sur un bitume 35/50 modifié par de déchets locaux à différentes teneurs, il s'agit de déchets de poudrettes de caoutchouc (NBR)

Le deuxième objectif de ce travail est d'étudier l'effet de ces déchets locaux sur les propriétés de vieillissement du bitume. Le vieillissement des liants a été effectué en utilisant le RTFOT et le PAV. Les essais de la pénétrabilité et la température bille-anneau ont été effectués conformément à EN 1426 et EN 1427 respectivement.

Les résultats d'analyses classiques ont montré que la modification change les propriétés des bitumes. En effet, la pénétrabilité des bitumes diminue par contre le point de ramollissement augmente avec l'ajout des polymères. Le degré d'influence varie en fonction de la nature et de la quantité du modifiant ajouté. L'influence du vieillissement sur les caractéristiques des bitumes est significative. Les bitumes modifiés présentent une meilleure résistance au vieillissement que le bitume de base.

Mot de clé : bitume, bitume modifié, poudrettes de caoutchouc, Vieillissement.

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تثمين النفايات المحلية في تعديل القار. في هذا في الواقع، تم إجراء الاختبارات الكلاسيكية على القار 50/35 معدلة بالمخلفات المحلية بمحتويات مختلفة، هذه مخلفات صناعية (المطاط) (NBR). الهدف الثاني من هذا العمل هو دراسة تأثير هذه النفايات المحلية على خصائص الشيوخة للقار. تم إجراء تقادم المجلدات باستخدام RTFOT و PAV. تم إجراء اختبارات قابلية الاختراق ودرجة حرارة الحلقة الكروية وفقاً للمواصفة EN 1426 و EN 1427 على التوالي. أظهرت نتائج التحليل الكالسيكي أن التعديل يغير خصائص القار. في الواقع، تنخفض قابلية اختراق القار، إلا أن نقطة التليين تزداد مع إضافة البوليمرات. تختلف درجة التأثير حسب طبيعة وكمية المعدل المضاف. تأثير الشيوخة على خصائص القار كبير. يتمتع القار المعدل بمقاومة أفضل للشيوخة من القار الأساسي

الكلمات المفتاحية: القار، القار المعدل، قنات المطاط، الشيوخة

Sommaire	
Remercîments	I
Résumé.....	II
Sommaire.....	III . V .VI.VII
Liste des Figures	VIII.IX
Liste des tableaux	X
List des abréviations.....	XI
Introduction générale	1

Partie I : Étude bibliographique

Chapitre 01 : Généralités sur le bitume

1.1-Introduction	6
1.2- Définition du bitume	6
1.3-Fabrication des bitumes	6
1.3.1-La distillation.....	7
1.3.1.1- Extraction par distillation à la pression atmosphérique	7
1.3.1.2- Distillation sous vide.....	7
1.3.2- Le dés asphaltage	7
1.3.3-Le soufflage	7
1.3.4-Le craquage	7
1.4- Composition chimique et structure colloïdale des bitumes.....	8
1.4.1- Composition chimique	8
1.4.2- Les asphaltées	9
1.4.3- Les maltènes	9
1.4.3.1- Les résines	9
1.4.3.2- Les aromatiques	9
1.4.3.3-Les saturés	9
1.4.2- Structure colloïdale des bitumes	10
1.4.2.1-Structure 1 "GEL"	11
1.4.2.2-Structure II "SOL"	11
1.4.2.3-Structure ID" SOL-GEL"	11
1.4.3-Les différents types des bitumes [03].....	12
1.4.4- Classification des bitumes routiers	13

1.5-Généralité sur le vieillissement des bitumes.....	15
1.6-Essais sur le bitume.....	16
1.7-Conclusion	16

Chapitre 02 : Les enrobés Bitumineux

2.1-Introduction.....	18
2.2-Types chaussées.....	18
2.2.1- Chaussée rigide.....	18
2.2.2- Chaussée semirigide.....	18
2.2.3- Chaussée souple.....	20
2.2.4- Chaussée bitumineux épaisse	20
2.2.5- Chaussée à structure mixte.....	21
2.2.6- Chaussée à structure inverse	21
2.2.7- Chaussée en béton de ciment.....	22
2.3-Les sollicitations dans les chaussées	23
2.3.1- Sollicitations mécaniques (effet dutrafic).....	23
2.3.2- Sollicitations climatiques (effet de la température)	24
2.4- Composition de l'enrobe	25
2.4.1- Granulats.....	25
2.4.2- Propriétés des Granulats	26
2.5- Généralités sur les enrobés.....	29
2.5.1- Définition.....	29
2.5.2- Formulation de l'enrobé.....	29
2.5.3- Qualités requises pour les enrobes bitumineux	29
2.5.4- Les essais sur les enrobes bitumineux.....	30
2.6- Les propriétés essentielles des enrobés	30
2.7- Conclusion	31

Chapiter03 : Les bitumes modifiés

3.1- Introduction.....	33
3.2- Objectifs de la modification des bitumes	33
3.3- Domaines d'emplois des bitumes modifiés	34
3.4- Les différents agents modifiants.....	36
3.5- Principaux polymères utilises en génie civil	36
3.6- Procèdes de modification.....	37

3.6.1- Le procédé humide	37
3.6.2- le procédé sec	38
3.7- Domain d'application des bitumes modifiés	38
3.8- Essais spécifiques aux liants modifiés	38
3.8.1- Observation microscopique	38
3.8.2- Stabilité au stockage.....	39
3.8.3- Essai force-ductilité	40
3.9- La modification par des déchets en en matières caoutchoucs	40
3.10- Conclusions	41

Partie II : Etude Expérimental

Chapitre 04 : Matériaux utilisés et Méthodes d'essais

4.1- Introduction	44
4.2- Présentations des Matériaux	44
4.2.1- Le bitume	44
4.2.2- Poudrette de caoutchouc NBR (Acrylonitrile butadiene rubber)	44
4.3- Essais de caractérisation	45
4.3.1- Essais conventionnels empiriques.....	46
4.3.1.1- Pénétrabilité (NF EN 1426).....	46
4.3.1.2- Température de ramollissement Bille Anneau (NF EN 1427)	47
4.3.2- Les essais de simulation des vieillissements.....	48
4.3.2.1- Protocole de vieillissement à court terme (Rolling Thin-Film Oven Test, NF EN 12607-1).....	48
4.3.2.2- Protocole de vieillissement à long terme « Pressure Aging Vessel » (PAV) (NF EN 14769).....	49
4.3.3- Essai de stabilité au stockage	50
4.4- Caractérisation de bitume de base	50
4.5- La modification.....	51
4.6 Caractérisation du NBR par FTIR.....	52
4.7- Conclusion.....	52

Chapitre 05: Effet du NBR sur les propriétés des bitumes modifiés.

5.1- Introduction	53
5.2- Influence de la poudrette (NBR) sur les bitumes.....	53
5.2.1-Pénétrabilité à 25 °C	53

5.2.1.1- Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité.....	54
5.2.1.2- Influence de la teneur en NBR sur la pénétrabilité	54
5.2.2- Température de ramollissement Bille Anneau	55
5.2.2.1-Influence du temps de malaxage sur la TBA	56
5.2.2.2- Influence de la teneur en NBR sur la TBA	56
5.2.3- Susceptibilité thermique (IP)	58
5.2.4- Stabilité au stockage	59
5.3. Conclusion.....	60

Chapitre 06: Etude des bitumes modifiés au vieillissement

6.1- Introduction	62
6.2- Caractéristiques physiques des bitumes modifiés après le vieillissement ...	62
6.2.1- Pénétrabilité.....	62
6.2.2- Température bille et anneau (TBA)	63
6.3 Susceptibilité thermique	65
6.4-Influence de la vitesse de malaxage sur la consistance (avant et après vieillissement)	66
6.5 Conclusion.....	67
Conclusion générale	69
Références bibliographiques	73

Liste des Figures :

Figure 1.01 : Principe de fabrication des bitumes.....	8
Figure 1.02 : Schéma de séparation chimique des constituants du bitume	10
Figure 1.03 : Représentations d'un bitume type SOL et d'un bitume type GEL.....	11
Figure 2.01 : Structure type d'une chaussée rigide.....	19
Figure 2.02 : Structure d'une chaussée semi-rigide.....	19
Figure 2.03 : Structure type d'une chaussée souple	20
Figure 2.04 : Structure d'une Chaussée bitumineux épaisse	20
Figure 2.05 : Chaussée à structure mi.....	21
Figure 2.06 : Chaussée à structure inverse.....	21
Figure 2.07 : Chaussées en béton de ciment	22
Figure 2.08 : Dalles en béton de ciment mince collé	22
Figure 2.09 : Schématisation des sollicitation induites par le trafic	24
Figure 3.01 : Observation de la microstructure d'un bitume modifié par microscopie de fluorescence (0.5x0.7mm) [34]	39
Figure 4.01 : Le bitume	44
Figure 4.02 : Poudrette de caoutchouc NBR	45
Figure 4.03 : Granulométrie du NBR	45
Figure 4.04 : Pénétrromètre analogique.....	46
Figure 4.05 : Point de ramollissement	47
Figure 4.06 : L'étuve RTFOT pour simuler ces étapes de vieillissement à court terme NF EN12607-1.....	48
Figure 4.07 : Vieillissement long-terme accéléré NF EN 14769.....	49
Figure 4.08 : Prélèvement d'éprouvettes pour l'essai de stabilité au stockage.....	50
Figure 4.09 : Appareillage de modification.....	51
Figure 4.10: Spectre FTIR du NBR	52
Figure 5.01 : Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité	54
Figure 5.02 : Influence de la teneur en NBR sur la pénétrabilité à 25 °	55
Figure 5.03 : Influence du temps de malaxage sur la TBA.....	56
Figure 5.04 : Influence de la teneur en NBR sur la TBA.....	57
Figure 5.05 : La susceptibilité thermique des bitumes modifiés	58
Figure 6.01 : Pénétrabilité avant et après le vieillissement	63

Figure 6.02 : TBA avant et après le vieillissement.....	64
Figure 6.03: Indice de pénétrabilité des bitumes modifiés avant et après vieillissement.....	65
Figure 6.04: Influence de la vitesse de malaxage sur la pénétrabilité avant et après vieillissement	66

Liste des tableaux :

Tableau 1.01: Composition chimique du bitume	10
Tableau 1.02: Classes de bitume.....	14
Tableau 3.01: Principaux agents chimiques utilisés dans la modification des bitume	37
Tableau 4.01: Propriété physique de bitume.....	51
Tableau 5.01: Les résultats de la pénétrabilité pour les différents mélanges.....	53
Tableau 5.02: Les résultats de la TBA pour les différents mélanges	55
Tableau 5.03: Les résultats de la susceptibilité thermique	58
Tableau 5.04 : Les résultats de la stabilité au stockage des bitumes modifiés.....	59
Tableau 6.01: Pénétrabilité à 25°C avant et après vieillissement pour les différents mélanges	62
Tableau 6.02: TBA°C avant et après vieillissement pour les différents mélanges.....	64
Tableau 6.03: Influence de la vitesse de malaxage sur la pénétrabilité avant et après vieillissement	66

Liste des abréviations

H/C : Ratio Hydrogène / Carbone.

SARA : Saturés, Aromatiques, Résines et Asphaltènes.

FTIR : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier.

GPC : Chromatographie sur Gel Perméable.

IC : Indice d'instabilité colloïdale.

TFOT : Thin Film Oven Test.

RTFOT : Rolling Thin Film Oven Test.

PAV : Pressure Aging Vassel.

SEBS : Styrène-Ethylène-Butadiène-Styrène .

SBR : statistique styrène-butadiène.

SBS : Styrène-Butadiène-Styrène.

EMA : L'éthylène-acrylate de méthyle.

EBA : L'éthylène-acrylate de butyle.

EVA : L'éthylène-acétate de vinyle.

PE : Le polyéthylène.

HDPE, LDPE : Polyéthylène à haute et basse densité.

PP : polypropylène.

NBR : Acrylonitrile butadiene rubber

SAEL : Société d'application d'élastomère.

IP : Indice de pénétrabilité.

TBA : Température bille et anneau.

Pen25 : Pénétration à 25 °C.

Introduction générale

Introduction générale

Le bitume, dans sa configuration traditionnelle, présente des limites face aux conditions et exigences environnementales devenues de plus en plus rudes. En effet, face à la croissance sans cesse du trafic aussi bien en nombre qu'en charges utiles, conjuguée aux conditions climatiques agressives, il est devenu primordial d'utiliser des liants plus performants. Le bitume approprié prolonge la durée de vie et par voie de conséquence une meilleure durabilité des chaussées.

Pour diminuer les phénomènes de détérioration de la chaussée et ainsi maximiser sa durabilité, diverses techniques ont été entreprises ; parmi lesquelles, la modification des liants avec des polymères. En d'autres termes, l'ajout de polymères dans le bitume augmente considérablement la durée de vie du revêtement routier. L'ajout de polymères modifie le comportement du bitume en diminuant sa susceptibilité thermique et en élargissant son intervalle de plasticité, autrement dit la plage de températures à l'intérieur de laquelle les enrobés conservent leurs performances mécaniques de résistance à l'orniérage et à la fissuration de fatigue et/ou thermique. Le bitume modifié aux polymères (PMB) possède aussi une plus grande cohésivité et une plus forte adhésivité c'est-à-dire une meilleure tenue des granulats à l'arrachement dans les enduits superficiels ou les enrobés minces et diminuent les risques de désenrobage par l'eau dans les enrobés ouverts.

Les investigations menées dans ce travail visent à identifier une solution pertinente de recyclage de déchets locaux dans les procédés de construction. Nous nous sommes intéressés à la modification d'un bitume de classe 35/50 avec de déchet industriel en forme de poudrette de caoutchouc (NBR).

Le premier objectif de ce travail est d'étudier les propriétés des bitumes modifiés par la poudrette de caoutchouc (NBR), qui inclut, la consistance du bitume, la susceptibilité thermique, la stabilité au stockage et les propriétés viscoélastiques.

Le deuxième objectif de cette étude est de décrire la simulation en laboratoire du mécanisme de vieillissement à court et long terme.

Ce mémoire est scindé en deux grandes parties à savoir :

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

- ✓ Les généralités sur les bitumes, le vieillissement des bitumes et le mécanisme de vieillissement.
- ✓ Généralités sur les enrobés bitumineux
- ✓ Les polymères (les différents agents modifiants, objectifs de la modification et compatibilité Bitume-Polymère.

La deuxième partie présente l'étude expérimentale consacrée à:

- ❖ L'influence de NBR et du temps de malaxage sur la consistance du bitume (pénétrabilité, TBA, la susceptibilité thermique.)
- ❖ L'influence de la modification des bitumes sur le vieillissement des bitumes.
- ❖ L'influence de la vitesse et de temps de malaxage sur le vieillissement des bitumes.

Ce mémoire se termine par une conclusion et des perspectives.

Partie I

Étude bibliographique

Chapitre 01 : Généralités sur le bitume

Chapitre 01 : Généralités sur les bitumes

1.1 Introduction [01]

Les bitumes sont utilisés dans plusieurs domaines d'application tels que les travaux public, l'isolation électrique, le moulage etc..., toute fois leur utilisation à grand échelle (il est donc nécessaire de modifier les bitumes) est dans l'enrobage routier. Les enrobages routiers sont des compositions constituées de quelques 95% en masse de granulats dispersés dans une matrice de 5% ayant un rôle de liant. La performance de tels matériaux composites dépend directement des propriétés du liant hydrocarboné.

Ce chapitre résume les connaissances acquises à ce jour sur les propriétés des matériaux bitumineux afin d'établir le cadre général de cette étude. A cet effet, nous présentons brièvement quelques généralités sur l'origine, la fabrication, la composition, ainsi que la structure des bitumes qui constituent l'exemple de liant hydrocarboné le plus utilisé actuellement.

1.2 Définition du bitume [02]

Le bitume est caractérisé par sa consistance visqueuse, sa composition majoritairement en hydrocarbures et leurs produits dérivés. On peut dissoudre cette substance dans le tri chlore-éthylène et elle est principalement non volatile et se ramollit graduellement une fois chauffée. Il est de couleur noire ou brune et possède les propriétés d'imperméabilisation et d'adhésion.

1.3 Fabrication des bitumes [03,04]

Les principaux procédés de fabrication des bitumes ont été énumérés La distillation en raffinerie des pétroles bruts, - Le soufflage, - Le dé asphaltage - Le craquage.

1.3.1 La distillation

1.3.1.1 Extraction par distillation à la pression atmosphérique

La méthode de raffinage consiste à chauffer en continu en utilisant un four, le brut qui a été préalablement décanté et dessalé. Une température de 340 °C est atteinte pour faire monter le brut dans une colonne de fractionnement maintenue à la pression atmosphérique. Le brut réduit est le résultat de la récupération du produit en fond de tour.

1.3.1.2 Distillation sous vide

Actuellement, le pétrole brut réduit provenant de la distillation atmosphérique est réchauffé à une température d'environ 400 °C avant d'être envoyé dans une colonne où la pression est maintenue à quelques dizaines d'hPa². Cette classe d'unité offre la possibilité de fabriquer toutes les sortes de bitumes, du 20/30 au 160/220.

1.3.2 Le désasphaltage

Cette méthode est utilisée pour les résidus sous vide qui contiennent une quantité excessive de traction lubrifiante et consiste à faire passer le résidu sous vide avec un flux ascendant de solvant. La récupération du bitume est rendue possible par la différence de solubilité de la fraction bitumineuse en fonction du solvant utilisé.

1.3.3 Le soufflage

Le bitume oxydé ou bitume soufflé, spécialement conçu pour des applications industrielles, est obtenu en injectant de l'air dans le résidu de la distillation sous vide, à une température élevée (en moyenne 280 °C) ; Cette méthode de fabrication vise principalement à optimiser les propriétés du bitume.

1.3.4 Le craquage

L'objectif de ce procédé de raffinage est de transformer en présence d'un catalyseur, la fabrication du carburant nécessite l'utilisation de coupes légères pour être converties en coupes lourdes à longues chaînes d'hydrocarbures. Il convient de souligner que lorsque la température est élevée (450 à 550 °C) et que la pression

Atmosphérique est importante ; Les grosses molécules hydro carbonées sont fragmentées pour obtenir de petites molécules possédant un indice d'octane Elevé.

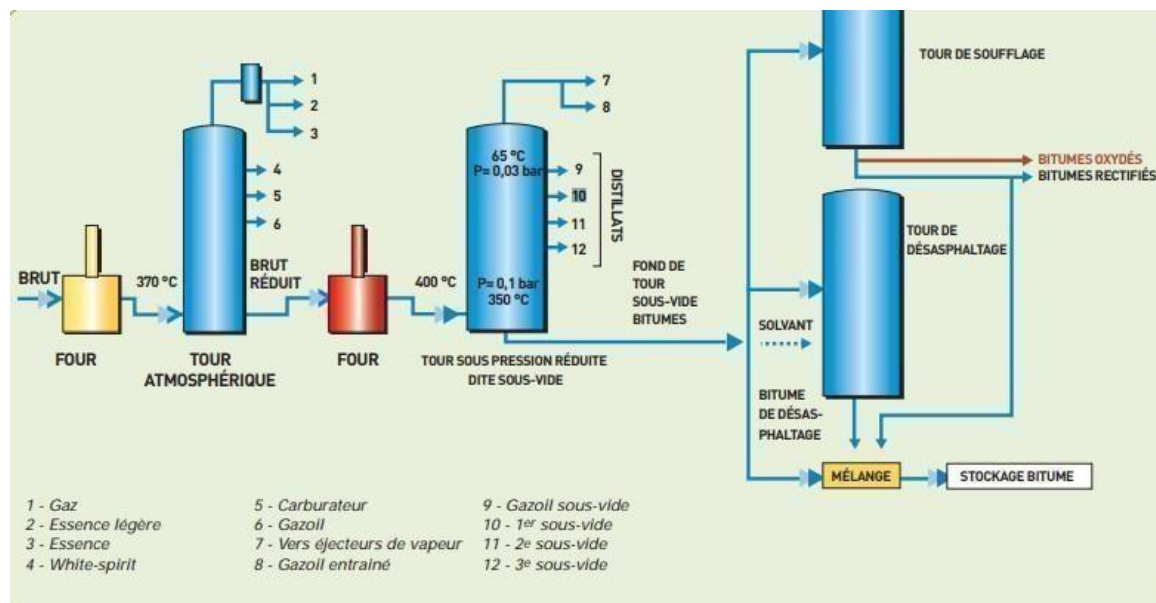


Figure 1.01 : Principe de fabrication des bitumes [03].

1.4 Composition chimique et structure colloïdale des bitumes [04,05, 06]

1.4.1 Composition chimique

Les hydrocarbures du bitume sont composés de différents hydrocarbures de poids moléculaire élevé, dont la majorité appartient aux groupes aliphatiques et naphthéniques. Ils ont des chaînes droites, plus ou moins ramifiées ou cyclique set 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. Les éléments métalliques à l'état de traces présents dans ces éléments sont : fer, vanadium, nickel, aluminium et silicium.

Les composés dont ils sont faits ont des masses molaires et des structures chimiques diverses. Les molécules de ces composés se composent de quatre principaux types d'hydrocarbures : les paraffines, les naphthènes, l'aromatique set les oléfines.

Il est également important de mentionner que parmi les différentes molécules présentes dans les bitumes, rares sont celles qui sont composées uniquement des quatre types de motifs évoqués.

1.4.2 Les asphaltées

Ces matériaux sont des solides amorphes noirs ou bruns qui contiennent du Carbone, de l'Hydrogène, de l'Azote, du Soufre et de l'Oxygène. Ils sont très polaires, avec une masse moléculaire allant de 1000 à 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.

1.4.3 Les maltènes

On peut séparer les molécules de maltènes par chromatographie en trois familles différentes :

1.4.3.1 Les résines

On peut classer ces solides ou semi-solides bruns noirs en tant que composés de carbone, d'hydrogène, de faibles quantités d'oxygène, de soufre et d'azote, qui ont une masse moléculaire allant de 500 à 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%.

1.4.3.2 Les aromatiques

Ces liquides sont de teinte brune ou noire et ont une viscosité élevée. Ils sont composés de chaînes carbonées non polaires et ont une masse moléculaire faible, allant de 300 à 2000g/mole. 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%.

1.4.3.3 Les saturés

Les hydrocarbures aliphatiques sont formés d'huiles visqueuses non polaires de couleur blanche ou paille. La masse moléculaire est semblable à celle des aromatiques. Elle représente 5 à 20 % du bitume. Le rapport atomique C/H est de 0,5. La proportion des différentes familles est influencée par l'origine, le mode de fabrication, la méthode de séparation, le grade et l'état de vieillissement du bitume.

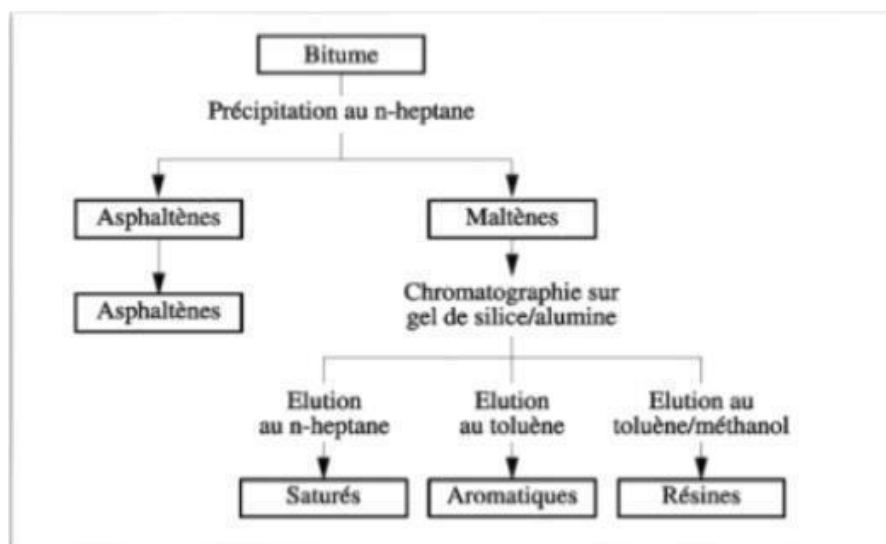


Figure 1.02 : Schéma de séparation chimique des constituants du bitume [04]

Tableau 1.01: Composition chimique du bitume [04].

Élément	Symbole	Teneur %
Carbone	(C)	80-85
Hydrogène	(H)	10-15
Soufre	(S)	0-0.6
Oxygène	(O)	2-3
Azote	(N)	0-1

1.4.2 Structure colloïdale des bitumes [8]

En fonction de la composition chimique et des concentrations respectives des composants du bitume, son équilibre colloïdal peut être plus ou moins modifié, ce qui va affecter la rhéologie du bitume en fonction de la température.

On peut catégoriser la structure colloïdale des bitumes en fonction de sa composition générique:

1.4.2.1 Structure 1 "GEL"

La caractéristique principale est l'agglomération de micelles d'asphaltènes qui forment un réseau continu dans un milieu dispersant faiblement structuré par les résines.

Les bitumes à structure 'GEL' riches en asphaltènes et ont une phase maltène pauvre en hydrocarbures aromatiques. Ils ont un comportement élastique.

1.4.2.2 Structure II "SOL"

Les micelles d'asphaltènes sont entièrement poétisées, ce qui permet d'obtenir une solution diluée et bien stabilisée dans un milieu dispersant fortement structuré par les résines. On peut observer cela dans les bitumes à phase maltène qui contiennent une forte concentration d'aromatiques. Ces bitumes ont un comportement visqueux (newtonien).

1.4.2.3 Structure ID "SOL-GEL"

La caractéristique principale est constituée par des agrégats de micelles d'asphaltées flottant dans un milieu dispersant structuré par les résines et se situant entre 1 et II. Dans la majorité des bitumes routiers, on retrouve cette structure. Ils présentent un comportement viscoélastique.

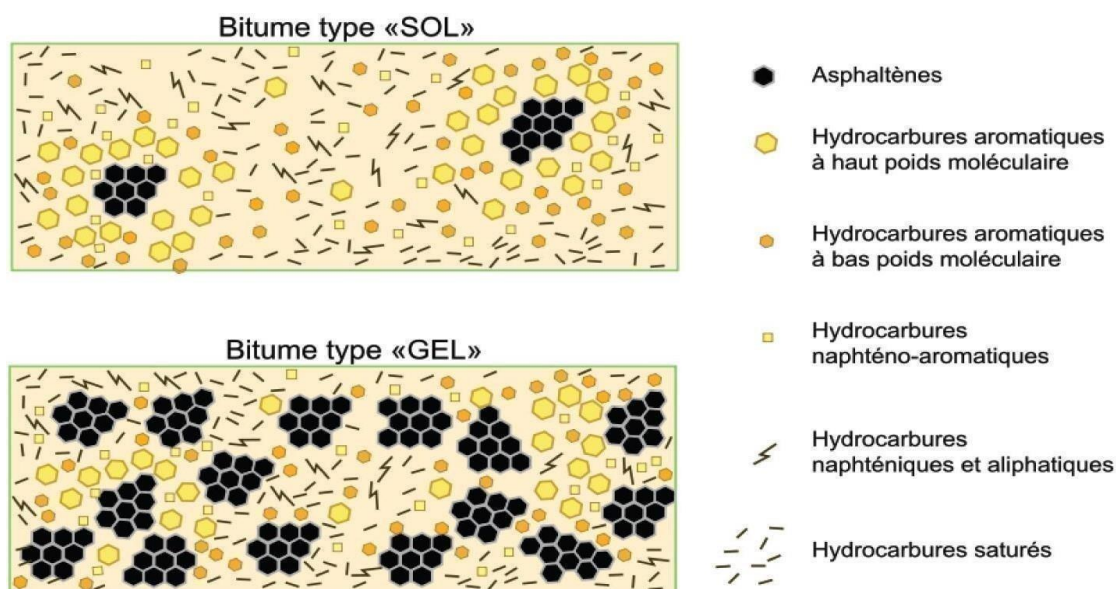


Figure 1.03: Représentations d'un bitume type SOL et d'un bitume type GEL [9].

1.4.3 Les différents types des bitumes [03]

L'utilisation de bitume dans les enrobés permet d'obtenir des revêtements de chaussées avec des propriétés viscoélastiques. Un bitume ayant les caractéristiques appropriées garantit des performances élevées en matière de résistance à l'orniérage, à la fissuration thermique, à la fissuration de fatigue et à l'arrachement, ce qui permet de réaliser des revêtements sécuritaires, durables et économiques.

Les types suivants de liants à base de bitume sont :

- a) **Les bitumes naturels** : qui existent à l'état naturel sous forme d'anciens gisements de pétrole.
- b) **Les bitumes purs** : qui sont directement issus du raffinage du pétrole.
- c) **Les cut-backs** : qui sont des bitumes mélangés avec un solvant plus ou moins volatil d'origine pétrolière, généralement une coupe kérosène de qualité non commerciale. La viscosité de ces produits se trouve ainsi abaissée, permettant une mise en œuvre à de faible température.
- d) **Les bitumes fluxés** : qui sont des bitumes mélangés avec une huile de faible viscosité. Ces liants sont souvent plus visqueux que les bitumes fluidifiés.
- e) **Les bitumes composés** : qui sont des mélanges bitume-goudron ou bitume-brai de houille dans lesquels le bitume est majoritaire.
- f) **Les bitumes modifiés** : qui sont des bitumes additionnés de substances d'origines diverses, généralement des polymères qui modifient certaines de leurs propriétés.
- g) **Les émulsions de bitume** : où l'huile de fluxage est un mélange de produits d'origine pétrolière et de produits de la houille.

1.4.4 Classification des bitumes routiers [10]

Les enrobés mis sur le marché doivent présenter certaines qualités définies. Les spécifications définissant ces qualités concernent les propriétés physico-chimiques intrinsèques du bitume et ses performances en tant que liant destiné à être incorporé dans des matériaux composites (mélanges bitumineux, enduits superficiels, etc.) pour diverses applications (route, étanchéité, industrie).

Valeurs limites pour des propriétés spécifiques (consistance, viscosité, adhérence, solubilité, point de rupture, résistance au vieillissement et autres propriétés spécifiques au fabricant) [10].

Le contrôle de la qualité commence par l'analyse du pétrole brut, bien avant le processus de production proprement dit : tous les pétroles bruts ne se prêtent pas de la même manière à la production de bitume, puisque seuls 10 % environ des 1 300 pétroles bruts différents contiennent du bitume. La première tâche du raffineur est de prévoir et de vérifier les propriétés du pétrole brut le plus lourd à

Tableau 1.02: Classes de bitume [10].

Bitumes purs - Norme européenne EN 12591*							
Caractéristique	Unité	Méthode	Désignation des classes appropriées				
			20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Pénétrabilité à 25 °C, 100 g, 5 s	x 0,1 mm	EN 1426	20-30	35-50	50-70	70-100	160-220
Point de ramollissement Bille et Anneau	°C	EN 1427	55-63	50-58	46-54	43-51	35-43
Résistance au durcissement EN12607-1 RTFOT à 163 °C		EN 12607-1					
Variation de masse maximum, +/-	%	EN 12607-1	0,5	0,5	0,5	0,8	1,0
Pénétrabilité restante, minimum	%	EN 1426	55	53	50	46	37
Point de ramollissement après durcissement, minimum	°C	EN 1427	57	52	48	45	37
Augmentation du point de ramollissement, maximum	°C	EN 1427	8	8	8	9	11
Point d'éclair	°C	EN ISO2592	240	240	230	230	220
Solubilité, minimum	% (m/m)	EN 12592	99,0	99,0	99,0	99,0	99,0
Teneur en paraffine, maximum	% (m/m)	EN 12606-2	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

1.5 Généralité sur le vieillissement des bitumes [11]

Le vieillissement se manifeste le plus couramment par un accroissement de la viscosité ou une diminution de la pénétrabilité.

Le bitume doit être caractérisé adéquatement pour prédire son comportement aux températures de service, à l'action de l'eau, l'air, la lumière et les agents chimiques.

En présence d'eau et d'éléments nutritifs et énergétiques, les micro-organismes peuvent se développer et biodégrader le bitume. Si certaines conditions de salinité, de PH (<12), de température ($<70^{\circ}\text{C}$) et de pression sont respectées dans un stockage profond, il ne faut pas exclure le développement de bactéries.

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

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

Il s'agit d'évaluer l'effet de vieillissement à court et à long terme et de le contrôler à hautes températures (résistance aux déformations) et à basses températures (résistance aux fissurations). On distingue en effet :

a) Le vieillissement physique: qui se traduit par deux processus :

- Processus réversible, le refroidissement du bitume et la présence de paraffines qui se cristallisent à froid.
- Processus irréversible qui est du à l'évaporation de substances volatiles

(Variation des propriétés rhéologiques d'une façon significatives et permanente).

b) Vieillissement chimique: se manifeste par une diminution de Pénétrabilité, très complexe due à des réactions d'oxydation et de polymérisation. L'oxydation est un phénomène irréversible. Il conduit soit à la formation d'asphaltées soit à la formation de groupements polaires.

1.6 Essais sur le bitume

Les essais sur les bitumes sont :

- ✓ Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NFT66 004).
- ✓ Essai bille anneau (NFT66 004).
- ✓ Viscosité absolue.
- ✓ Viscosité cinématique.
- ✓ Détermination du point de flamme et point d'éclair envas ouvert (NF T 60-118).
- ✓ Détermination de la recouvrance élastique (NF EN 13398) .
- ✓ Détermination de la force de ductilité.
- ✓ Stabilité au stockage.
- ✓ Test de vieillissement (RTFOT) Rolling Thin Film Oven Test (NF T 66-032).
- ✓ Essai fluage et viscosité à taux zéro.
- ✓ Température de fragilité FRAASS (NF T 66-006).
- ✓ L'essai PAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO).

1.7 Conclusion

La qualité et les performances des routes dépendent des propriétés du bitume et sont contrôlées par la composition du bitume. Dans ce chapitre, nous avons abordé certaines questions générales concernant le bitume, nous avons appris les composés du bitume et leur fabrication, ainsi que la classification du bitume, et nous avons mentionné un certain nombre de tests, notamment le test de pénétrabilité à l'aiguille et la TBA

Chapitre 02 : Les enrobés Bitumineux

Chapitre 02: Les enrobés bitumineux

2.1 Introduction [12]

Un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux (5 à 7 % en masse), d'agrégats (de taille varie entre 0 et D) et de fines (passant à 80 μm) – les fines étant également appelées “filler. Le liant assure la cohésion entre les grains minéraux en les mouillant et les enrobant d'un film continu. Le squelette granulaire est l'ossature rigide du mélange. La distribution de taille de différents agrégats donne la composition granulométrique du squelette granulaire qui peut être continue ou discontinue selon la destination du mélange et les propriétés visées.

Le filler absorbe une part du liant introduit et forme le mastic qui est plus rigide et moins thermiquement et cinétiquement susceptible que le liant pur. On appelle enrobé hydrocarboné tout mélange de granulats et de liant hydrocarbonée terme est donc plus général que celui de béton bitumineux puisqu'il inclut les mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume (goudron, liant à base de bitume fluidifié ...).

2.2 Types de chaussées [13]

2.2.1 Chaussée rigide

Une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment pervibré ou fluide. En règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol, les couches suivantes :

- une couche de forme.
- une couche de fondation.
- une couche de roulement en béton de ciment.

Dans le cas d'une chaussée neuve à faible trafic, la couche de fondation n'est pas nécessaire. La dalle en béton de ciment peut ainsi être réalisée directement sur l'arase terrassement ou sur la plate-forme support de chaussée (Figure 2.1).

Dans la chaussée rigide, la couche de surface et la couche de base sont confondues.

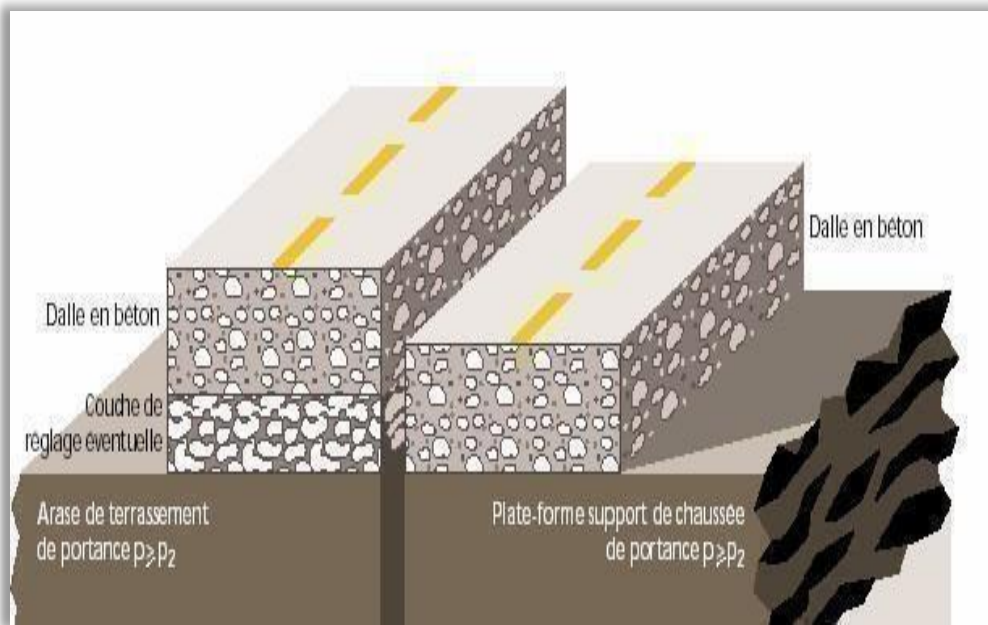


Figure 2.01: Structure type d'une chaussée rigide.

2.2.2 Chaussée semi rigide

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation) (Figure 2. 2).

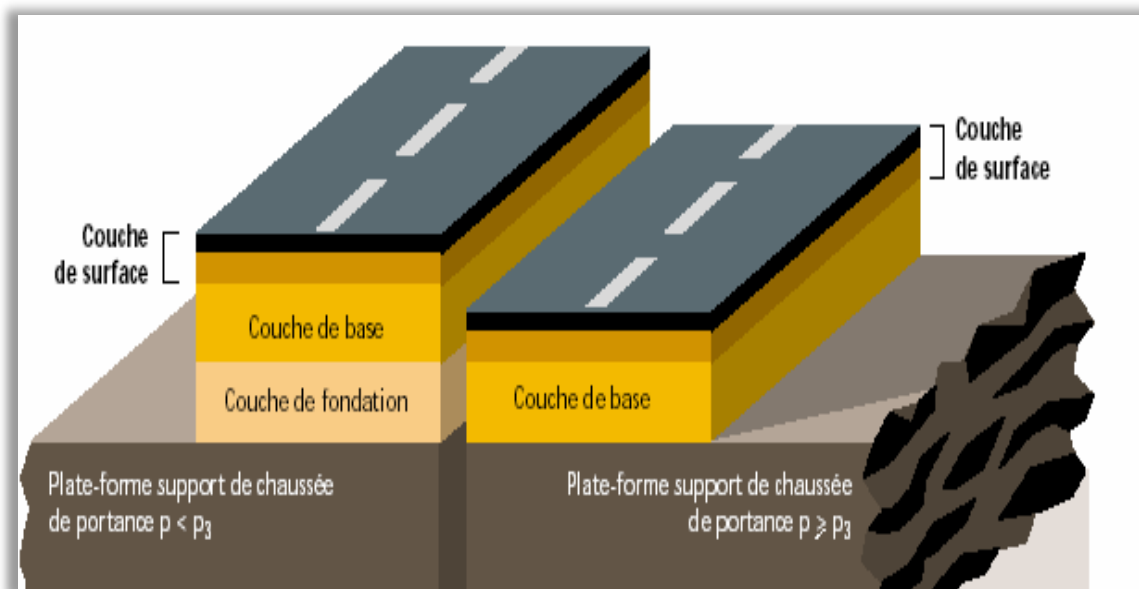


Figure 2.02 : Structure d'une chaussée semi-rigide.

2.2.3 Chaussée souple

C'est une structure de chaussée dans laquelle l'ensemble des couches liées qui la constituent, sont traitées aux liants hydrocarbonés (Figure 2.03).

La couche de fondation et/ ou la couche de base peuvent être constituées de grave non traitée.

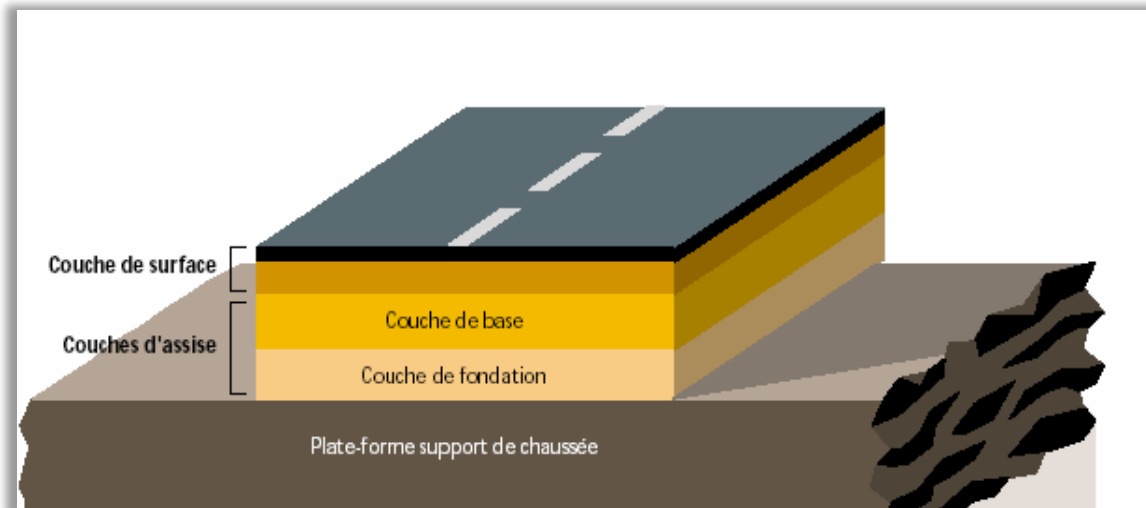


Figure 2.03: Structure type d'une chaussée souple.

2.2.4 Chaussée bitumineux épaisse

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés (Figure 2.04), fait d'une ou deux couches (base et fondation).

- L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.



1. Couche de surface de matériaux bitumineux
2. Matériaux bitumineux d'assise (de 15 à 40 cm)
3. Plate-forme support

Figure 2.04: Structure d'une Chaussée bitumineux épaisse.

2.2.5 Chaussée à structure mixte

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base : 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de 1/2.

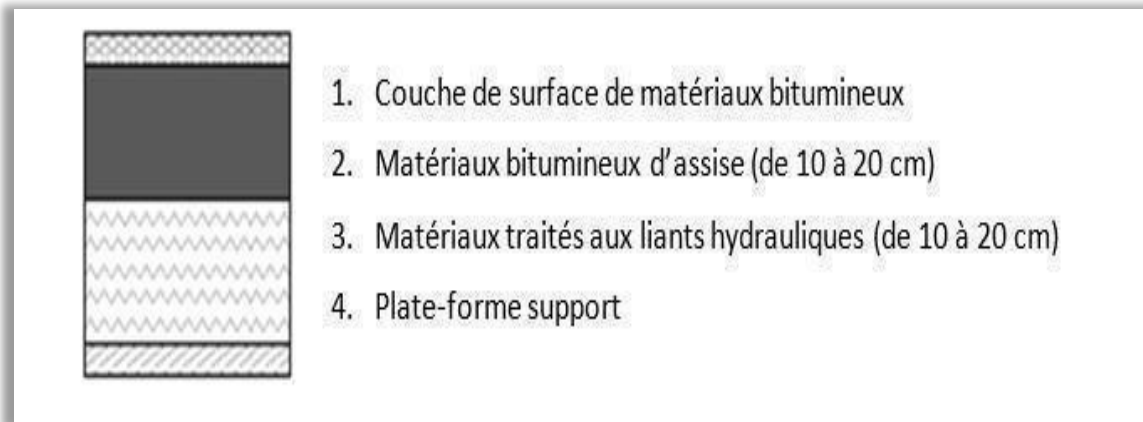


Figure 2.05: Chaussée à structure mi.

2.2.6 Chaussée à structure inverse

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche de grave non traitée (environ 12 cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80 cm.

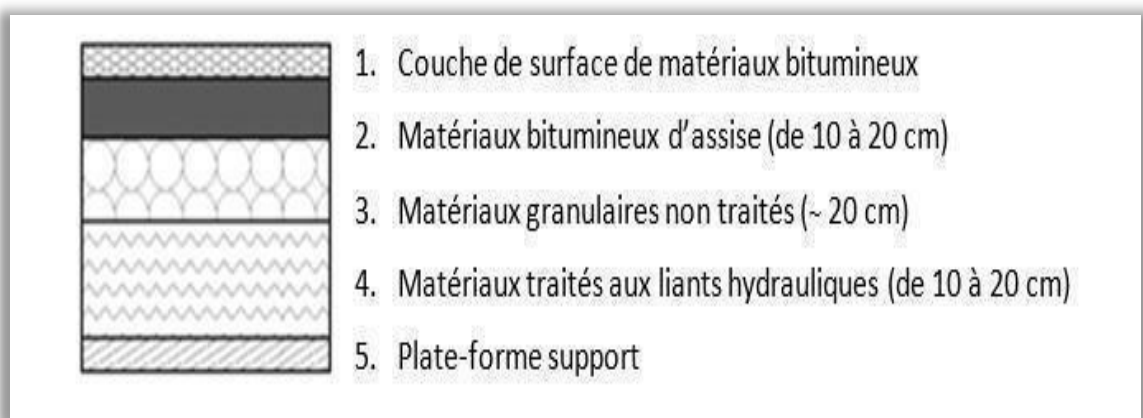


Figure 2.06: Chaussée à structure inverse.

2.2.7 Chaussée en béton de ciment

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur qui sert de couche de roulement éventuellement recouverte d'une couche mince en matériaux bitumineux.

La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment), soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.

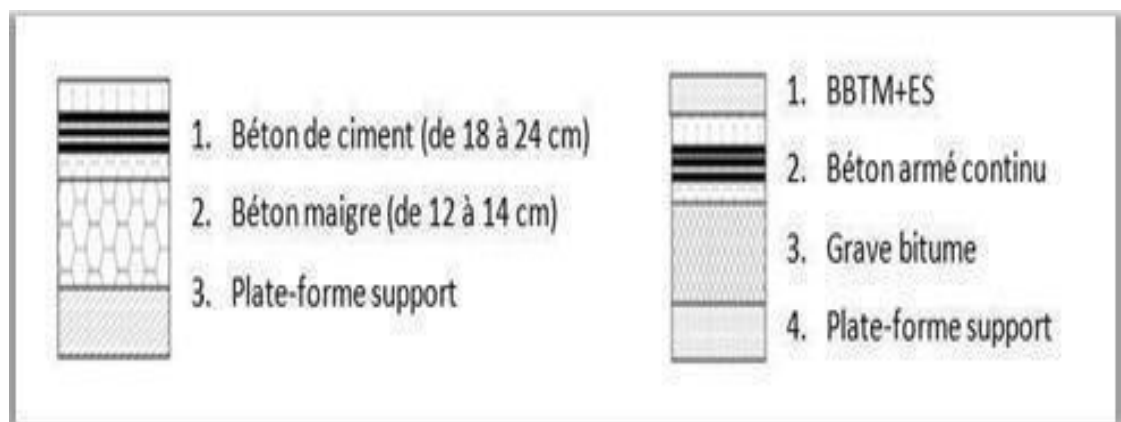


Figure 2.07: Chaussées en béton de ciment.

La dalle de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu), ou discontinue avec ou sans élément de liaison aux joints. Ci-dessous nous présentons les structures de chaussée en béton de ciment.

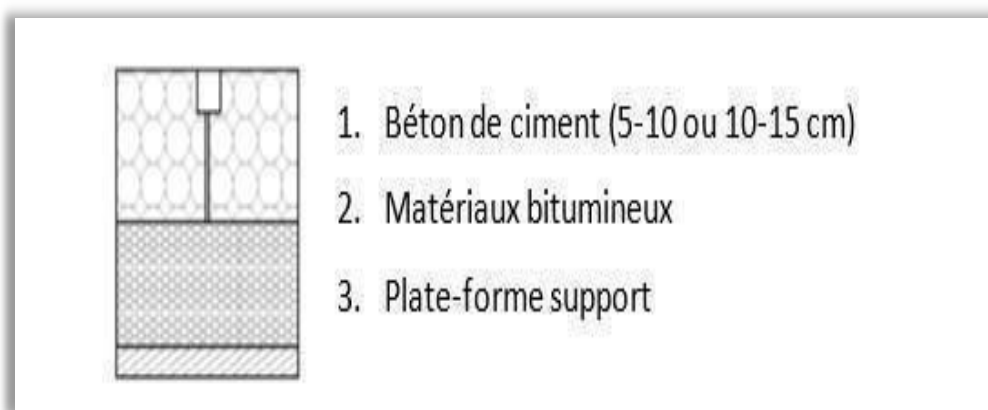


Figure 2.08: Dalles en béton de ciment mince collé.

2.3 Les sollicitations dans les chaussées

Les chaussées routières sont sujettes en permanence à des sollicitations mécaniques et thermiques combinées parfois avec des phénomènes chimiques qui vont participer, plus ou moins rapidement selon leurs niveaux de sollicitation, à la dégradation de structure. Ces éléments, responsables des dégradations, ont pour origine :

- Les sollicitations du trafic.
- les sollicitations climatiques.
- les phénomènes chimiques.

Ces différentes actions agissant simultanément sur la surface de contact (surface de l'asphalte) provoquent les dommages couramment observés.

2.3.1 Sollicitations mécaniques (effet du trafic)

Les principaux effets sont des effets dynamiques dus aux dépassements répétés de véhicules lourds, des effets statiques lorsque le volume du trafic diminue, et des effets dus au frottement entre la surface du pneu et la surface de la route.

En première approximation, chaque couche de chaussée peut être assimilée à une poutre soumise à une flexion sous l'influence du trafic. Pour calculer les contraintes et les déformations générées, il faut d'abord connaître le module d'élasticité complexe et, si nécessaire, le coefficient de Poisson. Il convient de noter qu'en raison des propriétés particulières du bitume (viscoélasticité), le comportement des mélanges bitumineux (et donc le module d'élasticité) dépend fortement de la température et du taux de chargement.

La traction répétée au fond de la formation par le passage des véhicules provoque des "micros" dommages, qui s'accumulent et conduisent à la ruine du matériau. Ce phénomène est connu sous le nom de fatigue et est observé dans de nombreux matériaux.

Ce phénomène est connu sous le nom de fatigue et est observé dans de nombreux matériaux. La compression répétée par le passage des véhicules entraîne une déformation permanente, et si la déformation est trop importante, le creusement d'ornières se produit sur la surface de la route (figure 2.9).

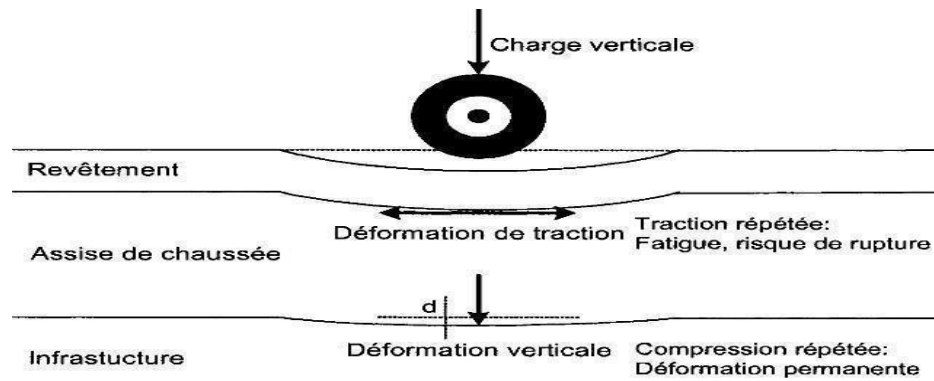


Figure 2.9 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic.

2.3.2 Sollicitations climatiques (effet de la température)

Il en résulte des fluctuations de température dans le mélange bitumineux. Ces fluctuations peuvent être à court terme (quotidiennes) ou à long terme (saisonnnières).

Il en résulte des fluctuations de température dans le mélange bitumineux. Ces fluctuations peuvent être à court terme (quotidiennes) ou à long terme (saisonnnières).

Changements dans le module d'élasticité des mélanges bitumineux, Génération de contraintes et de déformations dans les matériaux en raison de l'expansion et de la contraction thermiques lors des changements de température (couplage thermomécanique).

2.4 Composition de l'enrobé [14]

2.4.1 Granulats

2.4.1.1 Familles des granulats

Les granulats se répartissent suivant leur taille moyenne en plusieurs familles : fines, sables et gravillons. Les diamètres minimaux et maximaux de ces familles sont normalisés.

a- Les fines:

Les fines (passant $<$ à $80\ \mu\text{m}$) d'un mélange hydrocarboné sont généralement un mélange de fines d'apport en faible proportion et de fines du sable majoritaires. Les fines d'apport peuvent être issues de roches massives : le filler calcaire est utilisé majoritairement. On rencontre également d'autres Chaud vive, le filler activé (mélange de fines calcaires et de chaux éteinte), la chaux éteinte, les cendres volantes, les fillers de cimenterie et les ardoises.

b- Les sables:

Les sables pour enrobés sont les éléments inférieurs à $6,3\ \text{mm}$. Le sable doit répondre à des qualités bien spécifiques pour garantir des caractéristiques mécaniques acceptables du mélange bitumineux. Des sables roulés sont aussi utilisés pour améliorer la maniabilité des mélanges.

c- Les gravillons:

Les gravillons (d/D) constituent « l'ossature » du mélange hydrocarboné. A ce titre, leur nature, leur angularité, leur forme conditionnent pour partie la stabilité des mélanges et les caractéristiques de surface des couches de roulement. De plus, la nature minéralogique influe directement sur la formulation du mélange : certains matériaux (basaltes, granites, gneiss) sont plus difficiles à compacter, d'autres présentent un caractère absorbant (laitiers, calcaires dolomitiques) dont il faut tenir compte pour le dosage en liant. La nature minéralogique et la propreté influent également sur l'adhésivité bitume - granulats.

2.4.2 Propriétés des Granulats

a- La granularité:

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle conditionne la compacité de l'enrobé bitumineux ainsi que ses caractéristiques mécaniques.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par la vibration de la colonne de tamis.

Pour constituer le squelette granulaire de l'enrobé bitumineux, on mélange les différentes classes granulaires dans une certaine proportion. La distribution de la taille des différents grains (des plus gros au plus petit) constitue la courbe granulométrique du mélange. Celle-ci peut être continue ou discontinue (c'est-à-dire qu'une ou Plusieurs fractions granulaires peuvent manquer), selon la destination du mélange et les propriétés visées. Pour exemple, la courbe granulométrique des enrobés drainants est fortement discontinue, ce qui permet d'obtenir une porosité élevée après la mise en place.

b- La forme:

La forme d'un élément granulométrique est définie par le coefficient d'aplatissement qui dépend des trois caractéristiques dimensionnelles principales : l'épaisseur, la grosseur et la longueur.

Les granulats plats ne permettent pas de réaliser des bétons très compacts et, par ailleurs, en technique routière, ils ne peuvent être utilisés car ces éléments ont tendance à prendre une orientation préférentielle proche de l'horizontale selon leurs plus grandes dimensions, ils conduisent à des couches de roulement trop glissantes.

c- L'angularité:

L'angularité est une qualité beaucoup plus fondamentale que la forme. En effet, les éléments qui présentent des faces se coupant avec les angles vifs, augmentent l'angle de frottement interne du matériau et diminuent sa maniabilité ce qui a deux effets opposés : le compactage est plus difficile, mais si on réussit celui-ci, la stabilité est plus élevée.

d- La propreté:

Il s'agit de l'absence dans un granulat d'éléments fins indésirable. Ce sont soit des fines plastiques naturelles (argile), soit des fines issues du concassage ou du broyage des roches,

La présence d'argile autour des grains risque, une fois humide, de leur faire perdre toute stabilité. La qualité de l'adhésivité du bitume sur le granulat dépend de la propreté de la surface de chaque granulat ; une faible propreté diminue l'adhésivité du bitume.

e- Résistance à la fragmentation (chocs):

Elle est mesurée par le coefficient « Los Angeles ». Cette mesure est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic.

f- Résistance à l'attrition et à l'usure:

L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour objectif de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons entre eux même dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements. Comme l'usure est très influencée par la présence d'eau, l'essai le plus représentatif est le Micro Deval en présence d'eau.

g- La composition et la nature minéralogique:

La nature minéralogique des granulats influe essentiellement sur leur mode de rupture lors du concassage, sur leur forme ainsi que sur leur adhésivité avec le bitume. On distingue les granulats alcalins et les granulats acides ; les premiers étant le calcaire et le marbre, les seconds le granite et le quartzite.

Les propriétés d'un granulat sont en grande partie déterminées par sa teneur en silice (SiO_2). Les granulats qui possèdent des taux élevés de silices (les granulats siliceux) ne présentent généralement pas une bonne adhésivité avec les bitumes. Par contre, il est reconnu que les granulats alcalins, tels que le calcaire (de faible teneur en silice), adhèrent bien au bitume.

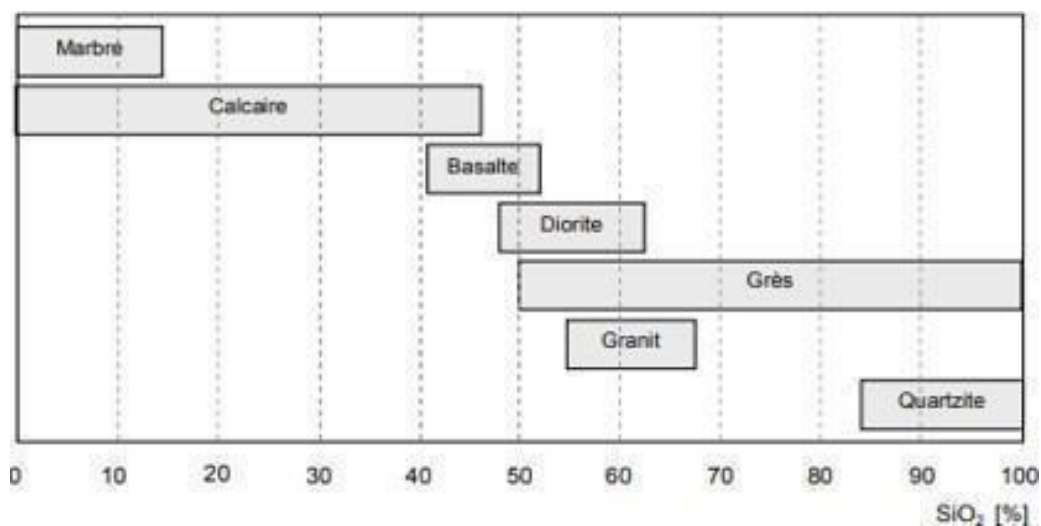


Figure 2.10: Classification simplifiée des roches en fonction de la teneur en silice (SiO_2) [15] .

2.5 Généralités sur les enrobés [16]

Le terme l'enrobé est plus général que celui de béton bitumineux, car il englobe des mélanges dont le liant n'est pas obligatoirement un bitume. (Goudron ou asphalte)

2.5.1 Définition

Un enrobé bitumineux est défini comme un mélange de liant bitumineux (5 à 7 % en masse), d'agrégats et de fines, les fines étant également appelées "filler".

2.5.2 Formulation de l'enrobé

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

Afin de formulé un enrobé bitumineux performant, des critères sont à prendre en compte : S'assurer que le mélange est suffisamment imperméable pour être durable, sans toutefois être trop maniable et être ainsi sujet à l'orniérage. Ce critère correspond à l'état du revêtement après le compactage effectué à l'étape de la construction. C'est dans cet état que les propriétés du mélange sont évaluées (densité brute, densité maximale, pourcentage de vides entre les granulats).

2.5.3 Qualités requises pour les enrobes bitumineux

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

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

2.5.4 Les essais sur les enrobés bitumineux

Pour avoir ces exigences, on doit procéder à des essais qui sont :

- ✓ Essai Duriez : [NF P 98-252-1].
- ✓ Essai Marshall : [NF P 98-251-2].
- ✓ La Presse à Cisaillement Giratoire (P.C.G): [NF P 98-252].
- ✓ L'essai d'orniérage : [NF P 98-253-1].
- ✓ L'essai de traction indirecte : [NF EN12697-23].
- ✓ L'essai de module complexe : [NF P 98-260-2].
- ✓ L'essai de fatigue : [NF P 98-261-1].

2.6 Les propriétés essentielles des enrobés [17]

Les enrobés doivent subir l'accroissement de l'intensité du trafic tout en résistant aux assauts des intempéries (froid, chaleur, pluie, etc.) et d'autres facteurs pouvant causer de la déformation et des dégradations de couche de roulement. Les enrobés doivent donc :

- Supporter les charges dues au trafic être confortables et sécuritaires.
- Protéger les différentes couches du corps de chaussée.

Les propriétés mécaniques essentielles des enrobés seront alors :

- Maniabilité.
- Résistance à l'orniérage.
- Résistance au ressuage.
- Résistance à la fissuration par fatigue.
- Résistance à la fissuration par retrait thermique.
- Sensibilité à l'eau.
- Résistance au vieillissement (oxydation).
- Résistance à l'arrachement (la perte de granulats).

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé une étude bibliographique sur : les sollicitations dans les chaussées composition de l'enrobe qualité requises pour les enrobés bitumineux les essais sur les enrobes bitumineux les propriétés essentielles des enrobés.

Chapitre 03 : Les bitumes

Modifiés

Chapitre 03: Les bitumes modifiés

3.1 Introduction

L'amélioration des propriétés des chaussées routières est une nécessité compte tenu de l'augmentation des volumes de trafic et des performances des véhicules. Cette amélioration a évolué grâce à l'introduction de nouvelles technologies et de nouveaux procédés, en particulier pour améliorer les produits bitumineux. Il s'agit d'un domaine qui a fait l'objet de recherches approfondies dans le monde entier au cours des dernières années.

Les polymères sont les modificateurs les plus fréquemment utilisés pour améliorer les propriétés de l'asphalte. Les polymères étendent la plage de température dans laquelle le liant peut résister à la fissuration thermique et à l'orniérage [18,19].

Les polymères augmentent la plage de température dans laquelle le liant résiste à la fissuration thermique, à l'orniérage et à l'endurance à la fatigue.

Ce chapitre expose d'une façon générale les bitumes modifiés, les polymères qui peuvent être ajoutés au bitume pour modifier les propriétés et le comportement du liant.

3.2 Objectifs de la modification des bitumes

Pour améliorer le comportement des bitumes aux températures de service, des mélanges complexes de bitume et de polymère, ont été réalisés. Les performances de ces liants dits "modifiés" sont également meilleures aux basses températures où ces derniers gardent en grande partie leur élasticité.

Cette modification vise à améliorer les propriétés de nombreux asphaltes et à les rapprocher le plus possible du liant "idéal" : [20]

- une cohesivité et une adhésivité améliorée.
- une susceptibilité thermique très faible dans toute la plage des températures d'utilisation, soit de - 20°C à +60°C.
- une faible viscosité aux températures de malaxage, de mise en œuvre et décompactage des bétons bitumineux.

- une résistance élevée à la déformation permanente, à la rupture et à la fatigue
une stabilité dans le temps et une résistance au vieillissement.

Il faut dire que l'utilisation réelle du bitume modifié dans la construction et l'entretien des routes dans le monde n'est qu'un faible reflet de l'importance qui lui est accordée dans la littérature technique.

3.3 Domaines d'emplois des bitumes modifiés [20]:

Le bitume modifié par des polymères est principalement utilisé dans les couches de roulement pour assurer la sécurité et le confort des usagers de la route et des résident en augmentant la résistance à la déchirure et à l'eau, en favorisant la cohésion, en réduisant le creusement des ornières et en assurant la durabilité des propriétés de la surface de la route en cas de trafic intense. À cette fin, des enrobés bitumineux ont été mis au point pour répondre aux besoins (par exemple, enduits superficiels routiers, couches minces, enrobés ouverts et drainants, couches de roulement pour les routes à forte circulation membranes anti-fissuration, revêtements imperméables pour les structures de génie civil).

Dans le cas des recouvrements l'objectif est d'obtenir un film de liant relativement épais autour des gravillons pour assurer la durabilité de ces enrobés bitumineux discontinus, plus exposés aux impacts environnementaux et de trafic que les enrobés bitumineux conventionnels plus fermés, tout en cherchant à éliminer les phénomènes de ressuage.

Dans le cas des mélanges ouverts (principalement les mélanges de drainage), l'objectif est d'améliorer la cohésion (augmentation de la résistance à l'effondrement) et l'adhérence aux agrégats (réduction du risque d'arrachement à l'eau).

Pour les mélanges bitumineux d'une épaisseur supérieure à 5 cm, la principale préoccupation est la résistance au creusement des ornières, qui peut être résolue en utilisant un liant modifié.

Dans le cas des couches de base des chaussées, l'objectif est d'améliorer la résistance à la fatigue de l'enrobé bitumineux face aux charges de trafic répétées et d'assurer une certaine flexibilité.

Les liants modifiés par des polymères peuvent répondre à tous ces objectifs, à la fois en termes de propriétés mécaniques dans une gamme de plasticité plus large et en termes de réduction de la sensibilité thermique.

3.4 Les différents agents modifiants [21]:

- ✓ **Les polymères thermodurcissables** : qui durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique (structure réticulées).
- ✓ **Les polymères thermoplastiques** : qui se fluidifient et deviennent malléables sous l'effet de la chaleur, de façon réversible.
- ✓ **Les polymères thermoplastiques sont classés en deux catégories** : les élastomères et les plastomères, qui diffèrent par leur comportement (rigidité, déformabilité et résilience) aux températures de fonctionnement.
- ✓ **Les plastomères** : la déformation élastique s'accompagne d'une déformation permanente qui peut être relativement importante.
- ✓ **Les élastomères** : présentant l'élasticité du caoutchouc à la température ambiante.
- ✓ **Les polymères de synthèse** : il s'agit notamment de la poudrette de caoutchouc et des latex.

3.5 Principaux polymères utilisés en génie civil

Le tableau ci-dessous présente les principaux modificateurs de bitume utilisés dans la construction routière, regroupés par catégorie.

Tableau 3.01: Principaux agents chimiques utilisés dans la modification des bitumes [21].

Polymères thermoplastiques élastomères	Copolymère styrène-butadiène-styrène SBS
	Copolymère styrène-isoprène-styrène SIS
	Styrène-butadiène SB
	Copolymère statistique styrène-butadiène SBR
Polymères thermoplastiques plastomères	Copolymère éthylène-acétate de vinyle EVA
	Copolymère éthylène-acrylate de méthyle EMA
	Copolymère éthylène-acrylate de butyle EBA
	Polyisobutylène PIB
Latex	Polychloroprène
	Caoutchouc SBR
	Caoutchouc naturel
Poudrette de caoutchouc	

3.6 Procèdes de modification

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

3.6.1 Le procédé humide « Wet Process »

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

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

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

La durée de mélange (agitation mécanique, vitesse de malaxage est de 300–1500 tr/min) varie de 1 heure à 12 heures selon le type de polymère.

3.6.2 Le procédé sec « Dry Process »

Cette technique consiste à introduire le polymère directement dans le malaxeur de la centrale d'enrobage avec le bitume et les granulats pour la fabrication de l'enrobé à chaud.

Les polymères utilisés dans ce type de procédé sont les polymères incompatibles avec le bitume. Dans ce cas, ces polymères Laissent refroidir pour former une dispersion.

De plus, des polymères compatibles tels que des élastomères ou des plastomères peuvent ajouter directement en centrale. Le temps de mise en contact direct entre le polymère et le bitume est ici totalement insuffisant pour assurer le gonflement du polymère par les Maltènes du bitume.

3.7 Domain d'application des bitumes modifiés [21]:

Le bitume modifié a été développé pour les applications suivantes Couches de surface minces (enduit superficiel, mélange bitumineux mince BBM 3-4 cm, BBTM 2-3 cm, BBUM 1-2 cm...). (BBM 3-4 cm, BBTM 2-3 cm, BBUM 1-2 cm...) ;

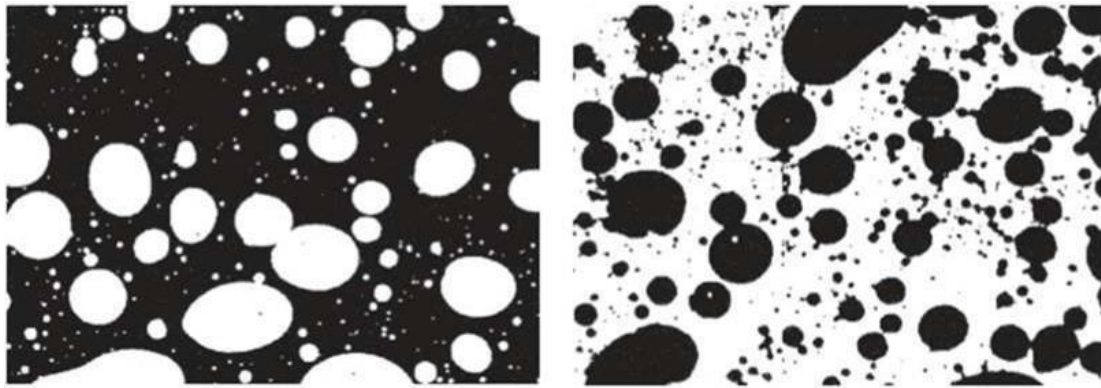
Enrobé drainant :

- ✓ Couche de roulement sur les routes très fréquentées.
- ✓ Couche de base sur les routes à forte circulation.
- ✓ Membranes anti-fissures et chapes d'étanchéité.
- ✓ Chapes d'étanchéité pour ouvrages d'art.

3.8 Essais spécifiques aux liants modifiés

3.8.1 Observation microscopique

C'est la technique la plus utilisée pour apprécier l'état de dispersion des phases bitume et polymères. Elle est basée sur le principe que les polymères, gonflés par certains composants du bitume auquel ils sont ajoutés, sont fluorescents lorsqu'ils sont éclairés par une lumière UV. Ils réémettent une lumière jaune-vert alors que la phase bitume restante apparaît noire [21].



Bitume modifié par 5% de SBS

Bitume modifié par 7% d'EVA

Figure 3.01: Observation de la microstructure d'un bitume modifié par microscopie de fluorescence (0.5x0.7mm) [21].

3.8.2 Stabilité au stockage

Durant le stockage à haute température, le polymère ne doit pas se séparer de la phase bitumineuse et le mélange ne doit pas changer excessivement de consistance.

L'essai de stabilité au stockage fournit des informations utiles pour les mesures préventives pendant le stockage et le transport des bitumes modifiés.

Le test de stabilité au stockage peut être mesuré à l'aide de l'essai dit « essai de décantation ». Le principe de cet essai est de maintenir un tube contenant le liant en position verticale dans un four pendant un temps déterminé, puis le refroidir et de procéder à son découpage en trois parties égales. La séparation éventuelle des phases est appréciée par la détermination de certaines caractéristiques (en premier lieu la TBA) sur les parties supérieures et inférieures.

Si la différence entre les points de ramollissement des parties est inférieure à 2,5°C le bitume polymère est considéré comme stable.

En général la stabilité au stockage des bitumes dépend de divers facteurs, tel que la nature et la teneur en polymère, la composition chimique et la structure du bitume et du polymère, la différence dans la densité et la viscosité entre le bitume et le polymère et le temps et la vitesse d'agitation [22].

3.8.3 Essai force-ductilité [23]:

Cet essai est utilisé pour examiner les caractéristiques de traction d'éprouvettes de bitume dans des conditions définies de vitesse d'allongement et de température.

Les résultats de cet essai permettent d'évaluer les caractéristiques de cohésion des bitumes modifiés et des liants bitumineux.

L'essai est réalisé dans un bain d'eau habituellement à 5°C, mais d'autres températures peuvent être utilisées.

3.9 La modification par des déchets en en matières caoutchoucs: [24]

Dans l'histoire de la modification du bitume, le caoutchouc est le premier modificateur, comme le caoutchouc naturel (NR), le caoutchouc styrène-butadiène (SBR) et caoutchouc pour les pneus.

Les déchets de caoutchouc constituent une partie substantielle des déchets solides du monde. La plupart de ces déchets sont constitués de pneus post-consommation de voitures et de camions.

Certains des déchets de caoutchouc générés dans le monde sont utilisés pour le recyclage, le reste étant stocké ou mis en décharge, ce qui crée des problèmes environnementaux et des risques pour la santé.

Il existe deux procédés de fabrication d'enrobés contenant de la poudrette de caoutchouc à sec et par voie humide. Nous allons mentionner quelques travaux qui utilisent du caoutchouc comme un modificateur du bitume:

- ❖ Soudani (2017) a montré que l'ajout du déchet industriel de type NBR sous forme de poudrette (issue de broyage des semelles de chaussure) améliore les propriétés viscoélastique du bitume.
- ❖ Magramane en 2009 a étudié l'influence de la modification des bitumes avec la poudrette de caoutchouc (les pneus usagés). D'une part sur les propriétés physiques, chimiques et mécaniques du bitume et des enrobés et d'autre part sur le comportement rhéologique au fluage statique des enrobés bitumineux.

L'étude montre que :

- La modification du bitume avec du caoutchouc améliore ses caractéristiques physiques et mécaniques (pénétrabilité, TBA, ductilité, susceptibilité thermique).
- La modification des bitumes améliore le comportement des enrobés bitumineux.

Cette amélioration se traduit par :

- ✓ Une augmentation de la stabilité, la compacité, et le quotient Marshall.
 - ✓ Une diminution du fluage Marshall.
 - ✓ Une augmentation de la résistance aux déformations de fluage.
 - ✓ Une atténuation de la déformation initiale de l'enrobé bitumineux.
- ❖ Le vieillissement du bitume modifié par du caoutchouc est également largement étudié dans la littérature. Selon les résultats obtenus dans la littérature, l'addition de caoutchouc améliore sensiblement la résistance au vieillissement des liants.

3.10 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur les études de modification des bitumes par des polymères de manière générale, et les déchets recyclés en particulier comme la poudrette de caoutchouc. Nous nous sommes donc limités dans cette synthèse à des résultats utilisables pour :

- Les différents agents de la modification.
- La compatibilité entre le bitume et le polymère.
- Le mécanisme de modification.

Partie II : Etude Expérimental

Chapitre 4 : Matériaux utilisés et Méthodes d'essais

Chapitre 04 : Matériaux utilisés et Méthodes d'essais

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents matériaux de base utilisés et le mode de préparation des bitumes modifiés. Ensuite, nous allons décrire les principaux essais utilisés pour caractériser les bitumes modifiés en présentant pour chaque essai le dispositif normalisé utilisé et le mode opératoire suivi. L'essai de pénétrabilité et de température de ramollissement ont été utilisés pour la caractérisation physique, Le RTFOT et le PAV pour la simulation du vieillissement à court et à long-terme,

4.2 Présentations des Matériaux

4.2.1 Le bitume

L'étude expérimentale a été effectuée sur un bitume de classe 35/50, souvent utilisé pour la réalisation des couches de surface des routes et des aérodrômes en Algérie.



Figure 4.01: Le bitume

4.2.2 Poudrette de caoutchouc NBR (Acrylonitrile butadiene rubber)

Il s'agit du caoutchouc acrylonitrile butadiène (NBR) obtenu à partir du broyage des semelles de chaussure. C'est un déchet industriel de couleur noirâtre sous forme de poudrette provenant de la société d'application d'élastomère (Alger).



Figure 4.02: Poudrette de caoutchouc NBR.

L'analyse granulométrique montre que la poudrette de caoutchouc est constituée de grains inférieurs à 0,8 mm. La densité de la poudrette est de $1,25 \text{ g/cm}^3$.

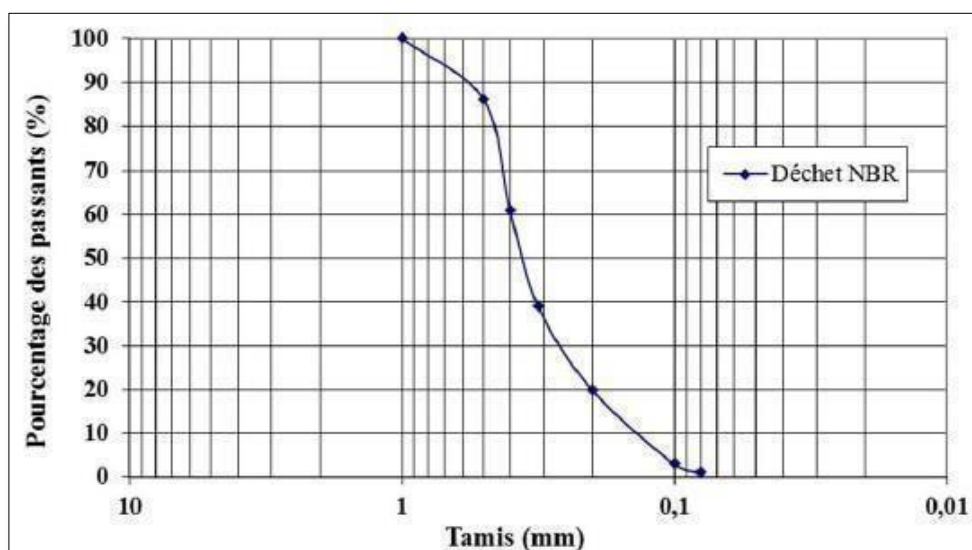


Figure 4.03: Granulométrie du NBR.

4.3 Essais de caractérisation

Les bitumes modifiés et le bitume de base ont été caractérisés en utilisant les tests suivants :

- Tests conventionnels (pénétrabilité et TBA),
- Des essais de simulation des vieillissements tels que RTFOT et PAV,

4.3.1 Essais conventionnels empiriques

4.3.1.1 Pénétrabilité (NF EN 1426)

La pénétrabilité du bitume représente la mesure de la pénétration (exprimée en dixièmes de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C. La pénétrabilité exprimée en 1/10^{ème} de millimètre permet directement de caractériser la consistance. Dans ces conditions, plus un bitume est dur, plus la valeur de sa pénétrabilité est faible.

L'essai de pénétrabilité peut être considéré comme une mesure indirecte de la viscosité du bitume à 25°C.

La détermination de la pénétrabilité à 25°C ne pose pas en général de problème pour la plupart des mélanges à base de SBS et EVA. Pour ces cas, la répétabilité de cet essai est comparable avec celle obtenue avec des bitumes purs.



Figure 4.04: Pénétrômetre analogique.

4.3.1.2 Température de ramollissement Bille Anneau (NF EN 1427)

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



Figure 4.05: Point de ramollissement

4.3.2 Les essais de simulation des vieillissements

4.3.2.1 Protocole de vieillissement à court terme (Rolling Thin-Film Oven Test, NF EN 12607-1)

Afin de prévoir l'évolution du bitume pendant l'enrobage, une méthode de simulation du vieillissement a été mise au point et normalisée, c'est le RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test).

A l'enrobage, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour du granulat, favorisant ainsi un vieillissement du liant. L'oxydation chimique est violente car l'apport énergétique est intense. La simulation en laboratoire de cette évolution du bitume est usuellement réalisée par l'essai RTFOT, car il reproduit bien l'oxydation et les pertes de matières volatiles dans la centrale d'enrobage puis lors de la mise en œuvre.

Le bitume est placé dans des cylindres en verre dont l'axe est horizontal (Figure 4.6). Ces cylindres sont eux-mêmes fixés sur un tambour tournant horizontalement sur son axe. Le bitume est exposé à des courants d'air chaud à la température 163 °C pendant 75 minutes dans un appareil approprié. On mesure ensuite les propriétés habituelles sur le liant vieilli: 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'enrobé, que de celles obtenues sur le bitume d'origine.

La dureté du bitume traité est déterminée par la mesure de la pénétrabilité. Cet essai est utilisé par SHRP pour simuler le vieillissement du liant lors du malaxage et de la mise en place d'un enrobé.

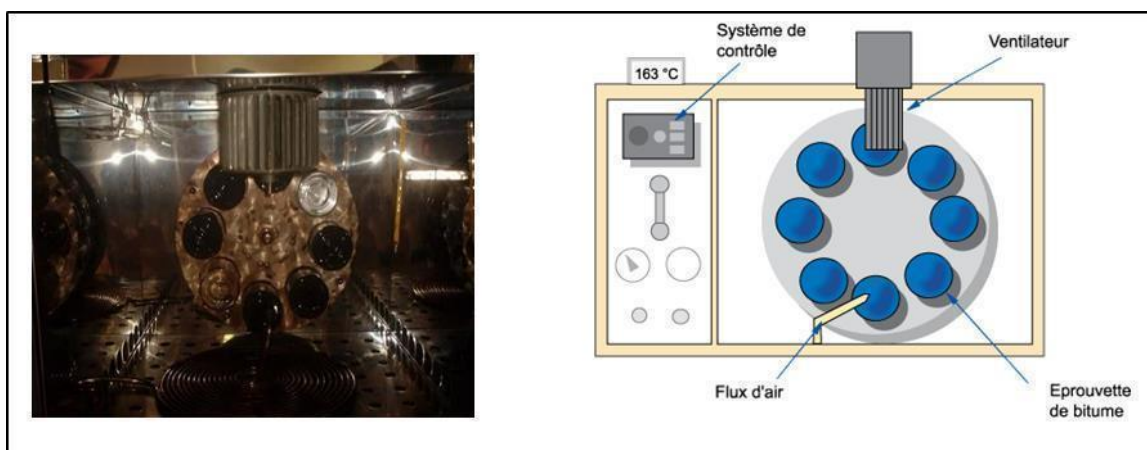


Figure 4.06: L'étuve RTFOT pour simuler ces étapes de vieillissement à court terme NF EN12607-1.

4.3.2.2 Protocole de vieillissement à long terme « Pressure Aging Vessel » (PAV) (NF EN 14769)

Cet essai est employé pour permettre 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), une pression d'air de 20 bars est appliquée dans le récipient. Après une durée de vingt heures (qui constitue un avantage important de l'essai), la pression est diminuée lentement (8 à 10 minutes). Les plateaux d'éprouvettes sont placés ensuite dans un four à 163°C pendant 30 minutes. 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.

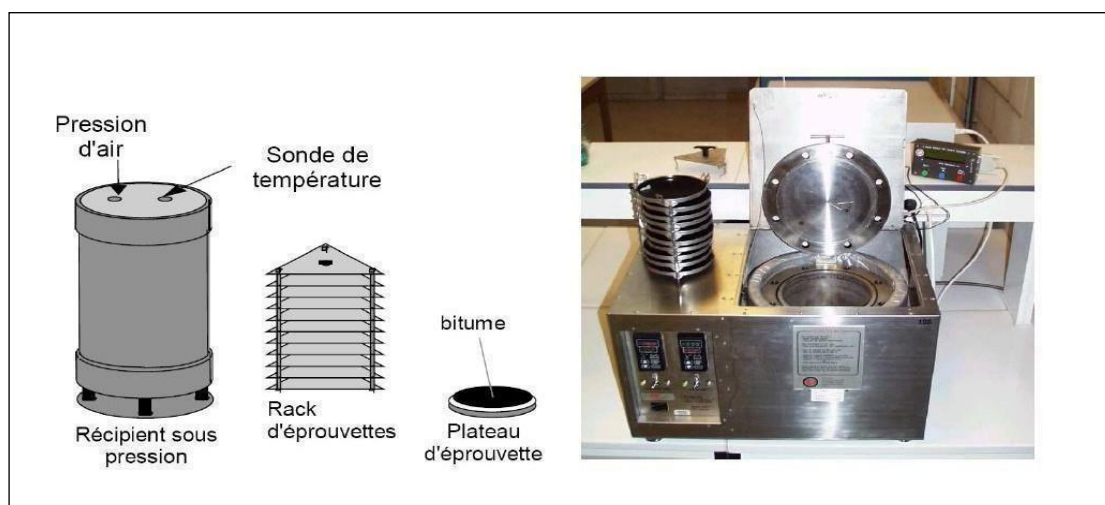


Figure 4.07: Vieillessement long-terme accéléré NF EN 14769

L'essai de vieillissement au PVA est applicable aux bitumes modifiés par des polymères sans difficulté particulière. Ce vieillissement artificiel dans le laboratoire correspond au vieillissement du revêtement de la chaussée d'environ 8 ans.

4.3.3 Essai de stabilité au stockage

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



Figure 4.08: Prélèvement d'éprouvettes pour l'essai de stabilité au stockage.

4.4 Caractérisation de bitume de base

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

Tableau 4.01: Propriété physique de bitume.

Type d'essai		Résultat	Spécification
Pénétrabilitéà 25 °C (1/10 mm)		39	35 – 50
Température bille et anneau «TBA » (°C)		53	50-58
Indice de pénétrabilité « IP »		-1.032	$-3 \leq IP \leq +7$
Ductilité (cm)		>100	100
Après RTFOT	Pénétrabilitéà 25 °C (1/10 mm)	26	
	TBA (°C)	60	> 52
	Pénétrabilitérestante [%]	66.66	> 53
	ΔTBA [°C]	7	< 8

4.5 La modification

Les bitumes modifiés ont été préparés à partir du bitume de classe **35/50** et de (déchets industriels) poudrette de caoutchouc (**NBR**). Les teneurs en polymère utilisées pour la modification sont **1, 3 et 5%** en poids du bitume. Le mélange bitume - polymère a été malaxé à une température de **180 °C** avec une vitesse de **600 tr/ min** pendant **1h. 2h.3h.**

**Figure 4.09:** Appareillage de modification.

4.6 Caractérisation du NBR par FTIR.

La figure suivante montre le spectre infrarouge du déchet NBR. L'analyse du spectre montre une large bande à environ 3424 cm^{-1} qui est due à la présence de molécules d'OH non liées. Ceci est probablement causé par l'absorption de l'humidité. Une forte présence des groupements C-H sur les bandes de 1435 cm^{-1} , 2923 cm^{-1} , 2852 cm^{-1} et 1035 cm^{-1} ces groupements sont ceux d'une chaîne macromoléculaire (polymère).

Les groupes C-C (1652 cm^{-1}) sont également présents (butadiène). Nous pouvons également remarquer l'existence d'un groupe (C-S) qui peut être due à un traitement avec des dérivés de soufre. Des groupes nitrile (-C-CN) sont également détectés (468 cm^{-1})

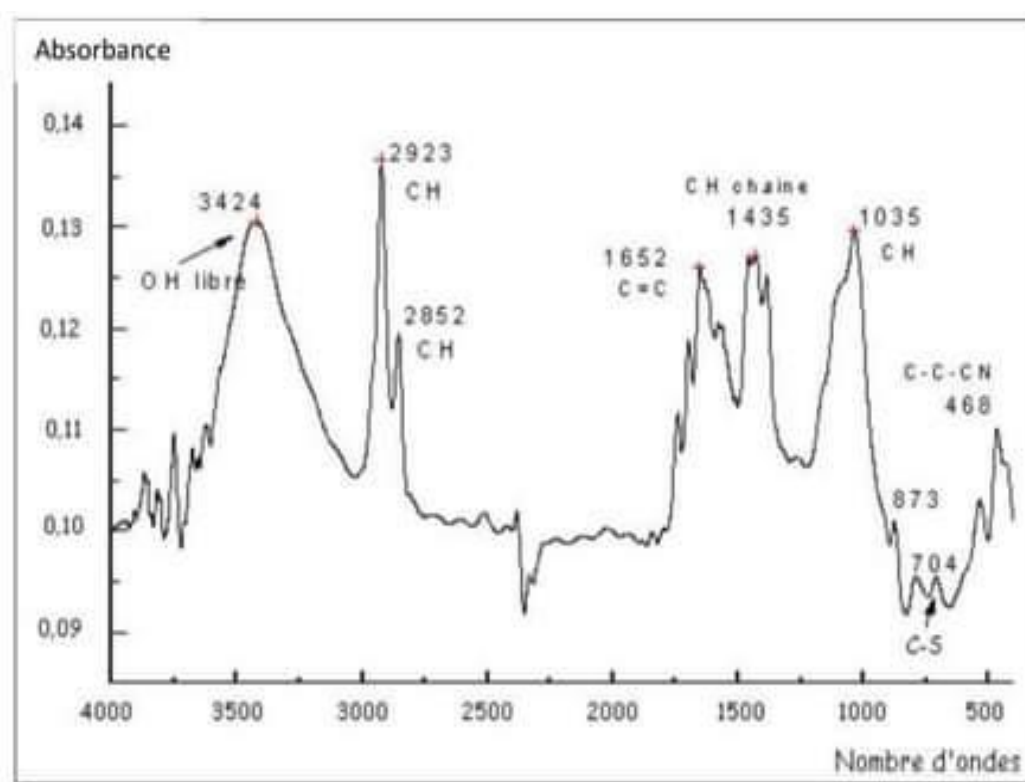


Figure 4.10: Spectre FTIR du NBR

4.7 Conclusion

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

Chapitre 5 : Effet du NBR sur les propriétés des bitumes modifiés

Chapitre 05: Effet du NBR sur les propriétés des bitumes modifiés

5.1 Introduction

Ce chapitre montre l'effet de l'ajout de déchets locaux à savoir, les poudrettes de caoutchouc (NBR) sur les propriétés physiques d'un bitume de classe 35/50. Les bitumes modifiés ont été caractérisés par des essais conventionnels, tel que la pénétrabilité à 25 °C, la température de ramollissement Bille-Anneau et la susceptibilité thermique.

5.2 Influence de la poudrette (NBR) sur les bitumes

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

5.2.1 Pénétrabilité à 25 °C

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

Tableau5.01 : Les résultats de la pénétrabilité pour les différents mélanges.

Temps de malaxage	1h	2 h	3 h
Bitume pur	38	36	33
1%NBR	35	33	30
3%NBR	32	29	27
5% NBR	29	27	25

5.2.1.1 Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité

L'effet du temps du malaxage sur la pénétrabilité des bitumes sont représentés par la figure 5.01:

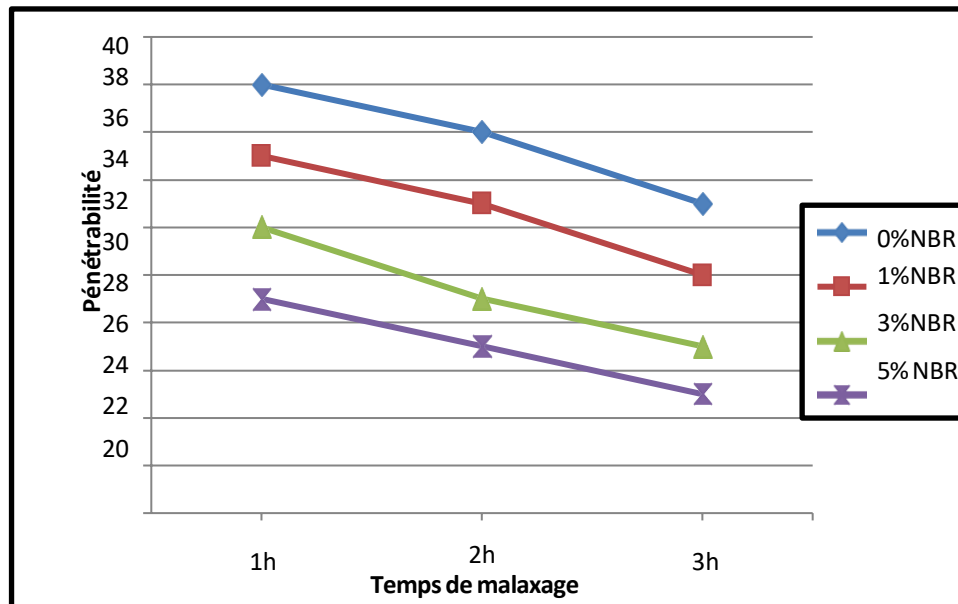


Figure 5.01 : Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité.

Les résultats de la figure 5.1 montrent que la pénétrabilité diminue avec l'augmentation du temps de malaxage, et cela pour toutes les teneurs en NBR.

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

5.2.1.2 Influence de la teneur en NBR sur la pénétrabilité

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

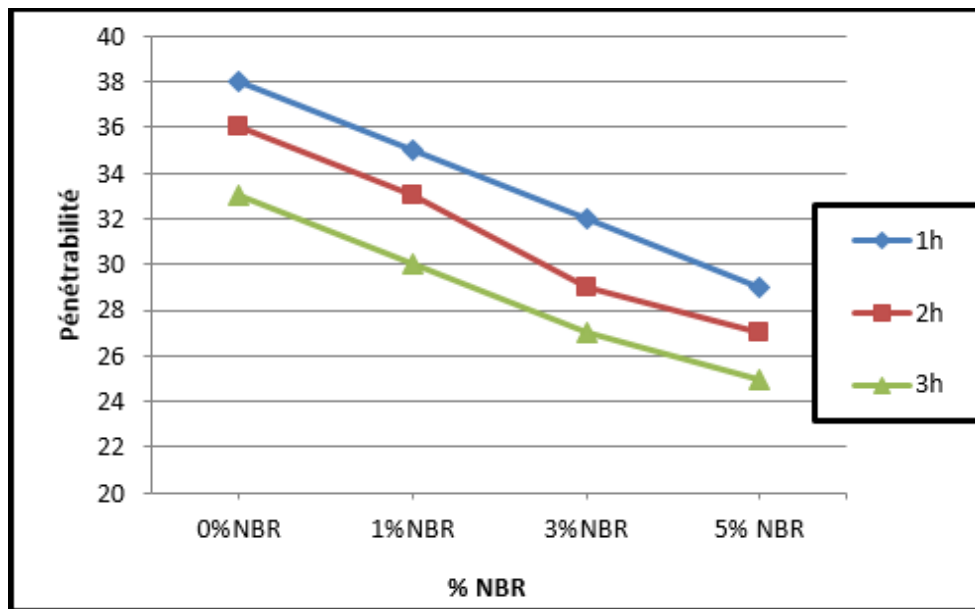


Figure 5.02 : Influence de la teneur en NBR sur la pénétrabilité à 25 °

Les résultats de la figure 5.02 montrent que la pénétrabilité diminue en fonction de la teneur en polymères. Comparativement au bitume pur, les bitumes modifiés sont plus consistants ce qui montre que les bitumes modifiés par les déchets peuvent présenter un meilleur comportement à haute température. Globalement, l'augmentation de la rigidité du bitume après l'ajout de déchets NBR peut améliorer la résistance aux déformations à hautes températures.

5.2.2 Température de ramollissement Bille Anneau

Les résultats de la TBA en fonction de la durée de malaxage et de la teneur en poudre de caoutchouc sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau 5.02 : Les résultats de la TBA pour les différents mélanges

Temps de malaxage	1h	2 h	3 h
Bitume pur	52	54	56
1%NBR	54	56	58
3%NBR	56	59	61
5% NBR	59	61	64

5.2.2.1 Influence du temps de malaxage sur la TBA

L'effet du temps du malaxage sur la TBA des bitumes sont représentés par la figure 5.03

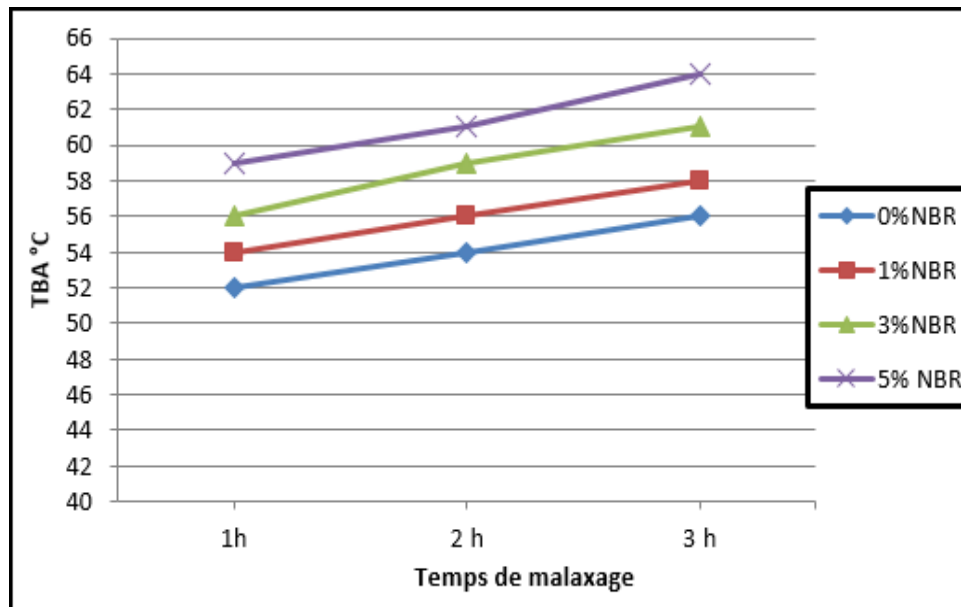


Figure 5.03 Influence du temps de malaxage sur la TBA

La figure 5.03 montre que pour toutes les teneurs, les courbes présentent en général la même allure.

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

La TBA des bitumes augmentent après la modification ce qui indique que l'ajout de polymères (NBR) améliore les caractéristiques des bitumes à haut températures.

5.2.2.2 Influence de la teneur en NBR sur la TBA

Les résultats d'évolution de la TBA en fonction de la teneur en poudre sont représentés sur la figure 5.04

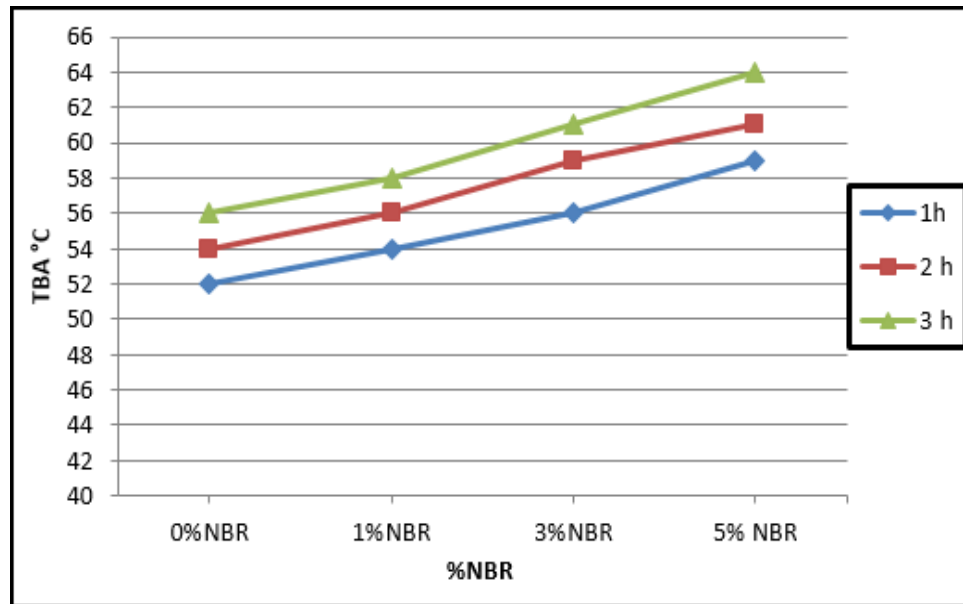


Figure 5.04 Influence de la teneur en NBR sur la TBA

Les résultats de la figure 5.04 montrent que la TBA augmente avec l'augmentation de la teneur en NBR. Les résultats de la température de ramollissement indiquent clairement que l'additif utilisé améliore les caractéristiques du bitume à hautes températures. Selon certaines études, existe une relation proportionnelle entre la TBA et la résistance à l'orniérage. En effet, plus la TBA augmente plus la résistance à l'orniérage augmente. Ceci montre que les bitumes modifiés par NBR augmentent la résistance à l'orniérage des chaussées bitumineuses fabriquées à base de ces déchets.

5.2.3 Susceptibilité thermique (IP)

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

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

Pfeiffer et van Doormaal en 1936 ont défini la susceptibilité thermique des bitumes en se basant sur l'indice de pénétrabilité (IP) et ont précisé que cet indice peut prendre des valeurs de -3 pour les bitumes très susceptibles à +7 pour les bitumes à faible susceptibilité thermique[24].

Les résultats de la susceptibilité thermique en fonction de la teneur en polymères (NBR) sont donnés dans le tableau 5.03 et schématisés dans la figure 5.05.

Tableau 5.03: Les résultats de la susceptibilité thermique

IP	0%	1%	3%	5%
NBR 2h%	-1.26	-0.76	-0.39	-0.15

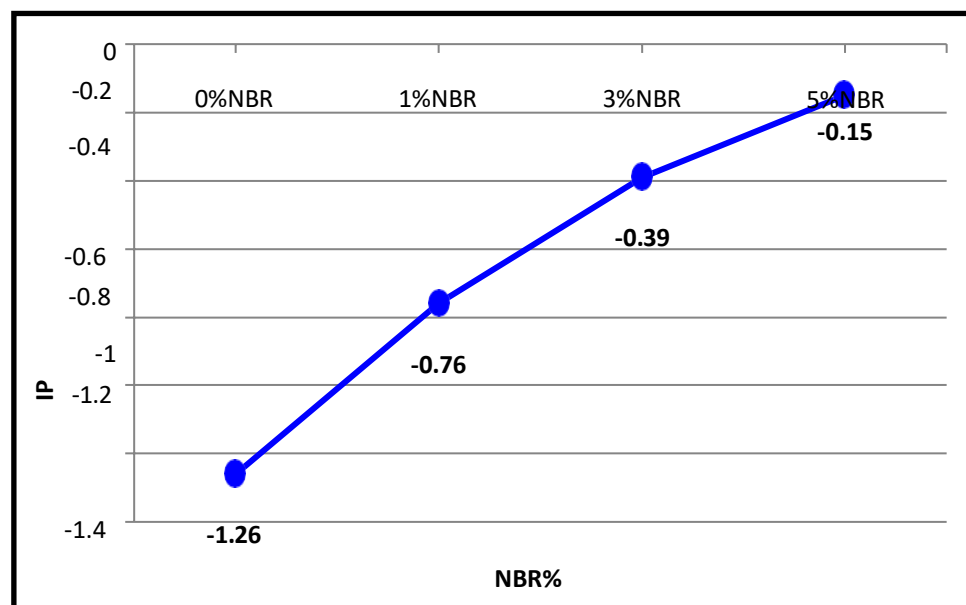


Figure 5.05: La susceptibilité thermique des bitumes modifiés.

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

Le bitume modifié aux polymères (BmP) est un matériau de haute performance utilisée pour la construction et l'entretien des routes. Cependant, sa stabilité au stockage et son comportement de séparation de phase ne sont pas encore suffisamment compris et doivent être étudiés pour une application plus réussie et durable du bitume modifié.

La stabilité des bitumes consiste à remplir des tubes en aluminium (hauteur 15cm, diamètre 4cm) avec du bitume, puis placer ces derniers verticalement dans un four à 165°C pour une durée de 48 heures. Après refroidissement, le tube est divisé en trois parties égales ; le point de ramollissement est déterminé pour les parties du haut et du bas.

Tableau 5.04 : Les résultats de la stabilité au stockage des bitumes modifiés.

	Point de ramollissement °C			Commentaires
	Haut	Bas	Différence	
5% NBR (2h)	62	60	2	>2.5 stable

On observe qu'il y a une différence acceptable entre les valeurs de TBA des parties supérieure et inférieure du tube, ce qui indique que le bitume -NBR conserve son homogénéité après deux jours de stockage. On conclut que le NBR est bien dispersé dans le bitume et l'échantillon ne subit pas de séparation de phase pendant le stockage.

5.3 Conclusion

L'utilisation du déchet du caoutchouc (NBR) comme modifiant des liants bitumineux a apporté une amélioration sur les performances de la consistance du bitume pur, Cette amélioration est traduit par :

- La diminution de la pénétrabilité,
- L'augmentation du point de ramollissement,
- La diminution de la susceptibilité thermique,

Le degré d'influence varie en fonction de la quantité du modifiant ajouté et de la durée de malaxage.

Chapitre 06 : Etude des bitumes modifiés au vieillissement

Chapitre 06: Etude des bitumes modifiés au vieillissement

6.1 Introduction

En raison de sa bonne propriété viscoélastique, le bitume est largement utilisé comme liant d'agrégats dans l'enrobé bitumineux destiné aux chaussées. Le bitume étant l'unique composant déformable de l'enrobé, ses performances peuvent être dégradées par la chaleur, l'oxygène ou l'irradiation ultraviolette (UV).

Le vieillissement des bitumes sur route se traduit par des détériorations de la chaussée (fissuration, orniérage,...) provoquées par des changements du comportement et de la composition du liant.

L'effet de la poudrette de caoutchouc (NBR) sur le vieillissement du bitume à court et à long terme est exposé dans ce chapitre. Pour ce faire, les bitumes purs et modifiés ont été soumis à un processus de vieillissement à court terme en utilisant l'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) et à long terme en utilisant l'essai PAV (Pressure Ageing Vessel). Le processus de vieillissement réversible «durcissement» du bitume a été caractérisé par des tests physiques tels que la pénétration, le point de ramollissement.

6.2 Caractéristiques physiques des bitumes modifiés après le vieillissement

6.2.1 Pénétrabilité

Les résultats de la pénétrabilité en fonction de la teneur en (NBR) avant vieillissement, après RTFOT et après PAV sont donnés dans le tableau 6.01 et schématisés par la figure 6.01 (durée de malaxage 2 heures).

Tableau 6.01: Pénétrabilité à 25°C avant et après vieillissement pour les différents mélanges.

Pénétrabilité	Bitume pur	1%NBR	3%NBR	5%NBR
Avant	39	33	29	27
RTFOT	26	24	22	20
PAV	22	20	18	15

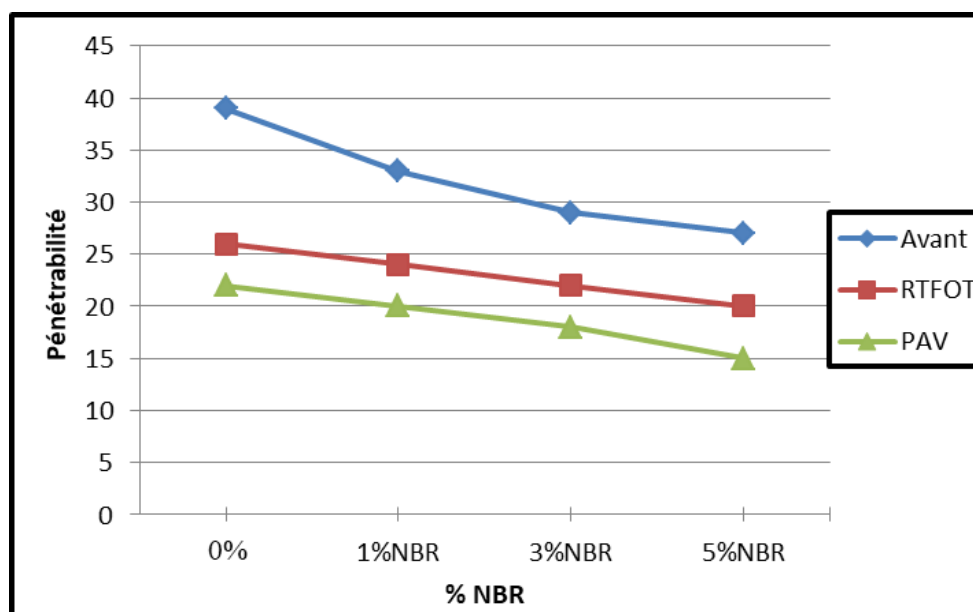


Figure 6.01: Pénétrabilité avant et après le vieillissement.

La figure 6.1 montre que la pénétrabilité des bitumes diminue considérablement après le vieillissement à court et à long terme en raison de la durcissement physique des liants, qui est causé par l'évaporation des composants volatils du bitume.

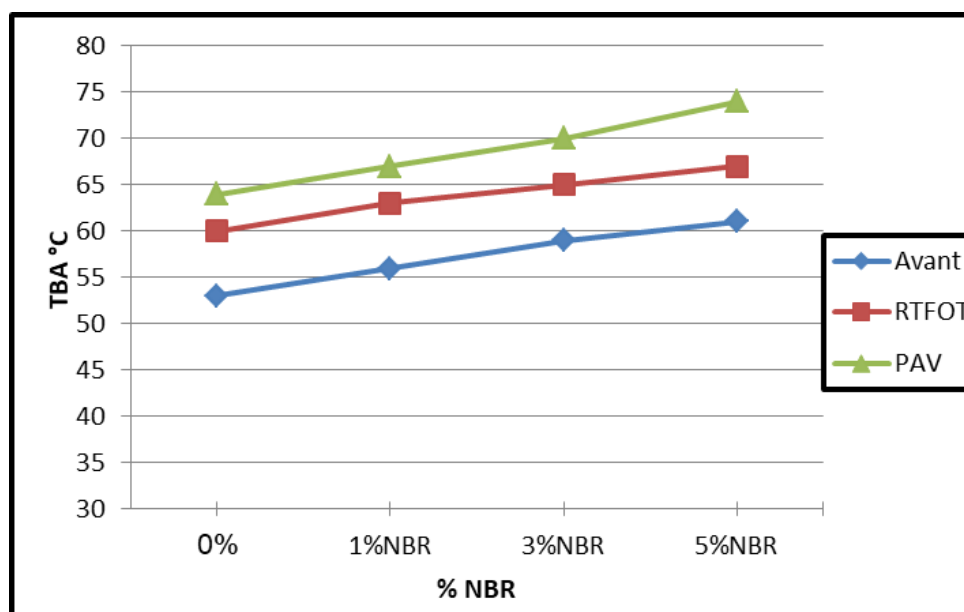
Comparativement au bitumen pur (0% NBR), la différence entre les valeurs de pénétrabilité avant et après RTFOT diminue après l'ajout des déchets industriels (NBR) indiquant que les déchets augmentent la résistance au durcissement. Concernant le vieillissement à long terme, on peut remarquer que la différence entre la variation de la pénétrabilité RTFOT et PAV est plus grande que celle entre avant et après RTFOT montrant que le processus de durcissement est plus important à long terme, lors de la mise en service de l'enrobé bitumineux.

6.2.2 Température bille et anneau (TBA)

Les résultats de la TBA pour les différents mélanges après leur passage au RTFOT et au PAV sont donnés par le tableau 6.02 et schématisé par la figure 6.02.

Tableau 6.02: TBA°C avant et après vieillissement pour les différents mélanges.

TBA°C	Bitume pur	1%NBR	3%NBR	5%NBR
Avant	53	56	59	61
RTFOT	60	63	65	67
PAV	64	67	70	74

**Figure 6.02 :** TBA avant et après le vieillissement.

Les résultats de la figure 6.2 montrent que la température de ramollissement augmente après RTFOT et PAV. Comparativement au bitume pur, la différence entre les valeurs de TBA avant et après RTFOT diminue après l'ajout de déchets, montrant que les déchets NBR augmentent la résistance au vieillissement par durcissement, et par voie de conséquence une meilleure durabilité des chaussées. La différence entre la variation de TBA entre RTFOT et PAV est plus grande à celle entre Avant et après RTFOT montrant que le processus de durcissement sur la TBA est plus important à long terme, lors de la mise en service de l'enrobé bitumineux.

6.3 Susceptibilité thermique

Les résultats de l'indice de pénétrabilité (IP) en fonction de la teneur en additif avant et après vieillissement des bitumes modifiés sont présentés dans la figure 6.3.

Selon les résultats de la figure 6.3, on observe une augmentation de l'indice de pénétrabilité après le vieillissement pour le bitume pur et les bitumes modifiés.

Comparativement au bitume pur, l'indice de pénétrabilité augmente considérablement après RTFOT et après PAV pour les bitumes modifiés. L'augmentation de l'IP après RTFOT et après PAV montre que les bitumes modifiés sont moins susceptibles à la variation thermique, ce qui indique que les bitumes modifiés présentent une meilleure résistance au vieillissement, à court et à long terme

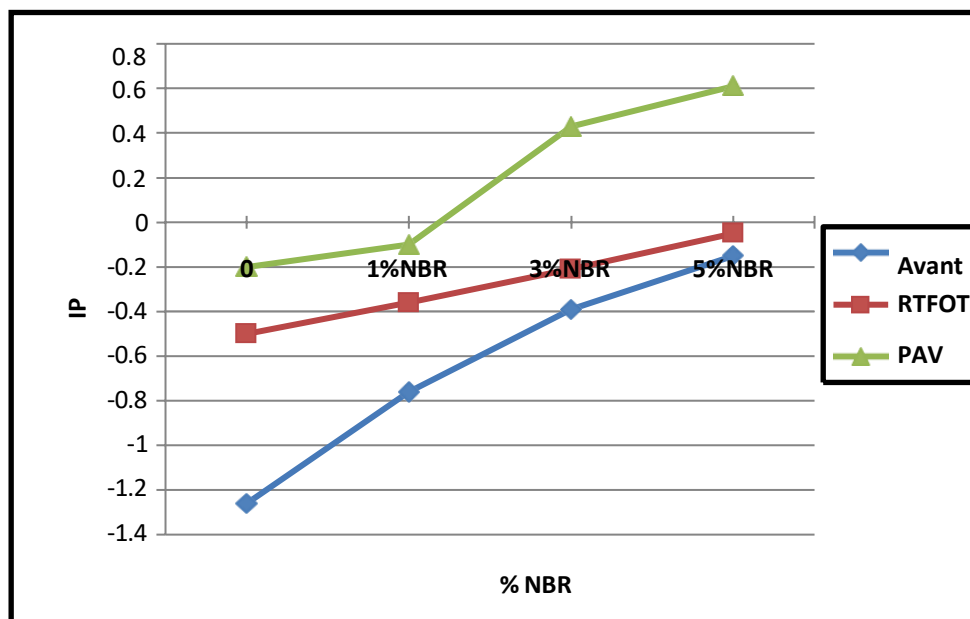


Figure 6.03: Indice de pénétrabilité des bitumes modifiés avant et après vieillissement.

6.4 Influence de la vitesse de malaxage sur la consistance (avant et après vieillissement)

Nous avons adopté les paramètres de modification suivants :

- Une température du mélange de $180 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Une vitesse de malaxage : 600 tr/min, 1000 tr/min et 1500 tr/min
- Une durée de malaxage de 2 heures.
- Le teneur en NBR est 5%

Les résultats de la pénétrabilité pour chaque vitesse de malaxage sont présentés dans le tableau 6.03 et schématisé par la figure 6.04.

Tableau 6.03: Influence de la vitesse de malaxage sur la pénétrabilité

pénétrabilité	600 Tr/min	1000 Tr/min	1500 Tr/min
Avant	27	25	22
RTFOT	20	18	14
PAV	15	14	11

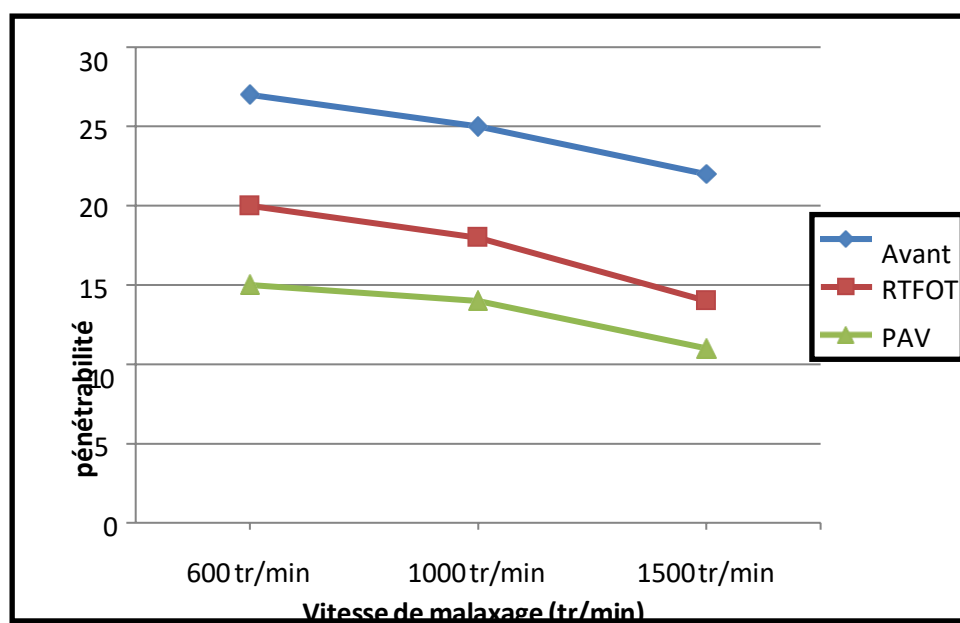


Figure 6.04: Influence de la vitesse de malaxage sur la pénétrabilité avant et après vieillissement.

Le figure 6.04 montrent que :

- ☒ La pénétrabilité diminue en fonction de la vitesse de malaxage avant le vieillissement ce qui indique à l'augmentation de la consistance du bitume.
- ☒ La pénétrabilité diminue en fonction de la vitesse de malaxage après le vieillissement ce qui indique à l'augmentation de la résistance au vieillissement

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a examiné le processus de durcissement du bitume de base et des bitumes modifiés en se basant sur les caractéristiques physiques des liants avant et après leur vieillissement. Selon les résultats, on observe une augmentation significative de la dureté du bitume après son vieillissement, ce qui peut être expliqué par une variation significative des valeurs de pénétrabilité et du point de ramollissement.

L'impact du vieillissement à long terme et à court terme varie selon les bitumes testés. L'impact du vieillissement après PAV est beaucoup plus significatif que celui du vieillissement après RTFOT. L'augmentation de l'indice de pénétrabilité IP du bitume après vieillissement a pour conséquence la diminution de la susceptibilité thermique du bitume, ce qui montre que le vieillissement réduit la susceptibilité thermique des bitumes.

Conclusion générale

La plupart des chaussées contenant du bitume conventionnel souffre du problème de durabilité en raison de la mauvaise performance des matériaux de revêtement et la croissance sans cesse du trafic, conjuguée aux conditions climatiques agressives.

Le mélange bitumineux doit être suffisamment flexible à basse température de service pour éviter la fissuration de la chaussée et être suffisamment rigide à haute température de service pour éviter l'orniérage.

Dans ce memoire nous nous sommes intéressés à la modification du bitume de classe 35/50 commercialisé en Algérie par l'ajout d'un déchet industriel (NBR). L'objectif de cette étude est d'étudier la possibilité de recycler ce déchet non biodégradable en technique routière.

Les propriétés des bitumes avant et après le vieillissement ont été mesurées par des méthodes conventionnelles (Pénétrabilité, température Bille et Anneau et la susceptibilité thermique). Les bitumes purs et modifiés ont tous été soumis à un processus de vieillissement à court et à long terme en utilisant l'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) et l'essai PAV (Pressure Ageing Vessel).

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

I -Avant le vieillissement

1. Les résultats d'analyses classiques ont montré que la modification du bitume par l'ajout du NBR modifie les propriétés des bitumes. Le bitume modifié est plus dur que le bitume pur. En effet, la pénétrabilité des bitumes diminue par contre le point de ramollissement augmente avec l'ajout des polymères.
2. Les résultats expérimentaux montrent que les bitumes modifiés, par leur susceptibilité thermique moindre, présentent de bien meilleures performances que les bitumes conventionnels.
3. Le bitume modifié avec NBR stable au stockage.

II Après le vieillissement

1. L'effet du vieillissement sur les caractéristiques physiques des bitumes est significative, cet effet est différent entre les bitumes modifiés et le bitume de base.
2. Après le vieillissement, les bitumes modifiés restent les moins susceptibles thermiquement par rapport au bitume de base.
3. L'effet du vieillissement à long terme et à court terme est différent. L'influence de vieillissement après PAV est très importante par rapport à celle de vieillissement après RTFOT.

En perspective

Nous proposons les actions suivantes :

- Etudier l'influence du NBR sur les caractéristiques physiques et mécaniques des enrobés bitumineux (fatigue, orniérage, etc).
- Réaliser des analyses chimiques sur les bitumes modifiés, telles que la-Chromatographie et la SARA, pour mieux expliquer les phénomènes de réaction entre le polymère et le bitume.

Références bibliographiques

Références bibliographiques:

- [1] A. Dony., «liants bitumes polymères : la fabrication à la mise en œuvre en enrobés : influence de la nature du bitume sur leurs propriétés mécaniques, leur micromorphologie et leur stabilité thermique», études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées 1991
- [2] 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)
- [3] 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.
- [4] KEBAILI Nabil, "L'asphalte caoutchouc valorisation de la poudrette de caoutchouc en domaine routier", Thèse de doctorat, Faculté science appliquées, ourgla, 2017 .
- [5] Jean, F., Corté, H. Di Benedetto « matériaux routiers bitumineux, constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges, ISBN 2-7462-0960-8, Lavoisier 2005.
- [6] Walzak. I., Détermination des produits organiques d'altération chimiques et radiochimiques du bitume, applications aux enrobés bitumés. Thèse doctorat janvier 2000 INSA Lyon, page 29-206.
- [8] DONY Anne, « Liants bitumes-polymères de la fabrication à la mise en œuvre en enrobés: influence de la nature du bitume sur leurs propriétés mécaniques, leur micromorphologie et leur stabilité thermique », LCPC, No. CR15. 1991. ISSN 1160-976.
- [9] MERBOUH M'hammed, « Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux Influence des conditions extrêmes de température et de trafic en fatigue », Thèse de Doctorat, Bordeaux-1, France 2010.
- [10] 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.
- [11] Roffey. R., Hjalmarsson. K., Norqvist. A., Microbial dégradation of bitumen used for encapsulating radioactive waste in Finland, Final FOA Report C 40238-4-9 1987, 87p
- [12] F. OLARD (2003), « COMPORTEMENT THERMOMÉCANIQUE DES ENROBÉS BITUMINEUX À BASSES TEMPÉRATURES Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé », Thèse de Doctorat, ECOLE DOCTORALE DES SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE LYON (génie civil).
- [13] Baba Mohammed Elamin : « Etude de formulation d'un béton bitumineux semi-grenu BBSG 0/14 pour couche de roulement : Cas de granulats d'Adrar », mémoire de master en génie civil, Présenté à l'Université d'Adrar, en 2021.
- [14] CERIU INFRASTRUCTURES, (2002) « LES REVETEMENTS TRES MINCES ET ULTRAMINCES DEMYSTIFIES » Bulletin d'information du Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines, Vol. 9 No 6.

- [15] 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.
- [16] BOUZZZA, M.S. and MELLAKH, A. (2018) Enrobe à module élevée : formulation et utilisation cas de formulation a 4 niveaux. Mémoire master. Université de Ouargla.
- [17] Pierre, L. (2015.)1 -introduction-aux-enrobesplanglois.PDF. Introduction aux les enrobé Disponible à : <http://www.bitumequebec.ca/wp-content/uploads/2015/06/1-introductionaux-enrobesplanglois.pdf>
- [18] Nabila BELLAOUAR, Messaouda MEDDAH," Etude sur les Caractéristiques Physicochimique du Bitume Modifié par Polymère (SBS)",Thèse de master, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Ghardaïa,2019.
- [19] OURARI Linda, DJANATI Sara," Etude comparative des procédés de modification du bitume routier algérien 40/50 par des déchets polymériques",Thèse de master, Faculté des Sciences, Université de DE M’HAMED BOUGUARA,2017.
- [20] Comportement Rhéologique Des Bitumes ModifiésPar Des Polymères : Influence Du Vieillissement le 09 Février 2014
- [21] 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].
- [22] JIDOUMOU MOHAMED MAHMOUD,BIZIMANA BELIEVE," Elaboration et caractérisation du bitume algérien 40/50 modifié par divers polymères", Thèse de master, Faculté des Sciences et de la Technologie, Tissemsilt,2022.
- [23] eurobitume," FORCE_DUCTILITE EN 13589 : Bitumes et liants bitumineux – Détermination des caractéristiques de traction des bitumes modifi és par la méthode de force ductilité"
- [24] FETHIZA ALI Boubaker," Contribution à l’Étude du Comportement des Bitumes Modifiés par l’Association du NBR et de Déchets Plastiques",Thèse de doctorat,Faculté de génie civil ,houari boumediene,2021.