



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid HAMMA LAKHDAR d'EL-OUED

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

Niveau : MASTER ACADEMIQUE

Spécialité: Matériaux en Génie Civil

**Projet de fin d'études répondant aux exigences d'obtention du diplôme de
master**

Intitulé:

Effet des Déchets Plastiques sur Le Vieillissement du Bitume Modifiés

Soutenue le: 13/06/2026

Préparé par :

GHILANI Abd El Karim

HANI Ahmouda

Devant le jury composé de:

Dr: Khelaifa Hamad

Examineur

Dr: Ammari Mohammed Seghir

Président

Dr: FETHIZA ALI Boubaker

Encadreur

Année universitaire : 2025/2026

شكر و عرفان

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله وتوفيقه تذلل الصعاب، والصلاة والسلام على معلم البشرية وهاديها

أتقدم بأسمى عبارات التقدير والامتنان، وخالص الشكر والثناء، إلى الدكتور المؤطر الفاضل **فطحيزة علي بوبكر**، الذي غمرني بنبل أخلاقه وسعة صدره، ولم يبخل عليّ يوماً بتوجيهاته السديدة ونصائحه القيمة التي كانت بمثابة المنار الذي أضاء لي طريق هذا البحث، فجزاه الله عني خير الجزاء. كما يمتد شكري وتقديري إلى جميع الأساتذة والدكاترة الأفاضل الذين شرفوني بقبول مناقشة هذا العمل وتقويمه، والذين نهلت من علمهم وأخلاقهم الطيبة طيلة مشواري الدراسي.

ولا يفوتني أن أتوجه بخالص الشكر والود إلى زملائي وزميلاتي الأوفياء، الذين عشت معهم أجمل لحظات الكفاح والدراسة، وتشاركنا معاً طموح العلم وعقبات الطريق؛ شكراً لكم على دعمكم المستمر وتشجيعكم الصادق. إلى كل من مد لي يد العون والمساعدة من قريب أو من بعيد لإنجاز هذا العمل، لكم مني جميعاً كل التقدير والاحترام.

إهداء

إلى النبع الذي لا ينضب من الحنان، ومن كانت دعواتها الصامته بلسماً يداوي تعب الأيام... أمي الحبيبة.

إلى المنارة التي أستضيء بها في عتمة الحيرة، ومن أورثني العزم والأنفة وشرف المحاولة... أبي الغالي.

إلى العضد والذخر، ورفيق السراء والضراء الذي أستند عليه فيشتدّ به جانبي... أخي العزيز.

إلى النسومات الرقيقة التي تملأ الروح أنساً، وتضفي على الأيام بهجةً وعطراً... أختاي.

إلى القلب الطيب والروح النقية، عمتي الغالية التي أجد في فيض حنانها امتداداً لدفع العائلة... عمتي العزيزة.

إليكم جميعاً، يا من كنتم لي حصناً وطريقاً، أهدي ثمرة هذا الجهد والنجاح.

الطالب: غيلاني عبد الكريم

إهداء

إلى ملاذي الأول، والقلب الذي فاض بالطهر والرضا، فكانت دعواتها سندي ونجاتي ...أمي الحبيبة.

إلى من شيد بالصبر طموحي، وأسرج بجهده وكفاحه قنديل دربي ...أبي الغالي.

إلى الذين بهم يشتدّ أزرِي، ويقوى في الملمات ظهري، سندي وعزوتي في الحياة ...إخوتي الأوفياء.

إلى ندى العمر، وجمال الأيام الصافية، من يزهر الوجدان بنقاء قربهما ...أخواتي الغاليات.

إليكم جميعاً، يا من جعلتم من طريقي وعراً يسيراً، أهدي ثمرة هذا الجهد والتعب.

الطالب:هاني أحمدوده

Résumé:

Les propriétés des bitumes purs doivent être optimisées pour garantir de meilleures performances en service, notamment en termes de résistance à l'orniérage, à la fatigue, à la fissuration à basse température ainsi qu'au vieillissement.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer le potentiel d'amélioration des liants bitumineux conventionnels par l'incorporation de déchets plastiques. À cet effet, des essais de caractérisation empirique ont été menés sur un bitume de grade 35/50 modifié à différentes teneurs en polymères recyclés. Le second objectif de ce travail est d'analyser l'impact de ces déchets locaux sur la durabilité et la résistance au vieillissement du liant.

Le vieillissement thermo-oxydatif des liants a été simulé à court et à long terme en utilisant respectivement le RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) et le PAV (Pressure Aging Vessel). Les essais de pénétrabilité à l'aiguille et de température de ramollissement bille et anneau (TBA) ont été réalisés conformément aux normes EN 1426 et EN 1427.

Les résultats des analyses classiques démontrent que la modification affecte significativement les propriétés intrinsèques du bitume. En effet, l'ajout de déchets plastiques entraîne une diminution de la pénétrabilité et, inversement, une augmentation du point de ramollissement (TBA), traduisant un durcissement bénéfique du liant. De plus, face aux effets du vieillissement, les bitumes modifiés affichent une stabilité globale et une résistance supérieure par rapport au bitume de base.

Mots-clés : bitume modifié, déchets plastiques, vieillissement, pénétrabilité, température bille et anneau (TBA).

ملخص:

يجب تحسين خصائص البيتومين النقي لضمان أداء أفضل أثناء الاستخدام، لا سيما فيما يتعلق بمقاومة التآكل، والإجهاد، والتشقق عند درجات الحرارة المنخفضة، والتآكل.

الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تقييم إمكانية تحسين المواد الرابطة البيتومينية التقليدية من خلال دمج النفايات البلاستيكية. ولتحقيق هذا الهدف، أجريت اختبارات توصيف تجريبية على بيتومين من الدرجة 50/35 مُعدّل بنسب متفاوتة من البوليمرات المُعاد تدويرها. أما الهدف الثاني لهذه الدراسة فهو تحليل تأثير هذه النفايات المحلية على متانة المادة الرابطة ومقاومتها للتآكل.

تمت محاكاة التآكل الحراري التأكسدي للمواد الرابطة على المدى القصير والطويل باستخدام اختبار فرن الأغشية الرقيقة الدوارة (RTFOT) واختبار وعاء التآكل بالضغط (PAV)، على التوالي. أجريت اختبارات اختراق الإبرة واختبار نقطة تليين الكرة الحلقية (RBWP) وفقاً لمعيار EN 1426 و EN 1427.

تُظهر نتائج التحليلات التقليدية أن التعديل يؤثر بشكل كبير على الخصائص الجوهرية للبيتومين. فإضافة النفايات البلاستيكية تؤدي إلى انخفاض في الاختراق، وعلى العكس، إلى زيادة في نقطة تليين حلقة الكرة (RBWP)، مما يعكس تصلباً مفيداً للمادة الرابطة. علاوة على ذلك، في مواجهة تأثيرات التآكل، يُظهر البيتومين المُعدّل استقراراً ومقاومةً أفضل بشكل عام مقارنةً بالبيتومين الأساسي.

الكلمات المفتاحية: بيتومين مُعدّل، نفايات بلاستيكية، تآكل ، اختراق، نقطة تليين حلقة الكرة

Tables des Matières	
Remerciements	I
Dédicace	II
Résumé	III
Tables des Matières	IV
Liste des figures	V
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	VII
Liste des abréviations	XVI
Introduction Générale	IX
Partie1 : Partie théorique	
Chapitre 01 : Généralités sur le bitume	
1.1-Introduction	5
1-2-Définition du Bitume	5
1.3-Fabrication des bitumes	5
1.3.1 - Le raffinage par distillation	5
1.3.1.1 - Distillation sous pression atmosphérique	5
1.3.1.2- Processus de Distillation sous Vide	5
1.3.2 - Le désasphaltage au solvant	6
1.3.3 - L'oxydation par soufflage:	6
1.3.4 - Le craquage (ou cracking)	6
1.4- Analyse de la composition chimique des bitumes	7
1.4.1- Les maltènes	7
1.4.1.1- Les huiles saturées	8
1.4.1.2- Les huiles aromatiques	8
1.4.1.3- Les résines (aromatiques polaires)	8
1.4.2- Les Asphaltènes	8
1.5-Classification du bitume	9
15.1-Critères de selection du bitume	11
1.6-Généralité sur le vieillissement des bitumes	11
1.6.1-Étapes du vieillissement	11
1.6.1.2-Vieillissement à long terme	11

1.6.2- Principales causes	12
1.6.3-Impact sur la qualité de la chaussée	12
1.7. Essais classiques sur le bitume	12
1.8. Conclusion	13
Chapitre 02: Les enrobés bitumineux	
2.1 Introduction	15
2.2. Types de chaussées (souples, rigides et semi-rigides)	15
2.2.1. Chaussée souple	15
2.2.1.1Définition	15
2.2.1.2- Composition	15
2.2.1.3- Avantages	16
2.2.1.4 .Inconvénients	16
2.2.2- Chaussée rigide	16
2.2 .2.1.Définition	16
2.2.2.2- Composition	17
2.2.2.3-Avantages	17
2.2.2.4- Inconvénients	17
2.2.3 Chaussée Semi-Rigide	18
2.2.3.1 .Définition	18
2.2.3.2 .Composition	18
2.2.3.3 .Avantages	18
2.2.3.4 .Inconvénients	18
2.3- Les structures de chaussées	19
2.3.1-Couche de surface	19
2.3.2-Couche d'assise	19
2.3.3-Couche de Forme	19
2.3.3.1-Fonctions principales de la couche de forme	20

2.4-Dégradations des chaussées	20
2.4.1- Les fissures	20
a) Les fissures transversales	20
b) Fissures longitudinales	21
c)Fissures de rives	21
d) Fissures de gel	22
2.4.2- Les fissurations	22
2.4.3 -Dégradation liée à l'orniérage	23
2.5 – Composition de l'Enrobé	24
2.5.1 – Les Granulats	24
2.5.1.1 – Types de granulats	25
2.5.2 – Le Bitume	25
2.5.3 – Le Filler	26
2.5.4 – Les Additifs	26
2.6 – Composition des enrobés bitumineux	27
2.6.1- Les granulats	27
2.6.2- Le liant bitumineux	27
2.6.3- Les vides d'air	28
2.6.4- Les additifs	28
2.7-Les granulats	29
2.8-Rôle des granulats dans les enrobés bitumineux	29
2.9-Caractéristiques essentielles des granulats dans les enrobés bitumineux	30
2.10-Influence des granulats sur l'enrobé	31
2.11-LES ESSAIS SUR LES GRANULATS	31

2.11.1- Analyse granulométrique (EN FN 933-1 - mai 2012)	31
2.11.2-Essai Los Angeles (NF P 18-573, Décembre 1990)	32
2.11.3- Propreté superficielle (NF P 18-591 septembre 1990)	33
2.11.4- Essai d'aplatissement (EN FN 933-3 mars 1997)	33
2.11.5-Essai micro-deval en présence d'eau (MDE) (NF P 18-572 Décembre 1990)	34
2.11.6-Essai de masse volumique et d'absorption d'eau (NF EN 1097-6)	34
2.12- Effet des essais sur le mélange d'asphalte	35
2.13-Qualités requises pour les enrobés bitumineux	35
2.13.1-Les essais sur les enrobés bitumineux	36
A. Essai Marshall	36
B. Essai Duriez	37
C. Essai de fluage	37
D. Essai d'orniérage (NF P 98-253- 1)	38
E. Essai CANTABRO	38
F. Essai de traction directe	39
G. Essai de retrait thermique empêché (AASHTO, TP10-93)	40
H. Essai de Rupture par Compression Diametral	40
I. Essai de détermination d'aliénabilité	41
J. Essai de résistance au dé enrobage	41
K. Essai de stabilité	42
L. Essai de compression simple ou répété	42
2.14-Conclusion	43
Chapitre 03: Les enrobés modifiés	
3.1 Introduction	45

3.2 Objectifs visés par l'ajout de polymères	45
3.3-Domaines d'application des bitumes modifiés	46
3.4. Les polymères utilisés pour la modification des bitumes	46
3.4.1. Les polymères thermodurcissables	46
3.4.2. Les polymères Thermoplastiques	47
3.4.2.1. Les élastomères	47
3.4.2.2. Les plastomères	48
3.4.3. Caoutchoucs naturels et synthétiques	50
3.4.4. Caoutchoucs thermoplastiques	50
3.5. Utilisation de polymères vierges dans la modification des bitumes	51
3.6. Procédés de modification	51
3.6.1. Le procédé humide « Wet Process »	51
3.6.2. Le procédé sec « Dry Process »	52
3.7. Domaines d'application du bitume modifié	52
3.8. Essais spécifiques aux liants modifiés	53
3.8.1. Observation microscopique	53
3.8.2. Stabilité au stockage	53
3.8.3. Essai force-ductilité	54
3.9. Valorisation des résidus plastiques en technique routière	55
3.10- Conclusion	56
Partie 2 : Etude Expérimental	
Chapitre 4 : Matériaux utilisés et méthodes d'essais	
4.1 Introductions	59
4.2 Présentations des matériaux	59
4.2.1 Le Bitume	59

4.2.2 Les déchets plastiques	59
4.3 Les essais utilisés	60
4.3.1. Pénétrabilité (NF EN 1426)	60
4.3.2. Température de ramollissement Bille Anneau (NF EN 1427)	60
4.3.3. Essai de stabilité au stockage (EN 13399 / LC 25-003)	60
4.3.4. Protocole de vieillissement à court terme (Rolling Thin-Film Oven Test, NF EN 12607-1)	62
4.3.5. Protocole de vieillissement à long terme « Pressure Aging Vessel » (PAV) (NF EN 14769)	63
4.4 Préparations des bitumes modifiés	64
Chapitre 05 : Effet du déchets plastiques sur les propriétés des bitumes modifiés	
5.1- Introduction	67
5.2 Pénétrabilité	67
5.2.1. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité.	67
5.2.2 Influence de la teneur en DP sur la pénétrabilité	68
5.3. Température de ramollissement Bille Anneau	68
5.3.1 Influence du temps de malaxage sur la TBA	69
5.3.2. Influence de la teneur en DP sur la TBA	69
5.4 Stabilité au stockage	70
5.5 Conclusion	71
Chapitre 06 : Effet du DP sur Le vieillissement des bitumes Modifiés	
6.1. Introduction	73
6.2- Caractéristiques physiques des liants bitumineux modifiés après vieillissement.	73
6.2.1- Perméabilité à 25 °C	73
6.2.2- Point de ramollissement	74

6.2.3 Susceptibilité thermique (IP)	75
6.3. Conclusion	76

Liste des figures	
Chapitre 01 : Généralités sur le bitume	
Figure 1.1: Les liants hydrocarbonés en construction routière	4
Figure 1.2: Principe de fabrication des bitumes	7
Figure1.3 : Schéma de séparation chimique des constituants du bitume	9
Figure1.4 : Propriétés et contrôle de l'asphalte	10
Chapitre 02: Les enrobés bitumineux	
Figure 2.1: Chaussée souple	16
Figure 2.2: Chaussée rigide	17
Figure 2.3: Chaussée semi-rigide	18
Figure 2.4. Constitution d'une structure de chaussée souple	19
Figure 2.5. Fissures transversales	21
Figure 2.6 : Fissures longitudinales	21
Figure 2.7: Fissures de rives	22
Figure 2.8: Fissures de gel	22
Figure 2.9: Fissuration	23
Figure 2.10: Phénomène d'orniérage	23
Figure 2.11. Les granulats	24
Figure 2.12. Les deux familles de granulats	25
Figure 2.13. Le Bitume	25
Figure 2.14. Améliore l'adhérence entre le bitume et les granulats.	26
Figure 2.15. Le rôle des additifs dans l'amélioration de la résistance des routes	26
Figure 2.16. Les tamis utilisés selon les classes granulaires	32
Figure 2.17. Le dispositif utilisé dans l'expérience	33
Figure 2.18. Détermination de l'indice de platitude	34
Figure 2.19 Effet des essais sur le mélange d'asphalte	35
Figure 2.20: Essai Marshall	37

Figure 2.21: Essai Duriez	37
Figure 2.22 : Essai de fluage	37
Figure 2.23 : Essai d'orniérage (NF P 98-253- 1)	38
Figure 2.24: CANTABRO	39
Figure 2.25: traction directe	39
Figure 2.26: retrait thermique empêché (AASHTO, TP10-93)	40
Figure 2.27: Rupture par Compression Diamétrale	40
Figure 2.28: détermination d'aliénabilité	41
Figure 2.29: Essai de résistance au dé enrobage	41
Figure 2.30: Essai de stabilité	42
Figure 2.31: compression simple ou répété	42
Chapitre 03: Les enrobés modifiés	
Figure 3.1 Structure du SBS	48
Figure 3.2. Structure de l'éthylène-acétate de vinyle (EVA)	49
Chapitre 4: Matériaux utilisés et méthodes d'essais	
Figure 4.1. Déchets plastiques (polypropylène)	60
Figure 4.2. Appareillage de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille	60
Figure 4.4. Matériel et principe de l'essai de la température bille et anneau	61
Figure 4.4 Fioles du protocole RTFOT (vide, avant le test et après le test)	62
Figure 4.5. Appareillage du protocole RTFOT	63
Figure 4.6. Plateaux du protocole PAV	64
Figure 4.7. Appareillage du protocole PAV	64
Figure 4.8. Appareillage de modification	65
Figure 4.9. Résumé des matériaux utilisés et du protocole expérimental	65
Chapitre 05: Effet du déchets plastiques sur les propriétés des bitumes modifiés	
Figure 5.1 pénétrabilité en fonction du temps de malaxage	67
Figure 5.2 pénétrabilité en fonction du DP	68
Figure 5.3 TBA (°C) en fonction de la durée de malaxage	69
Figure 5.4 TBA (°C) en fonction de déchets plastiques	70
Figure 5.5. Résultats de stabilité au stockage des bitumes modifiés	70
Chapitre 06 : Effet du DP sur Le vieillissement des bitumes Modifiés	
Figure 6.1: Pénétrabilité des bitumes modifiés en fonction de la teneur en DP avant et après vieillissement	70

Figure 6.2: Changement de la Température de Bille et Anneau (TBA) selon le pourcentage de DP avant et après le vieillissement	75
Figure 5. 3: Indice de pénétrabilité des bitumes modifiés en fonction De la teneur en DP avant et après vieillissement	76

Liste des tableaux	
Chapitre 4: Matériaux utilisés et méthodes d'essais	
Tableau 4.1. Propriété physique de bitume de base	59
Chapitre 05: Effet du déchets plastiques sur les propriétés des bitumes modifiés	
Tableau 5.1: Variation de la pénétrabilité à 25 °C pour les différents mélanges	67
Tableau 5.2: Variation de la TBA pour les différents mélanges.	68
Chapitre 06 : Effet du DP sur Le vieillissement des bitumes Modifiés	
Tableau6. 1: Pénétrabilité des bitumes modifiés en fonction de la teneur en DP avant et après vieillissement.	73
Tableau 6. 2: Point de ramollissement des bitumes modifiés en fonction De la teneur en DP avant et après vieillissement.	74
Tableau 6.3: la susceptibilité thermique des bitumes	76

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 FilmOvenTest.

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

Le secteur des infrastructures routières constitue l'un des leviers les plus puissants du développement socio-économique moderne, facilitant la mobilité des biens et des personnes. Au sein de ces structures, le bitume, produit complexe issu du raffinage pétrolier, occupe une place prépondérante en tant que liant hydrocarboné. Sa fonction essentielle est d'assurer la cohésion des granulats et de garantir l'étanchéité ainsi que la durabilité des enrobés bitumineux. Cependant, malgré ses propriétés viscoélastiques remarquables, le bitume est intrinsèquement vulnérable à un phénomène de dégradation irréversible : le vieillissement.

Ce processus de vieillissement, résultant de mécanismes physico-chimiques complexes tels que l'oxydation, la volatilisation des fractions légères et l'exsudation, est exacerbé par des conditions environnementales sévères. L'exposition prolongée aux rayonnements ultraviolets, aux variations thermiques extrêmes et aux sollicitations mécaniques du trafic intense modifie la structure moléculaire du liant, le rendant plus fragile et susceptible à la fissuration. Cette problématique engendre des coûts de maintenance colossaux et réduit prématurément la durée de vie des chaussées.

D'un autre côté, le monde fait face à une crise écologique sans précédent liée à la prolifération des déchets plastiques. Ces matériaux polymères, caractérisés par une décomposition extrêmement lente, s'accumulent dans l'environnement, posant une menace directe sur les écosystèmes. La recherche de solutions innovantes pour la valorisation de ces déchets est donc devenue une priorité absolue. C'est dans ce contexte de développement durable et d'économie circulaire que s'inscrit notre travail. L'idée centrale est d'utiliser les déchets plastiques comme agents modificateurs pour créer un "bitume-polymère" recyclé, capable de mieux résister aux outrages du temps.

Notre mémoire s'articule autour de deux parties complémentaires :

La Partie Théorique : organisée en trois axes principaux. Le premier chapitre dresse un état de l'art sur le bitume et détaille les mécanismes fondamentaux du vieillissement. Le deuxième chapitre est dédié aux enrobés bitumineux et à

leurs performances. Le troisième chapitre explore les techniques de modification du bitume par les polymères, en mettant l'accent sur l'importance écologique du recyclage des plastiques.

La Partie Expérimentale : commence par une caractérisation rigoureuse des matériaux de base. Ensuite, elle détaille le programme de formulation et les protocoles d'essais. Une attention particulière est portée à l'analyse de l'évolution des propriétés de consistance (Pénétrabilité et TBA) avant et après les simulations de vieillissement accéléré en laboratoire via les dispositifs RTFOT (vieillissement durant la mise en œuvre) et PAV (vieillissement durant la vie de l'ouvrage).

Les investigations expérimentales menées dans le cadre de ce projet ont abouti à des conclusions prometteuses qui valident l'intérêt de cette approche :

- ❖ Optimisation de la Consistance : L'incorporation des déchets plastiques induit une augmentation notable de la viscosité et de la température de ramollissement (TBA), tout en diminuant la pénétrabilité. Ce durcissement contrôlé améliore la stabilité de l'enrobé, offrant ainsi une résistance supérieure à l'orniérage, particulièrement dans les zones à climat chaud.
- ❖ Atténuation de la Sensibilité Thermique : Le bitume modifié montre une meilleure stabilité face aux variations de température. Les polymères créent un réseau tridimensionnel au sein de la matrice bitumineuse qui limite la mobilité des molécules du bitume durant l'oxydation.
- ❖ Résistance Accrue au Vieillissement : Les tests RTFOT et PAV révèlent que le bitume modifié subit une dégradation beaucoup moins sévère que le bitume pur. Le plastique agit comme un agent antioxydant structurel, préservant ainsi les propriétés élastiques du liant sur une plus longue période.
- ❖ Impact Environnemental et Économique : Au-delà des performances techniques, cette solution offre une voie de valorisation noble pour les déchets plastiques, transformant une nuisance environnementale en une ressource stratégique pour la construction routière, tout en visant une réduction des coûts de réhabilitation des routes.

Partie 1:

Étude Théorique

Chapitre 01:

Généralités sur le bitume

1.1-Introduction:

Les liants hydrocarbonés constituent des éléments fondamentaux de la construction routière contemporaine, bien que leur usage remonte à l'Antiquité. Il s'agit de matériaux thermoplastiques dont les propriétés restent stables après des cycles de chauffage, mais dont la fluidité évolue en fonction de la température. Cette sensibilité thermique est un atout majeur exploité lors de la mise en œuvre des chaussées [1].

Par ailleurs, si ces liants sont totalement insolubles dans l'eau, ils présentent une grande solubilité dans les solvants organiques.

Ce matériau se distingue par un **pouvoir agglomérant élevé**, lui permettant d'adhérer efficacement aux supports courants tels que la pierre, le bois et le béton [1]. On classifie généralement les liants hydrocarbonés en trois catégories distinctes:

- **L'asphalte**: issu du broyage de roches asphaltiques naturelles.
- **Les bitumes**: produits dérivés du raffinage de pétroles bruts.
- **Les goudrons**: résultant de la pyrogénéation de matières végétales ou organiques à l'abri de l'air.

Il est à noter qu'en technique routière moderne, l'usage est presque exclusivement réservé aux bitumes issus du pétrole [2].

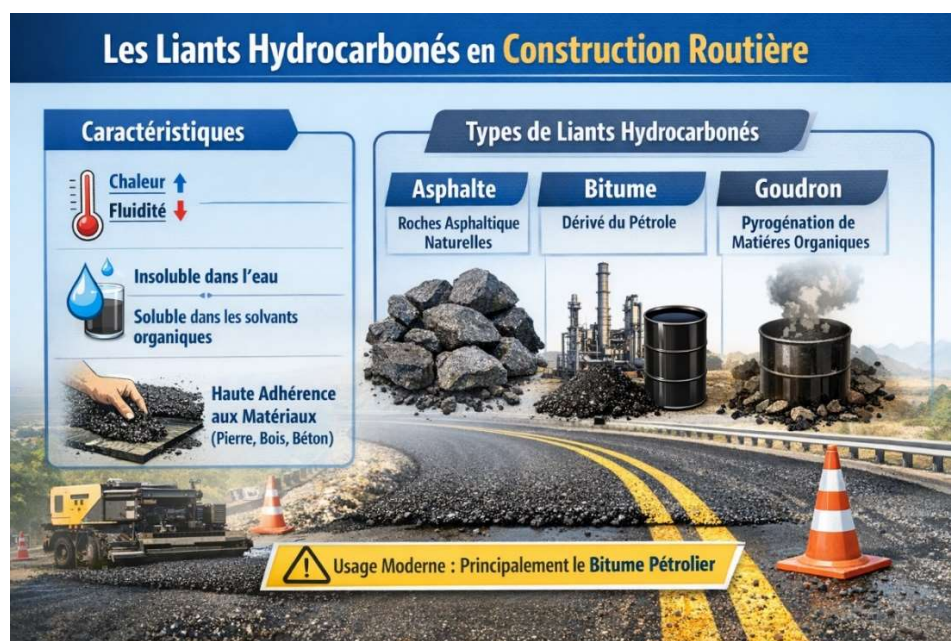


Figure 1.1: Les liants hydrocarbonés en construction routière

1-2-Définition du Bitume

Le bitume est un matériau hydrocarboné, solide ou semi-solide à température ambiante, de couleur noire ou brun foncé. C'est le constituant essentiel pour le revêtement routier et l'étanchéité des bâtiments [3].

Le bitume est un mélange complexe de composés hydrocarbonés à masse moléculaire élevée. Sur le plan chimique, c'est un système colloïdal composé principalement de:

- **Asphaltènes:** qui lui confèrent sa dureté et sa couleur noire.
- **Malthènes:** composés d'huiles et de résines qui lui apportent sa viscosité et son élasticité.

1.3-Fabrication des bitumes:

L'intégralité des bitumes utilisés comme liants provient de la distillation du pétrole brut. Les procédés de fabrication se déclinent comme suit: [4]

1.3.1 - Le raffinage par distillation:

1.3.1.1 - Distillation sous pression atmosphérique:

Cette méthode consiste en un chauffage continu du pétrole brut, après que celui-ci a été préalablement décanté et dessalé. Le brut est porté à une température d'environ 340 °C via un passage en four, avant d'être injecté dans une colonne de fractionnement opérant à pression atmosphérique. Le résidu lourd collecté à la base de cette colonne est appelé "brut réduit" [5]. »

1.3.1.2- Processus de Distillation sous Vide

- **Matière première:** On utilise le "brut réduit", qui est le résidu issu de l'étape précédente (la distillation atmosphérique).
- **Chauffage (400 °C):** La température est portée à environ 400 °C. À pression atmosphérique normale, une telle chaleur risquerait de provoquer le "craquage" ou la combustion de la matière. Cependant, grâce à la pression réduite (sous vide), il est possible de séparer les composants sans les altérer. [5]

- **Pression réduite (Sous vide):** La pression à l'intérieur de la colonne est abaissée à quelques dizaines d'hectopascals (hPa). Cela permet de réduire le point d'ébullition des composants lourds.
- **Polyvalence des grades:** L'importance de cette unité réside dans sa capacité à produire directement différentes classes de bitume :
- **Les grades durs:** comme le (20/30), utilisés dans les zones à climat chaud ou pour supporter des charges lourdes.
- **Les grades mous:** comme le (160/220), utilisés principalement dans les zones à climat froid.

1.3.2 - Le désasphaltage au solvant:

Ce procédé est appliqué aux résidus sous vide présentant une teneur élevée en fractions lubrifiantes. Il consiste à mettre en contact le résidu avec un flux ascendant de solvant (généralement du propane ou du butane). Grâce à la variation de solubilité des composants, la fraction bitumineuse est séparée des huiles lourdes, permettant ainsi une récupération sélective du bitume. [4]

1.3.3 - L'oxydation par soufflage:

Le bitume oxydé, également appelé bitume soufflé, est un produit destiné principalement à des applications industrielles. Son mode de fabrication consiste en une injection d'air sous pression au travers d'un résidu de distillation sous vide porté à haute température (environ 280 °C). Ce traitement thermique et chimique a pour objectif majeur d'optimiser les propriétés rhéologiques du liant, notamment en augmentant sa consistance et sa résistance aux variations thermiques. [4].

1.3.4 - Le craquage (ou cracking):

Le craquage est un procédé de raffinage dont l'objectif est de transformer les coupes lourdes « constituées de longues chaînes hydrocarbonées, en fractions plus légères destinées à la production de carburants. Sous l'action d'une haute température (comprise entre 450 et 550 °C) et en présence d'un catalyseur, les molécules volumineuses sont fragmentées (cassées) en unités plus petites. Cette transformation, réalisée à pression atmosphérique, permet d'obtenir des produits à fort indice d'octane. [4].

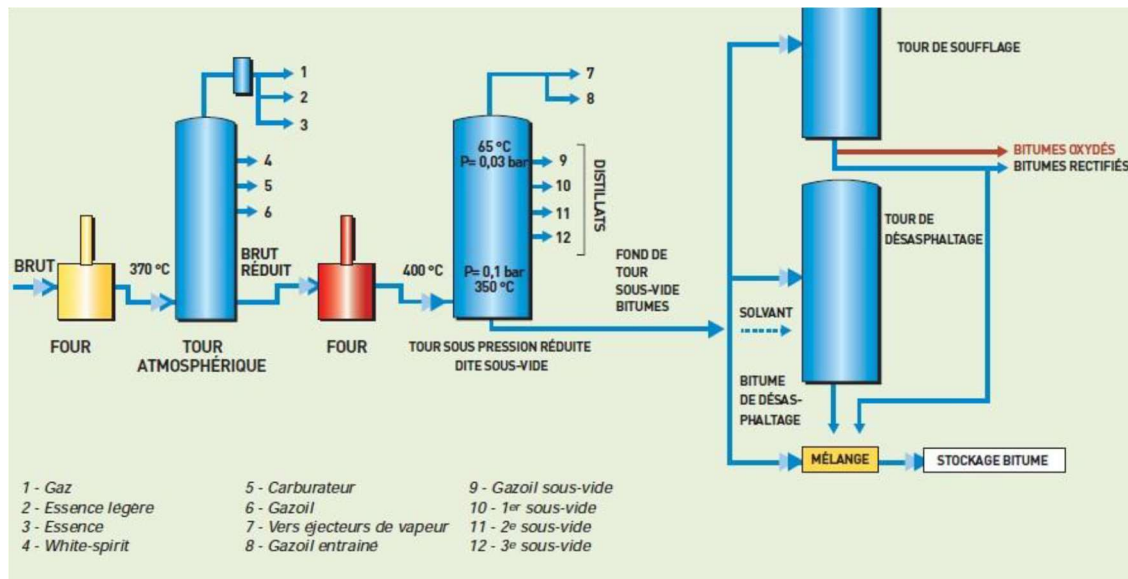


Figure 1.2: Principe de fabrication des bitumes [5]

1.4- Analyse de la composition chimique des bitumes [4]

Sur le plan physico-chimique, le bitume est classé parmi les liants hydrocarbonés. Bien que sa structure moléculaire soit complexe, il est principalement constitué de carbone (79 à 87 %) et d'hydrogène (9 à 12 %). Sa matrice renferme également des hétéroatomes tels que le soufre (1-8 %), l'azote (0-1,6 %) et l'oxygène (0,5-1,7 %). On y décèle enfin des traces de métaux lourds, notamment le vanadium (10-2000 ppm) et le nickel (20-200 ppm), ainsi que de l'aluminium, du chrome ou du plomb à l'état infinitésimal.

La constitution chimique globale dépend essentiellement de la provenance du pétrole brut et, dans une moindre mesure, des procédés de raffinage appliqués. Structuellement, le bitume est un système colloïdal divisé en deux fractions distinctes selon leur solubilité dans le n-heptane: les asphaltènes et les maltènes.

1.4.1- Les maltènes

Les maltènes constituent la phase huileuse (le milieu dispersant) dans laquelle évoluent les asphaltènes. Cette fraction peut être subdivisée par chromatographie liquide en trois familles chimiques, classées par ordre de polarité croissante:

1.4.1.1- Les huiles saturées:

Ce sont des fluides incolores ou jaunâtres, composés de structures paraffiniques et naphténiques. Elles représentent généralement moins de 10 % de la masse totale du bitume, avec une masse moléculaire oscillant entre 300 et 2000 g/mol.

1.4.1.2- Les huiles aromatiques:

Liquides visqueux de couleur sombre (rougeâtre), elles se caractérisent par une forte proportion de cycles aromatiques (environ 31 % de leurs atomes de carbone). C'est la fraction majoritaire, constituant 50 à 72 % du bitume.

1.4.1.3- Les résines (aromatiques polaires):

Solides noirs thermofusibles, les résines forment environ 11 % du liant. Elles présentent une structure hautement condensée (systèmes naphténo-aromatiques et hétérocycliques) avec une forte concentration d'hétéroatomes. Leur masse moléculaire est très étendue (500 à 50 000 g/mol) pour une taille moléculaire comprise entre 1 et 5 nm.

1.4.2- Les Asphaltènes

Les asphaltènes se manifestent structurellement sous deux configurations distinctes: soit sous forme de micelles (unités élémentaires composées de quelques feuillets moléculaires), soit sous forme d'agglomérats, résultant de l'association de plusieurs micelles. La cohésion de ces structures est assurée par des interactions intermoléculaires spécifiques, notamment des liaisons hydrogène ainsi que des forces dipolaires (induites ou permanentes).

Sur le plan thermodynamique, le bitume constitue un système colloïdal où les micelles d'asphaltènes sont maintenues en suspension dans une phase huileuse. Ce phénomène, appelé peptisation, est rendu possible par l'adsorption des résines à la surface des asphaltènes, garantissant ainsi leur dispersion homogène. Dans cet équilibre physico-chimique, les composés aromatiques agissent comme solvants, tandis que les fractions saturées tendent à jouer un rôle de floculant.

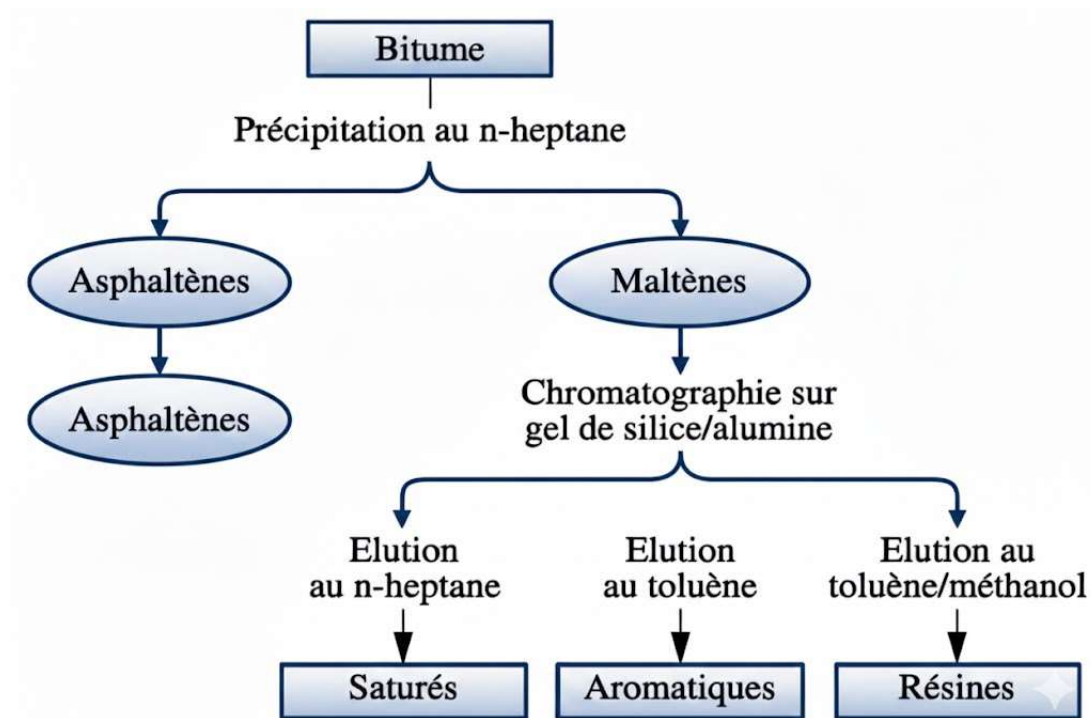


Figure1.3: Schéma de séparation chimique des constituants du bitume

1.5-Classification du bitume

L'asphalte mis sur le marché doit présenter une qualité clairement définie et constante. Les spécifications définissant ces qualités portent sur les propriétés physico-chimiques intrinsèques de l'asphalte et sur ses performances en tant que liant destiné à être ajouté à des matériaux composites (mélanges d'asphalte, enrobés bitumineux, agents de traitement de surface, etc.) pour diverses applications (routes, étanchéité, industrie). L'objectif est de déterminer les limites de certaines propriétés : consistance, viscosité, adhérence, solubilité, point de rupture, résistance au vieillissement et autres propriétés spécifiques au fabricant [5].

Le contrôle qualité commence bien avant le processus de production proprement dit, dès l'analyse du pétrole brut. Tous les pétroles bruts ne se prêtent pas à la production de bitume : seulement 10 % environ des 1 300 pétroles bruts connus conviennent à cet usage. La principale mission de la raffinerie est de prévoir et de vérifier les caractéristiques de la fraction la plus lourde du pétrole brut utilisé afin d'obtenir un mélange optimal conforme aux résultats escomptés [5].



Figure1.4: Propriétés et contrôle de l'asphalte

Tableau1.2 : Classes de bitume les plus appropriées

Classe de bitume	Caractéristiques	Usages principaux
20/30	Bitume très dur	Couches d'assise à fort module (EME), zones à fort trafic poids lourds, climats chauds (Sud).
35/50	Bitume dur	Bétons bitumineux pour couches de roulement et d'assise (BBSG, BBME) sur réseaux structurants.
50/70	Bitume moyen	Le standard en France. Utilisé pour la majorité des travaux neufs et d'entretien sur routes nationales et départementales.
70/100	Bitume mou	Zones climatiques froides (montagnes), trottoirs ou voiries à faible trafic.
160/220	Bitume très mou	Enduits superficiels ou recyclage de vieux agrégats d'enrobés.

1.5.1-Critères de selection du bitume

Le choix ne se fait pas' au hasard; il répond à un équilibre entre deux risques majeurs:

- **L'orniérage:** En été, un bitume trop mou se déforme sous le poids des camions. On privilégie alors des classes dures (35/50 ou 20/30).
- **La fissuration thermique:** En hiver, un bitume trop dur devient cassant. Dans les régions comme le Grand Est ou les Alpes, on peut s'orienter vers du 50/70 ou 70/100.

Note technique:

Pour les zones particulièrement sollicitées (ronds-points, arrêts de bus, fortes pentes), on abandonne souvent le bitume pur pour des bitumes modifiés par des polymères (PmB) qui offrent une meilleure élasticité.

1.6-Généralité sur le vieillissement des bitumes:

Le vieillissement de l'asphalte est un terme technique désignant l'ensemble des modifications physiques et chimiques qui se produisent dans l'asphalte au fil du temps sous l'influence de divers facteurs environnementaux et industriels.

Ce processus entraîne le durcissement de l'asphalte et une réduction de sa flexibilité, le rendant plus vulnérable aux fissures et à la détérioration des routes [6].

1.6.1-Étapes du vieillissement

Selon la durée et les conditions d'exposition, le vieillissement se divise en deux grandes étapes:

1.6.1.1-Vieillissement à court terme:

- Il se produit lors de la production, du transport et de la mise en œuvre des enrobés bitumineux.
- La principale cause est la température élevée, qui entraîne la volatilisation et l'oxydation rapide des huiles légères.

1.6.1.2-Vieillissement à long terme:

- Il se produit pendant la durée de vie de la route (plusieurs années).
- Les causes incluent l'exposition continue à l'oxygène, aux rayons ultraviolets et aux variations climatiques.

1.6.2- Principales causes

- **Oxidation:** Les composants de l'asphalte réagissent avec l'oxygène, ce qui entraîne une augmentation de la teneur en asphaltènes (composants solides).
- **Volatilité:** Les composants huileux légers s'évaporent sous l'effet de la chaleur.
- **Durcissement chimique (thixotropie) :** Une réorganisation moléculaire interne conduit à une rigidité accrue.

1.6.3-Impact sur la qualité de la chaussée

- Augmentation de la viscosité Augmentation de la fragilité.
- Apparition de fissures de fatigue.
- Diminution de l'adhérence:Décollement (séparation de l'asphalte et des granulats).

1.7. Essais classiques sur le bitume

Afin de mesurer la qualité et les performances du bitume, divers essais standardisés sont conduits en laboratoire. Ces analyses servent à déterminer ses propriétés physiques ainsi que sa réaction aux conditions d'utilisation.

- 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 en vase ouvert (NF T 60-118).
- Détermination de la recouvrance élastique (NF EN13398).
- Détermination de la force de ductilité.
- Stabilité au stockage.
- Test de vieillissement à court terme (RTFOT)
- Rolling Thin Film Oven Test (NFT 66-032).
- Essai de fluage et viscosité à taux zéro.
- Température de fragilité FRAASS (NFT 66-006).
- L'essaiPAV "Pressure Aging Vessel" (AASHTO) (vieillissement à long terme).

1.8. Conclusion

Ce premier chapitre a permis d'établir les bases théoriques essentielles à la compréhension du comportement des liants hydrocarbonés. En examinant la nature intrinsèque du bitume, depuis sa production industrielle jusqu'à la complexité de sa structure moléculaire, il devient évident que ses performances ne sont pas seulement liées à son origine pétrolière, mais reposent surtout sur le fragile équilibre de sa structure colloïdale. L'étude des critères de classification et des protocoles expérimentaux a souligné l'importance d'une caractérisation précise du bitume pour assurer la pérennité des infrastructures routières. La compréhension de ses propriétés physiques et chimiques s'avère cruciale, car c'est cette configuration initiale qui conditionne sa résistance face au vieillissement inévitable, ouvrant ainsi la voie à l'exploration des moyens d'améliorer ses caractéristiques.

Chapitre 02:

Les enrobés bitumineux

2.1 Introduction:

Les routes représentent un pilier fondamental des infrastructures de tout pays, se déclinant en différentes catégories selon leur usage prévu et les caractéristiques des environnements qui les entourent. L'enrobé, matériau principal utilisé dans la construction des chaussées, est un mélange composé de bitume et d'agrégats. Sa préparation repose sur l'assemblage du bitume, extrait par distillation du pétrole brut, avec des agrégats minutieusement sélectionnés et classifiés en fonction de leurs propriétés physiques. La composition de l'enrobé peut varier selon le type de voie à aménager, les conditions climatiques locales et le volume de trafic escompté. Afin de garantir des routes durables et performantes, les bitumes et matériaux granulaires doivent répondre à des normes strictes. Ils subissent ainsi une série de tests rigoureux portant notamment sur la densité, la flexibilité, et la résistance à des facteurs comme la corrosion ou les sollicitations mécaniques. Ces contrôles permettent d'évaluer leur comportement face à différents défis environnementaux, tels que la chaleur, la pression et l'humidité, assurant ainsi une meilleure adaptabilité aux conditions réelles. [7]

2.2. Types de chaussées (souples, rigides et semi-rigides)

2.2.1. Chaussée souple

2.2.1.1 Définition

Les chaussées souples se composent de plusieurs couches de matériaux granulaires, recouvertes en surface d'un revêtement bitumineux. Elles sont qualifiées de "souples" en raison de leur capacité à se déformer légèrement sous l'effet des charges, sans subir de fissures majeures ou brutales [8].

2.2.1.2- Composition

- **Couche de roulement:** Constituée d'enrobé bitumineux (asphalte) .
- **Couche de base:** Réalisée à partir de matériaux granulaires, pouvant être traités ou non avec un liant hydraulique .
- **Couche de fondation:** Formée de granulats compactés ou de grave non traitée .
- **Sol support:** Sol naturel ou compacté, en fonction de sa portance [9].

2.2.1.3- Avantages

-Coût réduit : Les chaussées souples nécessitent généralement un investissement initial inférieur à celui des chaussées rigides .

-Facilité d'entretien: Simplicité des réparations, comme le reprofilage ou le renouvellement du revêtement .

-Confort: Leur flexibilité garantit une conduite plus agréable, en absorbant efficacement les vibrations et les irrégularités de la surface.

2.2.1.4 .Inconvénients

- Offre une moindre résistance aux charges élevées et au trafic intense, tout en étant vulnérable aux variations climatiques, notamment à la chaleur excessive et aux cycles de gel-dégel .

- Nécessite un entretien plus régulier afin de prévenir l'apparition d'ornières et de fissures.

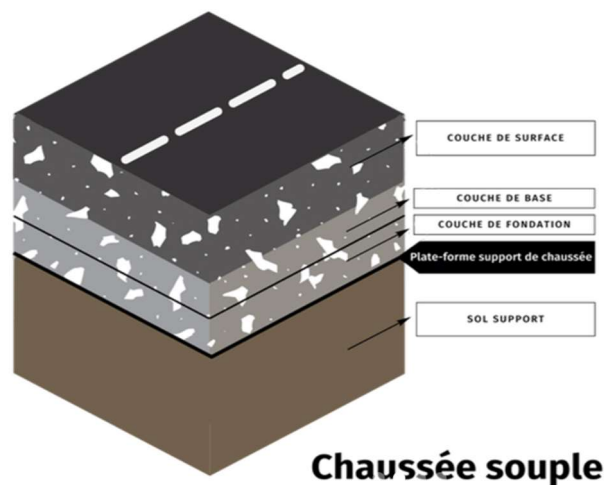


Figure 2.1: Chaussée souple

2.2.2- Chaussée rigide

2.2 .2.1.Définition

Les chaussées rigides se composent principalement d'une dalle en béton de ciment posée directement sur le sol ou sur une couche de fondation.

On les qualifie de "rigides" en raison de leur capacité à supporter les charges du trafic en répartissant les efforts sur une large surface.

2.2.2.2- Composition

- **Dalle en béton de ciment:** Peut-être non armée, armée en continu ou avec des joints .
- **Couche de fondation:** Constituée de matériaux traités ou non, elle assure une base homogène pour le support .
- **Sol support:** Sol naturel amélioré ou compacté pour garantir la stabilité.

2.2.2.3-Avantages

- **Durabilité exceptionnelle:** Une durée de vie pouvant dépasser les 30 ans sous réserve d'un entretien adapté .
- **Grande résistance:** Supporte efficacement les charges lourdes et les variations climatiques .
- **Entretien réduit:** Moins de maintenance requise comparée aux chaussées souples.

2.2.2.4- Inconvénients

- **Coût initial élevé:** La construction demande un investissement financier conséquent .
- **Gestion des contraintes thermiques:** Nécessite l'installation de joints de dilatation pour éviter les fissures liées aux variations de température .
- **Réparations complexes :** Les éventuelles dégradations impliquent des interventions coûteuses et techniques élaborées.

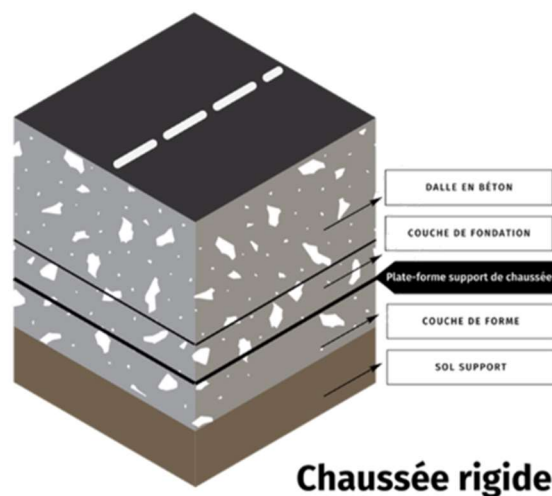


Figure 2.2: Chaussée rigide

2.2.3 Chaussée Semi-Rigide

2.2.3.1 .Définition

Les chaussées semi-rigides associent les propriétés des chaussées souples et rigides. Elles se composent d'une base réalisée en grave-bitume ou en grave traitée avec des liants hydrauliques, surmontée d'une couche d'enrobé bitumineux .[10]

2.2.3.2 .Composition

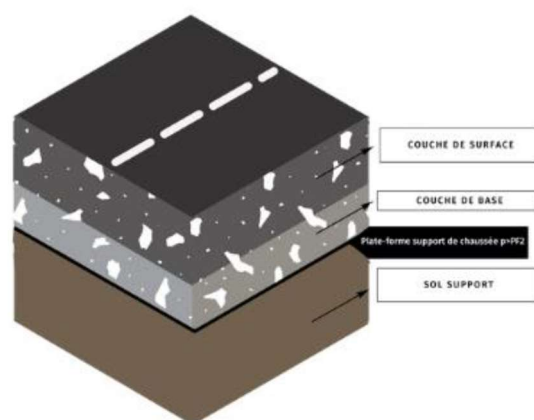
- **Couche de roulement:** Enrobé bitumineux .
- **Couche de base :** Grave traitée au ciment ou grave-bitume .
- **Couche de fondation:** Granulats compactés ou grave non traitée .
- **Sol support:** Sol naturel ou compacté .

2.2.3.3 .Avantages

- Résistance accrue aux charges lourdes par rapport aux chaussées souples .
- Flexibilité relative par rapport au béton, limitant le risque de fissurations soudaines
- Équilibre intéressant entre coût de construction et durée de vie .

2.2.3.4 .Inconvénients

- Problèmes liés aux fissurations causées par la rigidité partielle de la base .
- Potentiel de propagation des fissures depuis la base vers la surface.



Chaussée semi-rigide

Figure 2.3: Chaussée semi-rigide

2.3- Les structures de chaussées

Les chaussées se composent d'une structure multicouche (figure 2.4), spécialement conçue pour absorber les charges générées par le trafic, charges que le sol à lui seul ne serait pas capable de supporter. Dans cette structure en couches, chaque élément remplit des fonctions spécifiques, contribuant ensemble à la résistance et aux performances globales de la chaussée [11].

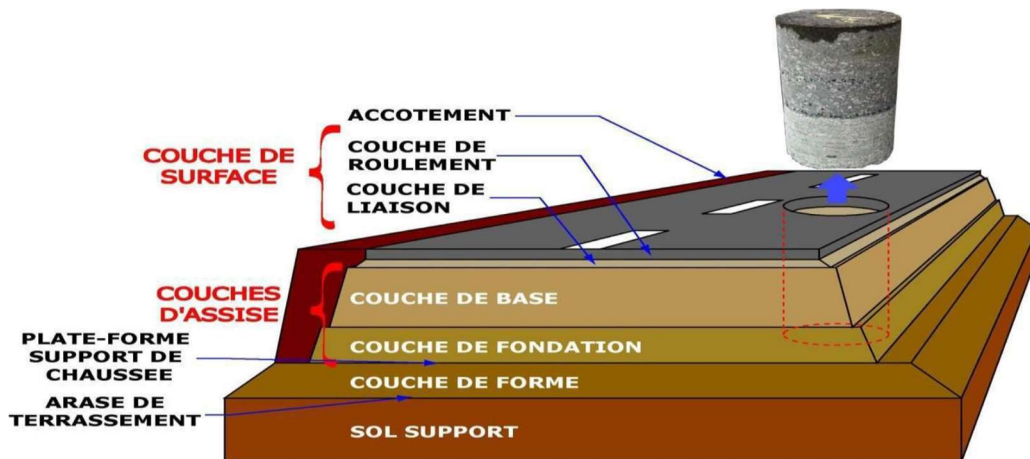


Figure 2.4. Constitution d'une structure de chaussée souple [10].

2.3.1-Couche de surface

La couche de surface d'une chaussée correspond à la couche supérieure de sa structure, exposée directement aux effets combinés du trafic et des conditions climatiques. Elle peut se composer

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

2.3.2-Couche d'assise

La couche d'assise dans une structure de chaussée désigne l'ensemble formé *par la* couche de fondation et la couche de base.

2.3.3-Couche de Forme

La couche de forme présente une structure dont la complexité varie en fonction de la qualité du sol. Elle constitue une couche intermédiaire, positionnée entre la partie supérieure du terrassement (PST) et les différentes couches formant le corps de chaussée [8].

Son rôle principal est d'ajuster les caractéristiques du terrain naturel, sur lequel elle est mise en œuvre, pour répondre aux exigences spécifiques de la future chaussée, notamment :

- La portance requise.
- L'évacuation efficace des eaux de ruissellement.
- L'adaptation au profil défini de la chaussée.

2.3.3.1-Fonctions principales de la couche de forme

- **Renforcement de la portance** : Cette couche améliore la capacité portante du sol en répartissant efficacement les charges liées au trafic, contribuant ainsi à la stabilité et à la durabilité de la chaussée.

- **Gestion du drainage** : Elle joue un rôle essentiel dans l'évacuation des eaux de ruissellement, ce qui permet de prévenir l'accumulation d'eau et de limiter les risques de dégradations des couches supérieures.

- **Résistance au gel** : Grâce à l'utilisation de matériaux insensibles au gel, elle protège la chaussée des dommages causés par les cycles de gel et de dégel.

2.4-Dégradations des chaussées

2.4.1- Les fissures

Une fissure est une ligne de rupture qui se manifeste sur la surface de la chaussée. On distingue différents types de fissures

a) Les fissures transversales

Ces fissures apparaissent de manière quasi perpendiculaire à l'axe de la chaussée. Elles peuvent être isolées ou se répéter avec des intervalles variables. Elles peuvent également affecter toute la largeur de la chaussée ou seulement une partie. [12]



Figure 2.5. Fissures transversales

b) Fissures longitudinales

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

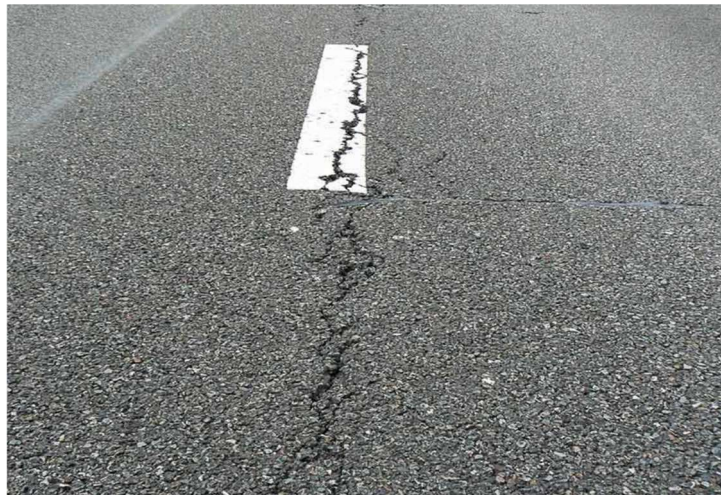


Figure 2.6 : Fissures longitudinales

c) Fissures de rives:

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



Figure 2.7: Fissures de rives

d) Fissures de gel :

Ces fissures, résultant de l'action du gel, se manifestent de différentes manières

- Elles peuvent être rectilignes et situées au centre de la chaussée ,
- Ou avoir une apparence lézardée, sans emplacement précis sur la surface de la chaussée.



Figure 2.8: Fissures de gel

2.4.2- Les fissurations

Réseau de fissures formant un maillage de petites mailles polygonales, dont la taille moyenne ne dépasse généralement pas 30 cm.



Figure 2.9: Fissuration

2.4.3 -Dégradation liée à l'orniérage :

L'intensification du trafic lourd contribue à l'apparition rapide de certaines dégradations, en particulier l'orniérage. Ce phénomène se caractérise par une dépression longitudinale formée dans les empreintes laissées par les pneus, qui devient encore plus marquée sous l'effet de températures élevées .

L'orniérage représente la principale cause de détérioration des chaussées souples. La susceptibilité de ces dernières à ce type de dégradation dépend de plusieurs facteurs, notamment les propriétés des matériaux constituant la chaussée, la teneur en liant, le type de mélange utilisé et la granulométrie. La figure 3.10 illustre un exemple concret d'une chaussée présentant des signes visibles d'orniérage. [12]



Figure 2.10: Phénomène d'orniérage

En d'autres termes, l'orniérage représente la principale forme de déformation des chaussées souples. Par conséquent, l'utilisation de techniques visant à modifier la consistance de la couche de roulement constitue une solution cruciale. Dans cette optique, une analyse approfondie de ce type de déformation est entreprise afin de mettre en place un remède adapté [12].

2.5 – Composition de l'Enrobé

L'enrobé bitumineux est un mélange homogène réalisé à chaud pour garantir un enrobage optimal des granulats par le bitume. Ce chauffage réduit la viscosité du liant, facilitant ainsi le mélange, l'application et le compactage. Ce procédé confère à l'enrobé d'excellentes propriétés mécaniques tout en permettant son adaptation à une variété de types de chaussées. La qualité et les performances de l'enrobé dépendent directement de la nature et des proportions de ses différents composants.

2.5.1 – Les Granulats

Les granulats forment la structure principale de l'enrobé. Composés de grains minéraux, leurs dimensions varient généralement entre 0 et 250 mm. Qu'ils soient d'origine naturelle ou artificielle, ils sont largement utilisés dans divers secteurs, notamment pour fabriquer des bétons, des mortiers, ainsi que pour les couches de chaussées et les infrastructures ferroviaires.

Pour assurer la durabilité de l'enrobé, les granulats doivent satisfaire à des critères rigoureux concernant leur résistance, leur propreté et leur forme. Leur composition dépend étroitement du gisement d'origine et des processus de production.



Figure 2.11. Les granulats

2.5.1.1 – Types de granulats

On distingue principalement deux grandes familles :

- Les granulats naturels, extraits des carrières ou des formations alluvionnaires .
- Les granulats artificiels, obtenus par des processus industriels et parfois caractérisés par une légèreté accrue[13] .

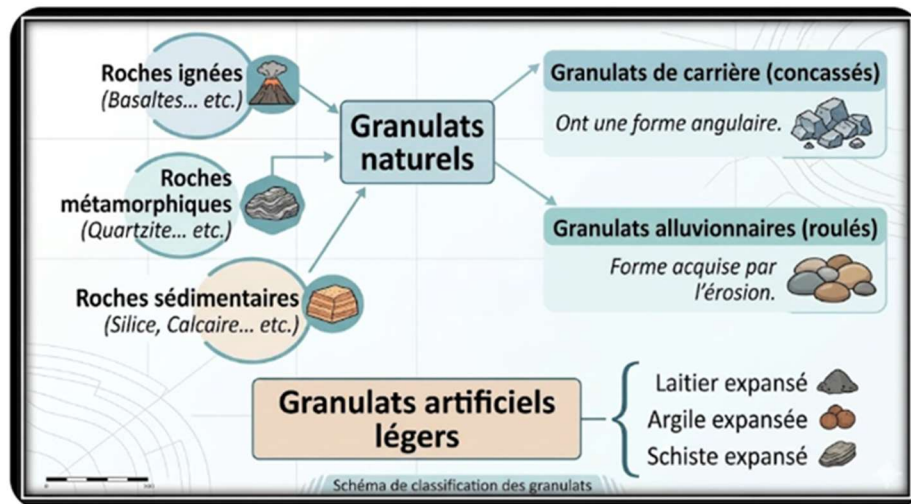


Figure 2.12. Les deux familles de granulats

2.5.2 – Le Bitume

Le bitume, un liant hydrocarboné, joue un rôle clé en assurant la cohésion de l'enrobé grâce à l'enrobage des granulats. Ses propriétés viscoélastiques lui permettent de résister aux déformations ainsi qu'aux variations climatiques. Le choix du bitume, déterminé notamment par son grade de pénétration, dépend des conditions environnementales et du type de trafic auquel il sera exposé. [14]



Figure 2.13. Le Bitume

2.5.3 – Le Filler

Le filler est une poudre minérale ultrafine qui renforce la compacité et la stabilité de l'enrobé. En plus d'optimiser ces paramètres mécaniques, il améliore également l'adhésion entre le bitume et les granulats.

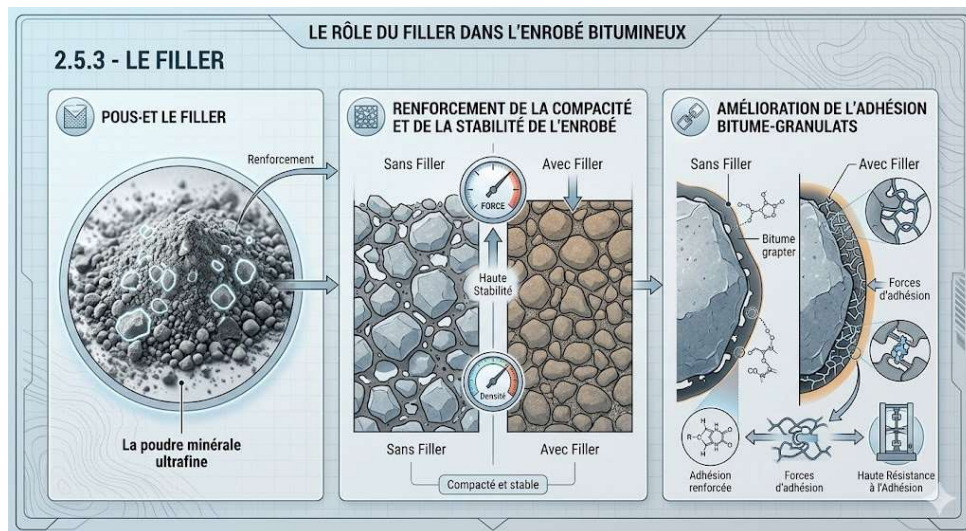


Figure 2.14. Améliore l'adhérence entre le bitume et les granulats.

2.5.4 – Les Additifs

Les additifs sont incorporés en faibles quantités pour modifier et améliorer certaines propriétés spécifiques de l'enrobé. Parmi eux, on trouve des polymères, des fibres ou encore des agents d'adhésivité. Ces substances augmentent notamment la résistance du matériau à l'eau, à l'orniérage et au vieillissement, contribuant ainsi à prolonger sa durée de vie et sa performance.

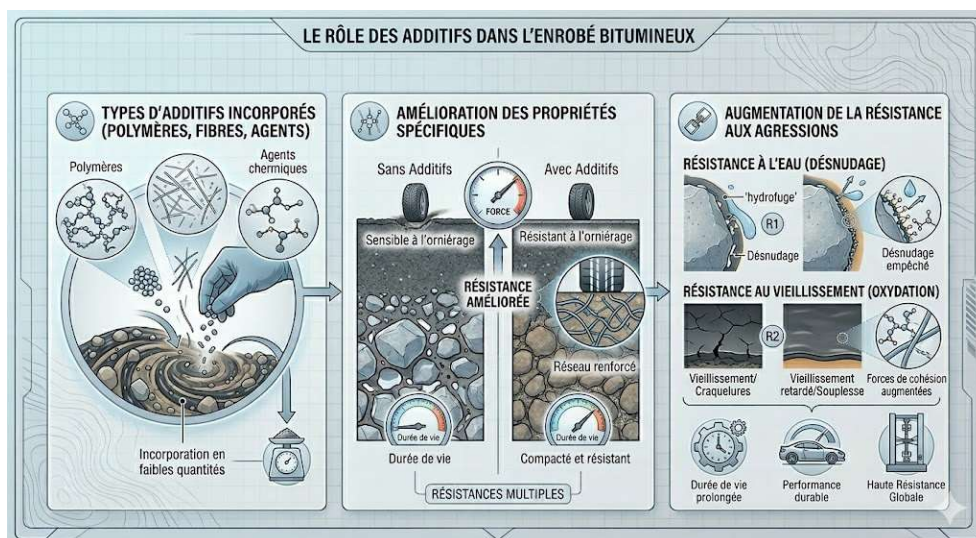


Figure 2.15. Le rôle des additifs dans l'amélioration de la résistance des routes

Après avoir détaillé la composition de l'enrobé, en insistant sur ses différents constituants et leurs fonctions respectives, il convient désormais de se focaliser sur sa formulation. Connaître les composants ne constitue qu'une première étape ; il est essentiel de définir leurs proportions idéales pour produire un mélange efficace, répondant aux exigences techniques et aux contraintes spécifiques.

2.6 – Composition des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux sont des mélanges élaborés à chaud, composés essentiellement de granulats associés à un liant hydrocarboné. Leur vocation principale est de garantir la résistance mécanique, la longévité et la stabilité des couches de chaussée face aux contraintes générées par le trafic routier et les variations climatiques.

La composition d'un enrobé se décompose comme suit :

2.6.1- Les granulats

Les granulats constituent environ 90 % à 95 % de la masse totale de l'enrobé. Ils forment le squelette granulaire du mélange, garantissant sa stabilité mécanique. Ces éléments se répartissent en trois catégories principales :

-Granulats grossiers: Composés de pierres concassées ou de graviers, ils assurent la prise en charge des charges principales .

-Granulats fins : Incluent le sable ou les produits de concassage fins, qui combler les espaces laissés entre les granulats grossiers .

-Filler minéral: Une poudre ultra-fine, comme la chaux, le ciment ou les poussières de carrière, utilisée pour optimiser la compacité et renforcer la cohésion du mélange .

2.6.2- Le liant bitumineux

Le bitume représente environ 4 % à 6 % de la masse de l'enrobé et joue un rôle central en apportant :

- La cohésion entre les granulats.
- La flexibilité du mélange .
- La résistance face aux variations de température .

Le bitume peut être utilisé sous sa forme pure ou modifié, par exemple avec des polymères, pour optimiser ses performances mécaniques, sa durabilité face au vieillissement et sa résistance à l'orniérage .

2.6.3- Les vides d'air

Les vides d'air constituent généralement 3 % à 5 % du volume total d'un enrobé. Ils remplissent des fonctions importantes telles que :

- Permettre l'expansion du bitume à haute température
- Empêcher le phénomène de ressuage
- Améliorer la stabilité structurelle face aux sollicitations dues au compactage ou au trafic routier .

Cette propriété est le fruit d'un dosage précis des composants et d'un compactage adéquat lors de la mise en œuvre.

2.6.4- Les additifs

De faibles quantités d'additifs sont parfois intégrées pour améliorer certaines caractéristiques de l'enrobé. Ces additifs incluent :

- Les polymères .
- Les fibres.
- Les agents anti-décollement, aussi appelés agents anti-stripping .

Ces substances favorisent une meilleure adhérence entre le bitume et les granulats, tout en renforçant des aspects tels que la résistance à l'eau, à la fatigue et à l'orniérage.

En résumé, la qualité d'un enrobé repose sur la synergie entre ses différents composants, qui contribuent chacun de manière complémentaire à ses performances globales.

2.7- Les granulats :

Les granulats sont des matériaux minéraux granulaires essentiels dans la fabrication des enrobés bitumineux. Ils proviennent soit de roches naturelles, comme le calcaire ou le basalte, soit de matériaux recyclés, et assurent principalement la résistance mécanique du mélange final.

Dans les enrobés routiers, les granulats se présentent sous différentes dimensions, généralement comprises entre 0 et 31,5 mm. Ces matériaux sont classés en plusieurs catégories en fonction de leur taille.

-Filler ($\leq 0,063$ mm) : constitué de particules extrêmement fines, il joue un rôle crucial dans la cohésion de l'ensemble .

-Sable (0,063 mm à 2 mm) :** participe au remplissage des vides pour garantir une structure compacte.

- Gravillons (2 mm à 31,5 mm) : forment l'ossature principale du mélange, offrant solidité et soutien.

La répartition granulométrique (courbe granulométrique) est essentielle pour garantir une bonne compacité, une stabilité élevée et une durabilité de l'enrobé.

2.8-Rôle des granulats dans les enrobés bitumineux

Les granulats occupent une place centrale dans la composition des enrobés bitumineux, constituant la structure principale du mélange et jouant un rôle clé dans ses performances mécaniques.

Leur fonction peut être décomposée en plusieurs aspects essentiels :

- Résistance mécanique : Les granulats absorbent la majorité des charges générées par le trafic, assurant ainsi la robustesse du revêtement.

- Stabilité : Leur forme, leur rugosité et leur capacité à s'emboîter contribuent à limiter les déformations permanentes, notamment l'apparition de l'orniérage.

- Durabilité : Des granulats de qualité élevée offrent une meilleure résistance à l'usure, aux chocs et aux agressions climatiques, garantissant une longue durée de vie au revêtement.

- Adhérence : La texture de leur surface favorise une liaison optimale avec le bitume, créant ainsi une couche homogène et solide.

- **Compacité** : Leur répartition granulométrique permet d'obtenir un mélange dense, minimisant la présence de vides et optimisant les propriétés mécaniques.

En somme, le choix des granulats, qu'il s'agisse de leur nature, de leur forme, de leur propreté ou de leur granulométrie, est un facteur déterminant pour assurer la qualité et les performances globales de l'enrober.

2.9- Caractéristiques essentielles des granulats dans les enrobés bitumineux

Les granulats employés dans la fabrication des enrobés bitumineux doivent posséder des caractéristiques spécifiques pour assurer la qualité, la stabilité et la longévité du mélange. Voici les principales propriétés requises :

- **Résistance mécanique** : les granulats doivent supporter les charges répétées du trafic sans se fragmenter. Cette qualité est généralement mesurée à l'aide de l'essai Los Angeles.

- **Résistance à l'usure (polissage)**: il est crucial qu'ils conservent une rugosité suffisante pour garantir une bonne adhérence des véhicules, ce qui est évalué par l'essai Micro-Deval.

- **Propreté** : les granulats doivent être exempts d'impuretés telles que l'argile,

Les poussières ou les matières organiques, car ces éléments peuvent nuire à leur liaison avec le bitume .

- **Forme et angularité** : des granulats anguleux permettent un meilleur emboîtement, augmentant ainsi la stabilité mécanique du mélange.

- **Adhésivité** : cette propriété reflète la capacité des granulats à se lier efficacement avec le bitume, évitant ainsi les risques de décollement en cas de présence d'eau.

- **Granulométrie** : une répartition bien étudiée des tailles des grains est cruciale pour garantir une bonne compacité et réduire la proportion de vides dans le mélange.

- **Durabilité** : les granulats doivent résister aux variations climatiques, comme les cycles gel/dégel ou les fortes chaleurs, sans altération de leurs caractéristiques.

Le respect de ces propriétés fondamentales est essentiel pour assurer des performances optimales et une longue durée de vie des enrobés bitumineux.

2.10-Influence des granulats sur l'enrobé

Les granulats sont un élément clé dans la composition des enrobés bitumineux, représentant la majeure partie du mélange. Leur qualité et leurs caractéristiques influencent de manière significative le comportement et les performances des revêtements routiers.

Voici les principaux effets des granulats sur les enrobés bitumineux :

Résistance mécanique : Des granulats robustes renforcent la capacité de l'enrobé à supporter les charges induites par le trafic routier.

Stabilité : Une forme anguleuse et un bon emboîtement des granulats réduisent les déformations permanentes, en particulier l'apparition d'ornières.

Compacité : Une granulométrie bien adaptée favorise un mélange dense, avec moins de vides et une meilleure cohésion.

Adhérence : La texture de surface des granulats joue un rôle essentiel dans l'adhésion avec le bitume, améliorant également la résistance au glissement.

Durabilité : Des granulats de haute qualité augmentent la résistance de l'enrobé à l'usure, aux infiltrations d'eau et aux variations climatiques.

Maniabilité : La taille et la forme des granulats influencent la facilité de mise en œuvre et le processus de compactage du mélange.

Ainsi, la sélection et la qualité des granulats sont des éléments déterminants pour optimiser la performance globale des enrobés bitumineux.

2.11-LES ESSAIS SUR LES GRANULATS

2.11.1- Analyse granulométrique (EN FN 933-1 - mai 2012)

Objectif de l'essai : L'analyse granulométrique vise à classer un échantillon d'essai ou une quantité de matériau, qu'il soit concassé ou roulé, en différentes classes granulaires. Elle permet de déterminer la répartition en poids des grains composant le matériau. Le processus consiste à séparer les éléments les plus gros par tamisage jusqu'à une taille de 0,08 mm, suivi d'une séparation par sédimentation pour les particules inférieures à cette dimension.

- Principe de l'essai** : Cette opération repose sur le fractionnement des granulats à l'aide d'une colonne de tamis. Les mailles de ces tamis sont normalisées et

disposées de manière décroissante, les tamis aux ouvertures les plus larges étant situés en haut pour un tri progressif jusqu'aux dimensions les plus fines en bas.

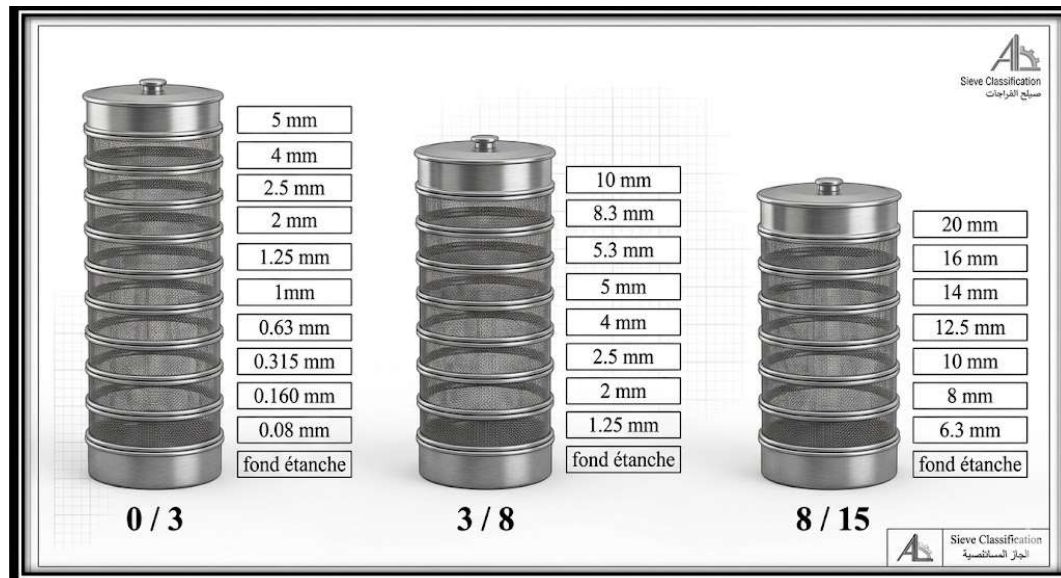


Figure 2.16. Les tamis utilisés selon les classes granulaires

On trace la courbe granulométrique après le calcul du pourcentage des tamisâtes partiels par

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

La formule suivante :

En abscisse : les dimensions des mailles en échelle logarithmique

En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique

La courbe doit être tracée de manière continue.

2.11.2-Essai Los Angeles (NF P 18-573, Décembre 1990)

L'essai Los Angeles est conçu pour évaluer la résistance combinée des granulats aux chocs et à l'usure progressive causée par le frottement mutuel des éléments. Cette méthode s'applique spécifiquement aux granulats destinés à la construction des chaussées.



Figure 2.17. Le dispositif utilisé dans l'expérience

La relation utilisée :

$$LA(\%) = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100$$

Avec:

M0: masse initiale de l'échantillon (g)

M1: masse après essai et tamisage (g)

2.11.3- Propreté superficielle (NF P 18-591 septembre 1990)

La propreté superficielle est définie comme étant le pourcentage pondéral des particules

Inférieurs à 0,5mm mélangées ou adhérees à la surface des granulats supérieur

À 2mm. Ces Particules sont séparées par lavage sur le tamis correspondant.

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

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

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



Figure 2.18. Détermination de l'indice de platitude

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

L'essai micro-Deval en présence d'eau a pour but la détermination de

La résistance à l'usure par le frottement réciproque des éléments d'un granulat.

2.11.6-Essai de masse volumique et d'absorption d'eau (NF EN 1097-6)

Définition :

Cet essai consiste à déterminer la masse volumique des granulats ainsi que leur capacité à absorber l'eau. Il repose sur la mesure des masses des granulats à l'état sec et à l'état saturé.

Objectif :

- Déterminer la densité des granulats.
- Évaluer leur porosité à travers le taux d'absorption d'eau.
- Vérifier leur aptitude à être utilisés dans les enrobés bitumineux.
- Apprécier leur influence sur l'adhérence avec le bitume et la durabilité du mélange.

2.11.2- Effet des essais sur le mélange d'asphalte

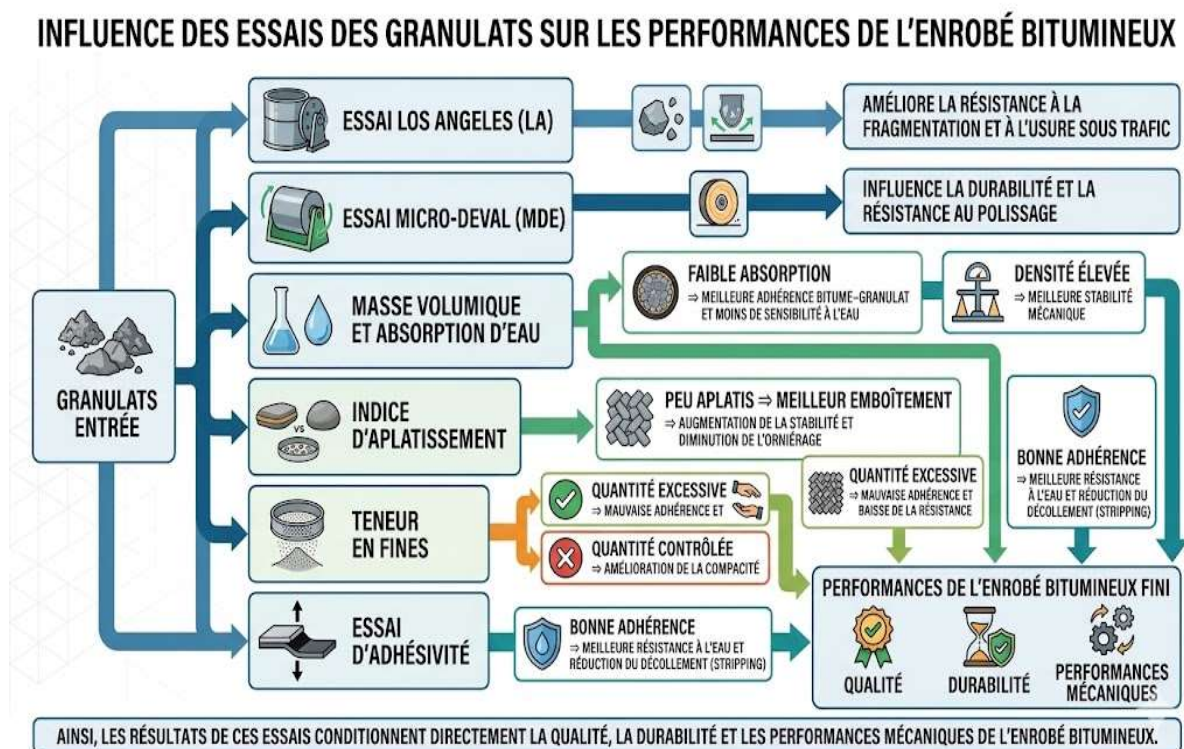


Figure 2.19 Effet des essais sur le mélange d'asphalte

2.12-Qualités requises pour les enrobes bitumineux :

Les enrobés bitumineux sont soumis à des normes rigoureuses afin de garantir leur performance face aux contraintes générées par la circulation et les conditions climatiques. Les critères essentiels auxquels ils doivent répondre sont les suivants :

- **Capacité de résistance mécanique.**

Ils doivent être capables de supporter les charges imposées par le trafic sans subir de déformation ni de rupture.

- **Stabilité et résistance aux déformations permanentes.**

Les enrobés bitumineux doivent limiter les phénomènes de déformations permanentes, telles que l'orniérage, particulièrement lors des périodes de températures élevées.

- **Durabilité face aux conditions climatiques.**

Ils doivent maintenir leurs caractéristiques au fil du temps, même en présence de pluie, de chaleur ou de gel prolongé.

- **Adhérence optimale pour la sécurité routière.**

Leur surface doit garantir une résistance suffisante au glissement, assurant ainsi la sécurité des usagers, notamment sur chaussées humides.

- **Insensibilité à l'eau.**

Ces revêtements doivent empêcher le détachement entre le bitume et les granulats, assurant une résistance accrue au contact avec l'eau.

- **Compacité parfaite.**

Une densité homogène et réduite en vides contribue à améliorer leur robustesse et leur longévité.

- **Flexibilité face aux efforts répétitifs**

Ils doivent tolérer les déformations répétées sans présenter de fissures, assurant une bonne résistance à la fatigue

- **Praticité lors de la mise en œuvre**

Le processus doit être fluide, que ce soit pour leur conception, leur transport, leur installation ou leur compactage sur les voies.

2.12.1-Les essais sur les enrobés bitumineux :

A. Essai Marshall :

Cet essai vise à évaluer les propriétés mécaniques des mélanges bitumineux denses enrobés et compactés à chaud dans des conditions standardisées. Il permet de mesurer des paramètres tels que la stabilité, le fluage, leur quotient respectif, ainsi que le pourcentage de vides, le pourcentage de vides dans le granulat et le taux de remplissage par le liant. Pour cela, les mélanges sont compactés dans des moules cylindriques à l'aide d'une dame afin de produire des éprouvettes de forme cylindrique. Ces dernières sont ensuite conservées à une température constante de 60°C avant d'être soumises à un test dans une presse spéciale. Lors du test, elles sont placées entre deux mâchoires semi-cylindriques qui se rapprochent l'une de l'autre à une vitesse de déformation constante de $0,85 \pm 0,02$ mm/s. Tout au long de l'essai, la charge appliquée et la déformation sont mesurées jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe.



Figure 2.20: Essai Marshall

B. Essai Duriez :

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



Figure 2.21: Essai Duriez

C. Essai de fluage

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



Figure 2.22 : Essai de fluage

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

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

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



Figure 2.23 : Essai d'orniérage (NF P 98-253- 1)

E. Essai CANTABRO

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

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



Figure 2.24: CANTABRO

F. Essai de traction directe :

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



Figure 2.25: traction directe

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

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



Figure 2.26: retrait thermique empêché (AASHTO, TP10-93)

H. Essai de Rupture par Compression Diamétral:

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



Figure 2.27 : Rupture par Compression Diamétrale

I. Essai de détermination d'aliénabilité

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



Figure 2.28 : détermination d'aliénabilité

J. Essai de résistance au dé enrobage

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



Figure 2.29 : Essai de résistance au dé enrobage

K. Essai de stabilité

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



Figure 2.30 : Essai de stabilité

L. Essai de compression simple ou répété:

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



Figure 2.31: compression simple ou répété

2.13-Conclusion

En résumé, une compréhension approfondie des types de méthodes, des processus ainsi que des tests liés à la formation des enrobés est essentielle pour garantir la construction et l'entretien de routes durables et de haute qualité. L'emploi de technologies adaptées, associé à des essais rigoureux, permet d'assurer des performances routières optimales sur le long terme, contribuant ainsi au développement d'une infrastructure sûre et durable au service de la communauté.

Chapitre 03:
Les enrobés modifiés

3.1 Introduction

Les techniques de modification utilisées dans le domaine du bitume polymère et de la valorisation des déchets jouent un rôle crucial dans l'atteinte de divers objectifs, notamment l'amélioration de la qualité des infrastructures routières, la préservation de l'environnement, et la promotion d'une économie durable. Ces modifications ont pour but d'optimiser les caractéristiques du bitume, afin de le rendre plus performant et respectueux de l'environnement, tout en réduisant les coûts associés à son utilisation. Cela s'effectue en incorporant certains matériaux qui renforcent ses performances mécaniques, prolongent sa durabilité ou minimisent son impact environnemental. Le processus de modification repose en grande partie sur l'intégration de polymères, capables d'améliorer des propriétés essentielles du bitume, telles que son élasticité, ainsi que sa résistance à la corrosion et à la fissuration. Par ailleurs, le bitume polymère trouve également son utilité dans le recyclage des déchets bitumineux. Ce procédé permet de récupérer et de réutiliser le bitume usagé par différentes techniques de substitution, réduisant ainsi les coûts, limitant la production de déchets et préservant les ressources naturelles. Les applications du bitume polymère et des méthodes de récupération des déchets couvrent plusieurs domaines. Elles incluent la construction de nouvelles infrastructures routières, l'entretien des routes existantes, la conception de matériaux de construction durables et écoresponsables, ainsi que l'amélioration générale de la résilience des infrastructures. La mise en œuvre de ces technologies contribue directement à un meilleur niveau de vie tout en protégeant les ressources environnementales pour les générations actuelles et futures. [15]

3.2 Objectifs visés par l'ajout de polymères:

La modification des bitumes par des polymères répond à la nécessité d'adapter le comportement rhéologique du matériau aux variations climatiques extrêmes.

Il s'agit d'assurer une rigidité suffisante aux hautes températures pour contrer les déformations permanentes, tout en réduisant la fragilité thermique pour éviter les ruptures à froid. Le choix de ces modifications est dicté par la nature des travaux: enduits superficiels, structures de chaussées à forte sollicitation, ou encore membranes anti-fissures et complexes d'étanchéité [16].

3.3-Domainses d'application des bitumes modifiés

L'usage des liants bitumineux modifiés est devenu indispensable pour répondre aux exigences structurelles et climatiques modernes. Leurs principales applications incluent: [17]

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

- Amélioration des performances en résistance face aux efforts de traction et de cisaillement;
- Assurer la durabilité;
- Eviter le ressuage;
- Améliorer l'adhésivité/tenue à l'eau

❖ **Enrobés ouverts**

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

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

- Assurer la résistance à l'orniérage;
- Améliorer le comportement à basse température;
- Améliorer le comportement à la fatigue.

❖ **Couche d'assise de chaussée**

Augmenter la résistance à la fatigue sous les chargements répétés du trafic; Apport d'une certaine flexibilité.

❖ **Renforcement des chaussées**

Minimiser l'épaisseur du rechargement.

❖ **Membranes anti-fissures, imperméable**

Augmenter la capacité d'allongement.

3.4. Les polymères utilisés pour la modification des bitumes

Les principaux agents modifiants utilisés pour la modification des bitumes sont:

3.4.1. Les polymères thermodurcissables

Ils durcissent de façon irréversible à une température qui dépend de leur nature chimique (structure réticulées) [18]

Il existe quatre grandes familles industrielles de résines thermodurcissables qui sont:

Les polymères insaturés, les phénoplastes, les polyuréthannes et les résines époxydiques.

3.4.2. Les polymères Thermoplastiques

Les polymères thermoplastiques sont caractérisés par le ramollissement durant le chauffage et par le durcissement durant le refroidissement [19].

Ils se fluidifient et deviennent malléables sous l'effet de la chaleur, de façon réversible [18].

Ces produits sont subdivisés en deux familles: les élastomères et les plastomères.

3.4.2.1. Les élastomères

La modification des bitumes par des élastomères conduit à des liants appelés bitumes élastomères. Généralement, le bitume élastomère est obtenu par simple mélange physique, mais il peut être également réticulé (ajout d'un réactif chimique après dispersion du polymère dans le bitume, en général l'agent de réticulation est à base de soufre) [20].

Les élastomères sont généralement plus efficaces que les plastomères pour la modification du bitume. Les élastomères les plus populaires en tant que modificateurs de bitume sont:

- Copolymères Styrène-isoprène-styrène (SIS)
- Copolymères Styrène-Butadiène (SB)
- Copolymère statistique styrène-butadiène (SBR)
- Copolymères Styrène-Butadiène-Styrène (SBS)

Le plus représentatif de ces matériaux est le copolymère séquencé styrène-butadiène-styrène (SBS) [21].

Les bitumes modifiés par addition de SBS ont les propriétés suivantes [22]– [23]:

- Diminue la susceptibilité thermique
- Augmente la cohésion
- Améliore le comportement rhéologique des bitumes.
- Les SBS sont incompatibles avec les liants.
- Augmente la résistance de déformation.

- Améliore les propriétés viscoélastiques (module complexe, l'angle de phase...).
- Améliore la résistance à la fatigue.
- Toutefois, leur inconvénient réside dans leur coût onéreux.

Un problème avec la modification du bitume par SBS est sa faible résistance à la chaleur, à l'oxydation et aux ultraviolets (UV) en raison de la présence de doubles liaisons et de α -H dans les blocs PB [24].

Malgré l'amélioration considérable des performances du bitume modifié SBS, la dégradation thermique du styrène butadiène styrène sous chaleur et air lors du stockage et du transport à haute température est le principal problème du bitume modifié par le SBS [25].

Plusieurs recherches SBS ont montré que la stabilité du bitume modifié avec le SBS peut être améliorée par l'ajout de soufre [26], [23], souvent sous forme de soufre élémentaire [20].

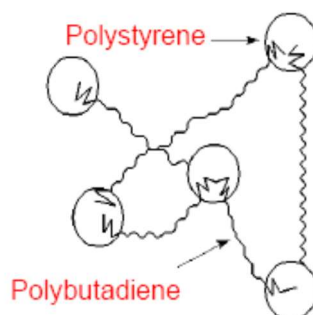


Figure 3.1 Structure du SBS [27].

3.4.2.2. Les plastomères

Les plastomères ont peu ou pas de composant élastique, ce qui entraîne généralement leur résistance rapide sous charge et la déformation permanente ou la rupture fragile suivante.

En tant que catégorie importante de plastomères, la polyoléfine est l'un des premiers modificateurs utilisés dans le bitume. Divers matériaux polyoléfiniques ont été étudiés, notamment le polyéthylène haute densité (HDPE), le polyéthylène basse densité (LDPE) [28], [29]. En raison de son coût relativement faible et de ses avantages, il peut être utilisé pour la modification du bitume.

Les plastomères les plus utilisés dans la modification du bitume sont les copolymères d'éthylène, tels que l'EVA et l'EBA, [30] [31]. En raison de leurs structures chimiques similaires, l'EVA est discuté ici comme exemple de copolymères d'éthylène. Il est composé du copolymère d'éthylène et du comonomère acétate de vinyle (OCOCH_3). La présence de groupes d'acétate polaire sous forme de branches courtes dans l'EVA perturbe la microstructure cristalline étroitement tassée des riches en éthylène segments, réduit le degré de cristallisation et augmente la polarité du polymère (figure 3.2), qui étaient tous deux considérés comme bénéfiques pour améliorer la stabilité au stockage de bitume par certains chercheurs.

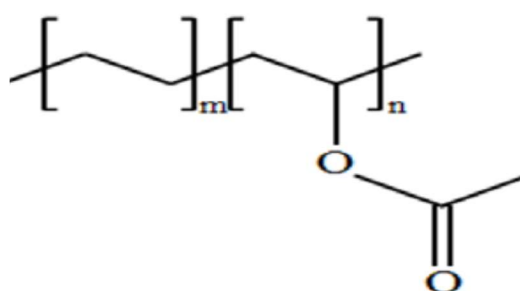


Figure 3.2. Structure de l'éthylène-acétate de vinyle (EVA) [32].

La modification du bitume avec l'EVA est caractérisée par une diminution de la pénétrabilité et une augmentation de la température bille et anneau.

D'une façon générale, Les bitumes modifiés par addition d'EVA ont les propriétés suivantes [30], [33]:

- Une meilleure résistance à la fatigue.
- Diminue la susceptibilité thermique.
- Améliore la résistance à la déformation du bitumen.
- Les EVA sont compatibles avec les liants.
- Recyclable et non toxicité.
- Élasticité et solidité à température ambiante.
- Stable au stockage.

3.4.3 .Caoutchoucs naturels et synthétiques

Le caoutchouc est caractérisé par son élasticité, son imperméabilité et sa résistance électrique. Le caoutchouc naturel est obtenu à partir d'un liquide blanc laiteux appelé latex, fourni par de nombreuses plantes, les caoutchoucs synthétiques sont des élastomères préparés à partir d'hydrocarbures insaturés[34] .

Le caoutchouc naturel est facilement décomposé et oxydé. Son poids molaire est trop élevé pour être directement dissous dans le bitume. Il doit être partiellement écomposé et mécaniquement homogénéisé.

Les caoutchoucs naturels et synthétiques sont mieux dispersés sous forme de latex.

Parmi les polymères de ce groupe, on distingue : [35]

- Le caoutchouc naturel (NR).
- Le caoutchouc styrene butadiene rubber (SBR).
- Le polychloroprène ou Néoprène (CR).
- Le polybutadiène (BR).
- Le caoutchouc Le polyisoprène.
- Le caoutchouc Le polychloroprène.
- Le nitrile butadiène (NBR).

3.4.4 .Caoutchoucs thermoplastiques

Les caoutchoucs thermoplastiques forment une nouvelle catégorie d'élastomères, qui a attiré l'attention de l'industrie depuis une quinzaine d'années [35], car ils combinent les caractéristiques d'élasticité et de résilience avec les caractéristiques de traitement des thermoplastiques. Ces propriétés sont liées à la configuration spécifique de ces copolymères, ce qui conduit à la microstructure d'origine.

Tous les caoutchoucs thermoplastiques introduisent dans le bitume des éléments forts de déformation élastique et peuvent obtenir une dispersion stable. Cependant, en raison de la présence de doubles liaisons dans la chaîne principale, sa résistance à la chaleur et à l'oxydation est plus faible que celle des polyoléfin.

Les caoutchoucs d'Éthylène-Propylène-Ruber (EPR) sont des caoutchoucs thermoplastiques contenant environ 50 à 60% d'éthylène. Ils se mélangent bien avec

Les bitumes, de sorte qu'ils peuvent être utilisés pour ajuster les propriétés des bitumes, telles que la viscosité.

3.5. Utilisation de polymères vierges dans la modification des bitumes

Les bitumes modifiés par des polymères (BmP) sont largement utilisés dans de nombreux aspects de la construction d'infrastructures, tels que les chaussées, l'imperméabilisation et les couches de protection. L'une des utilisations les plus importantes des BmP est la construction de chaussées en raison de leurs excellentes performances routières.

Plusieurs types de polymères ont été utilisés comme modificateurs de bitume tels que SBS (Styrène Butadiène Styrène), EVA (Ethylène Vinyle Acétate), LDPE / HDPE (polyéthylène basse et haute densité) et caoutchouc [36], [37].

Le bitume modifié par le caoutchouc considérablement améliore ses performances, son élasticité et sa ténacité à basse température. Les copolymères de polyéthylène (PE), d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) ou d'autres des bitumes modifiés par une résine thermoplastique ont une meilleure sensibilité à la température et des propriétés à haute température [28].

Bien que ces polymères améliorent toutes les propriétés du bitume dans une certaine mesure, il existe encore certains inconvénients limitant le développement futur de la modification des polymères de bitume, tels que le coût élevé, la faible résistance au vieillissement et la mauvaise stabilité au stockage du bitume modifié par des polymères (BmP) [38].

3.6. Procédés 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 [39]. 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 Laisser refroidissait 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. Domaines d'application du bitume modifié:

- **Autoroutes et routes à fort trafic:** pour résister aux charges importantes par essieu des camions et éviter l'orniérage.
- **Pistes d'aéroport:** pour résister à la pression des atterrissages d'avions et assurer la durabilité de la surface sous de fortes contraintes.
- **Zones aux climats rigoureux:** notamment dans les zones désertiques (comme la vallée), pour résister à des températures très élevées en été et à des températures basses en hiver.
- **Ouvrages d'art et ponts:** Il est utilisé comme couche d'étanchéité grâce à sa grande élasticité qui résiste aux mouvements de dilatation et de contraction des structures.

- **Zones urbaines et intersections:** où les arrêts et démarrages brusques des véhicules sont fréquents, nécessitant une forte adhérence pour éviter le fluage de l'asphalte.
- **Zones logistiques et ports:** Sur les quais de chargement soumis à des charges constantes et très lourdes pendant de longues périodes.
- **Couches très fines (Bétons Bituminés Minces):** Pour assurer une forte cohésion des granules dans des couches superficielles minces.
- **Grands parkings :** pour accroître la résistance de la surface à l'érosion et à la déformation dues aux manœuvres continues.

3.8. Essais spécifiques aux liants modifiés

La plupart des essais et techniques d'études utilisés pour les bitumes purs peuvent être employés pour la caractérisation des bitumes modifiés. Il est cependant nécessaire, dans certains cas, d'adapter certains aspects des modes opératoires.

3.8.1. Observation microscopique

Les techniques d'observation microscopique pour trouver l'état de dispersion de la phase polymère dans le bitume ou l'émulsion.

Cette technique est basée sur le principe que les polymères gonflés par certains composants de bitume auquel ils sont ajoutés sont fluorescents lorsqu'ils sont éclairés par une lumière ultra-violette. Ils réémettent une lumière jaune - vert alors que le bitume lui-même reste noir.

3.8.2. Stabilité au stockage

Plusieurs recherches indiquent que l'utilisation du bitume modifié à la place du bitume pur présente de nombreux avantages, cependant, toutes les caractéristiques des mélanges bitume / polymère ne sont pas positives, L'un des plus gros problèmes est l'instabilité au stockage [40].

La faible compatibilité entre le bitume et le polymère peut conduire à une séparation de phases lorsque le matériau est stocké à haute température (160-200 C) en l'absence d'agitation. Dans un tel cas, une phase riche en polymère migre vers la partie supérieure du réservoir de stockage, tandis qu'une phase riche en bitume se sépare dans la partie inférieure. Il en résulte un matériau inhomogène et peut causer des

problèmes en raison de la viscosité extrêmement élevée de la pièce à très haute teneur en polymère.

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 [41].

Il existe d'autres méthodes basées sur l'indice de stabilité au stockage [34] défini comme étant le rapport entre la valeur du module d'élasticité G' mesuré à 0.1 rad/s et 50°C, au fond de tube de décantation et sa valeur correspondant à 30cm de profondeur.

Un indice global égal à 1 indiquerait que le liant est stable, alors que les valeurs plus élevées donnent des indications claires sur la sédimentation des particules du polymère.

La stabilité au stockage des bitumes modifiés dépend de divers facteurs, tels 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 de la viscosité entre le bitume et le polymère et les paramètres du malaxage (le temps et la vitesse d'agitation) ...

La composition complexe du bitume de base rends thermodynamiquement incompatible avec divers modificateurs, ce qui affectera négativement sur la stabilité au stockage du bitume modifié [42].

3.8.3. Essai force-ductilité

Différents tests ont été développés pour évaluer l'amélioration de la résistance à l'étirement des bitumes modifiés aux polymères. Parmi ceux-ci, l'essai de force-ductilité

présente l'avantage d'utiliser un appareil d'essai relativement simple et courant, un ductilimètre. Pendant l'essai, la force et l'allongement sont mesurés à une vitesse d'étirement constante de 50 mm / min. Le test force-ductilité peut déterminer la cohésion des bitumes modifiés.

La phase élastique est représentée par la surface sous la courbe avant le pic initial, et la surface totale peut être utilisée pour calculer la dureté. C'est un bon indicateur de l'énergie nécessaire pour rompre les liaisons entre les molécules du bitume, et par conséquent, une bonne évaluation de la résistance aux fissures.

3.9. Valorisation des résidus plastiques en technique routière

Le plastique se distingue par sa grande polyvalence, bien qu'il constitue aujourd'hui une problématique environnementale majeure à l'échelle mondiale. Sa persistance dans l'écosystème, pouvant atteindre 45 siècles selon certaines recherches, ainsi que sa nature non biodégradable, en font une source de pollution visuelle et écologique préoccupante [43]. Scientifiquement, le terme "plastique" regroupe une vaste gamme de polymères organiques synthétiques [35].

L'expansion fulgurante de la consommation de ces matériaux s'explique par des propriétés avantageuses: légèreté, robustesse, facilité de transformation et coût de production réduit. Ces atouts ont favorisé leur intégration dans divers secteurs tels que l'emballage (qui absorbe 50 à 60 % de la production), l'industrie automobile, le domaine médical et les systèmes de télécommunication [44], [45].

Sur le plan statistique, la production mondiale a connu une croissance exponentielle, passant de 5 million de tonnes au milieu du XXe siècle à environ 100 million à l'aube du XXIe siècle [45]. Concernant les sacs en polyéthylène, la production globale avoisine les 5 billion d'unités par an. **L'Algérie figure parmi les plus grands consommateurs mondiaux avec un volume annuel estimé à 6 milliards de sacs** [46].

- **Amélioration des performances du liant:** Contrairement au bitume pur, le bitume modifié par des plastiques présente une **rigidité accrue** et une meilleure **résistance aux déformations permanentes (orniérage)** [48], [49].
- **Preuve de durabilité:** L'exemple de l'Inde, avec plus de 2500 km de routes réalisées depuis l'an 2000, démontre l'efficacité de ce procédé. Les suivis techniques

après plusieurs années de service ne révèlent aucune dégradation majeure, telle que l'arrachement de granulats ou la fissuration [50].

3.10- Conclusion

La modification des bitumes est une avancée technologique majeure qui répond aux défis posés par les conditions climatiques variées et les exigences de trafic élevé.

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur les études de modification des bitumes par des polymères de manière générale, et les déchets les déchets en matières plastique.

Partie 2:
Partie expérimentale

Chapitre 4

Matériaux utilisés et méthodes d'essais

4.1 Introductions

Ce volet expérimental est consacré, dans un premier temps, à l'exposition des constituants élémentaires ainsi qu'à la méthodologie de confection des liants bitumineux modifiés. Par la suite, nous détaillerons les protocoles expérimentaux retenus pour l'évaluation de leurs performances en précisant pour chaque test l'appareillage normatif et les étapes opératoires suivies. La caractérisation physique s'appuie sur les indices de pénétrabilité et de point de ramollissement. Quant à la durabilité des mélanges, elle est évaluée par les dispositifs RTFOT et PAV afin de simuler respectivement le vieillissement thermique à court et à long terme.

4.2 Présentations des matériaux

4.2.1 Le Bitume

Nous avons choisi ce type de bitume 35/50 car c'est le plus couramment utilisé en Algérie. Il constitue le principal composant des couches de roulement du réseau routier et aéroportuaire algérien.

Le Tableau 4.1 rassemble les différentes caractéristiques physiques du bitume pur. L'analyse de ces résultats montre que les paramètres mesurés s'inscrivent parfaitement dans les seuils réglementaires fixés par la norme NF EN 12591 pour un grade 35/50.

Tableau 4.1. Propriété physique de bitume de base.

Type d'essai	Résultat	Spécification
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	40	35-50
Température bille et anneau « TBA » (°C)	52.4	50-58
Indice de pénétrabilité « IP »	-1.12	$-3 \leq IP \leq +7$
Ductilité (cm)	100	100

4.2.2 Les déchets plastiques

Nous avons choisi comme déchet plastique pour cette étude les sacs d'emballage alimentaire. La méthode de préparation consiste à les découper en morceaux de 2 à 5 mm.

Le plastique incorporé présente une formule chimique (C_3H_6) n avec une densité de $0,9 \text{ g/cm}^3$. Sa température de fusion est fixée à 160°C [51].



Figure 4.1. Déchet plastique alimentaire

4.3 Les essais utilisés

4.3.1. Pénétrabilité (NF EN 1426)

La pénétrabilité d'un liant bitumineux est la consistance exprimée comme la profondeur, en dixièmes de millimètres, d'une aiguille normalisée de 1mm de diamètre, sous une charge de 100g, appliquée pendant 5 secondes sur un échantillon de bitume maintenu à 25°C . Dans ces conditions, plus le bitume est dur, plus la valeur de sa pénétration est faible. Le test de la pénétrabilité peut être considéré comme une mesure indirecte de la viscosité du bitume à 25°C .



Figure 4.2. Appareillage de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille

4.3.2. Température de ramollissement Bille Anneau (NF EN 1427):

La température de ramollissement est à la température à laquelle le matériau atteint une certaine consistance c-à-d la température la plus élevée à laquelle la cohésion du bitume disparaît.

Deux disques horizontaux de bitumes, moulés dans des anneaux de laiton à épaulement, sont chauffés dans un bain liquide avec un taux d'augmentation de la température contrôlé (5 °C par minute), alors que chacun soutient une bille d'acier. La température de ramollissement notée doit correspondre à la moyenne des températures auxquelles les deux disques se ramollissent suffisamment pour permettre à chaque bille, enveloppée de bitume, de descendre d'une hauteur de 25 mm $\pm$ 0,4 mm. Plus la température de ramollissement est élevée, plus le bitume est dur.

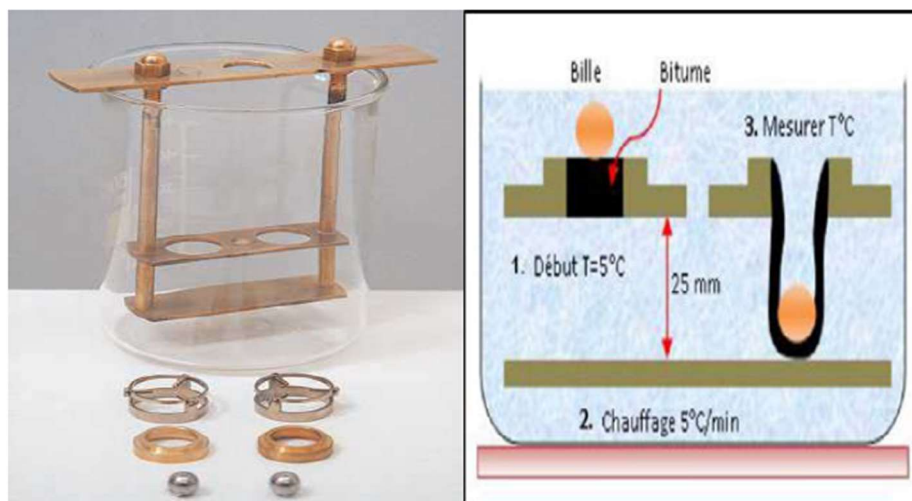


Figure 4.3. Matériel et principe de l'essai de la température bille et anneau

4.3.3. Essai de stabilité au stockage (EN 13399 / LC 25-003)

Pour déterminer la stabilité des bitumes, on a utilisé une caractérisation qui est mesurée à l'aide de l'essai dit « essai de décantation ». Le principe de cet essai est consisté à remplir des tubes en aluminium (de 4 cm de diamètre et 15,0 cm de hauteur) avec du bitume, puis placer ces derniers verticalement dans un four à 165°C pour une durée de 48 heures. Le tube contenant le bitume modifié est ensuite refroidi à -5 °C et coupé horizontalement en trois sections égales. Enfin, la stabilité au stockage de l'échantillon est déterminée en mesurant le point de ramollissement des sections supérieure et inférieure de chaque échantillon. La différence de points de ramollissement entre les sections supérieure et inférieure du tube a été mesurée.

Lorsque la différence est inférieure à 2,5°C, l'échantillon peut être considéré comme ayant une bonne stabilité au stockage.

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

Le programme RTFOT est utilisé pour simuler le vieillissement pendant le stockage, le mélange, le transport et la mise en place.

Cette méthode d'essai est destinée à mesurer l'effet de la chaleur et de l'air sur un film en mouvement de matériau bitumineux. Le RTFOT, dans lequel les conditions sont similaires au vieillissement à court terme réel qui a lieu sur le site où le liant est appliqué, est utilisé pour estimer le vieillissement à court terme à haute température en laboratoire. Dans cette méthode, les fioles en verre sont chauffées à 160 ° C avant de charger l'échantillon. Ensuite, $35 \pm 0,5$ g de bitume sont versés dans ces fioles en verre. Ces fioles sont ensuite placées dans un four chauffant à 163°C pendant 75 minutes avec un débit d'air de 4 L / min. Ensuite, les liants vieillis sont évalués en mesurant leurs propriétés physiques / rhéologiques et leurs caractéristiques chimiques. L'équipement du protocole RTFOT est représenté dans la figure 4.4.



Figure 4.4 Fioles du protocole RTFOT (vide, avant le test et après le test)

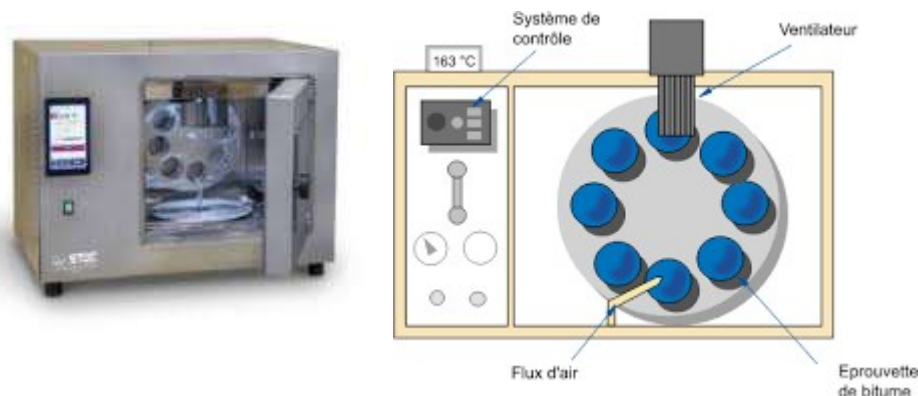


Figure 4.5. Appareillage du protocole RTFOT

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

Le protocole « Pressure Aging Vessel » ou PAV sert à simuler en laboratoire le vieillissement à long terme des bitumes. Ce protocole a été développé afin de simuler le vieillissement des enrobés pour un équivalent de 7 à 8 ans de mise en service. Le bitume utilisé pour le PAV est d'abord vieilli par RTFOT ou TFOT afin de simuler le vieillissement à court terme, car la simulation du vieillissement à long terme doit prendre en compte le vieillissement à court terme.

La procédure standard, réglementée par la norme EN 14769, consiste à placer 50 grammes de bitume conditionné au RTFOT dans des plateaux d'acier inoxydable, comme présenté à la Figure 4.7. Plusieurs plateaux sont alors placés dans une enceinte chauffée à 100 °C sous une pression d'air sec de $2,1 \pm 0,1$ MPa, pendant une durée de 20 heures. À la fin du test, les plateaux sont retirés du PAV et placés dans un four réglé à 163 °C. Le bitume doit être chauffé à un niveau suffisant pour être versé, puis agité doucement pour aider à éliminer les bulles d'air avant d'autres tests.



Figure 4.6. Plateaux du protocole PAV

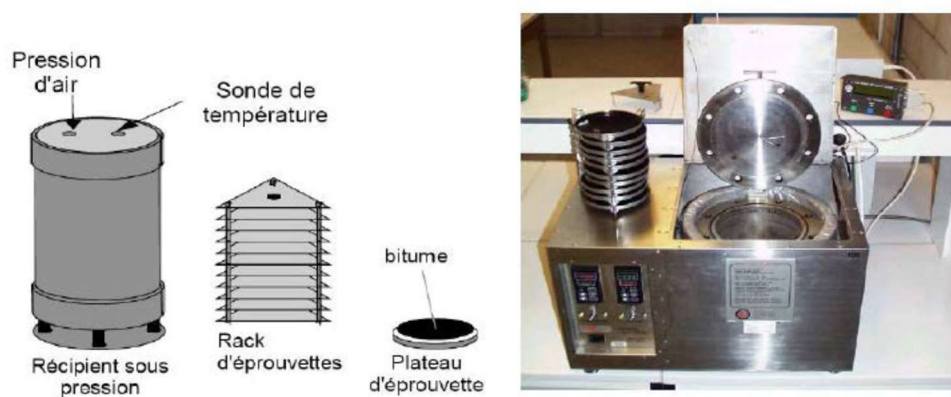


Figure 4.7. Appareillage du protocole PAV

4.4 Préparations des bitumes modifiés

Après avoir sélectionné le bitume de classe 35/50, les additifs plastiques sont incorporés à des teneurs de 2%, 4% et 6%. Le mélange est effectué à une température de 170°C, avec une vitesse de rotation de 1200 tr/min, pour des durées de mélange respectives de 45, 90 et 135 minutes.

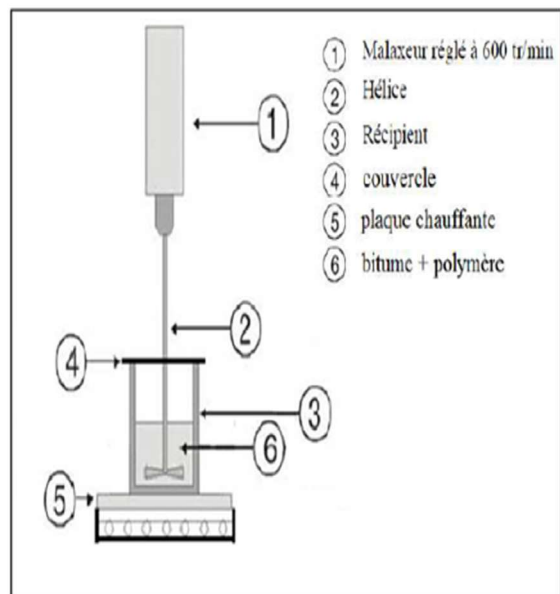
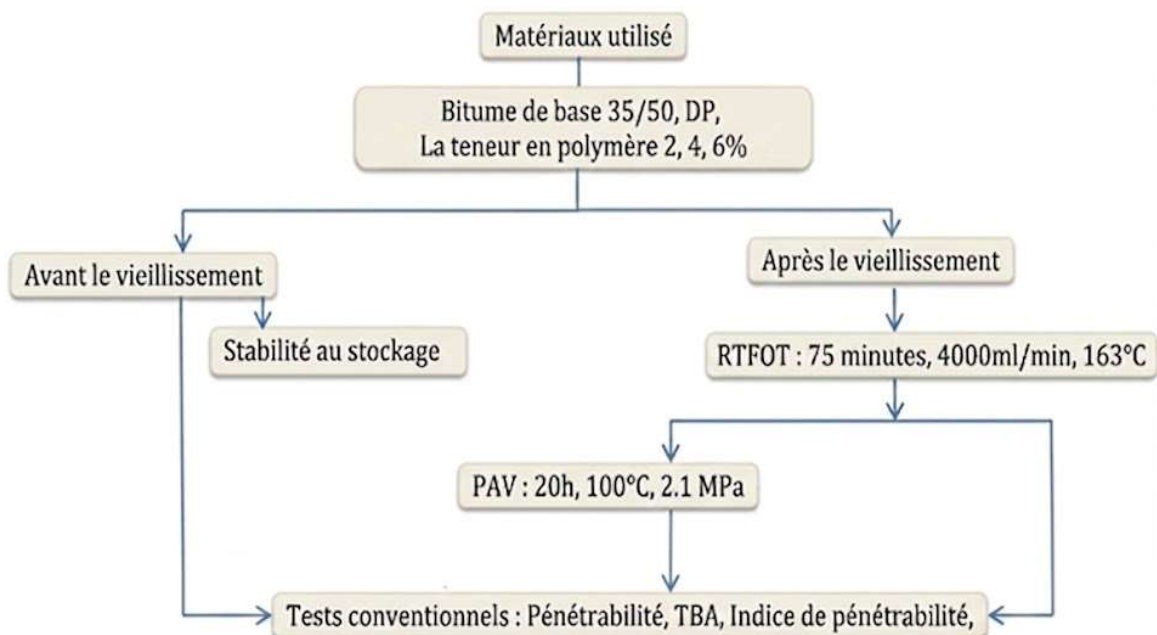


Figure 4.8. Appareillage de modification

Figure 4.9. Résumé des matériaux utilisés et du protocole expérimental.



Chapitre 05

**Effet du déchets plastiques sur
les propriétés des bitumes modifiés.**

5.1- Introduction.

Ce chapitre expose les résultats des tests standards, tels que la pénétrabilité à 25 °C, la température bille et anneau, ainsi que la stabilité au stockage, réalisés sur le bitume 35/50 et sur les bitumes altérés par l'incorporation de déchets plastiques à divers pourcentages. Ces données permettront d'analyser les propriétés empiriques classiques des liants étudiés pour anticiper l'impact de ce changement sur la consistance des bitumes modifiés.

5.2 Pénétrabilité.

5.2.1. Influence du temps de malaxage sur la pénétrabilité.

Les résultats de la pénétrabilité à 25 °C en relation avec la proportion de déchets plastiques et le temps de malaxage, sont présentés dans le tableau 5.1

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

pénétrabilité à 25 °C	45min	90 min	135 min
0%DP	39	37	34
2%DP	38	36	33
4%DP	35	32	29
6%DP	27	24	21

5.2.1.1 Variation de la pénétrabilité en fonction du temps de malaxage

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

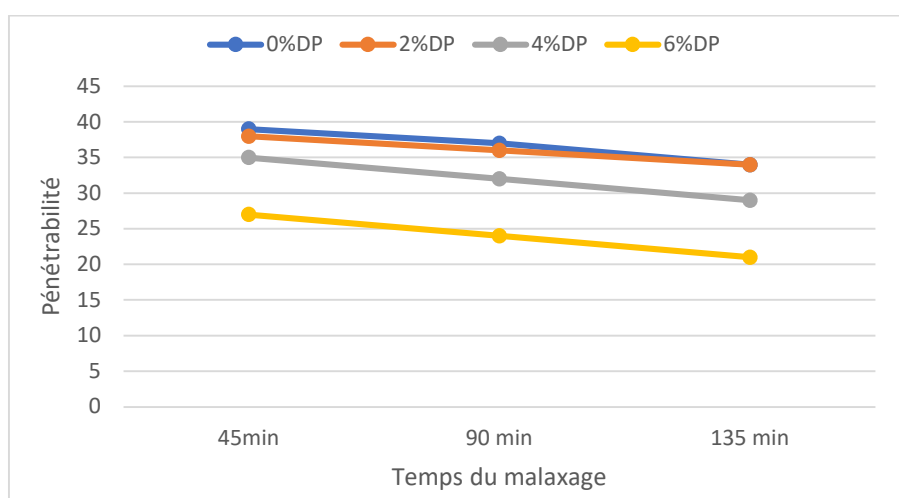


Figure 5.1 pénétrabilité en fonction du temps de malaxage

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

5.2.2 Influence de la teneur en DP sur la pénétrabilité

Les résultats d'évolution de la pénétrabilité en fonction de la teneur en **DP** sont représentés sur la figure 5.2.

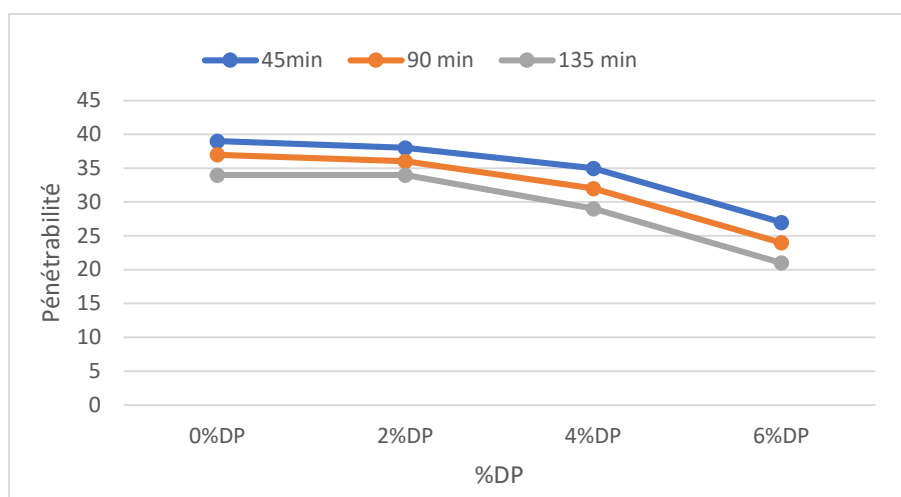


Figure 5.2 pénétrabilité en fonction du DP

La figure 5.2 indique que la pénétrabilité décroît avec l'augmentation de la concentration en DP. Par rapport au bitume de base (0% DP), les bitumes modifiés sont plus consistants, ce qui indique que les bitumes modifiés avec du DP pourraient présenter une performance supérieure à haute température. En général, le renforcement de la rigidité du bitume suite à l'incorporation de résidus de DP peut optimiser sa résistance aux déformations à des températures élevées.

5.3. Température de ramollissement Bille Anneau

Les résultats de la TBA en fonction de la durée de malaxage et de la teneur en **DP** sont rassemblés dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2: Variation de la TBA pour les différents mélanges.

TBA (°C)	45min	90min	135min
0%DP	53	55	57
2%DP	56	58	60
4%DP	58	61	63
6%DP	63	65	69

5.3.1 Influence du temps de malaxage sur la TBA

La figure 5.3 représente la TBA (°C) en fonction de la durée de malaxage. De manière générale, on observe que la valeur de la TBA augmente progressivement avec le temps de mélange (de 45 à 135 minutes) pour toutes les concentrations. De plus, l'ajout de déchets plastiques accentue cette augmentation, les valeurs de température de ramollissement les plus élevées étant enregistrées pour une concentration de 6 % de DP. Ce comportement indique que le temps de mélange et l'ajout de déchets plastiques augmentent la rigidité du bitume. Par conséquent, cette modification améliore significativement la résistance de la liaison homologue à la déformation permanente à haute température.

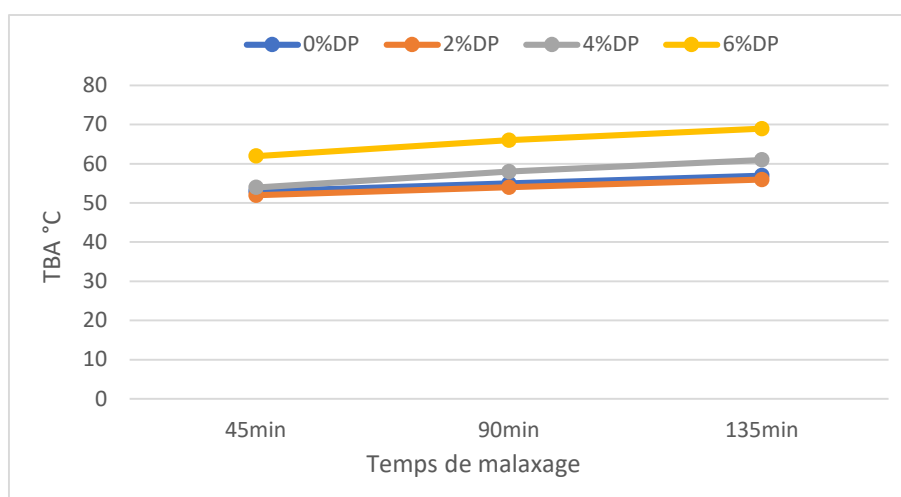


Figure 5.3 TBA (°C) en fonction de la durée de malaxage

5.3.2. Influence de la teneur en DP sur la TBA

Cette courbe illustre l'évolution de la température de ramollissement (TBA) en fonction du pourcentage de déchets plastiques (% DP) pour différentes durées de mélange. On observe qu'à 2 % DP, la valeur de la TBA diminue légèrement, se stabilisant ainsi par rapport au bitume pur (0 %). Cependant, au-delà de ce seuil, on observe une augmentation significative et linéaire de la TBA, atteignant son maximum à une concentration de 6 % DP. Cette évolution est directement proportionnelle à l'augmentation du temps de mélange, démontrant qu'un mélange prolongé (135 minutes) associé à un pourcentage élevé de DP optimise la consistance du bitume. Par conséquent, cette modification améliore significativement la stabilité thermique du liant et le protège de l'affaissement.

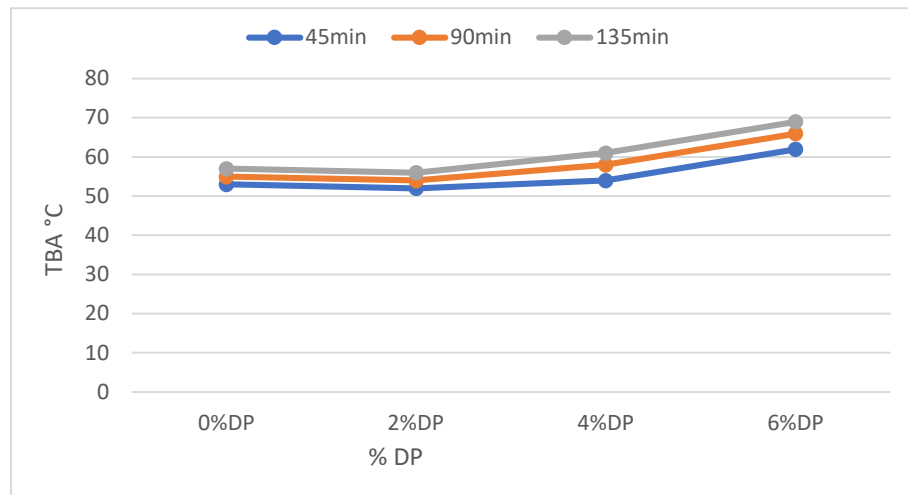


Figure 5.4 TBA (°C) en fonction de déchets plastiques

5.4 Stabilité au stockage

Pour évaluer la stabilité en entreposage, nous avons installé chaque mélange sans délai, après la production dans un tube cylindrique en aluminium où il a été gardé en position verticale à une température de 165°C durant 48 heures. Il a ensuite été placé dans un congélateur à une température de -5°C pour le refroidissement. Le tube a ensuite été sectionné en trois morceaux de longueur égale à l'aide d'une cuillère et d'un maillet. La variation des points de TBA parmi les sections. La partie inférieure et supérieure du tube a été évaluée. Lorsque l'écart est en dessous de 2,5 C, on peut estimer que l'échantillon présente une bonne stabilité lors du stockage. Ce test est employé pour vérifier l'uniformité et la compatibilité du bitume avec le polymère. **Les résultats de stabilité au stockage des bitumes modifiés sont présentés dans la figure 5.5**

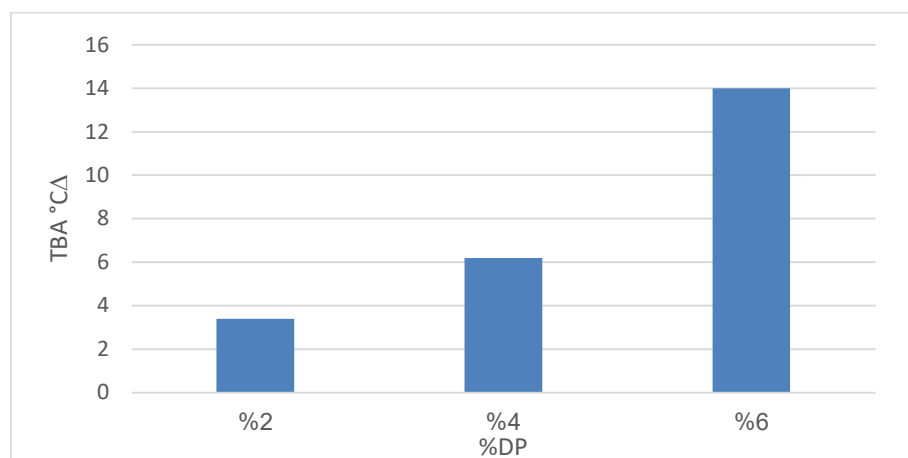


Figure 5.5. Résultats de stabilité au stockage des bitumes modifiés

Selon les résultats présentés dans la figure 5.5, il est possible de conclure que la stabilité au stockage des bitumes modifiés sont grandement affectés par la teneur en DP. L'instabilité des bitumes modifications avec DP peuvent être causées par une hausse de la quantité d'asphaltènes et la formation d'amas entraînant une séparation de phase. Ont déterminé que le DP est mal dispersé dans le bitume et l'échantillon subit une séparation de phase durant le stockage. Pour aborder le problème d'instabilité, les chercheurs ont testé divers types deréponses, comme :

- L'incorporation de soufre.
- Garder le mélange en agitation lors des températures de stockage et de transport

5.5 Conclusion

Ce chapitre illustre l'effet de l'ajout de déchets locaux, à savoir des déchets plastiques (DP), sur les propriétés physiques 'un bitume de grade 50/35. Les propriétés du bitume modifié ont été déterminées à l'aide d'essais conventionnels, tels que l'essai de pénétration (perméabilité) à 25 °C, la température de lissage (essai bille-anneau) et la stabilité au stockage.

Les différentes conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les tests physiques montrent que les bitumes modifiés sont plus consistants, en effet la pénétrabilité diminue et le point de ramollissement augmente en fonction de la teneur des déchets utilisés.
- La stabilité au stockage des bitumes modifiés est fortement influencée par la teneur en polymère.

Chapitré 06 :
Effet du DP sur le vieillissement des bitumes

6.1. Introduction

Ce chapitre souligne l'impact de l'incorporation de déchets plastiques sur le vieillissement du bitume à court et à long terme. Pour évaluer cet effet en laboratoire, le vieillissement à court terme a été reproduit par la méthode RTFOT, alors que la méthode PAV a été employée pour simuler le vieillissement à long terme. Le niveau de durcissement des échantillons a par la suite été analysé grâce à des tests physiques standards, en mesurant notamment les valeurs de pénétration et le point de ramollissement.

6.2- Caractéristiques physiques des liants bitumineux modifiés après vieillissement.

6.2.1- Pénétrabilité à 25 °C

Les résultats concernant la pénétrabilité des bitumes, jugés selon leur proportion de déchets plastiques (DP) après les tests de vieillissement RTFOT et PAV, sont présentés dans le tableau 6.1 et schématisés dans la figure 6.1.

L'examen de ces résultats montre une réduction notable de la pénétrabilité des liants après les deux cycles de vieillissement (RTFOT et PAV). Cette diminution est due au durcissement du bitume, principalement causé par la perte de ses fractions légères [26]. De plus, la différence entre les valeurs de pénétrabilité observées avant et après l'essai RTFOT diminue grâce à l'ajout des déchets plastiques, attestant que ces polymères recyclés renforcent la résistance du liant au durcissement.

De plus, l'évolution de la pénétrabilité apparaît plus marquée lors du vieillissement à court terme (avant et après RTFOT) par rapport au vieillissement à long terme (entre RTFOT et PAV). Cela indique que le phénomène de durcissement est beaucoup plus prononcé à court terme, ce qui correspond à la phase de production et d'application des enrobés bitumineux.

Tableau 6.1: Pénétrabilité des bitumes modifiés en fonction de la teneur en DP avant et après vieillissement.

Teneur en DP %				0%	2%	4%	6%
Pénétrabilité à 25 °C (mm)	Vieillissement	Avant		34	33	29	21
		Après	RTFOT	28	25	23	18
			PAV	21	20	17	14

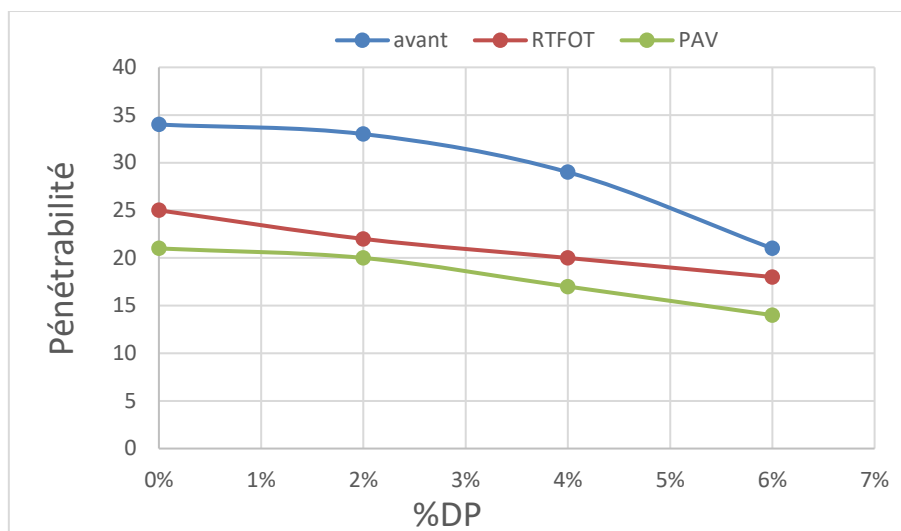


Figure 6.1: Pénétrabilité des bitumes modifiés en fonction de la teneur en DP avant et après vieillissement

6.2.2- Point de ramollissement

Les valeurs de la température de ramollissement, mesurées en relation avec le pourcentage de déchets plastiques (DP) ajoutés avant et après les cycles de vieillissement, sont enregistrées dans le tableau 6.2 et représentées par la figure 6.2.

Les résultats de la figure 6.2 révèlent que l'incorporation de déchets plastiques (DP) entraîne une hausse continue de la température de ramollissement bille et anneau (TBA), ce qui suggère une amélioration significative de la rigidité du bitume. Ce phénomène de durcissement se trouve accentué lors des phases de vieillissement à court terme (RTFOT) et à long terme (PAV), où l'on observe une augmentation progressive de la TBA à chaque taux de DP ; ce processus s'explique principalement par l'oxydation du liant et la perte de ses éléments volatils. Ainsi, la montée des courbes met en évidence l'effet cumulatif bénéfique de l'additif DP et du vieillissement, qui renforce la résistance thermique globale du liant face aux déformations permanentes (orniérage).

Tableau 6.2: Point de ramollissement des bitumes modifiés en fonction De la teneur en DP avant et après vieillissement.

Teneur en DP %				0%	2%	4%	6%
TBA °C	Vieillissement	Avant		57	60	63	69
		Après	RTFOT	61	64	66	71
			PAV	66	68	71	77

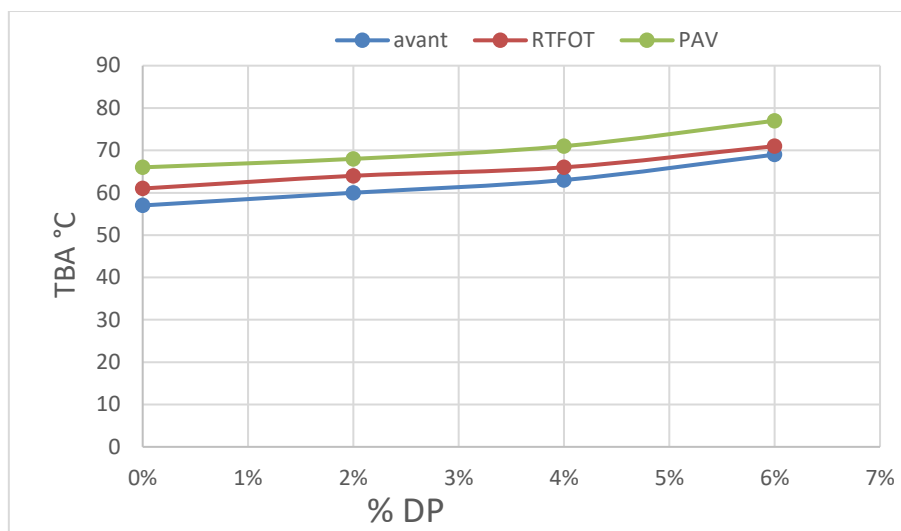


Figure 6.2 : Changement de la Température de Bille et Anneau (TBA) selon le pourcentage de DP avant et après le vieillissement.

6.2.3 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 01. (Où Pen₂₅ correspond à la pénétration à 25°C et TBA à la température de ramollissement).

$$IP = \frac{1952 - 500 \times \log(\text{Pen}_{25}) - 20 \times TBA}{50 \times \log(\text{Pen}_{25}) - TBA - 120} \quad (1)$$

Tableau 6.3: la susceptibilité thermique des bitumes

IP	0% DP	2% DP	4% DP	6% DP
Avant	-0.46	0.07	0.36	0.72
RTFOT	0.13	0.67	0.87	1.03
PAV	0.83	1.11	1.38	1.64

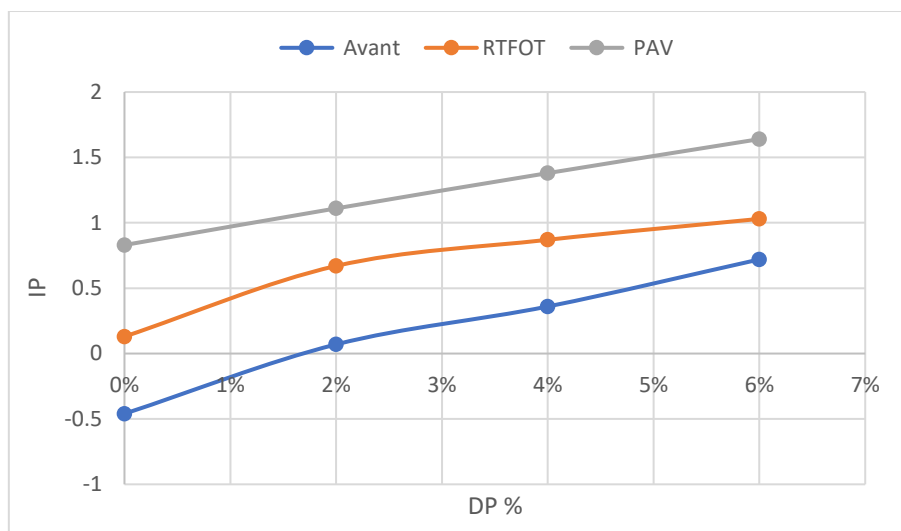


Figure 6.3: Indice de pénétrabilité des bitumes modifiés en fonction De la teneur en DP avant et après vieillissement.

Les figures 6.3 illustrent l'évolution de l'indice de pénétrabilité (IP) en fonction de la teneur en additif, avant et après les phases de vieillissement. Les résultats indiquent que l'IP augmente systématiquement après vieillissement, aussi bien pour le bitume pur que pour les liants modifiés. On observe également que l'écart d'IP avant et après le vieillissement à court terme (RTFOT) est moins prononcé pour l'ensemble des bitumes modifiés comparativement au bitume de base. À l'inverse, la différence d'IP entre les états RTFOT et PAV s'accroît avec l'incorporation de l'additif par rapport au bitume pur, à l'exception notable du mélange à 5 % de DP où cet écart demeure inférieur à celui du liant de référence.

6.3. Conclusion

Le durcissement de bitume de base et des bitumes modifiés, ont été étudiés dans ce chapitre en utilisant les propriétés physiques des liants avant et après vieillissement. Les résultats montrent que la dureté du bitume est plus remarquable après le vieillissement, expliquée par la variation importante des valeurs de pénétrabilité, du point de ramollissement. Cependant, cette variation diminue pour les liants modifiés. Pour tous les bitumes testés, l'effet du vieillissement à long terme et à court terme sont différents. L'influence de vieillissement après PAV est très importante par rapport à celle de 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

Cette étude a permis d'évaluer l'impact des déchets plastiques sur les caractéristiques des bitumes modifiés à partir d'un bitume de pénétration 35/50. Les différents essais effectués ont montré que l'incorporation de déchets plastiques a un impact notable sur les propriétés physiques, thermique et le vieillissement du liant bitumineux. Les résultats obtenus confirment que les déchets plastiques peuvent être utilisés comme agents modifiants afin d'améliorer certaines performances des bitumes routiers.

Les essais de pénétrabilité ont montré une diminution graduelle des valeurs avec l'augmentation du pourcentage de déchets plastiques. Cette diminution indique une augmentation de la rigidité et une diminution de la sensibilité du bitume aux charges imposées. Ainsi, le bitume modifié devient ainsi plus dur et plus résistant aux déformations permanentes sous l'effet du trafic.

Les résultats de la température de ramollissement Bille et Anneau (TBA) ont aussi indiqué une augmentation significative des valeurs après modification. Cette évolution signale une amélioration de la résistance thermique du bitume et une meilleure tenue aux températures élevées. Ainsi, l'incorporation de déchets plastiques contribue à réduire les risques d'orniérage et à renforcer la stabilité des routes dans les zones chaudes.

Cependant, les essais de stabilité au stockage ont révélé que l'augmentation de la teneur en déchets plastiques entraîne une diminution de l'homogénéité des mélanges. L'augmentation de la différence de température Bille et Anneau (ΔTBA) indique une séparation de phases entre le bitume et le polymère pendant le stockage à chaud. Cette instabilité devient particulièrement importante pour les fortes teneurs en plastique, notamment à 6 %DP, où une mauvaise dispersion et la formation d'amas ont été observées.

Les tests de vieillissement accéléré RTFOT ont démontré que les bitumes modifiés subissent un durcissement après exposition à des températures élevées et à l'oxydation. Cependant, les bitumes contenant des déchets

plastiques présentent une meilleure résistance au vieillissement thermique par rapport au bitume conventionnel. Les tests de vieillissement prolongé PAV ont confirmé cette tendance en mettant en évidence une amélioration de la durabilité et de la stabilité du liant au cours du temps.

L'ensemble des résultats indique que l'ajout des déchets plastiques dans les bitumes constitue une solution intéressante pour améliorer les performances thermiques et mécaniques des chaussées tout en valorisant les déchets plastiques. Cette méthode favorise aussi la sauvegarde de l'environnement et la diminution du volume des déchets rejetés.

En conclusion, les déchets plastiques représentent une alternative prometteuse pour la modification des bitumes 35/50. Néanmoins, il est essentiel de sélectionner un dosage optimal pour atteindre un équilibre satisfaisant entre l'amélioration des caractéristiques du bitume et la stabilité du mélange lors du stockage et de l'utilisation.

Perspectives

Les perspectives de cette étude consistent à approfondir l'utilisation des déchets plastiques dans les liants bitumineux en étudiant d'autres types de polymères recyclés et différentes proportions d'incorporation. Il serait également intéressant d'évaluer les performances mécaniques des enrobés modifiés à l'échelle réelle ainsi que leur comportement à long terme sous différentes conditions climatiques et de trafic. Enfin, des recherches complémentaires peuvent être menées afin d'améliorer la stabilité au stockage des bitumes modifiés et d'optimiser leur compatibilité avec le bitume de base.

- [1] M. Ould-henia. « Modélisation et prédiction du comportement rhéologique des mélanges bitume caoutchouc », Thèse de Doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, (2005).
- [2] Shell bitumes. « Bitumes techniques et utilisations », (1991)
- [3] Koshkarov, V., Shunyaev, I., & Koshkarov, E., 2023. Characteristics Evaluation of Modern Bituminous Binders in Group Hydrocarbon Composition and Their Application in Construction. *Materials Sciences and Applications*. <https://doi.org/10.4236/msa.2023.148026>.
- [4] KEBAILI Nabil, "L'asphalte caoutchouc valorisation de la poudrette de caoutchouc en domaine routier", Thèse de doctorat, Faculté science appliquées, ourgla, 2017.
- [5] 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.
- [6] Czajkowski, P., Przyjazny, A., & Boczkaj, G., 2023. Bitumen Aging—Laboratory Simulation Methods Used in Practice and Selected Directions of Research on New Methods. *Materials*, 16. <https://doi.org/10.3390/ma16020853>.
- [7] NGUYEN H.N., Etude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume, Thèse de doctorat Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, France, 2008
- [8] Singh, A. and Sahoo, J. (2019). Analysis and design of two layered flexible pavement systems: A new mechanistic approach. *Computers and Geotechnics*, 117, pp. 103238. doi: 10.1016/j.compgeo.2019.103238.
- [9] Verma, M. et Chouksey, A. (2024). Investigation of the Parameters on Asphalt Composites Pavement Design. *Journal of Engineering Research and Application*. doi: 10.55953/jera.2024.1.2.
- [10] Pérez-Acebo, H., Gonzalo-Orden, H., Findley, D. et Rojí, E. (2020). Modélisation de la performance de l'indice international de rugosité sur les chaussées semi-rigides dans les routes à une seule voie. *Construction and Building Materials*, pp. 121665. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121665.
- [11] M. ROBERT (J.F. LAFON), ROUTES Matériaux, Durabilité des chaussées MASTER 2 GENIE-CIVIL tome II, U.P.S. M2 UE1 2011/2012

- [12] Ghos, S., Ali, S., Zaman, M., Chen, D., Hobson, K. et Behm, M. (2021). Évaluation de la fissuration transversale des chaussées souples à l'aide d'une enquête sur le terrain et du logiciel AASHTOWare Pavement ME Design. *International Journal of Pavement Research and Technology* , 15, pp. 561 - 576. doi: 10.1007/s42947-021-00037-x .
- [13]Přikryl, R. (2021). Les géomatériaux comme agrégats de construction : un état de l'art. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* , 80, pp. 8831 - 8845. doi: 10.1007/s10064-021-02488-9 .
- [14] Wijenayake, U., Kumara, A., Langappuli, S. et Samaranayake, J. (2024). Amélioration des performances du bitume de pétrole 60/70 par modification avec du naphtalène brut. *Actes de la Conférence internationale sur les progrès en ingénierie routière et systèmes de transport (ICAHETS) (en ligne)* . doi : 10.31705/icahets.2024.5.
- [15] Magraman D, Amélioration des performances des enrobes bitumineux par la modification à base de polymères : poudrette de caoutchouc, thèse de magister 2009, ENSTP
- [16] PIARC, Use of modified bituminous binders, special bitumens with additives in road pavements, Laboratoire
- [17] Jean-Alphonse Farcas (2012), Étude de la composition chimique des bitumes et de leur susceptibilité à l'oxydation, IFSTTAR (ex-LCPC), ainsi que les guides techniques de l'IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité) relatifs à l'utilisation des bitumes modifiés par des polymères.
- [18] World Road Association (PIARC), "Use of Modified Bituminous Binders, Special Bitumens and Bitumens with Additives in Road Pavements," no. N° 303, 1999.
- [19] U. Isacson and X. Lu, "Testing and appraisal of polymer modified road bitumens - state of the art," *Mater. Struct.*, no. 28, 139–159, 1995.
- [20] Guian Wen, Yong Zhang, Yinxi Zhang, and Kang Sun, "Rheological characterization of storage-stable SBS-modified asphalts," *Polym. Test.*, no. 21 295–302, 2002.

[21] Amir Modarres, "Investigating the toughness and fatigue behavior of conventional and SBS modified asphalt mixes," *Construction and Building Materials.*, no. 47 218–222, 2013, <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.044>.

[22] Gordon D. Airey, "Rheological properties of styrene butadiene styrene polymer modified road bitumens," *Fuel*, no. 82 1709–1719, 2003, doi: 10.1016/S0016-2361(03)00146-7.

[23] Feng Zhang, Jianying Yu, and Jun Han, "Effects of thermal oxidative ageing on dynamic viscosity, TG/DTG, DTA and FTIR of SBS- and SBS/sulfur-modified asphalts," *Constr. Build. Mater.*, no. 25 129–137, 2011, doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.048.

[24] Yintao Li, Linfan Li, Yan Zhang, Sufang Zhao, Leidong Xie, and Side Yao, "Improving the aging resistance of Styrene-Butadiene- Styrene Tri-Block Copolymer and application in polymer-modified asphalt," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. Vol. 116, no. 754–761, 2010,

doi: 10.1002/app.31458.

[25] I. N. Frolov, N. Y. Bashkirceva, M. A. Ziganshin, E. S. Okhotnikova, A. A., and Firsin, "The steric hardening and structuring of paraffinic hydrocarbons in bitumen," *Pet. Sci. Technol.*, no. 34:20, 1675–1680, 2016, doi: <http://www.tandfonline.com/loi/lpet20>.

[26] J. S. Chen and C. C. Huang, "Fundamental characterization of SBS-modified asphalt mixed with sulfur," *J. Appl. Polym. Sci.*, no. Vol. 103, 2817–2825, 2007.

[27] Magramane Djamel, "Amélioration des performances des enrobes bitumineux par la modification à base de polymères : Poudrette de caoutchouc," Mémoire de magister, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Kouba, Alger, 2011.

[28] Yu-Hsun Nien, Jean-Hong Chen, Wei-Chyum Chen, and Jian-Shiuh Chen, "Thermal and Rheological Properties of Maleated Polypropylene Modified Asphalt," *Polym. Eng. Sci.*, no. 1152–1158, 2005, doi: 10.1002/pen.20386.

[29] Attaelmanan Moatasim, Cheng Pei Feng, and Al-Hadidy Al, "Laboratory evaluation of HMA with high density polyethylene as a modifier," *Construction and Building Materials.*, no. 25(5), 2764–2770, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.037.

- [30] Sengoz Burak, Topal Ali, and Isikyakar Giray, "Morphology and image analysis of polymer modified bitumens," *Construction and Building Materials.*, no. 23 1986–1992, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.020.
- [31] Haddadi Smail, Ghorbel Elhem, Laradi Nadir, "Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA," *Construction and Building Materials.*, no. 22 1212–1219, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.01.028.
- [32] Magramane Djamel, "Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification à base de polymères : Poudrette de caoutchouc," Mémoire de magister, Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Kouba, Alger, 2011.
- [33] Sengoz Burak and Isikyakar Giray, "Evaluation of the properties and microstructure of SBS and EVA polymer modified bitumen," *Constr. Build. Mater.*, no. 22(9), 1897-1905., 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.07.013.
- [34] Soudani Khedoudja, "Contribution à l'étude du comportement rhéologique des bitumes modifiés par le déchet polymérique NBR - Influence sur les propriétés mécaniques et d'adhérences des enrobés," Thèse de doctorat en science, USTHB, Alger, 2016.
- [35] Nouali Mohamed, "Analyse des possibilités de valorisation des déchets de sachets plastiques dans l'amélioration des caractéristiques des enrobés bitumineux," Mémoire de magister, École Nationale Supérieure des Travaux Publics, Kouba, Alger, 2015.
- [36] Angelone Silvia, Marina Cauhapé Casaux, Manuel Borghi, and Fernando O. Martinez, "Green pavements: reuse of plastic waste in asphalt mixtures," *Green Pavements Reuse Plast. Waste Asph. Mix.*, no. 49(5), 1655- 25 1665, 2016.
- [37] Ming Liang, Shisong Ren, Weiyu Fan, and Xue Xin, "Storage stability and its relationship with microstructure of SBS modified de-oiled asphalt," *4th Int. Conf. Mech. Mater. Manuf. Eng. MMME 2016*, 2016.
- [38] Praveen Kumar, Tanveer Khan, and Maninder Singh, "Study on EVA modified bitumen," *Chem. Eng.*, no. 54A 12616-12618, 2013.
- [39] Haddadi Smail, "Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux," thèse de doctorat d'état, USTHB, Alger, 2007.

[40] O. Gonzalez, M. E. Munoz, and A. Santamaria, "Bitumen/polyethylene blends: using m-LLDPEs to improve stability and viscoelastic properties," *Rheol Acta*, no. 45: 603–610, 2006,

doi: 10.1007/s00397-005-0009-7.

[41] Daquan Sun, Fen Ye, Fangzhi Shi, and Weimin Lu, "Storage stability of SBS-modified road asphalt preparation, Morphology, and Rheological Properties," *Pet. Sci. Technol.*, no. 24:9, 1067–1077, 2006,

Doi: 10.1081/LFT-200048186.

[42] SuPing Lyu, Frank S. Bates, and Christopher W. Macosko, "Modeling of coalescence in polymer blends," *AIChE J.*, no. Vol. 48, No. 1, 2002.

[43] Amit Gawande, G. Zamare, V.C. Renge, and Saurabh Tayde, "AN OVERVIEW ON WASTE PLASTIC UTILIZATION IN ASPHALTING OF ROADS," *J. Eng. Res. Stud.*, no. JERS/Vol. III/ Issue II, 2012.

[44] Rokade S, "Use of waste plastic and waste rubber tyres in flexible highway pavements," presented at the international conference on future environment and energy IPCBEE, 2012

[45] Rafat Siddique, Jamal Khatib, and Inderpreet Kaur, "Use of recycled plastic in concrete: A review," *Waste Manag.*, no. 28 1835–1852, 2008, doi: 10.1016/j.wasman.2007.09.011.

[46] Nouali Mohamed, Derriche Zohra, Ghorbel Elhem & and Chuanqiang Li, "Plastic bag waste modified bitumen a possible solution to the Algerian road pavements," *Road Materials and Pavement Design*. no. 1-13, 2019,

doi: 10.1080/14680629.2018.1560355.

[47] Amit P. Gawande, "Economics and viability of plastic road : A review," *J. Curr. Chem. Pharm. Sci.*, no. 3(4) 231-242, 2013.

[48] Mohd Ezree Abdullah *et al.*, "Effect of waste plastic as bitumen modified in asphalt mixture," *Matec Web Conf.* 103 1-7, 2017.

[49] Al-Hadidy, A. I and Yi-qiu, T., "Evaluation of pyrolysis LDPE modified asphalt paving materials," *Construction and Building Materials.*, no. 23(3), 1456-1464, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.07.004.

[50] R. Vasudevan, A. Ramalinga Chandra Sekar, B. Sundarakannan, and R. Velkennedy, "A technique to dispose waste plastics in an ecofriendly way – Application in construction of flexible pavements," *Construction and Building Materials.*, no. 28 311–320, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.08.031.

[51] FETHIZA ALI Boubaker. Contribution à l'Étude du Comportement des Bitumes Modifiés par l'Association du NBR et de Déchets Plastiques. These de doctorat, USTHB, 2021