

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**



Thèse de Doctorat En Sciences

Spécialité : Génie civil

Option : Géotechnique et Environnement

Présentée par :

M^{me} HADJ ABDERRAHMANE Saïda

Thème

L'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques du béton bitumineux pour les chaussées souples- cas des routes de Tizi-Ouzou

Devant le jury composé de :

Mr. DEHMOUS Hocine	M.C.A	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)	Président
Mr. GABI Smail	Professeur	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)	Rapporteur
Mr. BOUDDLAL Omar	M.C.A	Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)	Examineur
Mr. KACI Salah	Professeur	Université d'Alger 1	Examineur
Mr. KENNOUCHE Salim	M.C.A	Université Akli Mohand Oulhadj de Bouira (AMOUB)	Examineur
Mr. ARIBI Chouaib	M.C.A	Université M'Hamed BOUGARA de Boumerdès (UMBB)	Examineur

Année universitaire 2023 / 2024

-Remerciements-

Je tiens à remercier tout d'abord «**DIEU**», Tout-Puissant et Miséricordieux, qui m'a donné le courage, la volonté, la santé, la patience et les moyens de mener à terme ce modeste travail.

Je remercie à profondément ma petite famille qui a été infiniment patiente, pour que je puisse arriver à finir cette thèse.

J'exprime toute ma gratitude à Mr GABI Smail, Professeur à l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO), et directeur de cette thèse, pour la confiance qu'il m'a accordée, pour ses remarques, ses orientations et ses conseils pertinents. Je le remercie infiniment pour son encadrement tout le long de mon parcours universitaire d'Ingénieur, de Magister, et de Doctorat.

Je présente mes remerciements à Mr DEHMOUS Hocine, Maître de conférences à l'Université de Tizi-Ouzou, qui a accepté de présider le jury de soutenance de ma thèse, et aussi pour l'attention qu'il lui a portée.

Je remercie chaleureusement Mr BOUDDLAL Omar, Maître de conférences à l'Université de Tizi-Ouzou, Mr KENNOUCHE Salim, Maître de conférences à l'Université de Bouira (AMOUB), et Mr ARIBI Chouaib, Maître de conférences à l'Université de Boumerdès (UMBB), qui m'ont honorée de bien vouloir lire, évaluer, et examiner ce travail, et aussi Mr KACI Salah, Professeur à l'Université d'Alger 1.

Je tiens à remercier le personnel technique de la Direction des Travaux Publics (DTP) de Tizi-Ouzou, et de la subdivision des Travaux Publics (STP) de Draa-El-Mizan pour leur accueil au niveau de leurs organismes, pour leur assistance par la mise à ma disposition du matériel technique nécessaire pour la réalisation de l'étude pratique sur site et aussi pour les informations et la documentation qu'ils m'ont fournies.

Je remercie avec gratitude le Laboratoire de Contrôle des Travaux Publics (LCTP) de Tizi-Ouzou pour toute l'assistance technique lors de mes déplacements sur site et pour la mise à ma disposition du matériel technique nécessaire à la réalisation des essais expérimentaux.

Je présente aussi mes sincères remerciements au personnel du Laboratoire de Contrôle des Travaux Publics (LCTP) d'Alger, pour m'avoir accueillie, et mis à ma disposition le matériel nécessaire pour effectuer une partie des essais de ce travail.

J'adresse tous mes remerciements au personnel de l'organisme national de Contrôle Technique des Travaux Publics (CTTP) d'Alger, pour m'avoir généreusement accueillie et pour son assistance technique, qui a contribué significativement à la réalisation de ce travail.

Un grand merci au Professeure TAOUCHE-KHELOUI Fatma, vice-doyenne de la Faculté du Génie de la Construction de l'UMMTO pour son soutien, ses conseils et son aide pour l'organisation de ma soutenance de doctorat. Sans oublier le personnel de la Faculté pour sa contribution administrative et sa collaboration significative ayant permis l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements sont adressés aussi à tous mes collègues doctorants et docteurs pour leur amitié, leurs encouragements et tous les bons moments partagés.

Enfin mes remerciements vont également à chaque enseignant (e) qui a contribué à ma formation à toutes les étapes de mon parcours académique et de ma réussite, leur rôle capital a été essentiel pour me permettre de soutenir aujourd'hui le dernier diplôme de l'enseignement supérieur.

Résumé

Face aux enjeux mondiaux que représentent la protection de l'environnement et le développement durable, deux solutions sont envisagées dans le domaine routier : la durabilité des chaussées et le recyclage des matériaux dans la construction et la réhabilitation des structures routières. La recherche de la durabilité des revêtements routiers a fait appel à l'utilisation de différents polymères pour modifier le bitume utilisé.

Le présent travail consiste à analyser expérimentalement l'amélioration à chaud, et par voie humide des performances rhéologiques et mécaniques d'un béton bitumineux de la couche de roulement d'une chaussée routière, confectionné à partir d'un bitume de classe 40/50. Ce bitume est modifié par deux additifs: le polypropylène PP500P et des déchets plastiques (les chutes en fibres des brosses ou des balais plastiques, fabriqués principalement à base de ce polymère).

L'idée principale est de comparer les caractéristiques mécaniques des bitumes modifiés par ces deux additifs avec les mêmes pourcentages d'ajout (2%,4%, 6%,8%, 10%) pendant un temps de malaxage variable (1h, 2h, 3h), pour analyser la résistance de ce polymère après son recyclage. Les résultats montrent que le temps de malaxage a une influence sur les propriétés rhéologiques et mécaniques du bitume modifié, et les mêmes pourcentages d'ajout des deux additifs ne donnent pas forcément les mêmes résultats aux essais de la stabilité Marshall, du fluage, de la compacité, du volume des vides et de la tenue à l'eau des mélanges bitumineux.

L'idée secondaire est de déterminer la limite d'utilisation de ce type de déchets plastiques comme améliorant à la place du polypropylène PP500P, dans l'objectif d'atteindre la rigidité et la durabilité des chaussées souples, et d'éliminer en toute sécurité une quantité de plus en plus grande de plastique non biodégradable.

Mots-clés: recyclage, polypropylène, essai Marshall, bitume amélioré, déchets plastiques, routes de Tizi-Ouzou

Abstract

Faced with the global challenges of environmental protection and sustainable development, two solutions are being considered in the road sector: pavement durability and the recycling of materials in the construction and rehabilitation of road structures. Research into the durability of road surfaces has involved the use of different polymers to modify the bitumen used.

The present work consists of an experimental analysis of the hot and wet improvement of the rheological and mechanical performance of a bituminous concrete for the wearing course of a road pavement, made from a class 40/50 bitumen. This bitumen is modified by two additives: polypropylene PP500P and waste plastics (the fiber offcuts from plastic brushes or brooms, made mainly from this polymer).

The main idea is to compare the mechanical properties of bitumen modified with these two additives at the same percentages of addition (2%, 4%, 6%, 8%, 10%) during a variable mixing time (1h, 2h, 3h), in order to analyze the strength of this polymer after recycling. The results show that the mixing time has an influence on the rheological and mechanical properties of the modified bitumen, and the same percentages of addition of the two additives do not necessarily give the same results in tests of Marshall stability, creep, compactness, void volume and water resistance of bituminous mixtures.

The secondary idea is to determine the limit of use of this type of plastic waste as an improver in place of PP500P polypropylene, with the aim of achieving the rigidity and durability of flexible pavements, and safely disposing of an increasing quantity of non-biodegradable plastic.

Keywords: recycling, polypropylene, Marshall trial, improved bitumen, plastic waste, Tizi-Ouzou roads

TABLES DES MATIÈRES

Remerciements	i
Résumé	iii
Abstract	iii
Table des matières	iv
Liste des tableaux	xii
Liste des figures	xv
Liste des nomenclatures et des abréviations	xx
Liste des équations	xxii
Introduction générale.....	1
➤ Objectif.....	3
➤ Organisation de la thèse.....	3
Partie 1. Etude bibliographique sur l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques de l'enrobé bitumineux pour les chaussées souples.....	5
Chapitre 1. Comportement mécanique et dégradation des chaussées souples.....	6
1. 1. Introduction	7
1. 2. Généralités et définitions.....	7
1. 2.1. La plate forme	7
1. 2. 2. La couche d'assise	7
1. 2. 3. La couche de surface	8
1. 3. Matériaux utilisés dans l'infrastructure routière	8
1. 3. 1 Matériaux non traités.....	8
1. 3. 2. Matériaux traités au liant hydrocarboné.....	8
1. 3. 3. Matériaux traités au liant hydraulique.....	9
1. 3. 4. Béton de ciment.....	9
1. 4. Différents types de chaussée	9

1. 4. 1. Chaussée souple	9
1. 4. 2. Chaussée bitumineuse épaisse.....	10
1. 4. 3. Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques (semi rigide)	11
1. 4. 4. Chaussée à structure mixte	11
1. 4. 5. Chaussée à structure inverse.....	12
1. 4. 6. Chaussée à béton de ciment	12
1. 4.7. Chaussée composite	13
1. 5. Comportement mécanique des chaussées	14
1. 5. 1. Influence de l'effet de trafic lourd répété	14
1. 5. 2. Influence de l'effet environnemental	15
1.5. 2. 1. Action de la température1	5
1. 5. 2. 2. Action de l'eau.....	16
1. 5. 3. Influence des propriétés des matériaux utilisés.....	16
1. 6. Types de dégradations des chaussées souples.....	17
1. 6. 1. Déformation	17
1. 6. 1. 1. Le flache.....	17
1. 6. 1. 2. L'affaissement de rive.....	17
1. 6. 1. 3. L'orniérage.....	18
1. 6. 2. Les fissures	19
1. 6. 2. 1. Fissures transversales	19
1. 6. 2. 2. Fissures longitudinales	19
1. 6. 2. 3. Fissures obliques.....	20
1. 6. 2. 4. Faiénçage.....	20
1. 6. 2. 5. Fissures diverses.....	20
1. 6. 3. L'arrachement	21
1. 6. 3. 1. Le nid de poule.....	21
1. 6. 3. 2. Le plumage.....	21

1. 6. 3. 3. Le pelage	21
1. 6. 4. Les remontées.....	22
1. 7. Modélisation des structures routières	22
1. 7. 1. Objectif.....	22
1. 7. 2. Modéliser la chaussée dégradée	22
1. 8. Méthodes de calcul des chaussées souples.....	23
1. 8. 1. Méthode de monocouche	24
1. 8. 2. Méthode d'A.W.WERSTERGAARD	25
1. 8. 3. Méthode d'A.D. HOGG.....	26
1. 8. 4. Méthode de R.V. BURMISTER	27
1. 8. 5. Méthode de JEUFFROY	28
1. 8. 6. La méthode de MEF	28
1. 9. Caractéristiques physiques d'une chaussée souple.....	30
1. 10. Réseau routier de TIZI OUZOU	30
1. 10. 1. Etat de routes nationales de TIZI OUZOU	31
1. 10. 2. La route nationale RN25	32
1. 11. Conclusion.....	34
Chapitre 2. Les bitumes et les enrobés bitumineux	35
2. 1. Introduction	36
2. 2. Les produits noirs	36
2. 3. Propriétés générales des liants hydrocarbonés	36
2. 3. 1. La cohésion	36
2. 3. 2. La viscosité.....	37
2. 3. 3. L'adhésion.....	37
2. 4. La houille et les goudrons	37
2. 5. Bitume	37
2. 5. 1. Origine et destinations des bitumes.....	37

2. 5. 1. 1. L'asphalte.....	37
2. 5. 1. 2. Les bitumes purs.....	37
2. 5. 1. 3. Fabrication des bitumes.....	38
2. 5. 2. La composition chimique des bitumes	40
2. 5. 3. Organisation structurale des bitumes	42
2. 5. 4. La structure Sol/Gel	43
2. 5. 5. Vitrification et cristallisation des bitumes.....	44
2. 5. 6. Comportement des bitumes	45
2. 5. 7. Essais sur le bitume pur (essais homogènes)	46
2. 5. 7. 1. Essai de pénétrabilité à l'aiguille	46
2. 5. 7.2. Point de ramollissement bille et anneau (TBA)	47
2. 5. 7. 3. Température de fragilité FRAASS.....	48
2. 5. 7. 4. Essai de ductilité.....	48
2. 5. 7. 5. Teneur en asphaltènes	48
2. 5. 7. 6. Densité relative.....	49
2. 5. 7. 7. Perte de masse au chauffage.....	49
2. 5. 7. 8. Essai de point d'éclaire et point de flamme	49
2. 5. 7. 9. Solubilité	50
2. 5. 7. 10. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test"	50
2. 5. 7. 11. Essai Pressure Aging Vessel	51
2. 5. 7. 12. Essais rhéologiques	52
2. 6. Enrobes bitumineux.....	55
2. 6. 1. Définition de l'enrobé	55
2. 6. 2. Teneur en liant.....	56
2. 6. 3. Fabrication industriel des enrobés bitumineux.....	57
2. 6. 4. Qualité des enrobés fabriqués industriellement.....	58
2. 6. 5. Méthodes et essais de formulation de l'enrobé.....	58

2. 6. 6. Détermination des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux.....	59
2. 6. 6. 1. Comportement mécanique des enrobés bitumineux.....	59
2. 6. 7. Classification des essais mécaniques sur les enrobés.....	60
2. 6. 8. Essais non homogènes des enrobés	61
2. 6. 8. 1. Essai DURIEZ.....	62
2. 6. 8. 2. Essai Marshall	62
2. 6. 8. 3. Test à la presse PCG.....	63
2. 6. 9. Essais non homogène sur les enrobés	64
2. 6. 9. 1. Essai de fatigue	64
2. 6. 9. 2. Essai à l'orniéreur.....	65
2. 6. 9. 3. Essai de fluage dynamique	66
2. 6. 9. 4. Essai de module (MAER)	66
2. 6. 9. 5. Essai de module complexe (E*)	67
2. 7. Transport de bitume	67
2. 8. Conclusion.....	69
Chapitre 3. Polymères et impact de recyclage sur l'environnement	70
3. 1. Introduction	71
3. 2. Insuffisances des mélanges bitumineux	71
3. 4. Base de la modification	73
3. 5. Mécanisme de modification	73
3. 5. 1. Le gonflement	74
3. 5. 2. La stabilisation	74
3. 6. Principaux agents utilisés dans la modification des bitumes	75
3. 6. 1. Historique d'utilisation des polymères dans la modification des bitumes.....	75
3. 6. 2. Classification des polymères	75
3. 6. 2. 1. La nature des liaisons	75
3. 6. 2. 2. L'élément répétitif	75

3. 6. 2. 3. Leur cristallinité	76
3. 6. 2. 4. Les caractéristiques mécaniques et thermiques	77
3. 6. 3. Propriétés des polymères	78
3. 6. 3. 1. Propriétés mécaniques	78
3. 6. 3. 2. Propriétés thermiques	78
3. 6. 3. 3. Autres propriétés	80
3. 6. 5. Catégories des polymères destinés aux bitumes	80
3. 6. 6. Les fibres	80
3. 7. Notion de compatibilité	81
3. 8. Stabilité au stockage	82
3. 9. Objectif d'emploi des bitumes modifiés par polymères	83
3. 10. Impact de modification des bitumes sur l'environnement	84
3. 10. 1. Le plastique dans le monde	84
3. 10. 2. Risques liés au plastique dans l'environnement	85
3. 10. 2. 1. Risque sur le sol et l'aire	85
3. 10. 2. 2. Risque sur l'océan	86
3. 10. 2. 3. Risque sur l'humanité	87
3. 10. 3. La gestion des déchets plastiques	87
3. 10. 4. Le recyclage des déchets plastiques	88
3. 10. 4. 1. Le recyclage des polymères	89
3. 10. 5. Politique de recyclage dans le domaine routier	89
3. 11. Conclusion	90
Partie 2. Analyse de site et étude expérimentale	92
Chapitre 4. Étude expérimentale	93
4.1. Introduction	94
4. 2. Expertise	95

4. 2. 1. Test visuel	95
4. 2. 2. Le test de déflexion	97
4. 2. 3. Résultats et discussion.....	98
4. 2. 4. Exécution des sondages.....	99
4. 2. 5. Calcul des épaisseurs de renforcement.....	100
4. 2. 6. Renforcement réel à réaliser.....	101
4. 2. 7. Calcul des déformations verticales et horizontales avec ALIZE	102
4. 3. Matériaux	103
4. 3. 1. Agrégats	103
4. 3. 1. Caractéristiques intrinsèques et de fabrication.....	103
4. 3. 2. Analyse granulométrique	104
4. 4. Le Mélange.....	105
4. 4. 1. Formulation des agrégats	105
4. 4. 2. Courbe de mélange des agrégats et graphique	105
4. 4. 3. Teneur optimale en liant.....	107
4. 4. 2. Le liant utilisé.....	108
4. 5. Additifs.....	109
4. 5. 1. Le polymère.....	109
4. 5. 2. Les déchets plastiques	109
4. 6. La détermination des caractéristiques de bitume	110
4. 6. 1. Modification par le polymère PP500P	110
4. 6. 1. 1. Essai de pénétrabilité.....	110
4. 6. 1. 2. Essai de point de ramollissement bille et anneau (TBA)	111
4. 6. 1. 3. Essai de ductilité.....	112
4. 6. 1. 4. Essai de stabilité au stockage	112
4. 6. 2. Modification par déchets plastiques	113

4. 6. 2. 1. Essai de pénétrabilité.....	113
4. 6. 2. 2. Essai de point de ramollissement	114
4. 6. 2. 3. Essai de la ductilité.....	114
4. 6. 2. 4. Essai de stabilité au stockage	115
4. 7. Discussion des résultats.....	115
4. 7. 1. Influence des modificateurs sur la pénétrabilité.....	118
4. 7. 2. Influence des modificateurs sur le point de ramollissement	119
4. 7. 3. Influence des ajouts sur la ductilité	119
4. 7. 4. Influence des ajouts sur la stabilité au stockage.....	120
4. 8. La modification des caractéristiques de l'enrobé bitumineux	120
4. 8. 1. Appareillage et méthodologie de l'essai Marshall.....	120
4. 8. 2. Principe et méthodologie de l'essai DURIEZ.....	122
4. 9. Résultats obtenus.....	123
4. 9. 1. Résultats de l'essai Marshall.....	123
4. 9. 1. 1. Modification de l'enrobé bitumineux par le polymère PP500P.....	123
4. 9. 1. 2. Modification de l'enrobé bitumineux par les déchets plastiques.....	124
4. 9. 2. Résultats de l'essai Duriez	124
4. 10. Discussion	125
4. 10. 1. Influence de l'ajout de polypropylène et les déchets plastiques sur la stabilité Marshall.....	125
4. 10. 2. Influence de l'ajout de polypropylène et l'ajout des déchets plastiques sur le fluage	126
4. 10. 3. Influence de l'ajout de polypropylène et l'ajout des déchets plastiques sur la compacité de l'enrobé bitumineux modifié	127
4. 10. 4. Influence de l'ajout de polypropylène et l'ajout des déchets plastiques sur le pourcentage des vides de béton bitumineux modifié	128
4. 10. 5. Influence de l'ajout de polypropylène et l'ajout des déchets plastiques sur le quotient Marshall de béton bitumineux modifié	129
4. 10. 6. Influence du polypropylène et les déchets plastiques sur la tenue à l'eau	130

4. 11. Conclusion.....	130
Conclusion générale	133

Liste des tableaux

Tableau 2. 1. Fractionnement SARA d'un bitume pétrolier.....	41
Tableau 2. 2. Composition chimique de deux types bitumes Algériens.....	42
Tableau 2. 3 La molécule de bitume et les motifs hydrocarbonés.....	43
Tableau 2. 4 Classification du bitume en fonction de sa composition générique.....	44
Tableau 2. 5 Types de propriétés de bitume en fonction de l'indice de pénétrabilité.....	47
Tableau 2. 6 Catégories de bitumes routiers en fonction de TBA et Pénétrabilité.....	47
Tableau 2. 7 Caractéristiques de bitume subit les phénomènes de fissuration.....	48
Tableau 2. 8 Variation de module de rigidité en fonction des paramètres.....	55
Tableau 2. 9 Types de comportement bitumineux selon De la Roche et Di Benedetto.....	60
Tableau 2. 10 Classification de Bonnot.....	61
Tableau 2. 11 Essai Marshall: étapes et caractéristique.....	63
Tableau 3. 1 Relation entre le type de revêtement et les objectifs attendus.....	72
Tableau 3. 2 Phases de transformation bitume -polymère.....	73
Tableau 3. 3 Mécanisme de dispersion de copolymère dans le bitume.....	74
Tableau 3. 4 Forme et modèles correspondant.....	76
Tableau 3. 5 Catégorie et schéma de liaison.....	76
Tableau 3. 6 La variation de la cristallinité.....	77
Tableau 3. 7 La compatibilité de bitume-polymère.....	83
Tableau 4. 1 Les parties à étudier et leurs points kilométriques.....	95
Tableau 4. 2 Les anomalies observées sur la partie n°2 du PK17+200 au PK19+300.....	96
Tableau 4. 3 Les anomalies observées sur la partie n°3 de PK22+900 au PK25+100.....	96
Tableau 4. 4 Localisations des sondages proposés.....	99
Tableau 4. 5. Résultats de calcul de la structure.....	101
Tableau 4. 6. Les caractéristiques de renforcement correspondant aux sections dégradées.....	101

Tableau 4.7. Caractéristiques des matériaux de la structure.....	102
Tableau 4. 8. Déformations calculées et déformations admissibles.....	103
Tableau 4. 9 Caractéristiques générales des granulats.....	104
Tableau 4. 10 Résultats d'analyse granulométrique des agrégats.....	104
Tableau 4. 11 pourcentages des fractions granulaires.....	105
Tableau 4. 12 Mélange proposé des fractions granulaires.....	106
Tableau 4. 13 Critère de choix de la classe de bitume.....	108
Tableau 4. 14 Caractéristiques d'identification du liant utilisé.....	108
Tableau 4. 15 Valeurs de pénétrabilité de bitume modifié par le polymère.....	111
Tableau 4. 16 Valeurs de point de ramollissement de bitume modifié par le polymère.....	111
Tableau 4. 17 Résultats de ductilité de bitume avec l'ajout de polymère.....	112
Tableau 4. 18. Résultats de l'essai de stabilité avec l'ajout de polymère.....	113
Tableau 4. 19. Valeurs de pénétrabilité de bitume modifié par déchets plastiques.....	114
Tableau 4. 20 Valeurs de TBA de bitume modifié par les déchets plastiques.....	114
Tableau 4. 21. Résultats de l'essai de ductilité avec l'ajout de déchets plastiques.....	114
Tableau 4. 22. Résultats de stabilité au stockage avec l'ajout de déchets plastiques.....	115
Tableau 4. 23 Résultats de l'essai Marshall sur l'enrobé modifié par le PP500P.....	124
Tableau 4. 24 Résultats Marshall sur l'enrobé modifié par les déchets plastiques.....	124
Tableau 4. 25 Résultats de tenue à l'eau en fonction de l'ajout de polypropylène.....	124
Tableau 4. 26 Résultats de tenue à l'eau en fonction de l'ajout de déchets plastiques.....	125

Liste des figures

Figure 1. 1 Les différentes couches de la chaussée.....	8
Figure 1. 2 Exemple de la structure d'une chaussée souple.....	9
Figure 1. 3 Chaussée souple (solllicitation et fonctionnement).....	10
Figure 1. 4 Influence de la qualité de l'interface sur la distribution des contraint.....	10
Figure 1. 5 Chaussée épaisse.....	11
Figure 1. 6 Exemple d'une chaussée semi-rigide.....	11
Figure 1. 7 Chaussée semi-rigide (solllicitation et fonctionnement).....	11
Figure 1. 8 Exemple de la chaussée à structure mixte.....	12
Figure 1. 9 La superposition de couches d'une chaussée à structure inverse.....	12
Figure 1. 10 Superposition de dalles dans la chaussée à béton de ciment.....	13
Figure 1. 11 Exemple d'une chaussée composite.....	13
Figure 1. 12 Influence de joints sur la distribution des contraintes.....	13
Figure 1. 13 Schéma de sollcitation produite par l'effet de trafic.....	14
Figure 1. 14 Schéma de sollcitation environnemental sur la chaussée.....	15
Figure 1. 15 Schéma de mouvement de l'au dans la structure de la chaussée.....	16
Figure 1. 16 Exemple d'un affaissement de rive.....	17
Figure 1. 17 Exemple de déformation d'orniérage.....	18
Figure 1. 18 Déformation de la couche bitumineuse.....	18
Figure 1. 19 Déformation du sol support.....	18
Figure 1. 20 Exemple d'une fissure transversale.....	19
Figure 1. 21 Exemple d'une fissure longitudinale.....	19
Figure 1. 22 Faiénçage moyen sur une chaussée.....	20
Figure 1. 23 Exemple des fissures diverses dans une chaussées.....	20
Figure 1. 24 Exemple d'un nid de poule dans une chaussée.....	21
Figure 1. 25 Le plumage dans une chaussée.....	21
Figure 1. 26 Exemple d'un pelage dans la chaussée.....	21

Figure 1. 27 Exemple des remontées sur le revêtement bitumineux.....	22
Figure 1. 28 Modèle de statistiques avant la modélisation et la réhabilitation.....	23
Figure 1. 29 Modèle de comportement en fonction de la dégradation.....	24
Figure 1. 30 Méthode de BOUSSINESQ.....	24
Figure 1. 31 Principe de la Méthode d'A.W.WESTERGAARD.....	26
Figure 1. 32 Schématisation du modèle de HOGG.....	27
Figure 1. 33 La distribution des charges selon BURMISTER.....	28
Figure 1. 34 Concentration de contraintes au point de contact des essieux.....	29
Figure 1. 35 Carte de réseau routier de la wilaya de Tizi-Ouzou.....	31
Figure 1. 36 Carte des routes nationales de la wilaya de Tizi-Ouzou.....	32
Figure 2. 1 Schéma de différents types des liants hydrocarbonés.....	39
Figure 2. 2 Morceaux de bitume provenant d'un gisement naturel.....	39
Figure 2. 3 Principe de fabrication des bitumes.....	40
Figure 2. 4 Fractionnement SARA d'un bitume pétrolier.....	41
Figure 2. 5 Structure colloïdale du bitume.....	42
Figure 2. 6 La structure colloïdale d'un bitume routier.....	43
Figure 2. 7 Les deux types de structure de bitume.....	44
Figure 2. 8 Phase de variation de comportement de bitume.....	45
Figure 2. 9 Principe de l'essai de pénétrabilité.....	46
Figure 2. 10 Le dispositif pénétromètre.....	46
Figure 2. 11 Schéma de principe de l'essai TBA.....	47
Figure 2. 12. Appareil manuel de l'essai TBA.....	47
Figure 2. 13 Principe de l'essai de ductilité.....	48
Figure 2. 14 Appareillage pour déterminer le point d'éclaire et point de flamme.....	49
Figure 2. 15 Essai RTFOT.....	50
Figure 2. 16 Processus et équipements de l'essai PAV.....	51
Figure 2. 17 Modèle d'identification de la viscosité.....	53

Figure 2. 18 Principe et appareillage de l'essai DSR.....	53
Figure 2. 19 Schématisation du principe de test BBR.....	54
Figure 2. 20 L'influence de chargement et du temps sur le module complexe.....	55
Figure 2. 21 Squelette d'un enrobé bitumineux.....	56
Figure 2. 22 Exemple de central d'enrobage fixe et mobile.....	57
Figure 2. 23 Cheminement d'obtention des bétons bitumineux.....	59
Figure 2. 24 Divers comportement de l'enrobé bitumineux.....	60
Figure 2. 25 Principe et appareillage de la presse Duriez avec éprouvette.....	62
Figure 2. 26 Principe et appareillage de l'essai Marshall.....	63
Figure 2. 27 Principe et appareillage de l'essai PCG.....	64
Figure 2. 28 Principe de l'essai de fatigue.....	65
Figure 2. 29 Ornièreur de type LPC.....	65
Figure 2. 30 L'éprouvette de l'enrobé sous l'effort sinusoïdale.....	67
Figure 2. 31 Appareillage pour déterminer le module complexe	67
Figure 3. 1 Maille élémentaire de polypropylène (semi-cristallin).....	77
Figure 3. 2 Exemple de transformation.....	78
Figure 3. 3 Transition de phase d'un polymère.....	79
Figure 3. 4 Mesure de la température de transition Tg.....	79
Figure 3. 5 Production de matière plastique en fonction des années.....	85
Figure 3. 6 Taux de production des différents polymères.....	86
Figure 3. 7 Les pourcentages des gaz émis à effet de serre de 1990-2019.....	87
Figure 3. 8 La gestion inadéquate des déchets entre 2010-2025.....	89
Figure 3. 9 L'énergie de production du 2 types de plastiques.....	90
Figure 4. 1 Schéma de principe de l'essai de déflexion.....	97
Figure 4. 2 Le défléctomètre HDW.....	97
Figure 4. 3 La variation de la déflexion pour la partie 2.....	98
Figure 4. 4 La variation de la déflexion pour la partie 3.....	99

Figure 4. 5 Courbe granulométrique des agrégats.....	105
Figure 4. 6 Courbe granulométrique du mélange 0/14.....	106
Figure 4. 7 Les agrégats utilisés dans le mélange.....	107
Figure 4. 8 Le bitume à l'état liquide.....	108
Figure 4. 9 Le polypropylène PP500P.....	109
Figure 4. 10 Les déchets des brosses et balais plastiques à bas de polypropylène.....	109
Figure 4. 11 Essai de pénétrabilité réalisé.....	110
Figure 4. 12 L'essai de point de ramollissement réalisé dans cette étude.....	111
Figure 4. 13 Dispositif de l'essai de ductilité.....	112
Figure 4. 14 Essai de compatibilité du bitume modifié.....	113
Figure 4. 15 La pénétrabilité en fonction du polypropylène.....	115
Figure 4. 16 La pénétrabilité en fonction du déchet plastique.....	116
Figure 4. 17 Le point de ramollissement en fonction de PP500P.....	116
Figure 4. 18 Le point de ramollissement en fonction du déchet plastique.....	116
Figure 4. 19 Variation de la ductilité en fonction du polypropylène.....	117
Figure 4. 20 Variation de la ductilité en fonction des déchets plastiques.....	117
Figure 4. 21 Stabilité au stockage de bitume modifié par PP500P.....	118
Figure 4. 22 Stabilité au stockage de bitume modifié par déchets plastiques.....	118
Figure 4. 23 Préparation de l'échantillon de l'enrobé bitumineux modifié.....	121
Figure 4. 24 Compactage et écrasement de l'échantillon.....	121
Figure 4. 25 Étape de l'essai DURIEZ réalisé.....	122
Figure 4. 26 La stabilité Marshall en fonction de l'ajout de polypropylène.....	125
Figure 4. 27 La stabilité Marshall en fonction de l'ajout de déchets plastiques.....	125
Figure 4. 28 Le fluage en fonction de l'ajout de polypropylène.....	126
Figure 4. 29 Le fluage en fonction de l'ajout de déchet plastique.....	127
Figure 4. 30 La compacité en fonction de polypropylène et des déchets plastiques.....	127
Figure 4. 31 Le pourcentage des vides en fonction de PP500P et Dp.....	128

Figure 4. 32 L'effet de PP500P sur le quotient Marshall de l'enrobé bitumineux.....	129
Figure 4. 33 L'effet de Dp sur le quotient Marshall de l'enrobé bitumineux.....	129
Figure 4. 34. La tenue à l'eau en fonction de PP500P et Dp.....	130

Liste des notations et abréviations

σ_z : la contrainte verticale à une profondeur z sous la charge appliquée

q : la charge appliquée sur la chaussée

ν : le coefficient de poisson du matériau constituant les couches de la chaussée

r : la distance horizontale par rapport à la charge ponctuelle.

$\sigma(t)$: la contrainte à l'instant t

E : le module d'élasticité (young) du matériau

$\mathcal{E}(t)$: la déformation à l'instant t

η : la viscosité du matériau

$\frac{d\mathcal{E}}{dt}(t)$: la dérivée temporelle de la déformation, elle représente visqueuse du comportement.

a : un paramètre liée à la profondeur à laquelle la contrainte devient négligeable.

w : la déformation verticale au centre de la chaussée

\mathcal{E}_z : la déformation horizontale de la structure de la chaussée

\mathcal{E}_{zad} : la déformation horizontale admissible de la structure de la chaussée

\mathcal{E}_t : la déformation transversale de la structure de la chaussée

\mathcal{E}_{tad} : la déformation transversale admissible de la chaussée.

RN: Route nationale

CW: Chemin de wilaya

CC: Chemin communal

PK: le point kilométrique de la route

HDW: Heavy Weight Deflectometer

TVO: le Tout-Venant d'Oued

GB: la Grave Bitume

BB: le béton bitumineux

E^* ou G^* : module complexe de bitume ou de l'enrobé bitumineux

f: la fréquence de la charge sinusoïdale appliquée pour mesurer le module complexe de bitume ou de l'enrobé.

ω : la pulsation

E' : le module d'élasticité de bitume

E'' : le module de plasticité de bitume

i: la partie imaginaire de module de rigidité de bitume

NF: la norme française.

EN: la norme européenne.

NF EN: la norme européenne est adoptée et publiée en France par l'AFNOR à une portée européenne.

NA: la norme Algérienne

ASTMD: American Society for Testing and Materials Designation

TBA: Test Bille et Anneau

R': la résistance à la compression de l'éprouvette immergée dans l'eau pendant 7 jours,

R: la résistance de l'éprouvette conservée à sec

G: pourcentage de grains avec $\phi > 6.3\text{mm}$

S: pourcentage de grains avec ϕ entre 6.3 et 0.315mm

s: pourcentage de grains avec ϕ entre 0.315 et 0.3 mm

f: pourcentage de filler avec $\phi < 0.08\text{ mm}$

MAER: Module Américain d'élasticité en Recherche

PP: le polypropylène

Dp: déchets plastiques

Liste des équations

Équation 1. 1.....	25
Équation 1. 2.....	25
Équation 1. 3.....	26
Équation 1. 4.....	27
Équation 1. 5.....	28
Équation 2. 1.....	49
Équation 2. 2.....	56
Équation 2. 3.....	56
Équation 2. 4.....	56
Équation 2. 5.....	68
Équation 2. 6.....	68
Équation 2. 7.....	68
Équation 2. 8.....	68
Équation 2. 9.....	68

INTRODUCTION GENERALE

" Tout commence par une route", la fameuse expression que le groupe de la banque mondiale a débuté et clôturé sa réunion du 12 novembre 2013, des statistiques de 1.2 milliard d'individus de la planète ne disposent pas une route praticable, et le pourcentage élevé de cette constatation est en Afrique.

La route est un facteur socio-économique de développement d'un pays, c- à-d un réseau routier bien développé facilite; l'accessibilité, la connectivité, l'échange, la mobilité, la création de l'emploi, le commerce intérieur et extérieur, et stimuler l'économie du pays. Avec le fort potentiel du trafic routier aujourd'hui, d'importants budgets sont réservés aux infrastructures routières, et l'évolution dynamique de l'économie régionale ou nationale dépend de succès des investissements dans le secteur routier.

L'amélioration de la conception de l'infrastructure routière progresse en identifiant et en analysant les erreurs passées, les dommages routiers enregistrés, et les accidents de circulations survenues, ces données précieuses sont essentielles pour mener une étude approfondie en vue de la réparation ou de la construction routière, le projet doit impérativement répondre aux normes de confort, de sécurité, d'adhérence, et de durabilité, tout en respectant une réglementation environnementale très stricte.

Ces objectifs sont atteints si la capacité portante de la route est améliorée, à cet effet; la durabilité des matériaux de chaussée prend une part croissante dans la politique de construction et d'entretien des réseaux routiers, il s'agit des matériaux plus performants, résistant aux contraintes appliquées à la chaussée, aux conditions climatiques et aux agressions chimiques.

Le critère de durabilité est primordial dans la conception des revêtements routiers. Cependant ce critère a un effet néfaste sur le plan écologique et environnemental par les émissions des gaz, notamment celles provenant des postes d'enrobage. Face aux enjeux mondiaux que représentent la protection de l'environnement et le développement durable, de nouvelles politiques sont adaptées dans tous les domaines, tel que le recyclage et la valorisation des matériaux précisément dans le secteur routier.

Est ce que cette politique peut participer vraiment à la protection de l'environnement? Une question très pertinente, dont la réponse se focalise dans la relation entre la durabilité et l'environnement, et les résultats obtenus des premières adaptations de cette politique. Deux types de recyclage des matériaux dans le domaine routier sont distingués: le premier type consiste au recyclage des anciens matériaux de revêtement à chaud ou à froid et les réutiliser dans un nouveau revêtement pour la construction ou la réhabilitation, la première utilisation de cette technique a été aux états unis en 1970, puis s'était propagée dans d'autres pays en 1980, surtout au canada où le revêtement routier soumis aux conditions climatiques assez sévères, et la température atteint (-25°C). Plusieurs dépôts sont construits pour le stockage de la chaussée bitumineuse récupérée, et l'employer soit dans la production de l'enrobé à chaud recyclé, soit dans le recyclage à froid; ce dernier; est sur place de revêtement, ou en poste d'enrobage, surtout pour le renforcement des route après une saison hivernale.

L'emploi du recyclage en général a été stimulé par la crise énergétique, et la constatation de d'une diminution de la demande des matériaux utilisés, conduisant à un gain considérable et une gestion plus responsable des ressources naturelles non renouvelables, des recherches intensives renforcées par des tests aux laboratoires à ce jour sur une nouvelle branche de recherche parallèle à la première, axée sur l'amélioration du liant (le bitume). L'ajout d'additifs vise à renforcer le revêtement pour tenir le plus longtemps possible, représentant ainsi le deuxième type de recyclage. Les additifs les plus connus sont des polymères de divers types, grâce à leurs structure et qualités chimiques qui améliorent considérablement les propriétés des bitumes. Une amélioration considérable du bitume par des polymères qui sont initialement dérivés des produits pétroliers, une matière première couteuse pour les pays non possédant cette richesse naturelle, se qui a conduit à une nouvelle perspective de recycler les matériaux issues des polymères après leur cycle d'utilisation, afin de les réutiliser dans la modification du bitume. La première expérience a également eu lieu aux États-Unis par le recyclage du caoutchouc des pneus usés dans les enrobés bitumineux à chaud, plus économique, plus durable, et répond aux préoccupations environnementales par la gestion optimale des pneus usés. Ce principe s'est ensuite élargi et englober d'autres matériaux tel que les fibres, le plastique, les résidus de l'industrie agricole, et d'autres. L'emploi de cette technique dans les revêtements bitumineux progresse, pour la construction routière ou la réhabilitation des chaussées dégradée, dans de nombreux pays dans le monde et en Afrique.

L'Algérie est le plus grand pays de ce continent, d'une superficie de $2.381.741\text{km}^2$ et d'une population atteint 44.8 millions d'habitants, elle a relevé un défi considérable en développant

un réseau routier total de 140.000 km; dont 31.053 km représentent 121 routes nationales, ce nombre a été atteint en Janvier 2023, et 1.414 km est pour l'autoroute Est-Ouest, le reste est attribué entre chemins de wilaya et chemins communaux. L'utilisation prédominante des voitures individuelles entre les wilayas accroît le nombre d'essieux exerçant une charge verticale sur la chaussée, contribuant à la dégradation des routes nationales.

L'Algérie a aussi procédé au renforcement et à l'amélioration des caractéristiques du BB, le bon exemple à citer est le revêtement de la rocade autoroutière d'Alger en 2012, dont l'enrobé bitumineux était amélioré par l'ajout du PR PLAST MODULE à chaud avec un pourcentage de 0.7%, au mélange et la durée de vie prévue de la chaussée est élevée de 20 ans à 30ans. Cet exemple prouve l'importance de rendre le revêtement plus performant, plus rigide et plus durable pour avoir un impact positif sur l'environnement, et surtout si l'additif est un déchet non biodégradable dans la nature.

➤ **Objectif de l'étude**

La modification des caractéristiques mécaniques des enrobé bitumineux est un axe de recherche très important, les caractéristiques mécaniques améliorées par le recyclage des matériaux est la thématique de notre travail. Cette étude est fondée sur des essais expérimentaux dont l'objectif est:

- 1) Évaluer l'effet de l'ajout du polymère PP500P et celui des déchets plastiques sur le bitume, et faire une comparaison.
- 2) Savoir les limites d'utilisation du plastique recyclé dans l'amélioration du bitume, pour atteindre un impact positif sur l'environnement et la biodiversité.
- 3) Encourager le recyclage des déchets dans les mélanges bitumineux.
- 4) Évaluer l'état des routes de la Kabylie, notamment la RN25 et donner des perspectives.

➤ **Organisation de la thèse**

Ce travail est constitué de quatre chapitres regroupés en deux parties principales:

La première partie: contient une étude bibliographique sur l'amélioration des caractéristiques mécaniques du béton bitumineux pour les chaussées souples, elle est composée de trois chapitres:

- **Le premier chapitre:** illustre des généralités sur les chaussées, et leur comportement mécanique sous l'effet de la charge du trafic, des matériaux utilisés et des conditions

climatiques, aussi les différents types de dégradations distinguées sur la chaussée engendrées par ces actions.

- **Le deuxième chapitre:** expose le bitume et ses propriétés, ainsi que les essais attribués au matériau homogène. il présente aussi la composition de l'enrobé bitumineux et les essais nécessaires pour analyser les caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux.
- **Le troisième chapitre:** s'intéresse aux polymères utilisés dans de la modification des caractéristiques des enrobés bitumineux, leurs propriétés, ainsi que l'impact de recyclage de plastique sur l'environnement.

La deuxième partie: est une partie expérimentale fondée, elle représente le contenu du chapitre 4.

- **quatrième chapitre:** il est fondé initialement sur un diagnostic de site, par des testes in situ, et des essais au laboratoire, concernant la modification des caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux par le polypropylène et par les déchets plastiques.

La conclusion générale est une synthèse des majeures contributions de la thèse et certaines perspectives à prendre en considération dans les prochaines recherches.

À la fin de ce travail une conclusion générale récapitulative du travail fait ainsi que des perspectives envisagées.

Partie 1.
Etude bibliographique

CHAPITRE 1
COMPORTEMENT MÉCANIQUE ET
DÉGRADATION DES CHAUSSÉES
SOUPLES

1. 1. Introduction

Les chaussées en générale sont un critère très important dans l'évaluation du développement des pays depuis l'existence des revêtements, et cela revient à leur dépendance de nombreux domaines; écologique, environnemental, sociologique et économique [1]. La conception des chaussées routières est différente d'un pays à l'autre et même d'un continent à l'autre, par des conditions influençant. Un facteur moteur évalue le budget de la réalisation des routes. En Afrique là où les conditions naturelles et climatiques telles que le sol, la température, l'humidité, et autres sont totalement différentes de celles du le reste du monde. D'autres conditions à ne pas négliger telles que le trafic routier et la capacité portante de la route et les matériaux routiers qui ont une influence directe sur la durée de vie des chaussées, et aussi un effet direct sur le plan économique d'un pays [2]. Ce chapitre est une illustration de différents types d'agents qui influencent la durabilité des revêtements routiers, et le comportement des chaussées souples sous ces sollicitations ainsi que les diverses dégradations existantes.

1. 2. Généralités et définition

La chaussée est la voie de communication posée sur un ensemble de couches constituées de matériaux spécifiques sur un terrain naturel, elle est destinée à la circulation des véhicules dont l'objectif est de transporter la marchandise et les passagers en toute sécurité et confort. La chaussée est couramment composée d'un revêtement spécifique, et pour l'infrastructure routière, elle est considérée la partie intégrale sur une durée de vie de 20 à 30 ans [3]. La figure 1.1 représente les différentes couches qui composent la chaussée, qui sont comme suit:

1. 2. 1. La plate forme:

Elle est constituée de sol support et de la couche de forme (figure 1. 1), qui protège le sol support par la distribution des charges émises au cours des travaux par les couches supérieures, elle est considérée aussi comme un isolant thermique entre le sol support et le reste des couches de la chaussée.

1. 2. 2. La couche d'assise:

Cette couche est composée de 2 couches: de base et de fondation, (figure 1. 1), son rôle est de transmettre les efforts verticaux dus au trafic et les répartir sur la couche de forme, à fin d'éviter la déformation du sol support.

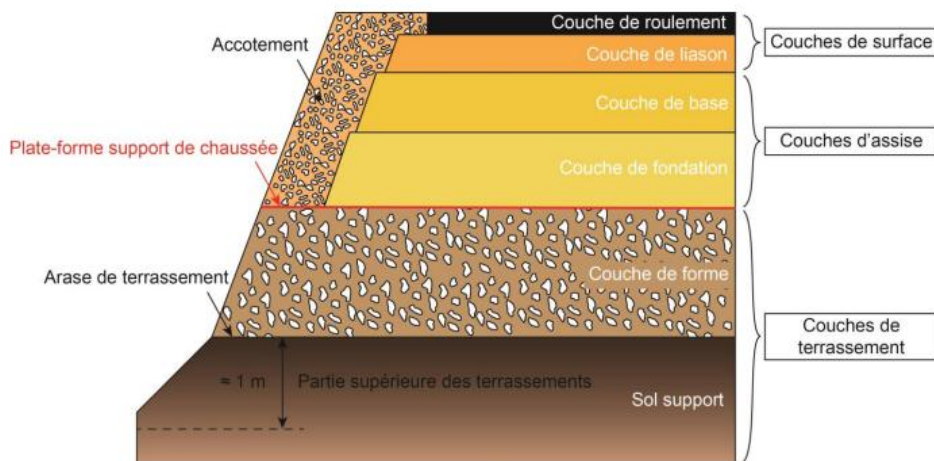


Figure 1. 1 Les différentes couches de la chaussée [4]

1. 2. 3. La couche de surface:

Elle est constituée par la couche de liaison et la couche de roulement (figure 1.1):

- La couche de liaison: elle protège la couche d'assise de toutes sollicitations transmises par la couche de roulement.
- La couche de roulement: elle est fonctionnelle par le contact direct de pneumatiques, une bonne adhérence de cette couche assure le confort et la sécurité routière qui sont liés au trafic et aux conditions climatiques.

1. 3. Matériaux utilisés dans l'infrastructure routière

Le choix de matériaux composants les couches de la chaussée routière doit satisfaire à certaines conditions; climatiques et mécaniques. Ce sont en:

1. 3. 1. Matériaux non traités:

Ce sont des matériaux destinés à la réalisation de la couche d'assise, de faible intensité de trafic, leur sensibilité à l'eau peut permettre l'apparition des déformations de typeorniérage, car leur comportement mécanique est linéaire non élastique [4, 5]

1. 3. 2. Matériaux traités au liant hydrocarboné

Deux catégories se distinguent:

- Les matériaux bitumineux à chaud: traités au liant hydrocarboné à chaud.
- Les matériaux bitumineux à froid: traités à l'émulsion de bitume.

Le comportement des deux types de matériaux est viscoélastique, qui est un comportement influencé par la charge d'application et la température, d'où la couche de roulement s'ornièrè et se fatigue, et des fissures longitudinales apparaissent sous le fort trafic [6,7].

1. 3. 3. Matériaux traités au liant hydraulique

Par définition ils sont traités aux liants qui ont la capacité de: durcir par une réaction chimique avec l'eau.

1. 3. 4. Béton de ciment

Ils sont très rigides, et sont des matériaux d'un comportement mécanique linéaire élastique isotrope, ils sont traités aux liants hydrauliques, qui désignent leurs propriétés mécaniques, et les caractérisent par une sensibilité aux fissures par retrait hydraulique [8].

1. 4. Différents types de chaussée

Il existe divers types de structure de la chaussée, et cette différence se distingue selon la nature des matériaux composants les couches de la chaussée, ainsi que le nombre de couches qui est différent d'un type à l'autre, pour qu'elle soit soumise à une catégorie de sollicitations après sa mise en service [9];

1. 4. 1. Chaussée souple

Ce type de chaussée est très présent dans le réseau routier Algérien, il est destiné au moyen à faible trafic. L'épaisseur de la chaussée varie de 30 à 60 cm, cette variation revient à l'épaisseur de la couverture bitumineuse de 8 à 15 cm, qui dépend à son tour de l'intensité du trafic. Les affaissements, faièncage et l'ornièrage sur la couche de roulement dans ce type de chaussée sont dus aux efforts de flexion et traction indiquent la faible épaisseur de la couche de roulement [10]. La figure 1. 2 représente un exemple de la structure d'une chaussée souple, et la figure 1. 3 représente la répartition des efforts du trafic sur une chaussée souple. Ce type de chaussée est le cas de notre étude.

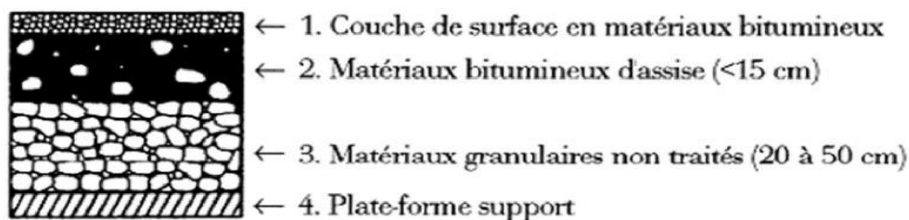


Figure 1. 2 Exemple de la structure d'une chaussée souple [9]

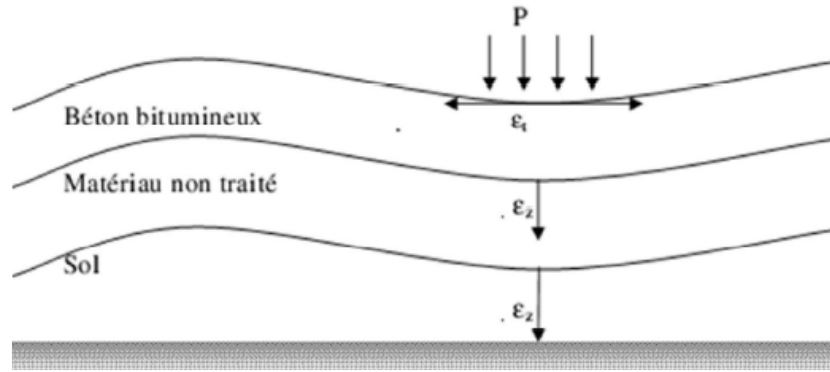


Figure 1. 3 Chaussée souple (solicitation et fonctionnement) [9]

1. 4. 2. Chaussée bitumineuse épaisse

Elle est composée d'une couche de roulement bitumineuse posée sur une couche d'assise de 15 à 40 cm, et à base des matériaux traités aux liants hydrocarbonés. Elle est fortement rigide et caractérisée par la résistance à la contrainte de traction des couches d'assise, ce qui signifie la diminution des contraintes transmises au sol support. L'importance de la qualité de l'inter-couche est soulignée (état de couches; liées ou décollées); les sollicitations en traction peuvent même induire à la ruine prématurée de cette structure si les couches sont décollées, du fait que l'interface favorise la distribution des contraintes [11] (voir figure 1.4), et la figure 1. 5 représente la structure et la composition de la chaussée épaisse

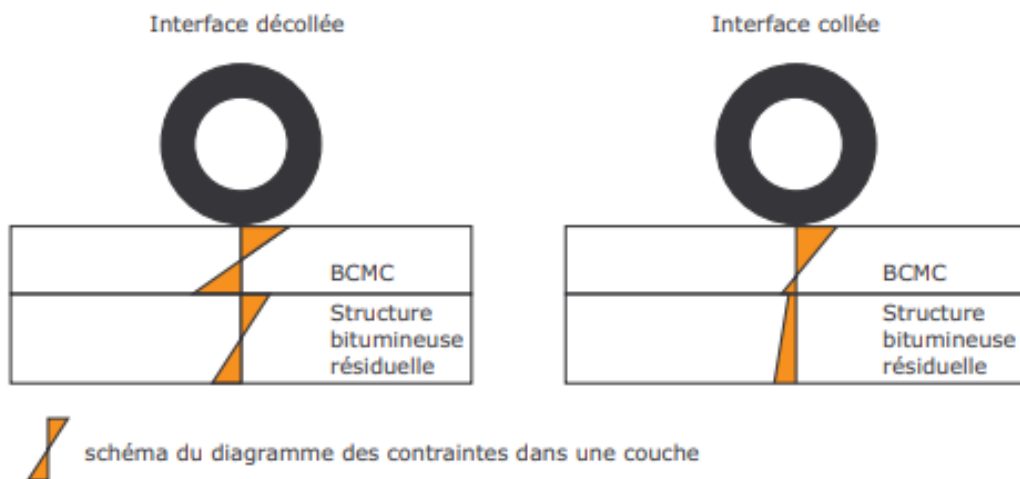


Figure 1. 4 Influence de la qualité de l'interface sur la distribution des contraintes [11]

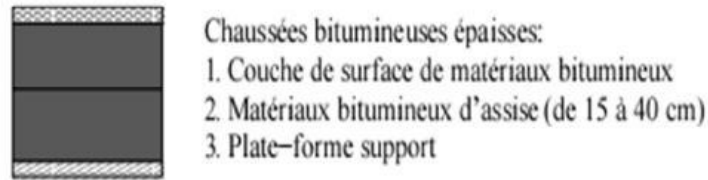


Figure 1. 5 Représentation d'une chaussée épaisse [9]

1. 4. 3. Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques (semi rigide)

Elle est structurée d'une couche de roulement bitumineuse posée sur une couche d'assise (base et fondation) de 20 à 50 cm à base de matériaux traités en liants hydrauliques, la figure 1. 6 illustre un exemple de la structure de la chaussée à assise traitée au liant hydraulique. L'assise est sensible à la prise de béton et au changement thermique. Cette chaussée est destinée au trafic de forte intensité engendré par une atténuation des contraintes verticales qui sont transmises à travers les couches d'assise au sol support [9] , comme le montre la figure 1. 7.

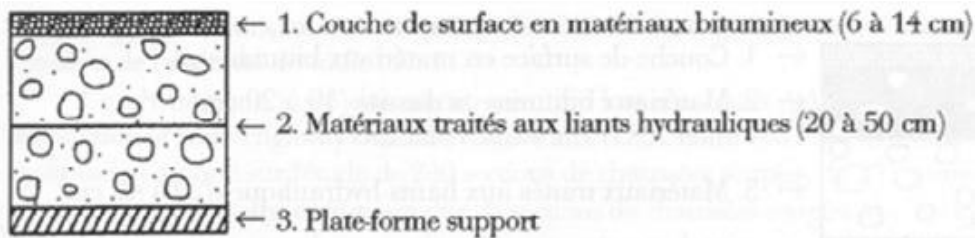


Figure 1. 6 Exemple d'une chaussée semi-rigide [9]

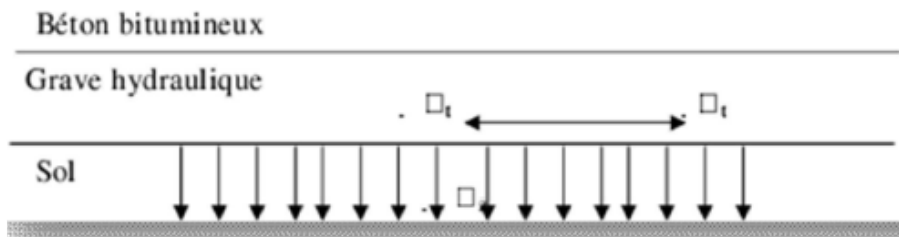


Figure 1. 7 Chaussée semi-rigide (sollicitation et fonctionnement) [9]

1. 4. 4. Chaussée à structure mixte

Ce type de chaussée contient une couche de base et une autre de roulement, l'épaisseur totale entre 10 et 20 cm à base de matériaux traités au liant hydrocarboné, posées sur une couche de fondation de 20 à 40 cm à base de matériaux traités aux liants hydrauliques [11]. L'appellation (mixte) revient à la dimension de la chaussée qui fait le double de

l'épaisseur de matériaux bitumineux, se qui caractérise ce type par la non sensibilité aux fissurations, en revanche les liants hydrauliques dans la structure ont un effet néfaste sur l'adhérence de la chaussées [9]. La figure 1.8 représente un exemple de la chaussée à structure mixte.

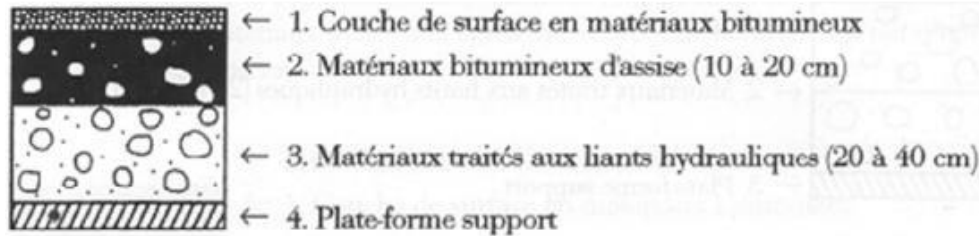


Figure 1. 8 Exemple de la chaussée à structure mixte [9].

1. 4. 5 Chaussée à structure inverse

Elle est similaire au type précédent, avec la présence d'une couche isolante de grave non traitée d'une épaisseur de 12 cm, c'est l'obstacle qui empêche la remontée de fissures des matériaux traités aux liants hydrauliques de la couche de fondation vers les couches à base de matériaux bitumineux. La dimension totale de cette structure est comprise entre 60 et 80 cm, varie selon la destination de l'ouvrage [9]. La figure 1.9 illustre la superposition de couches d'une chaussée à structure inverse.

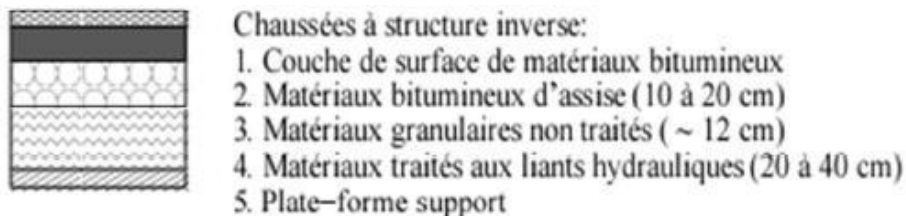
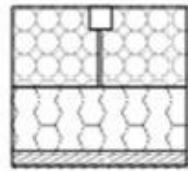


Figure 1. 9 La superposition de couches d'une chaussée à structure inverse [9]

1. 4. 6. Chaussée au béton de ciment

Elle est composée d'une couche de béton de ciment revêtue de matériaux bitumineux en mince épaisseur, cette couche repose soit sur le sol support, soit sur la couche de fondation en nature de matériaux différents [9], (en béton ou en matériaux traités aux liants hydrauliques; voir figure 1.10). L'élasticité élevée de la couche de béton la permet de reprendre les sollicitations en flexion [11].

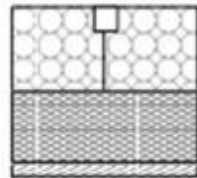


- Dalles non goujonnées avec fondation::
1. Béton de ciment (20 à 28 cm)
 2. Béton maigre (12 à 18 cm) ou matériaux traités aux liants hydrauliques (15 à 20 cm)
 3. Plate-forme support

Figure 1. 10 Superposition des dalles dans la chaussée au béton de ciment [9]

1. 4. 7. Chaussée composite:

Elle est composée de couches à base de matériaux bitumineux avec une couche de béton de ciment, dans le but d'avoir une chaussée à module d'élasticité élevée et bonne propriétés mécaniques, ce type est bien adapté pour les différentes aires de stationnement de poids lourds. La figure 1.11 est une schématisation d'une chaussée composite.



- Dalles en béton de ciment mince collé:
1. Béton de ciment (5-10 ou 10-15 cm)
 2. Matériaux bitumineux
 3. Plate-forme support

Figure 1. 11 Exemple d'une chaussée composite [9]

Les caractéristiques recherchées (moins de fissures et moins d'orniérage) dépendent de la qualité de liaison entre les couches [12]. L'épaisseur de la couche du béton et l'espacement limité entre les joints drainants influencent la durabilité de ce type de chaussée [13]. La figure 1. 12 montre l'influence de l'espacement des joints sur la propagation de la contrainte de traction à la base de la dalle de béton.

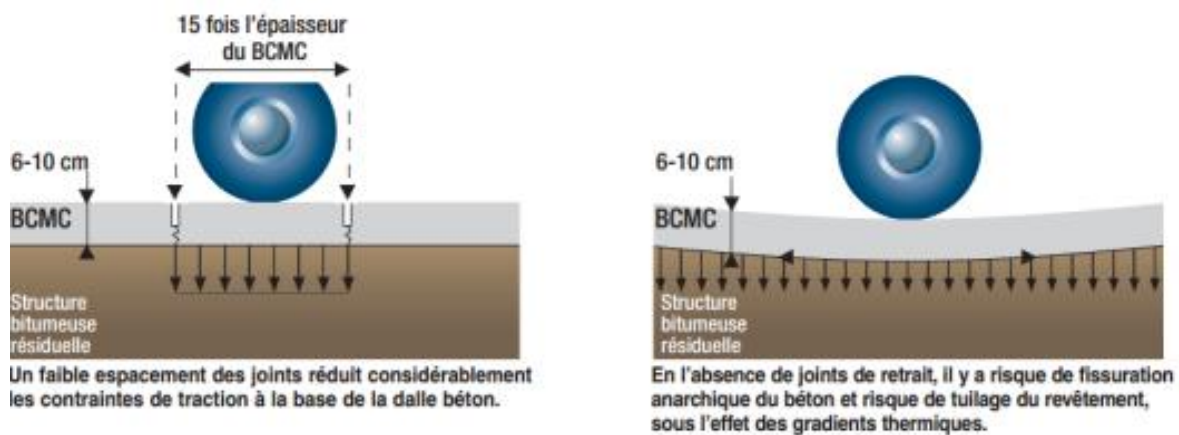


Figure 1. 12 Influence de l'espacement de joints sur la distribution des contraintes [13].

1. 5. Comportement mécanique des chaussées

Plusieurs types de sollicitations contribuent par leurs effets sur le comportement des chaussées souples, dont une réaction apparaîtra en fonction du temps, soit par déformation légère réhabilitable, ou par rupture. L'influence induite de ces sollicitations varie en fonction de la nature des actions aux quelles la chaussée est soumise, on distingue:

1. 5. 1. Influence de l'effet du trafic lourd répété:

La transmission des charges verticales du trafic roulant par le pneumatique, à la chaussée, provoque au niveau des couches de la structure une déformation en flexion, expliquée mécaniquement par la propagation des contraintes de traction au niveau supérieur de la structure de la chaussée qui peut entraîner par la suite la fatigue et la rupture de matériaux, des contraintes de compression à la base de la structure sont aussi développées sous le l'effet de fort trafic répété qui se traduit par des déformations permanentes favorisent l'orniérage de la chaussée [14]. Pour le calcul de ces efforts, une connaissance préalable du coefficient de poisson, et du module de Young des matériaux utilisés dans la structure qui est considérée comme un milieu isotrope, élastique et linéaire [15]. La figure 1.13 illustre la schématisation des contraintes développées dans la structure sous l'action du trafic.

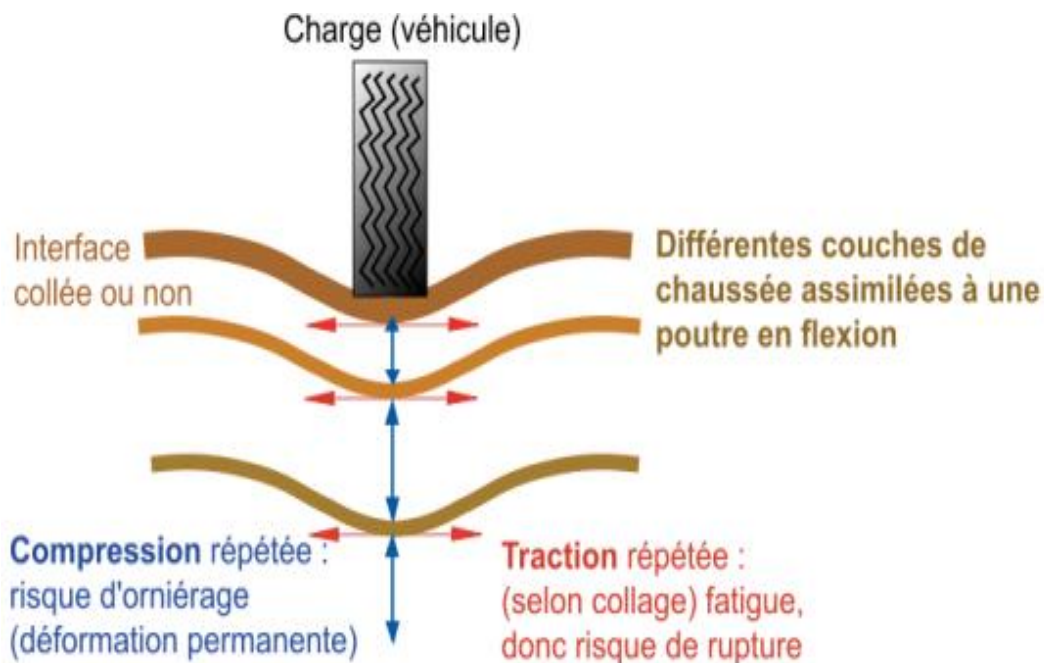


Figure 1. 13 Schéma de sollicitation produite par l'effet de trafic [14].

1. 5. 2. Influence de l'effet environnemental

1. 5. 2. 1. Action de la température

La température est un facteur important et son action influe directement sur le comportement de la chaussée, traduit par des déformations et des contraintes dépendent de ce facteur [14]. L'effet de la température agit sur la chaussée, et par la suite sur le comportement de matériaux bitumineux en deux cas :

- Cas de basse température : Dans ce cas, le bitume est trop fragile, notamment le bitume de classe inférieur, ce qui permet à l'enrobé de revêtement de se fissurer sous le chargement de trafic.
- Cas de température élevée : La température élevée influe sur le bitume par la perte de la rigidité face au phénomène d'orniérage conséquent des déformations permanentes de l'enrobé bitumineux.

Pour éviter la fragilité de bitume et la perte de sa rigidité dans des cas extrêmes de la température, il est convenable de procéder à l'utilisation d'un bitume stable, qui résiste aux déformations internes à température élevée, et qui soit flexible et ne se fissure pas à basse température. Des fissurations thermiques relatives au moment de changement de la température dues aux phénomènes de contraction et dilatation [16]. La figure 1. 14 schématise l'apparition des fissures dans la structure de chaussée sous l'effet environnemental.

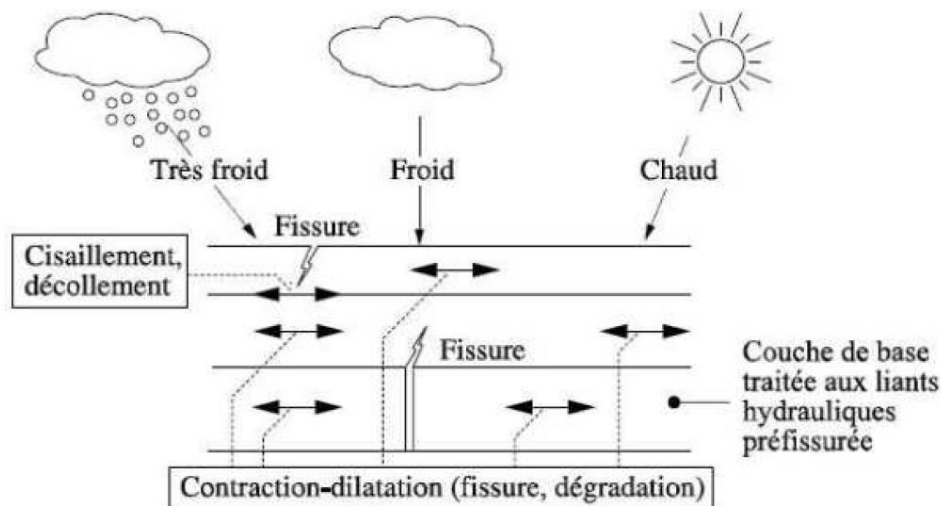


Figure 1. 14 Schéma de sollicitation environnemental sur la chaussée [16].

1. 5. 2. 2. Action de l'eau:

L'eau est un agent climatique important qui s'accumule sur la chaussée. Elle provient des précipitations puis elle s'infiltre ou provient par remontée capillaire à la structure de la chaussée [17], elle cause des dégradations sous diverses façons : l'apparition des nids de poule, le phénomène d'orniérage, la remontée des fines, et les différentes fissures [18, 19], (voir figure 1. 15). Les chaussées construites en matériaux traités aux liants hydrocarbonés sont moins sensibles que celles construites en matériaux traités aux liants hydrauliques qui contiennent des joints dont l'infiltration d'eau contribue à la disjonction des couches entre elles [20, 21, 22].

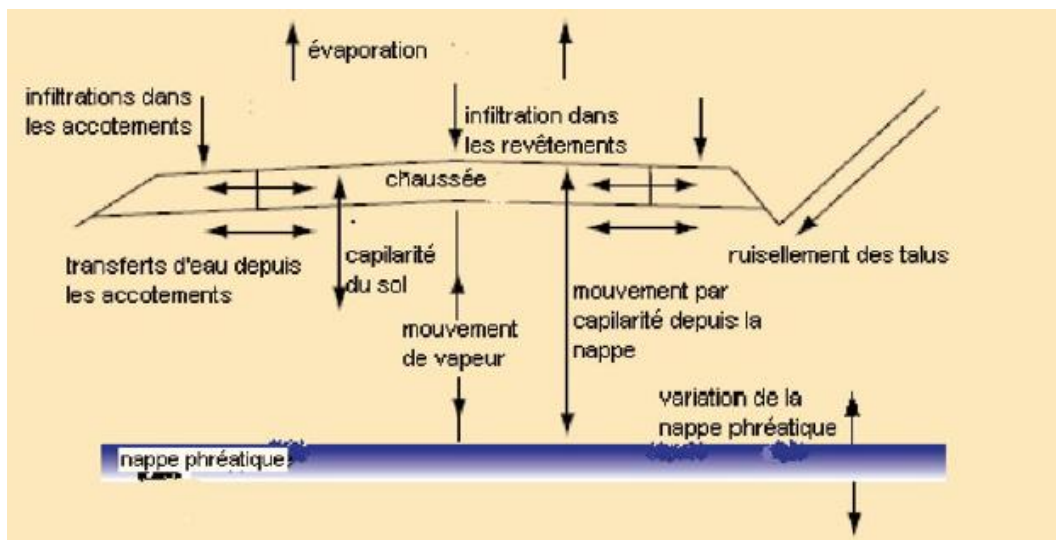


Figure 1. 15 Schéma de mouvement de l'eau dans la structure de la chaussée [23].

1. 5. 3. Influence des propriétés des matériaux utilisés

La nature du sol support a une influence directe sur la stabilité de la structure (stable ou moins stable), ainsi pour les propriétés des matériaux utilisés dans la conception de différentes couches, elles influencent le comportement mécanique des chaussées souples, à cet effet, il est possible d'obtenir une formulation d'enrobé bitumineux qui sert à construire une chaussée résistante aux actions citées précédemment, à conditions d'une bonne maîtrise de chaque constituant du mélange bitumineux [24, 25]. Les caractéristiques granulaires (forme et formule), le type de bitume, sa classe et sa teneur, ainsi que la compacité de l'enrobé confectionné interviennent dans la variation de comportement des bétons bitumineux (chaussées souples) [26, 27], le tableau 1. 1 illustre la variation de comportement de l'enrobé bitumineux en fonction de ses propriétés.

Tableau 1. 1 Comportement de l'enrobé bitumineux

Facteur	variation	Effet
Teneur en vides d'air	Diminue	Améliore la flexibilité
Teneur en liant	Augmente	Réduction de fissuration

1. 6. Type de dégradation des chaussées souples

La dégradation de la chaussée est définie par toute anomalie observée sur la chaussée ; en surface ou à n'importe quel niveau de la structure, à cet effet les dégradations connues sont classées en quatre catégories principales [28]:

1. 6. 1. Déformations:

Ce sont des dégradations qui reviennent à un défaut profond dans la structure de la chaussée, qui conduisent à des phénomènes irréversibles visibles en couche de roulement, causés en première phase par: l'eau infiltrée et mal drainée, la remontée par capillarité, ou le dégel engendrant le décollement entre les couches suite au gonflement, qui mènent à une influence sur le sol support par diminution de sa portance. En deuxième phase, sous l'effet des actions externes citées précédemment dans ce chapitre (l'environnement et le trafic), ces déformations deviennent visibles en surface [29]. On peut distinguer:

1. 6. 1. 1. La flache: C'est un tassement de forme ovale, positionné au milieu de a chaussée.

1. 6. 1. 2. L'affaissement de rive: Il s'agit d'un tassement en forme de cuvette avec un bourrelet, se retrouve en bordure de la chaussée (voir figure 1. 16).



Figure 1. 16. Exemple d'un affaissement de rive [30]

1. 6. 1. 3. L'orniérage: C'est le tassement le plus connus par son influence sur la circulation routière, il apparait longitudinalement sur la bande de roulement, et se produit surtout sur les chaussées à fort trafic. Ce type de déformation permanent est considéré faible si sa profondeur est inférieure à 10 mm, si elle dépasse 20 mm l'orniérage est majeur [31]. La figure 1.17 représente un exemple d'orniérage.



Figure 1. 17 Exemple de déformation d'orniérage [31]

Deux types d'orniérages peuvent être observés sur la coupe d'une chaussée dégradée:

- **Orniérage du sol support:** lorsque la charge verticale appliquée par le trafic provoque une déformation permanente traverse la couche bitumineuse et atteint le sol support qui n'est pas assez stable (voir figure 1. 18).
- **Orniérage de la couche bitumineuse:** c'est une déformation qui concerne uniquement la couche bitumineuse (voir figure I.19).

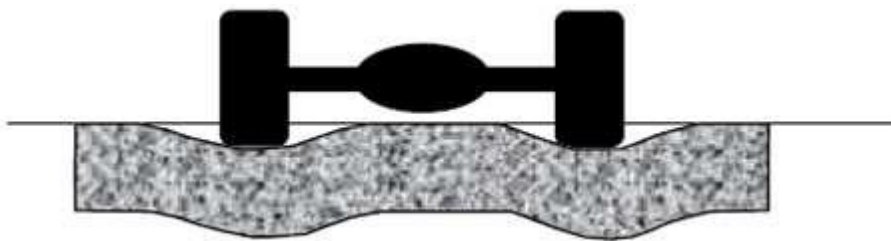


Figure 1. 18. Déformation de la couche bitumineuse [31]

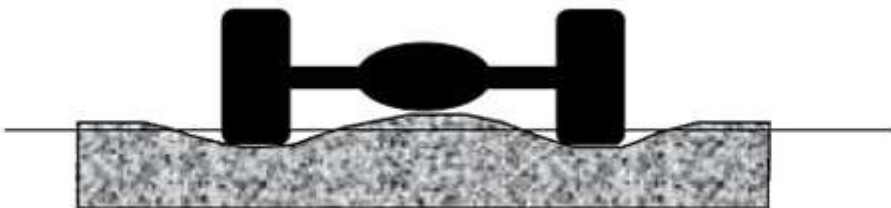


Figure 1. 19. Déformation du sol support [31]

1. 6. 2. Les fissures: Ce sont des déformations irréversibles, leur apparition sur la chaussée implique une auscultation et des précautions pour éviter leur propagation et évolution dans la chaussée. La cause revient au vieillissement, ou endommagement par fatigue des enrobés bitumineux, elles sont considérées faibles si l'ouverture est moins de 5mm, et elles sont majeures si cette valeur atteint 20 mm [32, 33, 34]. Les fissures sont classées selon leur forme et leur sens, on distingue:

1. 6. 2. 1. Fissures transversales: Elles sont dans le sens perpendiculaire à l'axe de la route, elles sont isolées ou regroupées sur toute la largeur de la chaussée. La cause revient aux phénomènes de retrait thermique ou la prise qui créent des fissures, remontantes à la surface [12, 35, 36]. Ce type se produit sur les chaussées: mixte, inverse, et bitumineuse épaisse. La figure 1. 20, montre un exemple de fissure transversale.

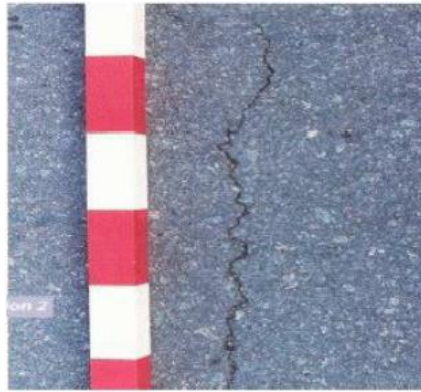


Figure 1. 20. Exemple d'une fissure transversale [9]

1. 6. 2. 2. Fissures longitudinales: Elles sont dans le sens parallèle à l'axe de la route, elles se trouvent sous le passage de pneumatique, ce type est observé dans les chaussées: mixte, inverse, souple, bitumineuse épaisse. Ces fissures sont initiales ou développées après propagation [37, 38] (figure 1. 21).



Figure 1. 21. Exemple d'une fissure longitudinale [9]

1. 6. 2. 3. Fissures obliques: Ce sont des fissures qui forment un angle de 30° ou 60° avec l'axe longitudinal de la route et sont présentes dans toutes les catégories de la chaussée. Peuvent être causées par les contraintes de traction obliques.

1. 6. 2. 4. Faièçage: C'est l'ensemble des fissures rapprochées, croisées qui forment un maillage de dimensions différentes sur la bande de roulement, il peut se présenter en mailles serrées, moyennes ou larges. La figure 1. 22 illustre un exemple d'un maillage.



Figure 1. 22 Faièçage moyen sur une chaussée [30]

1. 6. 2. 4. Fissures diverses: Elles apparaissent en désordre sur la couche de roulement sous différentes directions et différentes formes et dans tout type de chaussée (figure 1.23).



Figure 1. 23 Exemple des fissures diverses dans une chaussée [30]

1. 6. 3. L'arrachement: Ce type de dégradation se produit de trois façons distinctes:

1. 6. 3. 1. Le nid de poule: Ce sont les cavités produites par la dispersion des matériaux bitumineux dans la couche de roulement de la chaussée (figure 1. 24).



Figure 1. 24 Exemple d'un nid de poule dans une chaussée [9]

1. 6. 3. 2. Le plumage: Il s'agit des gravions qui s'arrachent de l'enduit superficiel de la chaussée (figure 1. 25).

1. 6. 3. 3. Le pelage: Il s'agit des plaques arrachées entièrement de la couche en béton bitumineux (figure 1. 26).



La figure 1. 25 Le plumage dans une chaussée [9]



Figure 1. 26 Exemple d'un pelage dans la chaussée [30]

1. 6. 4. Les remontées:

Appeler aussi ressuage, ce phénomène concerne le bitume qui remonte en surface. Il se produit si la chaussée est sous charge importante dans des conditions de températures élevées (figure 1. 27).



Figure 1. 27. Exemples des remontées sur le revêtement bitumineux [39]

1. 7. Modélisation des structures routières

1. 7. 1. Objectif:

Avant d'entamer la modélisation, des constatations sont faites, visant à évaluer l'état actuel des chaussées existantes et celles à réhabiliter, ainsi que les nouvelles structures à construire. L'objectif de cette modélisation doit donc cibler: la prédiction du comportement structural, l'optimisation de la conception, la gestion des ressources, l'évaluation de la durabilité, la sécurité routière, et le développement de nouvelles technologies [40]. La modélisation des structures routières se base sur plusieurs données telles que le trafic, l'environnement, et les matériaux utilisés, ce qui fait qu'elle englobe aussi les chaussées déjà existantes qui subissent des dégradations faibles ou moyennes pour permettre d'évaluer le renforcement adéquat, ou des dégradations majeures (cas des chaussées souples), impliquant la reconstruction de la chaussée [41]. La figure 1. 28 montre un modèle de statistiques et prévisions pour la construction routière.

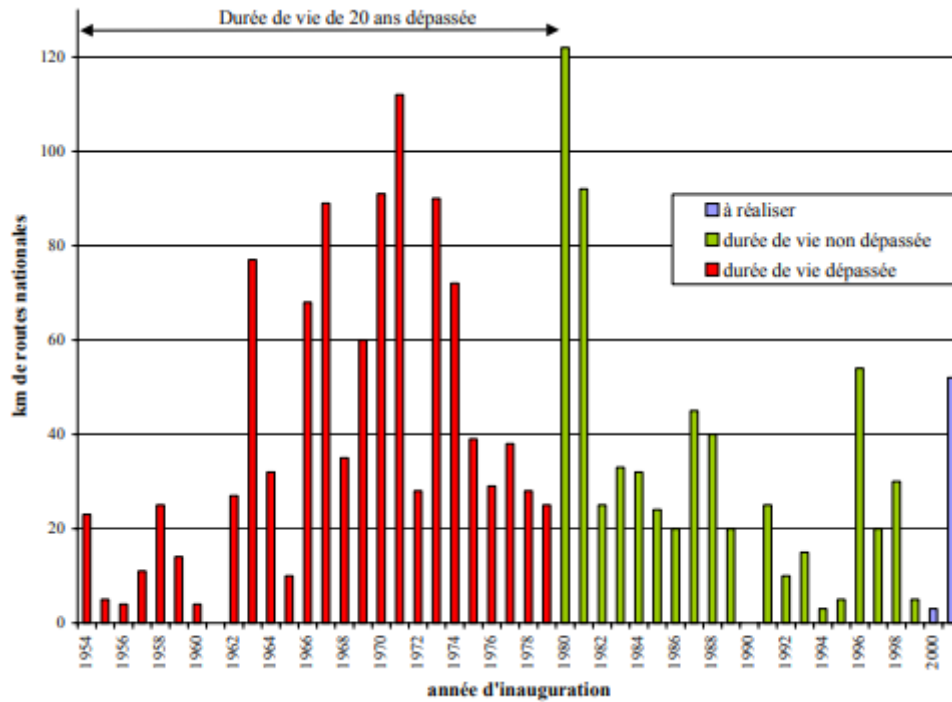


Figure 1. 28 Modèle de statistique avant la modélisation et la réhabilitation [40]

1. 7. 2. Modéliser la chaussée dégradée:

Pendant l'auscultation des chaussées dégradées, trois étapes sont observées, dont l'intervention immédiate dans l'une de ces étapes est bénéfique que dans celle qui suit [40]:

- Étape initiale: début des dégradations.
- Étape intermédiaire: les dégradations se propagent dans la chaussée.
- Étape finale: les dégradations se stabilisent, ou la chaussée rompt.

1. 8. Méthodes de calcul des chaussées souples

Après avoir cité les facteurs qui influent sur la chaussée et le comportement de la chaussée exprimé en résistance, déformation ou carrément rupture de la structure, il est indispensable de connaître les méthodes adaptées pour modéliser le comportement des chaussées, pour définir la charge admissible supportée par la chaussée avant la rupture, et même pour prévoir la durée de vie de la structure. Les actions externes influençant la structure sont prises comme conditions aux limites dans ces méthodes [13, 18]. La modélisation des chaussées intègre des connaissances en mécanique des sols, hydraulique, et matériaux de construction, dont plusieurs aspects sont intégrés tels que: l'analyse structurale, le

comportement des matériaux, la gestion de la circulation, le drainage et l'hydrologie [10]. Plusieurs modèles sont utilisés pour la modélisation des structures routières dont les méthodes s'appuient sur des hypothèses implicites, chaque approche est adaptée à un type particulier de comportement mécanique des matériaux composant le corps de la chaussée, qu'il soit réversible (élastique), ou irréversible (plastique), avec de la viscoélasticité offrant une approche plus complexe intégrant des aspects temporels, plus de paramètres existants, le modèle de comportement dépend aussi de la dégradation de la chaussée (relevé ponctuel) [42], (voir figure 1. 29).

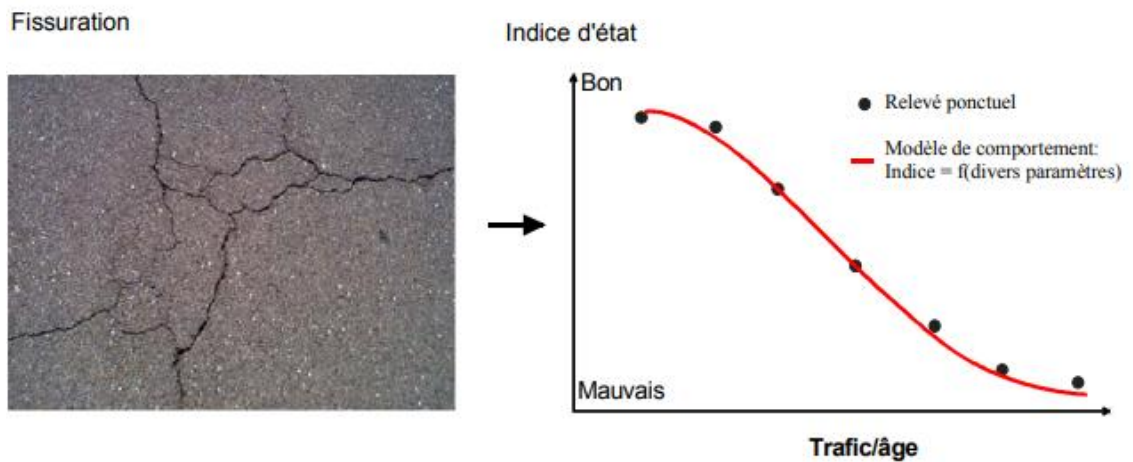


Figure 1. 29 Modèle de comportement en fonction de la dégradation [42]

1. 8. 1. Méthode de monocouche

C'est la méthode la plus ancienne, elle est connue par méthode de BOUSSINESQ, elle considère la chaussée un milieu semi-fini homogène et monocouche, la contrainte est une charge verticale statique sur une petite surface circulaire (figure 1. 30).

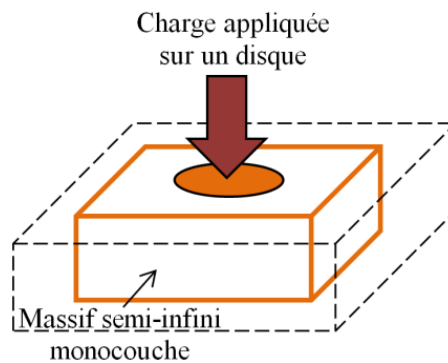


Figure 1. 30 Méthode de BOUSSINESQ [10]

Cette méthode s'appuie sur l'équation mathématique (1. 1):

$$\sigma_z = \frac{q(1-2\nu)}{\pi(r^2-z^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (1. 1)$$

σ_z : la contrainte verticale à une profondeur z sous la charge appliquée

q: la charge appliquée

ν : le coefficient de poisson du matériau

r: la distance horizontale par rapport à la charge ponctuelle

1. 8. 2. Méthode d'A.W.WERSTERGAARD

Cette méthode est une approche pour estimer les contraintes et les déformations dans les chaussées à utiliser dans le dimensionnement ou la réhabilitation [17], elle repose sur des hypothèses très simples:

- La chaussée est considérée comme une couche élastique semi-finie.
- La déformation verticale de la chaussée est considérée bidimensionnelle.
- La charge de trafic est représentée par des charges ponctuelles ou réparties.

La figure 1. 31 schématise le principe de la modélisation par la distribution des contraintes et des déformations du sol, en utilisant l'équation de calcul (1. 2) suivante:

$$\sigma(z) = q \left(\frac{1-\nu}{\pi} \right) \left(\frac{1}{r} \right) \left[\frac{1}{(z^2+r^2)^{\frac{3}{2}}} + \nu \frac{z}{(z^2+r^2)^{\frac{5}{2}}} \right] \quad (1. 2)$$

Avec:

$\sigma(z)$: la contrainte verticale à la profondeur z

q: la charge ponctuelle appliquée à la surface

ν : le coefficient de poisson du matériau de la chaussée

r: la distance horizontale de la charge ponctuelle à un point d'intérêt sous la surface

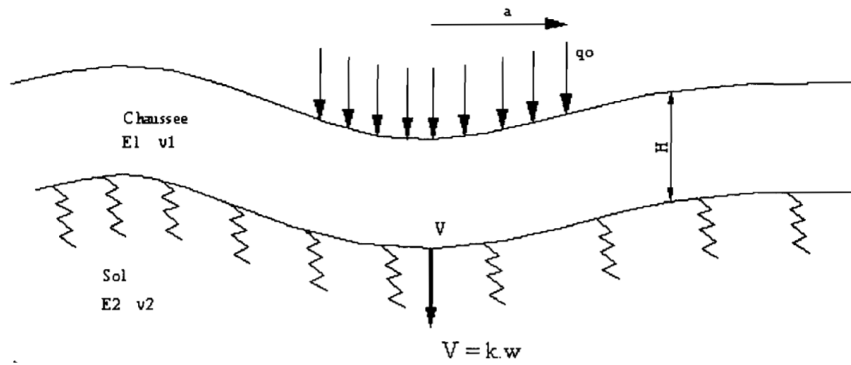


Figure 1. 31 Principe de la Méthode d'A.W.WESTERGAARD [10]

1. 8. 3. Méthode d'A.D. HOGG

C'est une approche plus précise par rapport aux deux premières méthodes classiques élastiques, ce modèle prend en considération le domaine viscoélastique de la chaussée, et grâce à son évaluation des performances des matériaux à long terme, elle permet d'anticiper la dégradation potentielle sous chargement répété du trafic [18]. La figure 1. 32 schématise la contrainte et la déformation considérées dans cette méthode qui se base sur des hypothèses suivantes:

- la chaussée est considérée comme milieu viscoélastique
- la contrainte verticale de trafic est répartie sur la chaussée
- la linéarité entre la contrainte et la déformation dans le temps
- l'homogénéité et l'isotropie de la chaussée dans ses propriétés viscoélastiques.

Ces hypothèses ont permis de formuler l'équation mathématique (1. 3) principale de ce modèle:

$$\sigma(t) = E \cdot \mathcal{E}(t) + \eta \cdot \frac{d\mathcal{E}(t)}{dt} \quad (1. 3)$$

Avec:

$\sigma(t)$: la contrainte à l'instant t

E : le module d'élasticité (Young) du matériau

$\mathcal{E}(t)$: la déformation à l'instant t

η : la viscosité du matériau

$\frac{d\mathcal{E}(t)}{dt}$: la dérivée temporelle de la déformation, elle représente visqueuse du comportement.

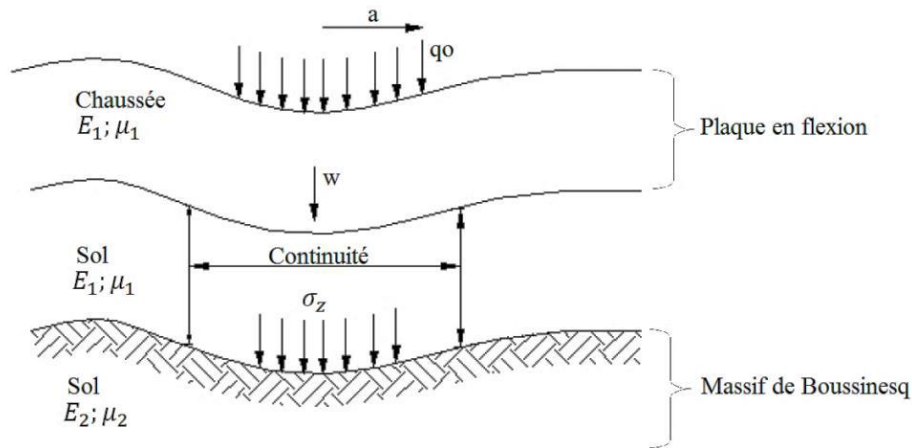


Figure 1. 32 Schématisation de la contrainte et la déformation du modèle de HOGG [10]

1. 8. 4. Méthode de R.V. BURMISTER

Elle est couramment utilisée pour la modélisation du comportement élastique de la chaussée soumise à la charge du trafic, à base des solutions analytiques utilisant des approximations simplifiées, la modélisation est un outil d'anticiper les risques de dégradation et de défaillance sous les sollicitations des véhicules [10, 13], dont les hypothèses sont:

- la chaussée est un milieu semi fini, élastique et homogène
- la prise en compte de la déformation vertical puisque l'approche est bidimensionnelle

La figure 1. 33 illustre le schéma de la méthode, et l'équation analytique (1. 4) est utilisée dans le calcul:

$$\sigma(z) = q \left(\frac{1}{\pi} \right) \left[\frac{1}{(z^2+a^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{z}{(z^2+a^2)^{\frac{3}{2}}} \right] \quad (1. 4)$$

Avec:

$\sigma(z)$: la contrainte verticale à une profondeur z sous la surface

q : la charge verticale appliquée à la surface

a : paramètre liée à la profondeur à laquelle la contrainte devient négligeable.

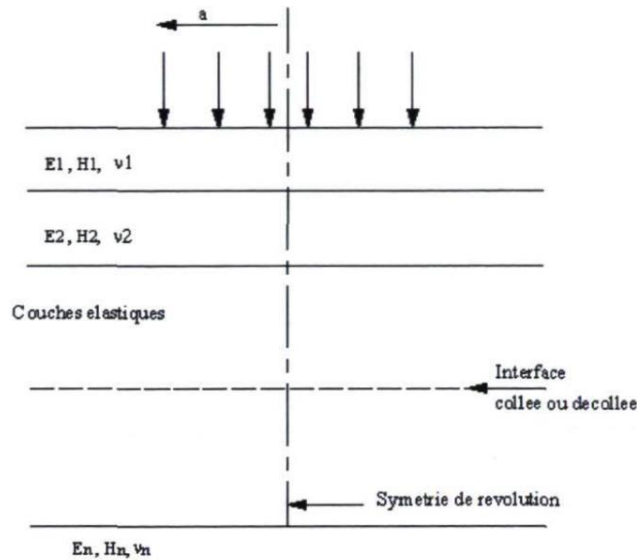


Figure 1. 33 La distribution des charges sur la chaussée selon BURMISTER [10]

1. 8. 5. Méthode de JEUFFROY

C'est une approche similaire à celle de BURMISTER, avec quelques ajustements, le modèle de JEUFFROY donne une certaine flexibilité par ses spécifications qui s'adaptent à des conditions du sol particulières. Le calcul de la déformation verticale est considéré au centre d'une chaussée sous une charge ponctuelle similaire à celle d'un essieu par l'emploi de l'équation mathématique (1. 5) suivante:

$$W = \frac{q(1-\nu^2)}{2E\left(\frac{3}{2}-4\nu\right)} \quad (1. 5)$$

w : la déformation verticale au centre de la chaussée

q : la charge ponctuelle appliquée

ν : le coefficient de poisson du matériau de la chaussée

E : le module d'élasticité du matériau de la chaussée

1. 8. 6. La méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis est une approche puissante modélisant des géométries complexes des chaussées, des matériaux hétérogènes, et des conditions de charges variables. Les principaux aspects de la modélisation des chaussées par la MEF sont:

- discrétisation de la chaussée en un ensemble des éléments finis de forme géométrique connue.
- formulation des équations de la mécanique des milieux continus pour chaque élément fini.
- assemblage des équations discrétisées et résoudre ce système numériquement
- obtention des contraintes et les déformations voulues de cette modélisation
- fixation des conditions aux limites telles que les conditions climatiques, les conditions de support à la base, et autres.
- analyse des résultats obtenus pour l'évaluation des performances structurelles de la chaussée et l'identification ses zones critiques.

Les méthodes de modélisation citées font appel à la technologie avancée en informatique, telle que la simulation numérique, les systèmes d'information géographique SIG, pour la gestion et la conception des chaussées basée sur les données recueillies et les performances souhaitées.

La déformation verticale des chaussées souples atteint sa valeur maximale au dessous des essieux des véhicules, soit dans un milieu élastique ou élastoplastique (voir figure 1. 34):

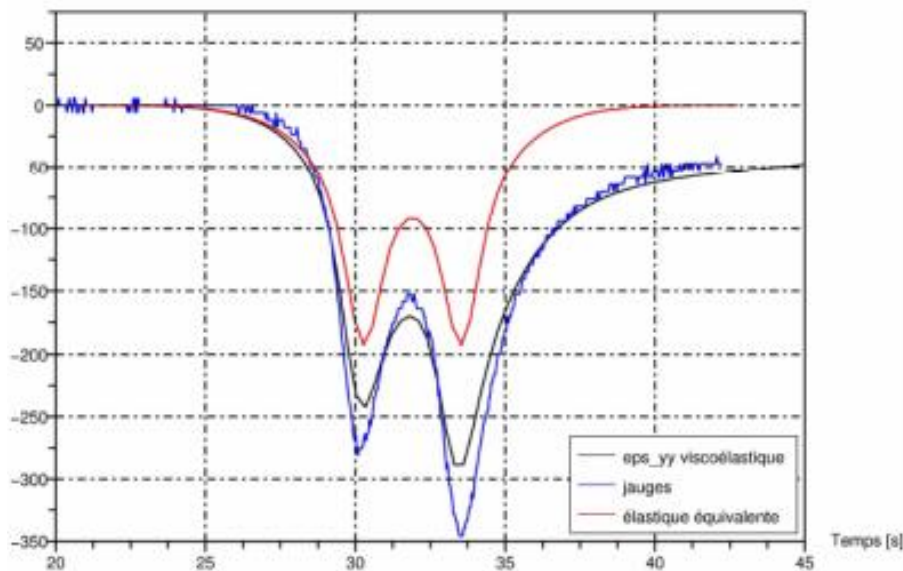


Figure 1. 34 Contraintes élastique et viscoélastique concentrées au point de contact des essieux [38].

1. 9. Caractéristiques physiques d'une chaussée souple

Les chaussées souples se distinguent des autres types des chaussées, non seulement par les couches qui les composent, et leurs épaisseurs, mais également par d'autres propriétés physiques fondamentales qui sont inhérentes à la nature physique de la structure routière, cette dernière est basée sur la forme et la dimension des granulats [3]:

1. 9. 1. La souplesse: La souplesse c'est la flexibilité qui caractérise ce type de chaussée et qui revient aux matériaux constituant (béton bitumineux) sous l'application de la charge, cette caractéristique est liée aux matériaux utilisés (granularité).

1. 9. 2. L'imperméabilité: Cette propriété est définie par la nature de liant utilisé dans le mélange bitumineux.

1. 9. 3. Le confort acoustique: Une caractéristique qui permet à la chaussée d'adsorber les vibrations et bruits de roulement du trafic, elle est liée à la texture poreuse des enrobés, si une chaussée contient ce facteur de confort.

1. 9. 4. L'esthétique: Elle est associée à l'aspect de surface lisse, uni, et une teinte uniforme.

1. 9. 5. La rugosité: Il s'agit de la surface texturée qui assure l'adhérence pneu-chaussée

1. 9. 6. La porosité: C'est la propriété responsable sur l'évacuation des eaux de surface.

1. 9. 6. La drainabilité: Les chaussées possèdent éventuellement des couches drainantes pour l'évacuation des eaux infiltrées.

1. 10. Le réseau routier de Tizi-Ouzou

La wilaya de Tizi-Ouzou, région de la Grande Kabylie, se situe à environ 100 km de la capitale. Elle s'étend sur une superficie de 2.992.96 km², et possède une population évaluée lors de dernier recensement de 1.627.608 d'habitants avec une densité de 316 hab/km². Cette wilaya est limitée par trois autres wilayas : Bouira, Boumerdès, et Béjaïa. Elle se situe à une altitude de 600 m sur la mer et sous une pluviométrie annuelle environs de 700 mm. La wilaya de Tizi-Ouzou est caractérisée actuellement par un réseau routier très dense, constitué des routes nationales (en rouge sur la carte de la figure 1. 35), chemins de wilaya (en jaune sur la carte de la figure 1. 35), et chemins communaux (en vert fin sur la carte de la figure 1. 35).

D'après les renseignements fournis par la direction des travaux publics de Tizi-Ouzou; le réseau routier de la wilaya est constitué de:

- Route nationale RN: 605 km
- Chemin de wilaya CW: 652 km
- Chemin communal CC: 3658 km



Figure 1. 35 Carte de réseau routier de la wilaya de Tizi-Ouzou

1. 10. 1. Etat de routes nationales de Tizi-Ouzou

La wilaya de Tizi-Ouzou ne possède qu'une seule ligne de chemin de fer vers Alger, passant par Boumerdès, autrement le transport des usagers et de la marchandise de et vers cette wilaya se fait essentiellement par la route, ce qui engendre une charge importante sur le réseau routier. En ce qui concerne les routes nationales (RN12, RN24, RN25, RN30, et RN72) sont soumises à un fort trafic (voir figure 1. 36). L'état des routes de la wilaya de Tizi-Ouzou indique qu'elles sont soumises aux différents types de sollicitations, telles que les actions climatiques, les matériaux de construction, et le sol support, qui influent sur la stabilité du corps de chaussée, à coté d'un trafic intense et répété.



Figure 1. 36 Carte des routes nationales de la wilaya de Tizi-Ouzou

De nombreuses anomalies, dégradations, sont distinguées sur la couche de roulement de plusieurs routes, et même quelques routes ont été endommagées par la rupture de chaussée, et d'après notre recherche régionale et les informations fournies au niveau de la direction des travaux publics DTP de Tizi-Ouzou, on constate que:

- Les routes de la haute Kabylie, comme la RN30 qui relie Bouira à Tizi-Ouzou sont très influencées par les basses températures et l'effet du gel sur le corps de chaussées a entraîné des dégradations moyennes à importantes (nids de poules, pelages, affaissements importants).
- La rupture de la RN12 au niveau d'Azazga est un problème permanent que subit cette route à cause des glissements de terrain que connaît la région.
- Les dégradations sur la RN25 sont importantes à cause du fort trafic du poids lourd.

1. 10. 2. La route nationale RN25 (Cas d'étude)

La route nationale 25, reliant les wilayas de Tizi-Ouzou et de Bouira est un axe routier considéré comme un raccourci notamment pour le transport des marchandises du secteur privé, et celui des sociétés qui réalisent la pénétrante de Tizi-Ouzou (voir figue 1. 35) avec de nombreux ouvrages tels que les viaducs, et les tunnels, ainsi que la réalisation du barrage de Souk-Tlata. A cet effet la RN25 est soumise à un fort trafic de poids lourds qui est l'une des causes principales de l'apparition de diverses dégradations dans le corps de chaussée. Le dernier revêtement de la RN25 était fait par l'entreprise Slimana en 2008, où les

matériaux granulaires utilisés sont acheminés de la carrière d'El-Hachimia, et le liant utilisé est le bitume de Naftal.

C'est à partir de cette étape qu'on a envisagé à mener une analyse sur les caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux employés dans les revêtements des chaussées souples. En utilisant des matériaux de même provenance que ceux utilisés dans la réalisation de la RN25, afin de contribuer à l'amélioration de la capacité portante de la chaussée sous le fort trafic, plutôt que procéder au renforcement et à la réhabilitation répétés. Nous avons accordé une attention particulière à l'impact environnemental de cette modification bitumineuse.

1. 11. Conclusion

La chaussée est conçue avec une structure spécifique, déterminant sa résistance et sa durabilité, et garantit le confort et la sécurité routière pendant la circulation. Différents types de chaussées sont réalisées de nos jours, chacune étant adaptée à des besoins spécifiques en prenant en compte les facteurs influençant le comportement de chaque type tel que: l'intensité de trafic, les conditions climatiques (l'eau, la température), et les matériaux constituant l'ouvrage.

Face à toutes les contraintes et les sollicitations subies par la structure de la chaussée, la réaction et le comportement mécanique différent d'un type de chaussée à l'autre. Plusieurs méthodes d'évaluation de la déformation et de la performance des chaussées sont proposées, notamment la méthode des éléments finis qui est un outil de modélisation très efficace et très utilisé de nos jours.

Il existe plusieurs types de dégradations telles que: les fissures, les affaissements, les remontées, et les diverses déformations influençant directement la circulation du trafic. Il est crucial de bien ausculter la structure et évaluer la gravité des dégradations pour pouvoir procédé aux réparations adéquates.

Ce chapitre donne aussi un aperçu sur un cas d'une chaussée souples plus au moins dégradée, l'auscultation faite sur la RN25 de la wilaya de Tizi-Ouzou, qui subit un trafic journalier de poids lourds important dans cette période. Après cette expertise et toute la procédure du renforcement qui ont été faites sur terrain, nous avons eu l'idée de faire une étude expérimentale sur la modification des propriétés mécaniques de l'enrobé bitumineux.

Avant de passer à cette phase, il est important de connaître profondément les matériaux (bitume et enrobé bitumineux), utilisés dans cette analyse. Le chapitre 2 fait l'objet d'un contenu détaillé sur ces matériaux, ainsi que sur les essais appropriés et les paramètres à définir pour chaque matériaux.

CHAPITRE 2
LE BITUME ET LES ENROBES
BITUMINEUX

2. 1. Introduction

Les bitumes et les enrobés bitumineux sont des composants clés de l'industrie de la construction routière et des infrastructures. Ces mélanges complexes sont utilisés pour construire et maintenir des surfaces routières, autoroutières, aéroportuaires, et d'autres infrastructures de transport, ainsi pour stimuler l'innovation dans l'ingénierie. Pour bien comprendre ces matériaux, on a opté pour une illustration bien détaillée dans ce chapitre, il s'agit de la structure chimique, les propriétés, et les essais homogènes et non homogènes pour chacun des ces composants.

2. 2. Les produits noirs

L'exploration des produits à base d'hydrogène comme source d'énergie propre et renouvelable augmente, comme les piles à combustible pour la production de l'électricité en évitant les émissions de gaz à serre [44]. Les produits noirs contenant l'hydrogène et le carbone représentent une catégorie importante de matériaux utilisée dans diverses applications, le carbone noir ou un matériau carboné est composé des particules de carbone de dimension nanométrique, il est utilisé industriellement pour fabriquer les pneus, les peintures, et est largement utilisé dans le renforcement des polymères [45].

La fonctionnalité de l'hydrogène et les nanomatériaux de carbone donne des composés hybrides aux propriétés uniques, qui s'appellent hydrocarbures, et qui ont diverses exploitations dans différents domaines comme exemple le stockage d'énergie; Il existe deux types d'hydrocarbures naturels et pyrogènes [45].

2. 3. Propriétés générales des liants hydrocarbonés

En général, Ces substances se révèlent excessivement visqueuses dans leur forme naturelle, rendant impossible leur utilisation directe à des fins spécifiques. Ainsi, il est nécessaire de réduire leur viscosités ou de les rendre plus fluides en recourant à divers procédés tels que le chauffage, la dissolution dans des solvants volatils, ou encore la formation des émulsions dans de l'eau [43]. Il est impératif que ces traitements ne modifient en aucun cas les caractéristiques fondamentales, qui sont comme suit:

2. 3. 1. La cohésion: il s'agit de l'aptitude à la déformation dans toutes les directions sans avoir des fissures ou être arraché.

2. 3. 2. La viscosité: il s'agit de la résistance interne qu'un liquide oppose à tout changement de forme ou de déformation.

2. 3. 3. L'adhésion: est une caractéristique spécifique du liant, il se colle aux granulats minéraux [43].

2. 4. La houille et les goudrons:

Ces éléments sont issus de diverses variétés de charbons gras distillés dans un environnement clos et non oxydant. Ce processus génère un produit dérivé essentiel, le goudron brut de la houille. Lorsque le goudron est distillé pour extraire les huiles, il laisse des résidus visqueux nommés brais de houille. Ces derniers peuvent être assouplis par les huiles qu'il contient ou par celles rajoutées. Il sert à la confection des enrobés goudronneux, souvent appelés "brai mou", il peut également être employé pour la production de goudrons connus qui sont largement employés dans l'industrie routière pour le revêtement superficiel et l'imprégnation des surfaces. À l'aide de processus de distillation du goudron brut généralement effectué à des températures dépassant les 1000°C (environ 1100°C) [47].

2. 5. Bitume

2. 5. 1. Origine et destinations des bitumes

Ces matériaux proviennent soit de sources naturelles (les Bermudes et de la Trinité), où ils sont fréquemment associés à des fillers fortement imprégnés (par exemple le bitume de Trinité, composé de 56% de bitume très pur et 44% de filler), soit d'origine artificielle, issue de la distillation du pétrole brut. Ainsi, on peut distinguer trois catégories de sources pour les bitumes [48]:

2. 5. 1. 1. L'asphalte: il s'agit d'un matériau naturel formé à partir d'une roche calcaire contenant une proportion significative d'hydrocarbures lourds, atteignant parfois jusqu'à 20%. Il est connu que l'asphalte naturel est intégré dans la conception des revêtements bitumineux, ou employé en tant qu'additif dans les mélanges d'enrobés, fournissant du liant et des particules fines [49].

2. 5. 1. 2. Les bitumes purs: ils sont produits à l'aide de processus de raffinage du pétrole brut sans aucune addition. La consistance du bitume est variable en fonction de processus de fabrication. Le choix du type de bitume approprié dépend de type de projet et des conditions

climatiques [50]. Ils sont ordonnés en plusieurs classes, de plus dur au plus mous: 20/30, 40/50, 60/70, etc.

2. 5. 1. 3. Fabrication des bitumes : Tous les types de bitume sont découlés du processus de distillation du pétrole brut, où les huiles utilisées comme solvants sont distillées ou évaporés [47]. Le bitume est fabriqué selon divers procédés [48]:

- **La distillation:** est un processus réalisé dans les raffineries et sert à la séparation des fractions légères des fractions lourdes du pétrole brut (comme le gaz, les différents types d'essences, etc.). Par la suite, les fractions légères sont soumises à une distillation sous vide pour produire des carburants, des huiles et des bitumes. Cette distillation directe de bruts s'effectue au sein d'une unité spécifique de la raffinerie; sous atmosphère et sous vide.
- **Le soufflage:** il s'agit des bitumes qui sont spécifiquement destinés à des applications industrielles. Après la distillation sous vide, l'air est injecté dans le résidu sous températures élevées (environ 280 °C). C'est pour cela qu'ils sont appelés bitumes oxydés ou également bitume soufflé, ce mode a pour but d'améliorer les caractéristiques du bitume en les optimisant.
- **Le désalphaltage:** Ce procédé est employé lorsqu'il y a une concentration excessive de fraction lubrifiante dans les résidus sous vide. Il consiste à faire passer un courant progressif de solvant à travers ces résidus. La différence de solubilité entre le solvant utilisé et les fractions bitumineuses permet d'obtenir le type de bitume souhaité.
- **Le craquage:** Ce mode cible la transformation des fractions lourdes composées de longues chaînes d'hydrocarbures en fraction plus légères, en utilisant un catalyseur. À une pression atmosphérique, et à des températures variables de 450 à 550 °C, les grandes molécules hydrocarbonées subissent une fragmentation pour produire d'autres plus petites avec un indice d'octane élevé.

La figure 2.1 montre qu'un liant hydrocarboné est de nature bitumineuse, goudronneuse, ou encore à base de bitume fluidifié, selon sa composition chimique, et la figure 2. 2 illustre des morceaux de bitume naturel.

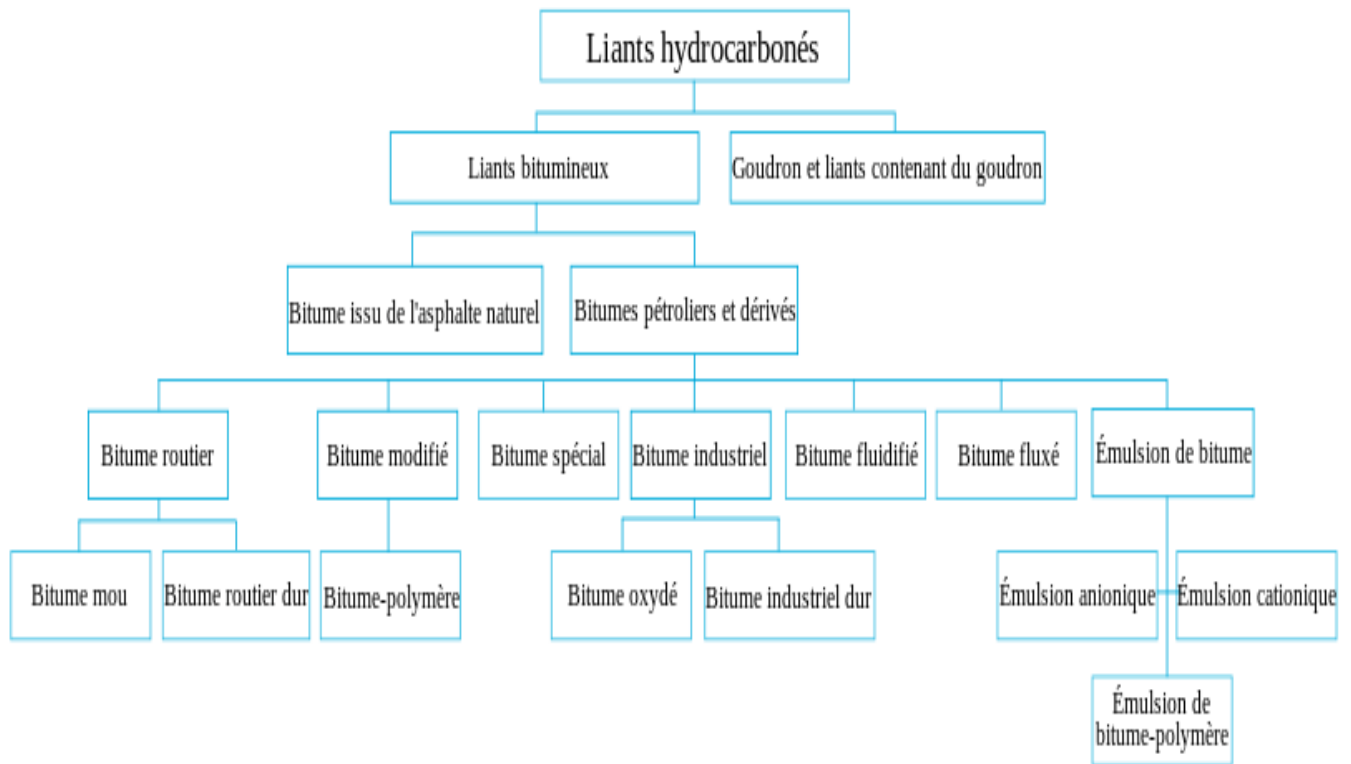


Figure 2. 1 Schéma de différents types des liants hydrocarbonés [51]



Figure 2. 2 Morceaux de bitume naturel [52]

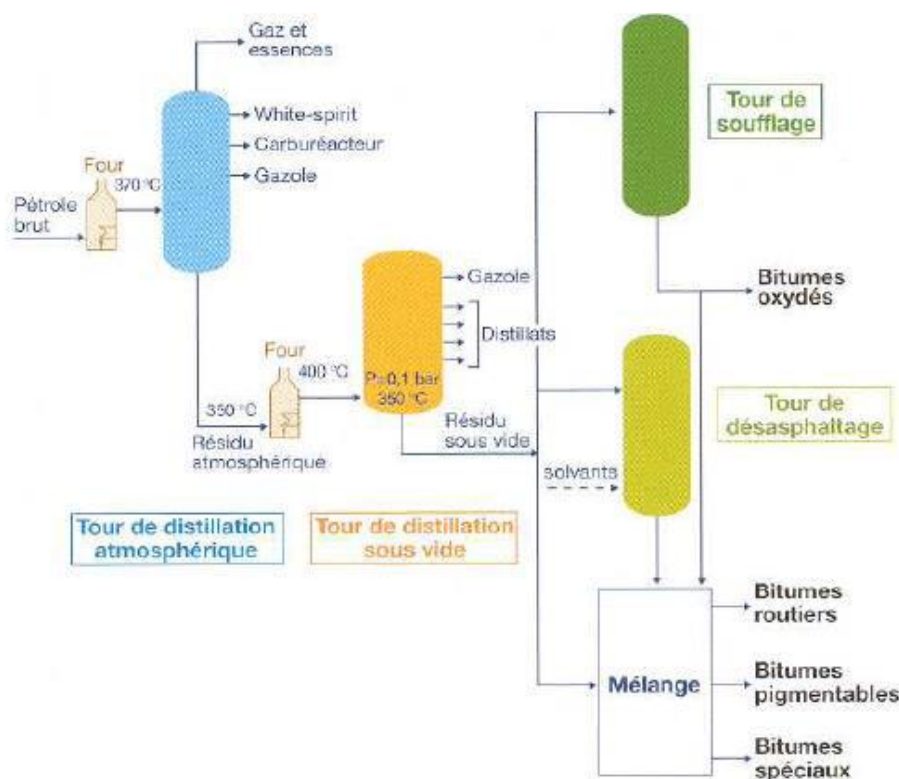


Figure 2. 3 Principe de fabrication des bitumes [47, 49]

2. 5. 2. La composition chimique des bitumes

Dans la composition du bitume, les atomes ont un pourcentage élevé en hydrogène (8-12%) et très élevé en carbone (80 - 87%), un faible pourcentage des hétéroatomes tels que : l'azote (0 - 1.5 %), l'oxygène (0.5 - 1.5 %) et le soufre (1 - 9 %). Des traces de métaux (vanadium, nickel) ont également été détectées [51].

D'après les travaux de Boussingault, le bitume se sépare en deux catégories distinctes en fonction de sa solubilité dans le n-heptane, donnant ainsi naissance aux asphaltènes (partie insoluble) et aux maltènes (partie soluble). Ensuite, ils étaient séparés grâce aux travaux de Corbet à travers le développement SARA (Saturé, Aromatique, Résine, Asphaltènes) [53], qui est actuellement normalisé (ASTM D 4124) [54].

La composition chimique précise et la proportion de chaque fraction dépendent principalement de plusieurs facteurs, notamment la source du pétrole brut, les solvants employés, la technique de séparation, ainsi que le type de la phase stationnaire [55]. La figure 2.4 montre le principe de fractionnement SARA.

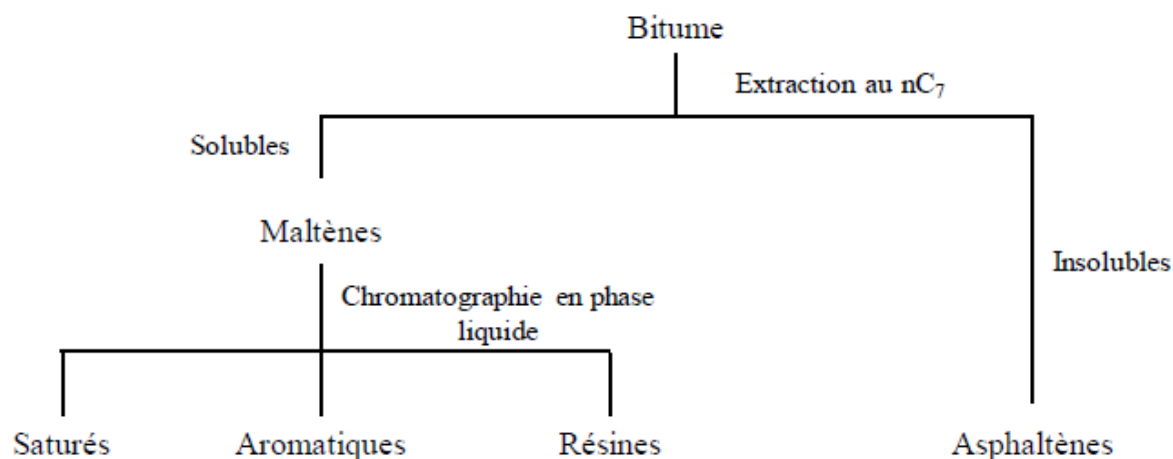


Figure 2. 4. Fractionnement SARA d'un bitume pétrolier [56].

Le fractionnement d'un bitume routier de distillation directe en utilisant une chromatographie sur lame mince et un ensemble de solvants d'élution (cyclohexane, dichlorométhane et mélange 70/25/5 de dichlorométhane/méthanol/isopropanol) permet d'obtenir environ 10% de résine, 10% de saturé, 10 à 30% d'asphaltène et 50 à 70% d'aromatiques [45], le tableau 2.1 montre le fractionnement SARA d'un bitume routier.

Tableau 2. 1 Fractionnement SARA d'un bitume pétrolier [57]

Composant	Nature	Structure et Caractéristiques	Masse moléculaire g/mole	% de représentation de bitume
Saturés	Huiles incolores, ou jaunâtres	-Molécules paraffiniques et cycles naphténiques	300-2000	<10%
Aromatiques	Huiles rouge-brunes sombres	-les atomes de carbone de cycles aromatiques	300-2000	50-70%
Résines	Solides noires	-système condensé de cycles aromatiques	500-50 000	10%
Asphaltènes	Solides brunes à noires	-atomes d'hydrogène et de carbone -forme micelles ou paquet de micelles	>900	10-20%

À cet effet le fractionnement SARA est très adapté aux laboratoires dans le monde, mais en Algérie il en est à ses débuts. Des chercheurs ont réussi à obtenir la composition chimique du bitume 40/50 et 80/100 en Algérie, type (SARA) à base de la méthode de chromatographie liquide, dont les résultats sont illustrés dans le tableau 2. 2

Tableau 2. 2. Composition chimique de deux types de bitumes Algériens [58]

Type de bitume	Saturés (%)	Aromatiques (%)	Résines (%)	Asphaltènes(%)
40/50	10.97 à 19.0	30.40 à 50.19	20.41 à 30.50	17.91 à 35.55
80/100	8.72 à 19.0	34.7 à 58.55	18.33 à 30.30	14.61 à 23.0

2. 5. 3. Organisation structurale des bitumes

Les asphaltènes se présentent sous forme d'une suspension colloïdale au sein de la phase malténique, composé d'aromatiques et de saturés. Cette structure comprend des micelles d'asphaltène, enveloppées par des molécules de résines, comme l'a décrit Nellensteyn. [50, 59]. Les résines agissent comme des agents de peptisation, créant ainsi une couche de solvation qui assure la stabilité des asphaltènes (figure 2. 5), autrement dit, la stabilisation stérique résultant de l'adsorption des molécules de résines autour des agrégats d'asphaltènes formant ainsi une "barrière stérique", qui empêche à son tour les agrégats d'asphaltène de se rapprocher et de former des grappes en place [48, 50]. L'évolution de la couche de résine qui entoure les asphaltènes varie en fonction de la température qui est un paramètre crucial [60].

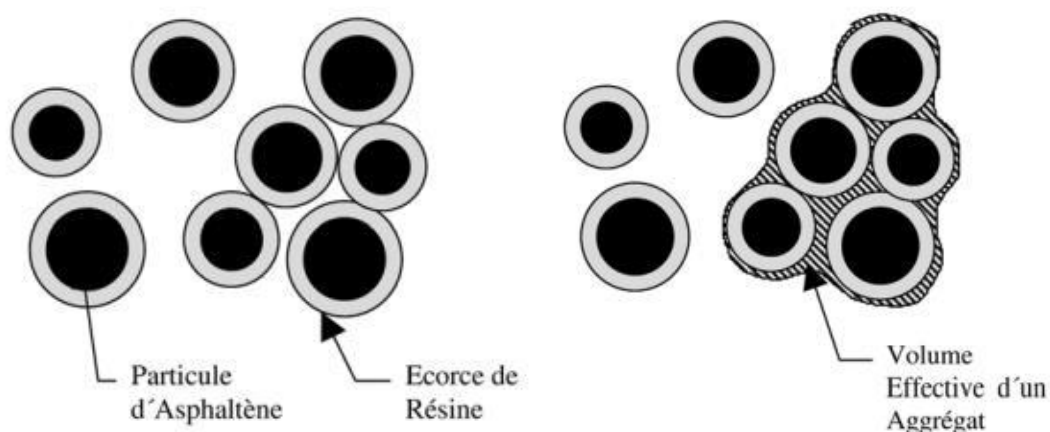
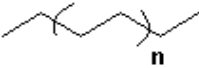
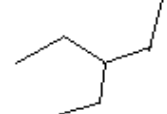

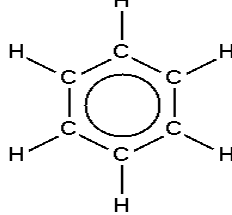
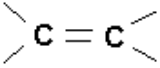


Figure 2. 5 Structure colloïdale du bitume: particule d'asphaltène entourée par des résines et agrégats d'asphaltènes [49]

Le bitume est une combinaison de composés hydrocarbonés ayant une variation de structure chimique et de masse molaire. Ces composés sont principalement classés dans les catégories naphthéniques et aliphatiques. Les molécules des composés bitumineux sont construites à partir de motifs hydrocarbonés, dont il existe quatre types comme indiqué dans le tableau 2. 3. Cependant, il est rare de trouver des molécules composées d'un seul de ces motifs [61].

Tableau 2. 3. La molécule de bitume et les motifs hydrocarbonés [51]

<p>Paraffiniques saturés: chaînes linéaires sans cycle</p>	<p>Chaînes linéaires </p> <p>ramifiées </p>
<p>Paraffiniques: chaînes saturées cycliques (cycle à liaison simple)</p>	
<p>Aromatiques: Au moins un cycle avec doubles liaisons de benzène</p>	 <p>Benzène</p>
<p>Oléfines: chaîne à une ou plusieurs doubles liaisons</p>	

2. 5. 4. La structure Sol/Gel: dans cette structure comme le montre la figure 2. 6, on distingue trois différentes structures:

- La structure de type Sol: totale dispersion, bitume riche en résines et huiles aromatiques (milieu solvant) et pauvres en huiles saturées (milieu floculant) et asphaltènes.
- La structure de type Gel: cas des bitumes fortement soufflés; partielle dispersion, bitume pauvre en aromatique et résines, mais riche en huiles saturées et asphaltènes.
- La structure de type Sol-Gel, est intermédiaire, il s'agit des agglomérats de micelles d'asphaltènes baignant dans un milieu structuré par les résines. La même structure des bitumes routiers possédant un comportement viscoélastique.

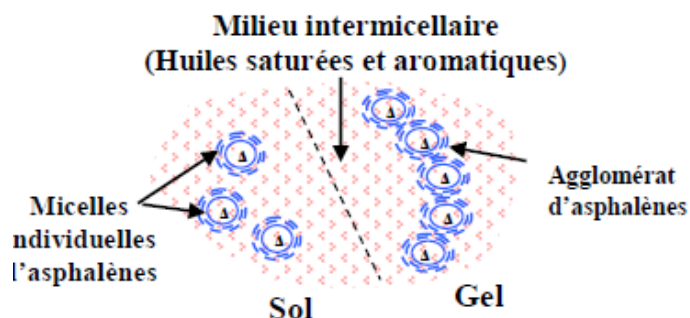


Figure 2. 6 La structure colloïdale d'un bitume routier [49]

L'indice d'instabilité colloïdale (IC) permet de connaître la position des bitumes fabriqués par rapport aux deux états extrêmes Sol et Gel, cet indice est défini comme suit:

$$IC = (\% \text{ Asphaltènes} + \% \text{ Saturés}) / (\% \text{ Résine} + \% \text{ Aromatiques})$$

- Le bitume est désigné comme un Gel si IC est fort
- Le bitume est désigné comme un Sol si IC est faible

Le tableau 2. 4, montre la classification du bitume en fonction de l'indice d'instabilité colloïdal IC, et la structure des deux types de bitume Sol et Gel est illustré dans la figure 2. 7

Tableau 2. 4 Classification du bitume en fonction de sa composition générique [62]

Type de structure	Asphaltène(%)	Résine(%)	huiles(%)
Gel	> 25	< 24	> 50
Sol	< 18	> 36	< 48
Gel - Sol	21 - 33	30 - 34	45 - 49

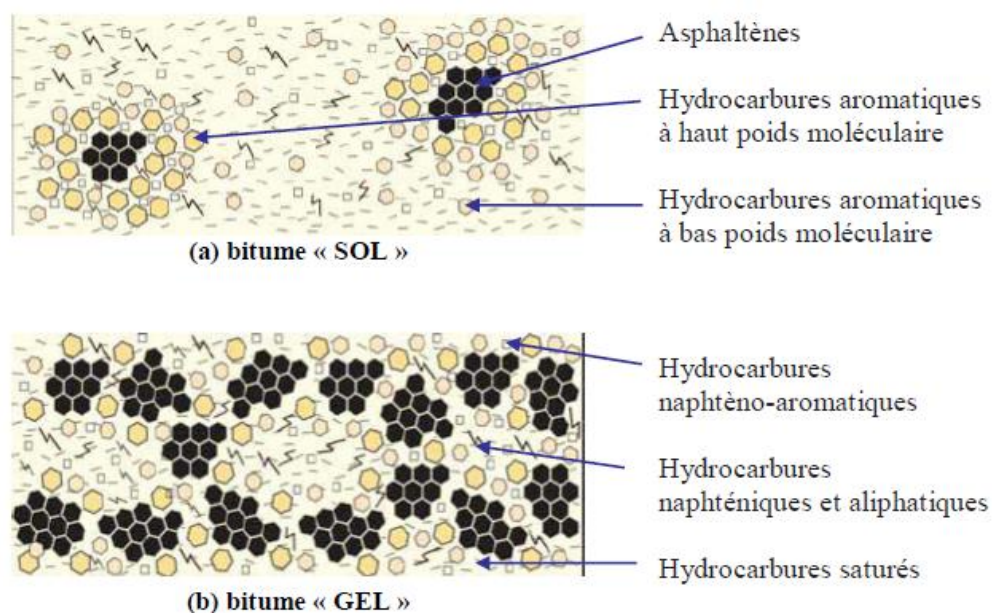


Figure 2. 7 Les deux types de structures de bitume [62]

2. 5. 5. Vitrification et cristallisation des bitumes

La cristallisation touche spécifiquement un groupe de composés paraffiniques présents dans les bitumes, appelés "paraffines cristallisables", qui montrent une solidification soudaine à des températures situées entre 40 et 50°C, les alcanes linéaires à faible masse molaire sont la construction basique des paraffines cristallisables, qui sont facilement identifiés par des méthodes calorimétriques [61].

La vitrification se rapport à la phase maltènes, qui ne forme pas de cristaux mais devient vitreuse à des températures relativement basses, ce phénomène peut être facilement détecté à l'aide de techniques telles que la calorimétrie différentielle ou les mesures diélectriques. En générale, la température à laquelle un bitume subit cette transition vitreuse, varie de 50 à 10 °C et s'étend sur une plage d'environ dix degrés [63].

2. 5. 6. Comportement des bitumes

Le comportement viscoélastique du bitume est lié principalement à la température. A basse température (à des fréquences élevées), il se comporte comme un solide élastique, ce qui signifie qu'il est cassant, en revanche, à haute température (à des fréquences faibles), il se comporte comme un fluide visqueux. Le bitume se comporte comme un matériau flexible à température ambiante, avec une densité d'environ 1 [45]. Le bitume est conventionnel, s'il répond à plusieurs critères rhéologiques essentiels; il doit être capable de [64]:

- être pompé et manipulé à des températures d'application d'environ 160 °C,
- devenir mou à basses températures, afin d'éviter le phénomène de fatigue par la relaxation des contraintes,
- devenir rigide à des températures élevées afin de maintenir la structure granulaire.

La variation de comportement des bitumes en fonction de la déformation (ϵ), de la température (T) et de l'amplitude, avec une vitesse de déformation fixée; est illustrée dans la figure 2. 8.

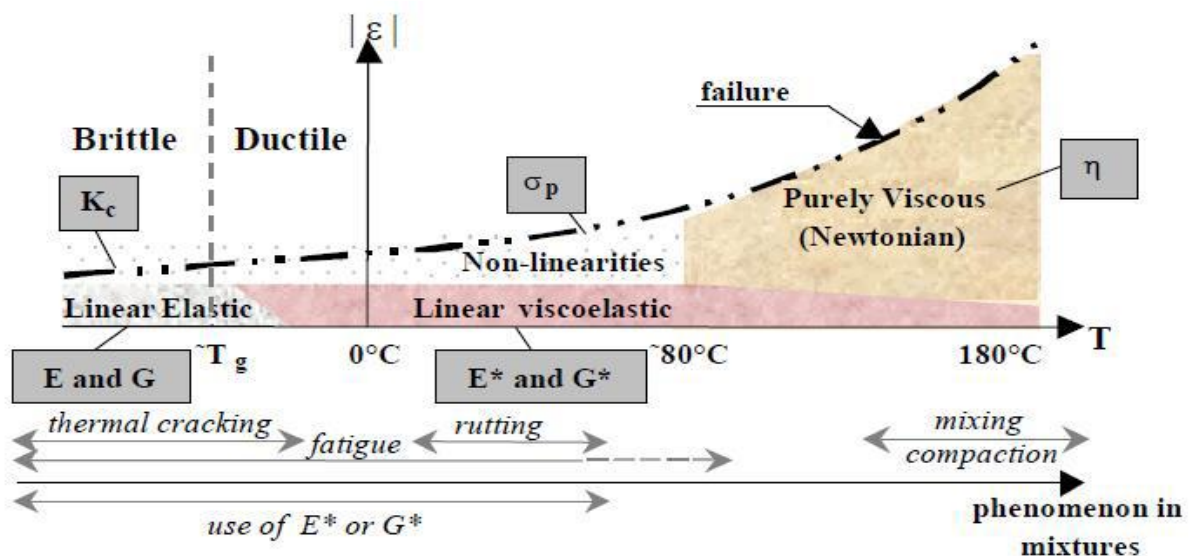


Figure 2. 8 Phases de variation de comportement du bitume [45, 64].

Le bitume est caractérisé par:

- La résistance à la traction (σ_p) peut être mesurée dans les domaines fragile et ductile ;
- La ténacité (K_c) ou (G_c) dans la zone de la rupture fragile ;
- Les modules (E) et (G) caractérisent le comportement élastique linéaire;
- Les modules complexes E^* et G^* caractérisent le domaine viscoélastique linéaire;
- La viscosité η caractérise le comportement purement visqueux (Newtonien) ;
- La possibilité de mesurer la résistance à la traction (σ_p) dans les domaines ductile et fragile;
- Le comportement est considéré fortement non linéaire si les déformations sont de l'ordre de quelques pourcents;

2. 5. 7. Essais sur le bitume pur (essais homogènes)

2. 5. 7. 1. Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426)

Cet essai vise à évaluer la cohérence pour un échantillon de bitume en mesurant la profondeur à laquelle une aiguille normalisée, chargée à 100 g et maintenue à une température de 25°C, pénètre dans l'échantillon de bitume en l'espace de 5 secondes. La pénétrabilité est ainsi définie comme la distance parcourue par cette aiguille, exprimée en dixièmes de millimètres, et elle est mesurée à l'aide d'un pénétromètre [57] (Voir figures 2. 9 et 2. 10):

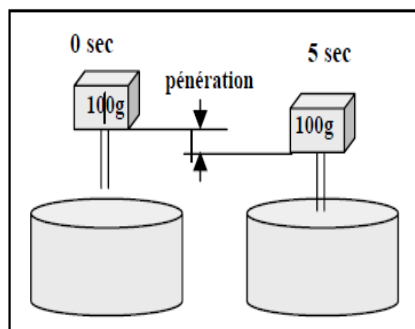


Figure 2. 9 Principe de l'essai de pénétrabilité

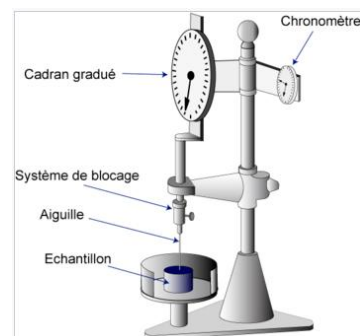


Figure 2. 10 Le dispositif pénétromètre

Il s'agit aussi de mesurer l'indice de pénétrabilité (IP) qui est la susceptibilité du bitume en mesurant la pénétrabilité à différentes températures [57], à fin de bien comprendre le comportement de bitume aux variations de température (tableau 2. 5)

Tableau 2. 5. Types de propriétés de bitume en fonction de l'indice de pénétrabilité [57].

Indice de pénétrabilité (IP)	Type de propriétés de bitume
IP faible	Propriétés visqueuses newtoniennes, correspond au type "SOL"
IP fort	Propriétés plus en plus élastiques et non newtoniennes, type "GEL"

2. 5. 7. 2. Point de ramollissement bille et anneau (TBA). (NF EN 1427)

L'essai vise à établir la température à laquelle un bitume atteint un certain degré de ramollissement selon les conditions normalisées. Pour ce faire, le matériau est chauffé jusqu'à ce qu'il se liquéfie, puis il est versé dans deux anneaux en laiton aux dimensions standardisées. Ensuite, l'échantillon est refroidi à la température ambiante, et une bille d'acier est positionnée au centre de celui-ci. L'ensemble est ensuite soumis à un chauffage progressif, augmentant la température à un rythme constant fixée par 5°C/min [63] Le point de ramollissement bille et anneau est la valeur de la température à l'instant où la bille d'acier touche la plaque inférieure (voir figure 2. 11):

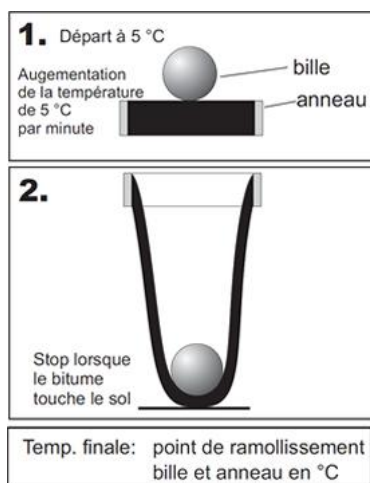


Figure 2. 11. Schéma de principe de l'essai TBA **Figure 2. 12. Appareil manuel de l'essai TBA**

Ces deux paramètres (pénétrabilité et point de ramollissement), permettant la classification et l'identification du bitume (tableau 2. 6).

Tableau 2. 6 Catégories des bitumes routiers en fonction de TBA et Pénétrabilité [63]

Consistance	Dur				Mou
	20/30	40/50	60/70	80/10	180/122
TBA °C	55 à 63	50 à 56	45 à 51	42 à 48	34 à 43
Pen 25 °C	20 à 30	35 à 50	50 à 70	70 à 100	180 à 220

2. 5. 7. 3. Température de fragilité FRAASS (NF T 66-026)

Il s'agit de la température à laquelle un mince film de bitume se fracture lorsqu'il est soumis à une flexion, selon des paramètres de fabrication et de test clairement définis. Cet essai empirique offre une indication des caractéristiques du bitume à des températures basses [65]. Le tableau 2. 7 illustre les caractéristiques liées aux phénomènes de fissurations des liants bitumineux:

Tableau 2. 7 Caractéristiques de bitume subit les phénomènes de fissuration

Propriété	Spécification
La pénétration	< 20 (1/10) mm
Température de ramollissement	> 70°C
Température de fragilité	< 0°C

2. 5. 7. 4. Essai de Ductilité (NF T 66-006)

Pour le paramètre de ductilité, un échantillon de bitume, d'une forme déterminée et à une température de 25°C, est étiré par une vitesse de 5 cm/min (voir figure 2. 13) Il s'agit pour cet essai d'évaluer l'allongement de ce bitume, en mesurant la distance entre les deux mors au moment de la rupture. L'essai est refait 5 fois et la moyenne des mesures représente ductilité du bitume testé [66]:

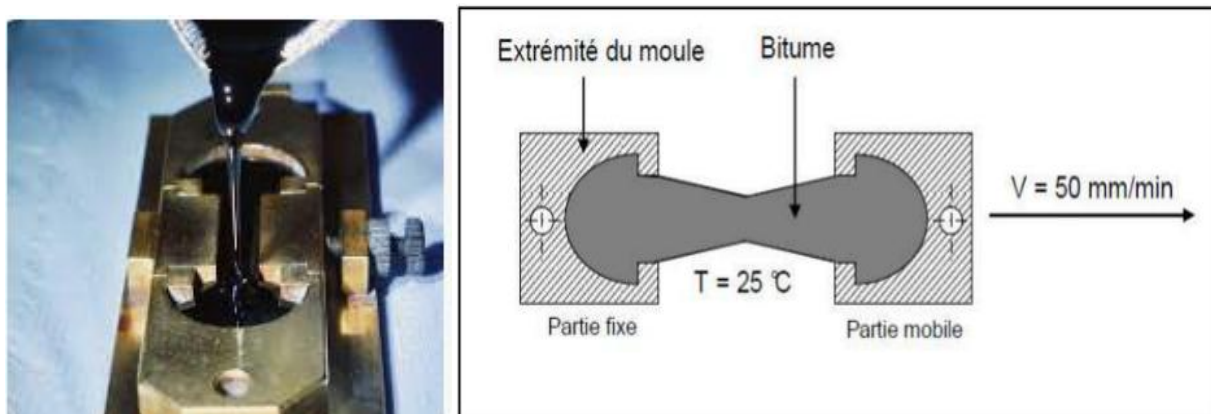


Figure 2. 13. Principe de l'essai de Ductilité

2. 5. 7. 5. Teneur en asphaltènes (NF T66-015)

La teneur en asphaltènes est une référence pour évaluer le processus de vieillissement du bitume, en mesurant la quantité de bitume non soluble dans l'heptane [25].

2. 5. 7. 6. Densité relative (NF T66-007)

Ce paramètre est mesuré à l'aide d'un pycnomètre, et est généralement réalisé à une température de 25 °C. La densité relative est déterminée par la comparaison de la masse d'un volume spécifique d'eau, avec celle d'un volume équivalent à la même température. Cet essai permet de calculer la proportion des espaces vides dans les mélanges bitumineux utilisés pour les routes après leur compactage [29].

2. 5. 7. 7. Perte de masse au chauffage (NF T66-011)

Elle est définie comme étant la différence de masse entre l'échantillon initial de bitume (avant chauffage) et celui final (après chauffage) en pourcentage. L'échantillon de bitume est mis dans une étuve, et soumis à une température de 163°C pendant 5 heures, puis refroidi. L'objectif de cet essai est d'évaluer les modifications des caractéristiques du bitume après l'effet de la température et estimer sa résistance face aux influences atmosphériques dans le temps [29].

2. 5. 7. 8. Essai de point d'éclair et point de flamme (NF T60-118)

Il s'agit d'une température minimale à laquelle les vapeurs du matériau s'enflamment à proximité d'une flamme. Le point d'inflammation est identifié au moment où le matériau prend feu, et continue de brûler au moins 5 secondes (figure 2. 14). Dans cet essai une faible flamme est périodiquement approchée en bas de la surface de l'échantillon de bitume contenu dans un récipient en laiton. La température à laquelle suffisamment de vapeurs sont libérées pour provoquer une brève émission de lumière instantanée est enregistrée comme le point d'éclair. L'objectif principal de cet essai est de minimiser les risques d'incendie pendant la fabrication des mélanges bitumineux [29, 65].



Figure 2. 14. Appareillage pour déterminer le point d'éclair et point de flamme

2. 5. 7. 9. Solubilité (NF T 66-012)

Elle est évaluée par la séparation des composants insolubles de ceux qui sont solubles par filtration, en dissolvant le bitume dans un solvant comme le sulfure de carbone. La fraction soluble est ensuite séchée et pesée, le pourcentage insoluble est calculé par la suite. En soustrayant ce pourcentage de 100, on obtient le pourcentage des composants solubles. Au moins 99.5% de solubilité dans le solvant est pour les bitumes de qualité, issus de pétrole non mélangé. Cet essai consiste aussi à fournir une indication sur la pureté du bitume [29].

2. 5. 7. 10. Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test" (NF T66-032)

Lors de la fabrication de l'enrobé à chaud, les granulats sont chauffés à environ 160 °C, et enrobés ensuite de bitume chaud, formant un film mince de bitume autour des granulats, ce qui entraîne le processus de vieillissement du liant, ce phénomène s'est provoqué par une oxydation chimique intense à la présence d'oxygène de l'air, et à la température élevée. Le RTFOT est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes, car il reproduit l'oxydation et la perte des composants volatiles qui se produisent dans l'unité de production d'enrobé, et pendant la mise en œuvre. D'après la norme européenne EN12607-1 [46] et la norme américaine ASTM D 2872 [67], cet essai implique l'utilisation de 8 flacons en verre, chacun contenant 35g de bitume disposés dans un support rotatif dans un four. Dans chacun des flacons, un flux contrôlé d'air chaud est introduit. Pendant la durée de l'essai, le bitume s'étend en couches relativement fines adhérant à la paroi intérieure de chaque flacon, tout en étant soumis à une température de 165°C pendant 75 minutes [68].

L'essai RTFOT a pour but d'exposer l'intégralité du bitume à l'air pulsé, et à la chaleur, les pellicules protectrices ne se forment pas à la surface du bitume grâce au mouvement constant du dispositif (figure 2. 15).

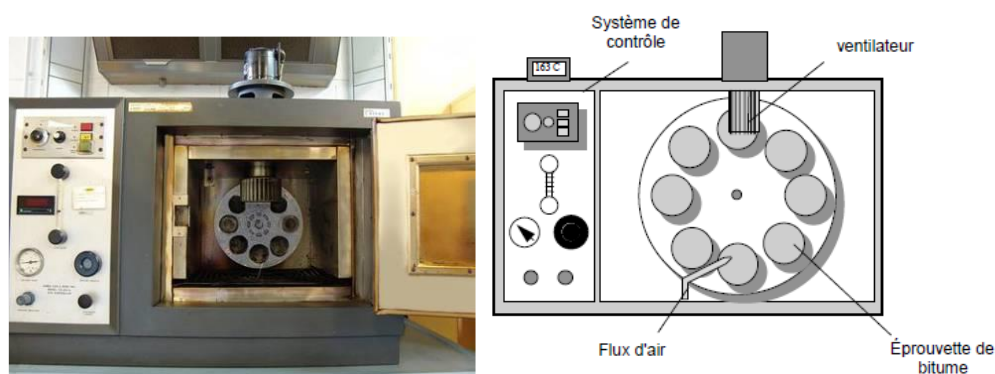


Figure 2. 15 Essai RTFOT [62]

Les propriétés courantes du liant vieilli, telles que la température de ramollissement (TBA), et la pénétrabilité sont mesurées et désignées comme "après RTFOT", et sont ensuite comparées aux valeurs initiales. Les valeurs "après RTFOT" sont proches des valeurs obtenues du liant extrait de l'enrobé neuf que celles obtenues à partir d'un bitume d'origine.

Cependant, il convient de souligner que l'essai RTFOT ne parvient pas à reproduire entièrement la complexité de tous les phénomènes qui se produisent dans une centrale d'enrobage. Le RTFOT ne prend pas en considération les autres facteurs qui interviennent dans le processus en centrale d'enrobage tels que: la présence de vapeur d'eau, les chocs thermiques subis par les granulats à des températures plus élevées, les variations de l'état de surface durant le mélange, ainsi que la courte durée du matériau dans le malaxeur.

2. 5. 7. 11. Essai Pressure Aging Vessel

Il s'agit d'une simulation du vieillissement d'un bitume à une période de 5 à 10 ans de service. À partir de l'essai RTFOT, le résidu obtenu sera chauffé, puis versé dans des plateaux métalliques servant d'éprouvettes pour l'essai PAV. Ces éprouvettes sont ensuite disposées sur un support et placées dans un récipient à l'intérieur d'une enceinte thermique. Au cours de cet essai, et dans le récipient, une pression d'air de 300 psi (2.1MPa) est appliquée, maintenue dans une plage de température entre 90 et 110°C. Après une période de 20 heures, la pression est progressivement relâchée sur une période 8 à 10 min, ensuite les éprouvettes sont exposées à une température de 163°C dans un four pendant 30 minutes. Par la suite la température (TBA) et la pénétrabilité sont mesurées, et désignées comme "après PAV". Une comparaison des valeurs avant et après l'essai est faite [68]. Le processus de l'essai est illustré dans la figure 2. 16

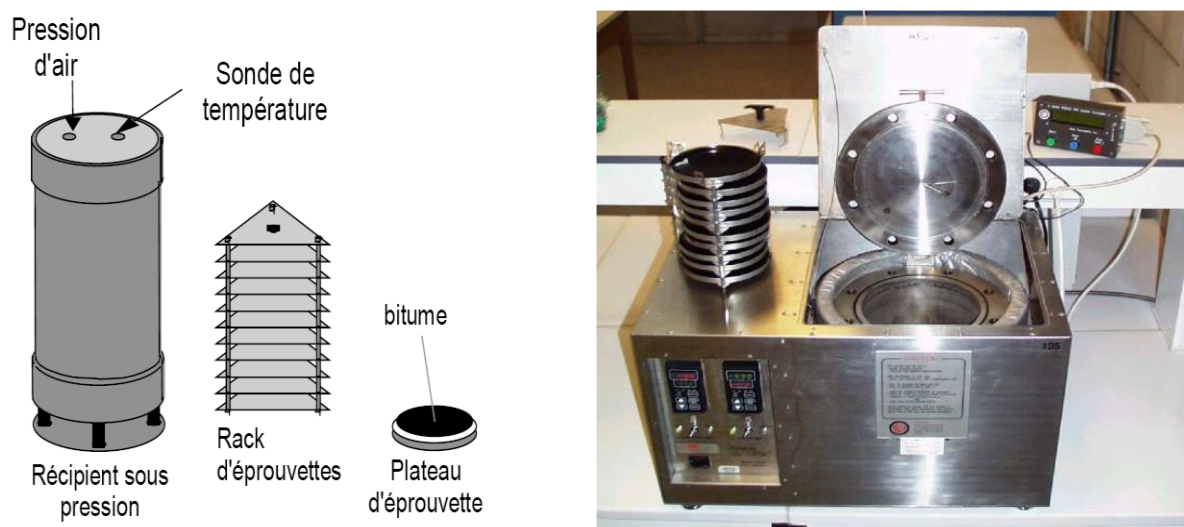


Figure 2. 16 Processus et équipements de l'essai PAV [57]

2. 5. 7. 12. Essais rhéologiques

Les essais rhéologiques visent à évaluer diverses propriétés physiques d'un échantillon. Pour le cas du bitume, ils sont effectués pour mieux comprendre l'influence des contraintes et de la température sur son comportement dans le but d'optimiser son utilisation [57]. Les méthodes de mesure des propriétés rhéologiques comprennent principalement trois types d'essais:

- Essai de viscosité,
- Des essais de cisaillement à chaud et de traction à froid principalement utilisés pour les bitumes.
- Le fluage sous contrainte constante et sa récupération sous sollicitations périodiques,
- Des essais impliquant une sollicitation instantanée,

a. Viscosité (ASTMD2170 & D217178)

Cet essai permet de mesurer la résistance qu'un fluide oppose au déplacement relatif de ses molécules. Pour se faire, deux plaques de surface S , d'un espacement entre elles de e , sous une force F , et une vitesse V , se déplacent parallèlement l'une par rapport à l'autre (voir figure 2. 17). Une définition est donnée pour la viscosité dynamique η par la relation de l'équation (2. 1):

$$\tau = \eta * D \quad (2. 1)$$

τ : la contrainte de cisaillement, rapport de F appliquée sur S , en $[N/m^2]$

D : le taux de cisaillement, rapport de V par e exprimé en $[S^{-1}]$

Deux types de viscosimètres sont utilisés pour mesurer cette propriété:

- Le viscosimètre "STV" pour évaluer la viscosité spécifique de bitume pur
- Le viscosimètre "Engler" pour déterminer la viscosité des émulsions de bitume.

La densité cinématique peut être calculée en divisant la densité dynamique sur la densité du bitume.

L'appareil d'essai comprend deux thermomètres avec des plages de températures de (0-60) °C et de (0-150) °C, ainsi qu'une fiole adaptée à la nature du bitume à tester.

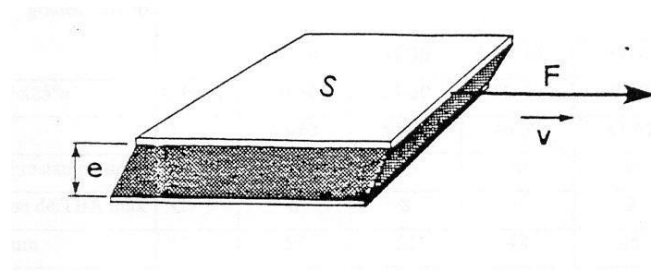


Figure 2. 17 Modèle d'identification de la viscosité

b. Essai de cisaillement dynamique au rhéomètre

Le DSR, (Dynamic Shear Rheometer), est un dispositif utilisé pour évaluer les propriétés viscoélastiques des bitumes. Il fonctionne en soumettant un échantillon de bitume à une contrainte de cisaillement entre deux plaques cylindriques, mesurant ainsi la déformation résultante (figure 2. 18). Le DSR permet de caractériser les bitumes en déterminant des paramètres tels que: le module d'élasticité, l'angle de phase, module de viscosité, température de durcissement, ...etc. [57]



Figure 2. 18 Principe et appareillage de l'essai DSR

c. Essai de fluage en flexion (AASHTO TP1)

Bending Beam Rheometer Test, en abrégé BBR, est un essai qui sert à analyser le comportement du bitume en fonction du temps en termes de fluage à basse température. Il s'agit d'évaluer la déformation d'un échantillon de bitume rectangulaire préalablement refroidi à une

température spécifique, et soumis à une force constante appliquée à une température donnée au centre de l'échantillon. Le module de déflexion $S(t, T)$, qui dépend de la température T et du temps t peut être calculé en utilisant comme données: la force appliquée, les dimensions de l'éprouvette, et la déformation. Par la suite le module de rigidité peut être calculé après 60 secondes de chargement pour chaque température. Aussi dans la courbe obtenue, la variation logarithmique de ce module en fonction du temps de chargement est calculé à 60 secondes et représentée par la pente $m(60s)$ [69] (figure 2. 19), les essais BBR sont réalisés à deux moments: avant et après que le bitume ait subi le processus de vieillissement sous pression (PAV) dans une bombe de vieillissement (chambre scellée sous pression avec les conditions reproduisant les effets de vieillissement naturel).

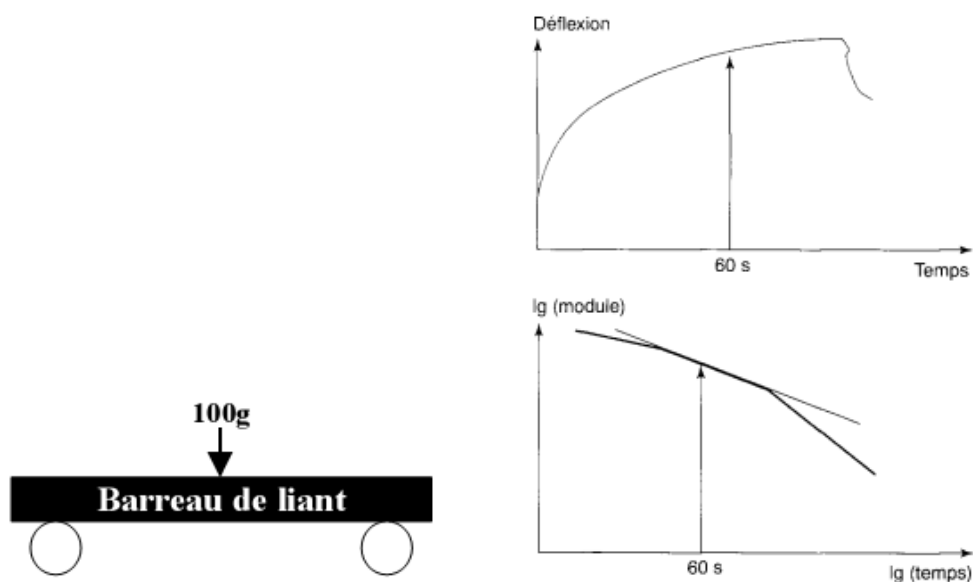


Figure 2. 19 Schématisation du principe de test BBR [69]

d. Essai de module complexe

Le module de rigidité des bitumes est identique à celui de la catégorie viscoélastique, et est sensiblement influencé par la durée du chargement et par la température à laquelle il est soumis. La courbe dans la figure 2. 20 illustre l'équivalence entre le temps et la température, qui est une propriété fondamentale de tous les matériaux viscoélastiques [42]. Le principe de cet essai consiste à appliquer une contrainte sinusoïdale sur un échantillon de bitume, puis mesurer la déformation qu'il va subir comme réponse. Le rapport entre l'effort et la réponse du bitume est défini et représenté sous forme d'un module complexe.

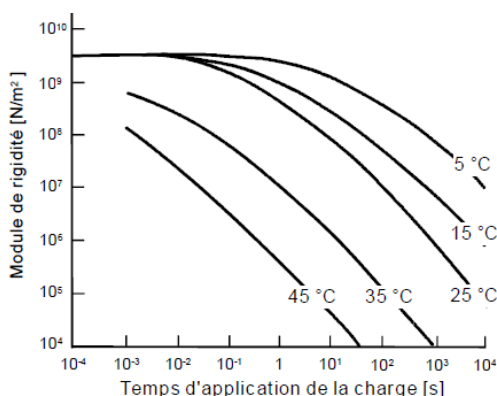


Figure 2. 20. L'influence du chargement et du temps sur le module complexe [42]

Depuis 1954 et d'après C. Van der Poel, les bitumes se distinguent en tant que matériaux qui ne relèvent ni du modèle idéale de solide élastique de Hooke, ni de celui de liquide visqueux newtonien, puisque leurs propriétés dépendent principalement de la température à laquelle ils sont soumis et du temps de chargement (voir tableau 2. 8):

Tableau 2. 8 Variation de module de rigidité en fonction des paramètres

Température	Effort appliqué	Module de rigidité	Comportement
Basse	Faible	Constant	Elastique
Élevées	Élevé	Diminue	Visqueux

2. 6. Enrobés bitumineux

2. 6. 1. Définition de l'enrobé:

Divers types de matériaux granulaires, tels que les sables, les graviers, et les cailloux, sont liés ensemble par le bitume pour donner la composition de l'enrobé, qui forme la couche supérieure d'une chaussée routière. Le mélange bitumineux combiné soigneusement, contient généralement une proportion de 5 à 7% en poids de bitume, le reste étant constitué de granulats, le liant hydrocarboné est principalement responsable de l'adhérence des composants. L'obtention d'un mélange optimale des granulats, du liant, et des vides, est l'objectif principal de cette formulation, pour aboutir aux performances spécifiques recherchées [70], la figure 2. 21 représente un exemple d'un squelette d'enrobé bitumineux, où le bitume est en noir, et les granulats sont en gris.

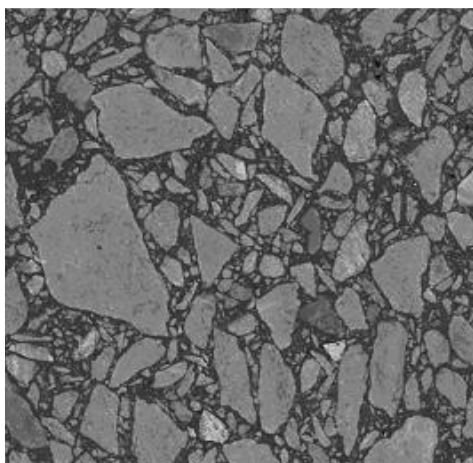


Figure 2. 21: Squelette d'un enrobé bitumineux

2. 6. 2. Teneur en liant

La viscoélasticité des enrobés bitumineux est intrinsèquement transmise par les liants bitumineux. Il en est donc essentiel de définir une quantité optimale de liant pour garantir la cohésion du mélange, assurer une couverture adéquate de chaque grain du mélange par une fine pellicule de bitume, et éviter l'orniérage et le fluage excessif à des températures élevées et en cas de surdosage en bitume. Pour quantifier le liant optimal à mélanger avec les granulats, on utilise le concept de surface spécifique des granulats noté (Σ) et exprimé en m^2/kg , par la formule ci-dessus (2. 2) et pour une distribution granulométrique donnée [71]:

$$100 \Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f \quad (2. 2)$$

Avec:

G: pourcentage de grains ($\phi > 6.3mm$)

S: pourcentage de grains (ϕ entre 6.3 et 0.315mm)

s: pourcentage de grains (ϕ entre 0.315 et 0.3 mm)

f: pourcentage de filler ($\phi < 0.08$ mm)

La proportion de filler est la composante la plus importante d'après cette formule, par conséquent dans la quantité de liant nécessaire. Une formule plus simple est adaptée dans certaines situations:

$$\Sigma = 2.5 + 1.3f \quad (2. 3)$$

La surface spécifique des granulats influence la teneur en liant nécessaire pour l'enrobé.

Cette teneur est donnée par la formule expérimentale ci-dessus:

$$P = \alpha k \sqrt[5]{\Sigma} \quad (2. 4)$$

Avec:

P: teneur en liant (%)

α : fraction dépendant du type de granulats (2.65/masse volumique des granulats)

Σ : surface spécifique des granulats (m²/kg)

k: module de richesse (k varie de 2.75 pour les enrobés donnant le maximum de résistance à la déformation, à 3.95 pour ceux qui sont souples)

D'une manière générale, le pourcentage de liant à utiliser, peut être déterminé grâce à une analyse expérimentale prenant en compte divers facteurs comme, l'épaisseur de la couche de roulement, le trafic, les densités requises sur le chantier ainsi que l'utilisation prévue de la route. Particulièrement, il est nécessaire de réduire le pourcentage en liant, pour un trafic de poids lourd important, dépassant les 200 poids lourd/jours [70]. Au fil du temps, et sur la surface de roulement, des ornières apparaissent, conduisant à une reconstruction complète de la route (environs tous les dix ans, avec une limite de 7km/jour) ou à une réhabilitation [72].

2. 6. 3. Fabrication industrielle des enrobés bitumineux:

Ces matériaux se fabriquent dans les centrales d'enrobage, où le liant à l'état d'un fluide visqueux, est mélangé avec les granulats, à des températures d'environ (160-180) °C, se qui facilite l'adhérence des granulats lors du mélange [72]. Ces centrales d'enrobage se différencient par leur mobilité : les centrales fixes sont conçues pour approvisionner les chantiers en béton bitumineux dans les zones délimitées et proches, en revanche, les centrales d'enrobage mobiles sont installées le plus près possible du chantier afin de réduire le transport des enrobés bitumineux. La figure 2. 22 illustre ces deux types de centrales mentionnés précédemment (mobile à droite et fixe à gauche).



Figure. 2. 22 Exemple de centrales d'enrobage fixe et mobile.

2. 6. 4. Qualité des enrobés fabriqués industriellement:

L'enrobé bitumineux fabriqué dans une centrale d'enrobage est évalué en fonction de la constance de sa composition, comprenant le liant et les granulats. La constance dépend à la fois de la régularité des matériaux granulaires utilisés, et de la précision des équipements industriels utilisés pour doser les composants (selon la norme XP P98 142-1 2003). Il est essentiel que la répartition en masse des dimensions des granulats qui forment la structure granulaire, et la proportion de liant dans l'enrobé produit correspond exactement au mélange établi lors des tests de formulation expérimentale, avec une vérification systématique des caractéristiques au cours de la production industrielle [73].

2. 6. 5. Méthodes et essais de formulation de l'enrobé :

- Méthode de formulation basée sur les essais traditionnels: Elle se concentre principalement sur le comportement mécanique des enrobés bitumineux, comme la rupture d'un échantillon dans la phase plastique, où les conditions de charge, de température, et d'humidité sont standards. À cet effet la composition doit être adéquate au critère de résistance, et les tests les plus couramment employés sont les tests Marshall et Duriez. Le schéma présenté dans la figure 2. 23 synthétise les divers phases de la formulation d'enrobé bitumineux, conformément à la procédure suivie dans les laboratoires en Algérie.

L'objectif est d'identifier les propriétés intrinsèques qui définissent le comportement de l'enrobé bitumeux. En 2004, une distinction a été faite sur ces tests et elle est basés sur quatre caractéristiques des enrobés bitumineux évaluées à différentes échéances [74]

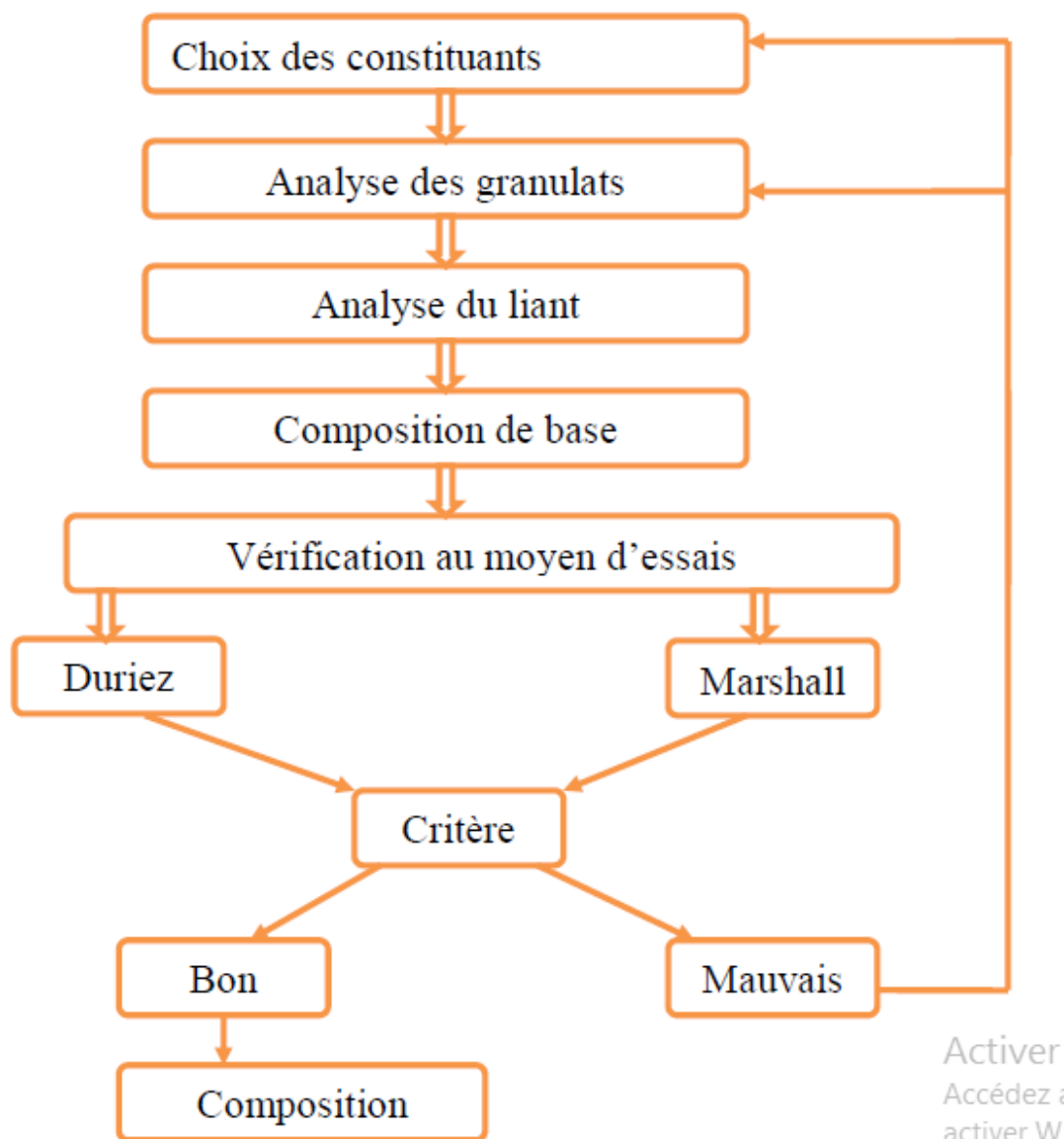


Figure 2. 23 Cheminement d'obtention des bétons bitumineux [68]

2. 6. 6. Détermination des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux

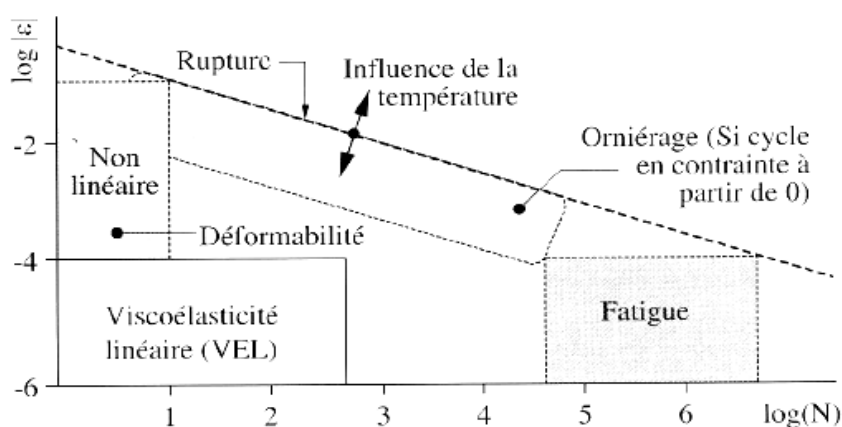
2. 6. 6. 1. Comportement mécanique des enrobés bitumineux

L'enrobé bitumineux réagit mécaniquement sous l'influence de divers facteurs. A cet effet, plusieurs types de comportements sont observés comme le suggère l'étude de Di Benedetto et De la Roche en 1998. Le tableau 2. 9, et la figure 2. 24 illustrent cette suggestion et les paramètres dépendants.

Tableau 2. 9 Types de comportement bitumineux selon De la Roche et Di Benedetto [75]

Type de Comportement	Niveau de déformation (ϵ)	Nombre de Cycles de sollicitation (N)	Caractéristiques
Comportement non linéaire	Fortes amplitudes (quelques %)	Faible (peu de cycles)	-Fortement non-linéaire, -Tendance à la rupture rapide
Comportement viscoélastique linéaire (VEL)	Faible amplitudes ($<10^{-4}$)	Restreint (quelques cycles à quelques centaines)	Le comportement dépend des conditions d'essai et de l'enrobé
Endommagement par "fatigue"	Faibles amplitudes	Elevé (des dizaines de milliers)	-Endommagement progressif -Dégradation des caractéristiques mécaniques jusqu'à la rupture

Un comportement de l'enrobé bitumineux non linéaire à faibles sollicitations, engendre une rupture rapide après une forte déformation, par contre le comportement linéaire viscoélastique offre une bonne résistance à l'enrobé dont les caractéristiques dépendent des conditions de l'essai. À des sollicitations élevées, et faibles amplitudes, l'enrobé s'endommage par fatigue [75].

**Figure 2. 24. Divers comportements de l'enrobé bitumineux (Corté et Di Benedetto 2005) [76]**

2. 6. 7. Classification des essais mécaniques sur les enrobés:

Les principales classifications utilisées pour les essais concernant les enrobés bitumineux sont celles de Di Benedetto et celle de Bonnot.

- **La classification de Bonnot :** Les essais d'identification des performances mécaniques des enrobés bitumineux selon Bonnot de 1973 jusqu'à 1984, sont regroupés en trois catégories distinctes comme le montre le tableau 2.10.

Tableau 2. 10. Classification de Bonnot

Type d'essais	Sollicitations	Description	Objectif
Empiriques	Différentes de celles sur chantier	-Ils ne fournissent pas de données intrinsèques sur le matériau. -La conclusion est basée sur la répétition et la comparaison de plusieurs cas.	Évaluation en place de la réaction du matériau
Simulation	Très proches de celles sur chantier	- La simulation ne permet pas d'obtenir la reproduction précise des conditions aux limites.	Simulation de propriétés d'usage spécifiques de l'ouvrage
Détermination	Simple et bien définies	-Isolation des propriétés intrinsèques du matériau. - l'emploi de la loi de comportement après le calcul de la structure.	Détermination des propriétés intrinsèques des matériaux en vue de les appliquer à la construction de l'ouvrage

- **Classification de Di Benedetto:** Cette classification consiste à diviser les essais mécaniques selon l'état de contrainte et de déformation en deux principales classes: homogène et non homogène.

- **Essai homogène:** permet d'obtenir la loi de comportement du matériau, sans nécessiter d'hypothèses supplémentaires, en garantissant que l'état de contrainte et de déformation reste uniforme dans toutes les zones de l'échantillon testé.

- **Essai non homogène:** est un essai pour lequel l'interprétation repose sur une approche empirique, et les propriétés de l'ouvrage sont établies en employant des lois de similitude généralement sous forme de modèles réduits.

2. 6. 8. Essais homogènes des enrobés

Les laboratoires algériens effectuent principalement trois types d'essais non homogènes pour la formulation des enrobés bitumineux, à savoir:

- essai Duriez (EN 12694- 12)
- essai Marshall (EN 12694- 34)
- essai PGC (EN 12694- 34)

2. 6. 8. 1. Essai DURIEZ:

L'objectif de l'essai Duriez est de quantifier la résistance à l'eau d'un mélange bitumineux en comparant les résistances à la compression des échantillons immergés et non immergés, à une température et un compactage spécifiques. Cet essai consiste aussi à calculer les vides en pourcentage dans l'enrobé bitumineux, sous un compactage particulier, et également à évaluer sa sensibilité aux variations de températures [76,77].

Le mode de l'essai Duriez se fait en utilisant des échantillons cylindriques qui sont comprimés à une vitesse de 1mm/seconde et une température de 18°C (voir figure 2. 25). La densité apparente est mesurée sur plusieurs échantillons afin de déterminer le pourcentage des vides. La résistance à la compression de l'enrobé bitumineux fabriqué à chaud est mesurée par la charge maximale qui provoque l'écrasement, l'évaluation de cette résistance sera après une période de 8 jours, avec une moitié des échantillons conservée au sec et l'autre moitié immergée dans l'eau. La valeur du rapport entre la résistance de l'échantillon immergé et la résistance de l'échantillon sec indique la résistance du mélange bitumineux à l'eau [77].



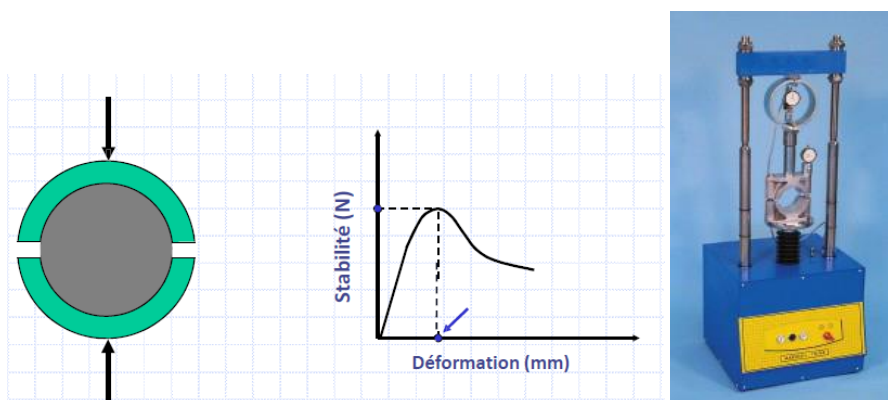
Figure. 2. 25 Schéma de principe et appareillage de la presse Duriez avec éprouvette

2. 6. 8. 2. Essai Marshall

Cet essai offre la possibilité de comparer différentes formulations de mélanges hydrocarbonés et d'évaluer leur comportement à divers niveaux de compactage, de plus, il permet de prédire si un mélange hydrocarboné sera stable par la suite ou tendra à s'affaisser sous l'impact du trafic routier [72]. Cet essai s'effectue sur tous les enrobés chauds qui ne contiennent pas de granulats dont les dimensions dépassent 20 mm, il est réalisé sur des échantillons cylindriques comme illustré dans la figure 2. 26. Les étapes et les caractéristiques identifiées par ce test sont présentées dans le tableau 2. 11.

Tableau 2. 11 Essai Marshall: étapes et caractéristiques

Caractéristique	Description
Stabilité Marshall	Évaluer la résistance maximale à la rupture, la vitesse est constante à 60°C.
Fluage Marshall	Rétrécissement de (1/100) de diamètre de l'échantillon à l'écrasement.
Compacité Marshall	Identifier à l'aide de pourcentage des vides.
Méthode d'essai	1. Échantillons compactés. 2. Immersion dans l'eau de (30-40) minutes, à 60°C. 3. Compression à vitesse constante de 51 mm/min en compression diamétrale restreinte à l'aide de mémoire hémicycles.

**Figure 2. 26 Principe et appareillage de l'essai Marshall**

2. 6. 8. 3. Test à la presse PCG

Cet essai est aussi nommé le comportement de compatibilité par rapport à son objectif, qui vise à établir la courbe de variation de la compacité (pourcentage des vides) en fonction du nombre de rotations de la presse giratoire. L'essai PCG consiste à compacter l'enrobé en utilisant un cylindre en rotation sur son axe avec une température constante, pour simuler l'action de compactage des rouleaux pneumatiques sur le chantier [78].

Le compactage est réalisé en combinant un mouvement de cisaillement rotatif avec l'application d'une force axiale résultante à l'aide d'une tête mécanique conformément à la norme NF P98-252. Par la mesure de la hauteur h de l'échantillon à chaque rotation (voir figure 2. 27); la compacité de l'enrobé est facilement calculée, et elle est représentée graphiquement en fonction de la contrainte de compactage [79].

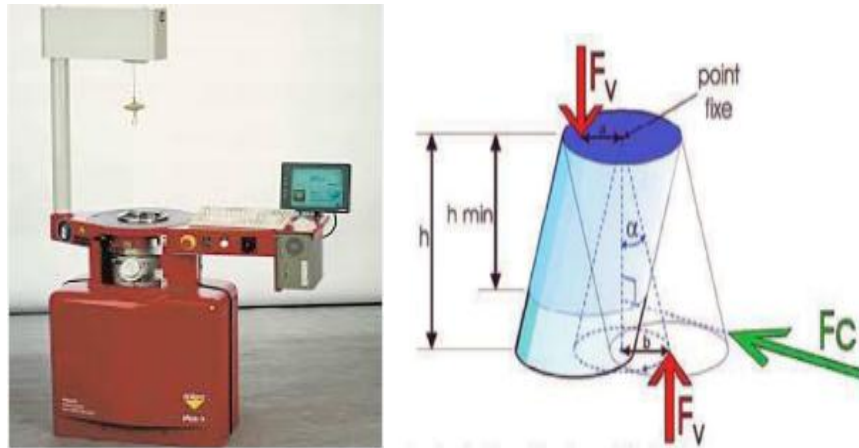


Figure 2. 27 Principe et appareillage de l'essai PCG [80]

2. 6. 9. Essais non homogènes sur les enrobés:

2. 6. 9. 1. Essai de fatigue (NFP 98-261-1)

L'idée de la réalisation de l'essai de fatigue est survenue suite à la fatigue causée par la répétition des charges des véhicules lourds sur les routes. Une partie de la conception des routes est déterminée en fonction des caractéristiques analysées au laboratoire grâce à un essai standardisé [81]. Cet essai vise à déterminer la durée de vie d'un revêtement bitumineux après un nombre de rotation jusqu'à l'écrasement, et la contrainte de déformation maximale que le revêtement peut supporter avant de subir des dommages dus aux sollicitations répétées.

L'essai de fatigue se déroule à une température constante, où une éprouvette trapézoïdale est fixée à une base. Des déplacements alternatifs sinusoïdaux d'amplitude constante sont appliqués à l'extrémité libre de l'éprouvette, et chaque force enregistrée correspond à un déplacement. Dans une fréquence de 25Hz et une température constante de 10°C, la fatigue de l'échantillon, est définie par déformation ou contrainte constantes (figure 2. 28).

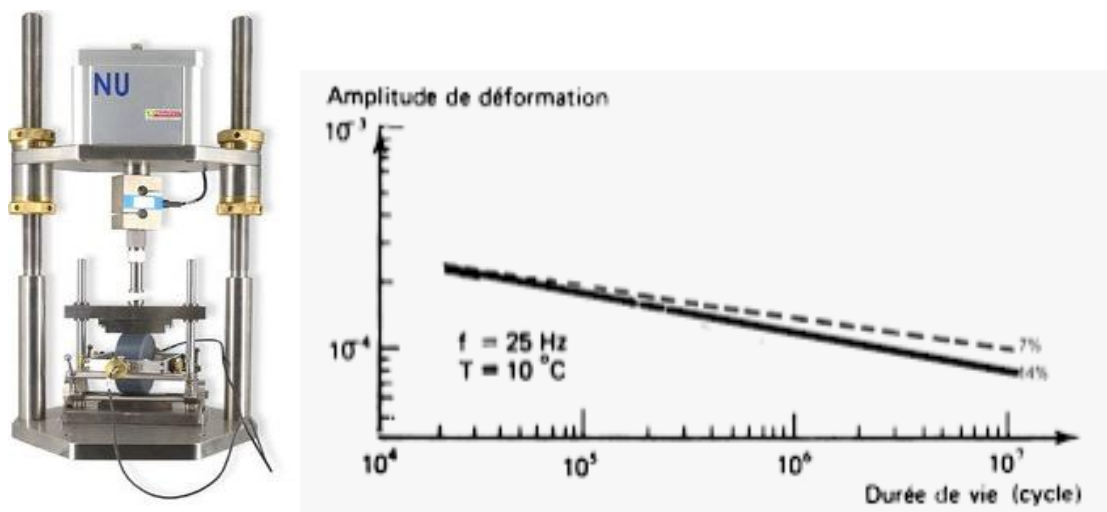


Figure 2. 28 Principe de l'essai de fatigue

2. 6. 9. 2. Essai à l'orniéreur:

L'essai à l'orniéreur vise à évaluer la capacité des matériaux hydrocarbonés à résister à l'orniérage causé par le passage fréquent de poids lourds. Cette résistance est examinée en termes de déformations liées à l'orniérage-fluage [81]. Les caractéristiques observées lors de cette simulation au laboratoire, ne sont pas toujours identiques à celles en conditions réelles sur chantier. Le but de l'essai est de mesurer la profondeur des ornières, c'est à dire l'épaisseur réduite créée par l'effet de trafic sur la surface de revêtement, que ce soit à une température de 50°C correspondant aux couches de base, ou 60°C correspondant aux couches de surface [82].



Figure 2. 29 Orniéreur de type LPC

La forme de l'échantillon test est un parallélépipède de dimensions: $L=500$ mm, $l = 180$ mm, et $h = 100$ ou 50 mm, qui peut être soit prélevé sur la chaussée, soit confectionnée en

laboratoire. Il est positionné dans un moule et soumis à des conditions isothermes, de manière à ce que sa surface supérieure affleure le haut du moule. Une charge verticale constante est maintenue grâce à un dispositif approprié, tandis qu'un pneumatique, gonflé à 0.6 MPa, exerce une charge constante de 5KN. Ce pneumatique effectue un mouvement sinusoïdal à une distance de 410 mm. Au cours de l'essai, on mesure à plusieurs reprises le critère de la profondeur de l'ornièrre sur cinq sections différentes, permettant ainsi de générer une courbe qui illustre en fonction de nombre de cycles, la progression de ce critère.

2. 6. 9. 3. Essai de fluage dynamique:

C'est un essai réalisé sur des éprouvettes cylindriques, conçues en laboratoire ou carottées sur le terrain. Il offre une méthode de détermination de la formulation optimale de l'enrobé [69]. Cela se fait en examinant l'orniérage de la chaussée, tout en permettant d'analyser une loi de comportement de fluage d'un matériau bitumineux dans la dynamique, ce qui permet aussi de prédire comment cet enrobé va se comporter après la mise en œuvre de la chaussée [70].

Cette étude est réalisée en soumettant l'enrobé bitumineux à des compressions axiales de type sinusoïdal de certaines fréquences et amplitudes, qui s'ajoutent à une contrainte constante isotrope de pression prédéfinie.

2. 6. 9. 4. Essai de module (MAER):

Il s'agit pour cet essai de définir la durée de vie de la chaussée en terme de fatigue en évaluant le module de rigidité en traction directe de l'enrobé bitumineux. Pour ce faire, on prend un échantillon de l'enrobé bitumineux dans une éprouvette cylindrique et on l'expose à une contrainte de traction $\mathcal{E}(t)$, avec variation des paramètres: les différents niveaux de déformation, le temps de chargement, et la température (-10 à + 30°C). On considère un temps de chargement de 0.02 s équivalent au passage d'un poids lourd roulant à une vitesse de 60 Km/h, ce qui implique que les modules de rigidité sont calculés à des intervalles de temps de charge variant de 0.02 à 300 s. Ces essais visent à évaluer la capacité de l'enrobé bitumineux à résister à la fatigue, c.-à-d. l'estimation de la durée de vie de la chaussée routière [69]. Pour évaluer la résistance de l'enrobé à l'alternation traction - compression, l'éprouvette est soumise à cette alternation, dont les valeurs augmentent jusqu'à 10 Hz (voir figure 2. 30) [42]

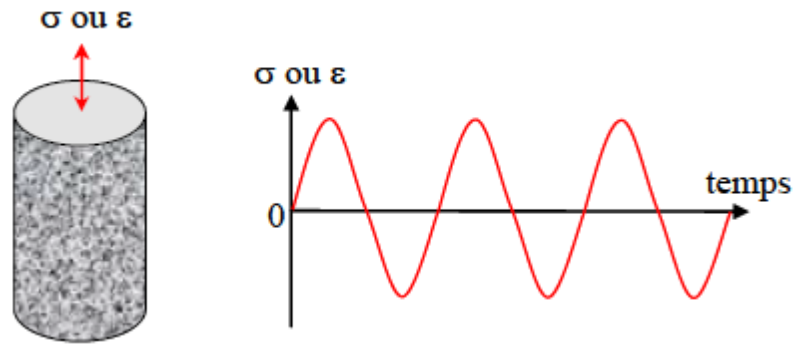


Figure 2. 30. L'éprouvette sous l'effort sinusoïdal [42]

2. 6. 9. 5. Essai de module complexe (E^*)

Cet essai vise à évaluer la réaction des matériaux bitumineux sous l'effet de la température et la fréquence, dans la phase viscoélastique. Pour ce faire, nous utilisons une éprouvette ayant une forme trapézoïdale de dimensions (250, 56, et 25 mm), fixée à une extrémité et libre à l'autre, sur laquelle, une très faible déformation est appliquée pour produire une flexion similaire à celle induite par le trafic. Le module est calculé dans une plage étendue de températures à partir de la force résultante, et pour différentes fréquences (voir figure 2. 31). Le module complexe permet à établir des relations avec les propriétés de résistance à la fatigue, aux fissures thermiques, et à l'orniérage des enrobés bitumineux pour pouvoir bien élaborer, le processus de conception des chaussées [42]. Dans certains ouvrages, ce paramètre est mentionné par (G^*), et il est mesuré en Pa ou MPa.



Figure 2. 31. Appareillage pour déterminer le module complexe

La viscoélasticité des enrobés bitumineux dépend de la vitesse à laquelle les sollicitations sont appliquées et de la température. Elle est généralement évaluée au moyen d'essais de sollicitation cyclique sinusoïdale. Au cours de ces essais, des échantillons sont soumis à des compressions répétées sous une charge sinusoïdale caractérisée par une fréquence f et une pulsation ω [83], tel que: $\omega = 2\pi f$ (2. 5)

$$E^* = E' + i E'' \quad (2. 6)$$

$$\text{et } |E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \quad (2. 7)$$

$$\text{La compression imposée: } \sigma(t, \omega) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (2. 8)$$

$$\text{La réponse de l'enrobé: } \epsilon(t, \omega) = \epsilon_0 \sin(\omega t - \delta) \quad (2. 9)$$

Avec: E' : le module d'élasticité nommé (partie réelle)

E'' : le module de plasticité nommé (partie imaginaire)

i : la partie imaginaire tel que $i^2 = -1$

δ : l'angle de l'étape viscoélastique de l'enrobé bitumineux

2. 7. Transport de bitume:

Le bitume se transporte sur le territoire national par des camions citernes, ou remorques citernes, dont des conditions spécifiques de transport sont exigés:

- Adaptation: la citerne doit être destinée aux produits bitumineux, d'une résistance à la chaleur et étanchéité considérable.
- Arrimage: une fixation solide de la citerne, qui doit être arrimée au véhicule, pour éviter tout mouvement.
- Chargement: ne pas dépasser le poids total autorisé de véhicule, et respecter l'espace de dilatation du produit.
- Température: maintenir la température du bitume entre 180 °C et 190°C, par un système d'isolation et de chauffage de la citerne, afin de le garder à l'état fluide.

- Conduite: souple, sans coups de freins brusques pouvant déstabiliser la fixation de la citerne, et respecte la limitation de vitesse.

Le bitume est aussi transporté par des navires et traverse tous les océans. En 2008, une quantité de 1.100.000 tonnes de bitume a été transportée dans 270 navires, soumis à des températures conditionnées de 160°C à 200°C [84].

2. 8. Conclusion

Le contenu de ce chapitre présente de manière concise les concepts fondamentaux liés aux bitumes et aux enrobés bitumineux. L'objectif étant de fournir une compréhension préliminaire des phénomènes et du comportement de ces matériaux, à partir d'essais spécifiques disponibles : essais homogènes pour évaluer le comportement rhéologique du bitume, et essais mécaniques pour analyser le comportement de l'enrobé bitumineux. Les conditions de chaque essai cité dans ce chapitre fournissent une idée sur les performances des matériaux bitumineux attendues après l'application de différentes charges simulant des charges dues au trafic routier. Cette base de connaissances est essentielle pour passer à l'étude des caractéristiques du bitume et de l'enrobé bitumineux, à l'étude des modifications des leurs propriétés après recyclage. Les additifs servant à cette modification, doivent être soigneusement choisis selon de nombreux critères, tout en mettant l'accent sur la protection de l'environnement.

CHAPITRE 3
LES POLYMERES ET IMPACT DU
RECYCLAGE SUR
L'ENVIRONNEMENT

3. 1. Introduction

L'augmentation du trafic routier exige l'augmentation de la capacité de la charge portante de la route [85], d'où la nécessité de la conception des revêtements routiers durables [2]. La durée de vie d'un revêtement routier a un effet positif direct sur le plan économique [1], et un effet néfaste sur le plan écologique et environnemental par les émissions des gaz des postes d'enrobage. A cet effet, la durabilité des matériaux de chaussée prend une part croissante dans la politique de la construction et l'entretien des réseaux routiers [86]. Ces données ont fait appel à l'introduction des nouvelles techniques et matériaux de modification des caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux [66]. Le recyclage est l'une des techniques employées dans ce contexte par rapport à son importance dans la valorisation des matériaux et leurs réutilisations dans l'enrobé bitumineux.

Ce chapitre illustre la modification des caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux, le recyclage et l'utilisation des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux, et leur son impact sur l'environnement.

3. 2. Insuffisances des mélanges bitumineux

Une relation directe est observée entre le choix du bitume et l'objectif de son utilisation vis à vis des conditions bien déterminées à savoir les résistances mécaniques, la charge de trafic et les conditions climatiques [82].

Le risque d'orniérage des chaussées bitumineuses est accru par l'augmentation du trafic de poids lourds, la pression des pneumatiques, et l'augmentation de la charge. Les bitumes purs ont certaines limites d'utilisation conditionnées [87]:

- Le bitume pur ne parvient plus à garantir une résistance suffisante à l'orniérage pour les enrobés traditionnels (une granulométrie continue, semi-grenue ou grenue d'un béton bitumineux 0/10 ou 0/14) dans des conditions de trafic très intense, associées à des températures élevées sur une longue durée.
- les enduits superficiels formulés avec du bitume pur ne préservent pas leur durabilité lorsqu'ils sont formulés sans bitume pur et soumis à un trafic intense et lourd, vis à vis des propriétés mécaniques et à l'adhésivité.

➤ Certains enrobés bitumineux de granulométrie ouverte pourraient ne pas atteindre la résistance mécanique voulue en raison de la cohésion et de l'adhérence offerte par l'utilisation du bitume pur, et ils pourraient également avoir une durabilité insuffisante en raison de la faible teneur en liant.

La modification des bitumes est donc nécessaire et a pour objectifs :

Plusieurs points sont visés derrière l'incorporation des additifs, en premier lieu c'est d'éviter les écoulements excessifs et les déformations permanentes, et que le bitume ne soit pas fragile à très faible température, et éviter les fissures ainsi que les détachements des granulats.

Les buts recherchés peuvent également être variés en fonction des techniques envisagées et domaines d'application [88]. Le tableau 3. 1 montre la relation entre le type de revêtement et les objectifs attendus:

Tableau 3. 1 Relation entre le type de revêtement et les objectifs attendus [66].

Type de revêtement	Objectifs
Enduits superficiels	-Amélioration de la résistance sous les sollicitations de traction et de cisaillement. -Assurer la durabilité. -Améliorer l'adhésivité -Améliorer la tenue à l'eau. -Éviter le ressuage.
Enrobés ouverts	- Améliorer les propriétés antidérapantes. -Augmenter la viscosité aux températures d'application.
Enrobé à chaud épais (>5cm), Enrobé 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.

Par conséquent, l'objectif de la modification des bitumes vise à créer un bitume "idéal" qui doit répondre aux critères suivants [89]:

- Préservation des propriétés de cohésion et d'adhérence des liants traditionnels.
- Faible susceptibilité thermique sur l'ensemble de la plage de températures de service.
- Faible sensibilité aux contraintes à long terme.
- Grande résistance au vieillissement lors de la mise en service du revêtement.
- Amélioration de la résistance à la fissuration à basse température.

- Réduction des déformations permanentes à températures élevées.
- Meilleur comportement des enrobés en service sous des charges lourdes répétées.

3. 4. Base de la modification

La modification d'un liant bitumineux est basée sur l'amélioration des spécifications à l'aide des essais rhéologiques. Elle a eu lieu la première fois aux États-Unis [90], et par la suite ces spécifications sont adaptées en Europe [91], puis en Afrique. Le comportement d'un enrobé bitumineux dépend directement du comportement rhéologique et mécanique du liant utilisé. A cet effet, l'étude de la modification des enrobés est à l'origine de l'étude du comportement d'un matériau viscoélastique sous sollicitations mécaniques et température variable [92].

3. 5. Mécanisme de modification

Afin d'assurer l'efficacité d'un polymère, il est essentiel d'avoir une compatibilité avec la matrice bitumineuse, le rôle de ce polymère est de renforcer la résistance du bitume; à des basses températures en évitant de le rendre dur, et à des températures élevées tout en évitant aussi sa viscosité. Dans ce cas le bitume doit être capable de se mélanger de manière appropriée dans des équipements conventionnels, et ces conditions doivent toujours être satisfaites [87].

La modification des liants bitumineux consiste à l'incorporation d'un composant dans le bitume de base. Ce composant va provoquer des modifications dans les propriétés mécaniques et physiques, et cela par la modification de la structure chimique du liant. Ce principe peut expliquer l'amélioration des caractéristiques des bitumes en incorporant des polymères, qui vont absorber les huiles existantes dans le bitume. Ces polymères sont considérés comme modificateurs de bitume, s'ils ont une faible capacité d'absorption, et sont solubles dans les faibles masses moléculaires des fractions hydrocarbonées du liant, passant par deux étapes de transformation qui sont représentées dans le tableau 3. 2 [93],

Tableau 3. 2 Phases de transformation bitume -polymère.

Étape	Caractéristiques
Gonflement	Les huiles gonflent le polymère après l'absorption
Stabilité finale	Bitume plus riche en asphaltées et en résine que le bitume initiale

3. 5. 1. Le gonflement: Appelée aussi phase mobile, où la fraction maltène (huiles) du bitume se diffuse en particules dans le polymère, se qui engendre son gonflement influencé par divers facteurs [94, 95, 97]:


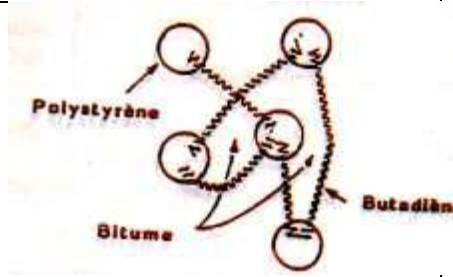
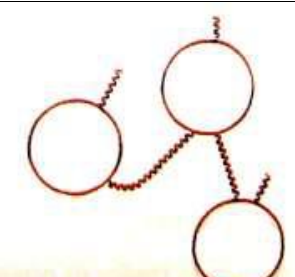
- la morphologie et la taille des particules de caoutchouc
- la méthode de production du caoutchouc
- la source du matériau de caoutchouc

Une relation inversement proportionnelle entre le taux de pénétration de la fraction maltène dans les particules de caoutchouc et la taille de ces particules. Les petites particules prennent moins de temps pour se gonfler que les grosses particules [97].

3. 5. 2. La stabilisation: Appelée aussi phase immobile, qui commence à la fin du gonflement, et où la dispersion des polymères dans la matrice bitumineuse est finalisée. Cette phase est influencée par [76]:

- La température du malaxage: une influence directe sur la vitesse des particules de bitume dans le polymère et précise le moment de cisaillement.
- La dimension de la particule de polymère: grande particule, espace de contact réduit, faible vitesse d'écoulement.
- Le cisaillement: le phénomène de gonflement facilite la mobilité des particules, ce qui engendre un cisaillement influencé par la température. La durée de malaxage optimale est atteinte, si les caractéristiques désirées du bitume-polymère sont atteintes [93]. Toutes ces étapes sont représentées dans le tableau 3. 3

Tableau 3. 3. Mécanisme de dispersion de copolymère dans le bitume (cas de polystyrène) [98].

Étape	1- bitume et polymère	2- La syntonisation	3 et 4 - Le gonflement
État			

3. 6. Principaux agents utilisés dans la modification des bitumes

La modification de la structure chimique du bitume ainsi que ses propriétés physiques et chimiques dépend de la nature du modificateur employé, dont les propriétés doivent répondre à des exigences spécifiques. Les polymères sont considérés comme des agents modificateurs largement utilisés dans la modification des bitumes, ainsi que les fibres qui dérivent de ces polymères.

3. 6. 1. Historique d'utilisation des polymères dans la modification des bitumes

Au début de XIXe siècle, Wilhelm Eduard Weber et Braconnot ont évoqué la notion de macromolécule. Marcellin Berthelot était le premier qui a utilisé le terme "polymère" en 1866, mais le concept de macromoléculaire a été réellement introduit grâce aux travaux d'Hermann Staudinger entre 1920-1930. Après la deuxième guerre mondiale, ce concept a connu un développement accéléré aux Etats-Unis par le lancement d'un programme de recherche pour trouver des substituts synthétiques à cause de la crise économique. En 1950, Carothers et Flory ont lancé la base de la théorie des polymères, et la première modification du bitume par l'inclusion de caoutchouc de latex a été faite aux Etats-Unis en 1960.

3. 6. 2. Classification des polymères:

Ils sont classés selon différents critères [99] notamment:

3. 6. 2. 1. La nature des liaisons:


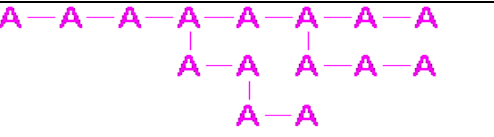
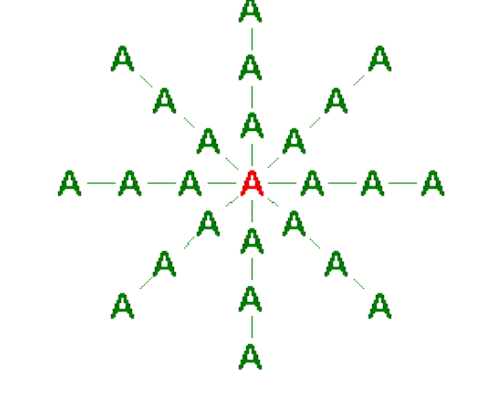
Les liaisons qui forment la structure fondamentale des molécules sont covalentes, comme elles peuvent être organiques, telles que l'acrylique, styrénique, ou vinylique,...

3. 6. 2. 2. L'élément répétitif:

Selon cette classification, deux types de polymères sont distingués; homopolymère et copolymère.

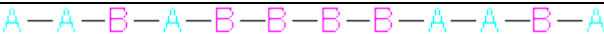


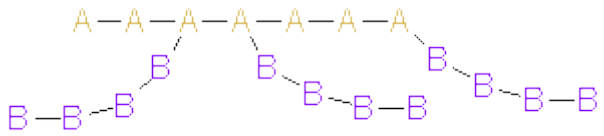
- **Les homopolymères:** ils sont constitués à la base d'un élément unique de répétition. Le polypropylène fait partie de cette catégorie et le tableau 3. 4, donne des exemples sur la forme, le schéma de liaison et le modèle correspondant [99].

Tableau 3. 4 Forme et modèles correspondant

Forme	Schéma de liaison	Modèle
Alignements		Polybutadiène
Branchements		Polypropylène
Flocons		Polystyrène

- **Les copolymères:** il s'agit de la combinaison de deux ou plusieurs monomères de compositions chimiques différentes. Sous le mode de copolymérisation, diverses catégories sont possibles pour ce type, ils sont illustrés dans le tableau 3. 5 .

Tableau 3. 5 Catégories et schémas de liaison [99]

Catégorie	Schéma de liaison
Aléatoire	A - A - B - A - A - B - B - B - B - A - B
Statistique	
Alternée	
Séquencée	
Gréffée	

3. 6. 2. 3. Leur cristallinité:

Selon le taux de cristallinité qui est illustré dans le tableau 3. 6, on distingue le type amorphe et le type partiellement cristallin. Les polymères cristallins se caractérisent par une plus grande dureté, une rigidité accrue, une opacité plus prononcée, une meilleure résistance aux solvants, et une densité supérieure par rapport à leurs équivalents amorphes.

Tableau 3. 6 La variation de la cristallinité

polymère	Pourcentage de la structure cristalline (%)
Polytétrafluoroéthylène (PTFE)	50-70
Polypropylène isotactique(PP)	40-60
Polyéthylènetéréphtalate(PET)	50
Polyéthylène basse densité (PEBD)	30-50
Polychlorure de PVC (atactique)	5

La figure 3. 1 illustre la structure chimique et la disposition des chaînes de polypropylène formant des structures ordonnées pendant le processus de cristallisation. L'atome rouge représente le carbone et l'atome gris l'hydrogène. (Polymère étudié).

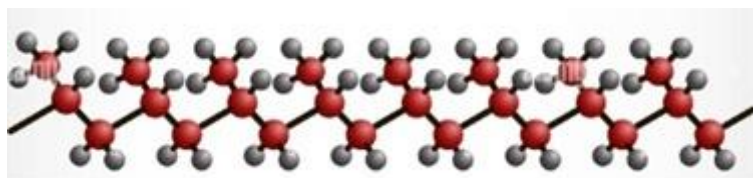


Figure 3. 1 Maille élémentaire de polypropylène (semi-cristallin) [99]

3. 6. 2. 4. Les caractéristiques mécaniques et thermiques:

Les polymères sont fréquemment regroupés en trois principales catégories en fonction de leurs caractéristiques thermomécaniques:

- Les thermoplastiques désignés par TP
- Les thermodurcissables désignés par TD
- Les réticulés désignés par "élastomères"

❖ Les thermoplastiques:

Le symbole utilisé pour cette catégorie est (TP). Ces polymères sont des substances dérivées des constitutifs organiques naturels, et qui deviennent liquides lorsqu'ils sont chauffés. Leurs matériaux sont qualifiés de "transformables à l'état fondu", c.-à-d. qu'ils peuvent être façonnés lorsqu'ils se trouvent dans un état liquide (fondu) ou visqueux.

❖ Les polymères thermodurcissables:

Par définition la température spécifique à leur composition chimique, ils subissent une réaction irréversible. Le symbole utilisé pour cette catégorie est (TD). Les molécules s'assemblent en une structure tridimensionnelle qui limite le mouvement thermique.

❖ Les Élastomères

Les deux premiers types peuvent subir un processus de réticulation pour se transformer en élastomères faibles ou forts. La figure 3. 2 présente un exemple de cette transformation:

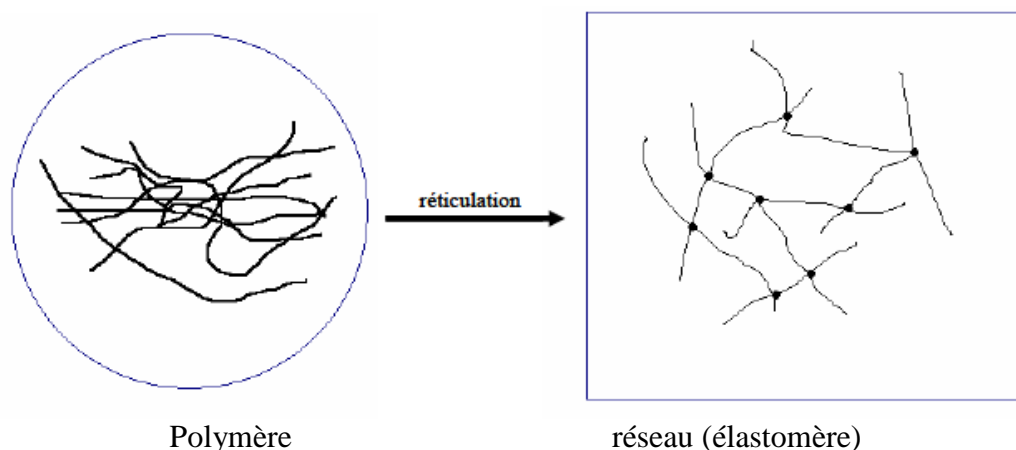


Figure 3. 2 Exemple de transformation [101]

3. 6. 3. Propriétés des polymères:

Plusieurs propriétés sont à citer, dont les plus importantes:

3. 6. 3. 1. Propriétés mécaniques:

Les propriétés mécaniques se rapportent à la manière dont les polymères réagissent aux contraintes mécaniques telles que la pression, l'étirement, la torsion, le frottement, les chocs et l'influence de la gravité. Certains polymères, tels que les polyesters aromatiques, sont appréciés pour leur capacité à maintenir des dimensions stables, tandis que d'autres, comme les élastomères, sont recherchés en raison de leur élasticité exceptionnelle, ce qui les rend capables d'absorber efficacement les chocs, ils sont ainsi utilisés dans des fabrications comme certains accessoires des voitures. La plasticité des polymères peut varier sur une large échelle, allant des polymères les plus rigides, durs et cassants, aux polymères plus souples (semblables à des pâtes) ou élastiques (comme les élastomères) [102].

3. 6. 3. 2. Propriétés thermiques:

Le cycle de ramollissement d'un polymère thermoplastique sous l'effet de la chaleur et de la solidification peut se refaire d'une manière illimitée. Cette plage de température, appelée "domaine de température", et permettant la mobilité des chaînes moléculaires pour

faciliter le moulage, est généralement située entre 100 et 250 °C. Deux phases de température sont distinguées [69]:

- **Température de fusion**

Le symbole utilisé est (T_f), elle correspond au seuil des polymères semi-cristallins, c.-à-d. à la désorganisation des régions cristallines, elle varie généralement de 125 à 325°C [103]. La figure 3. 3, présente la transition de phase d'un polymère en fonction de la température.

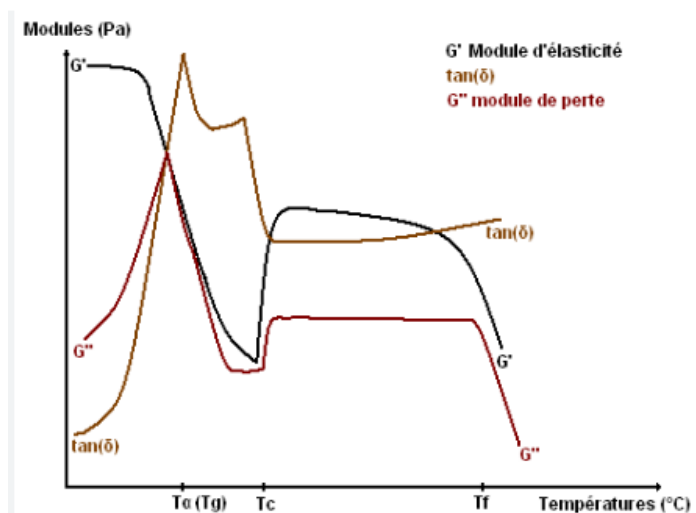


Figure 3. 3 Transition de phase d'un polymère (analyse par DSC) [102, 103]

- **Transition vitreuse**

L'augmentation de la température permet le passage des polymères de l'état solide à l'état fluide sans un point de transition net, et cette transformation s'accompagne invariablement d'une modification significative de leurs caractéristiques physiques, notamment de leurs propriétés mécaniques [103] (voir figure 3. 4)

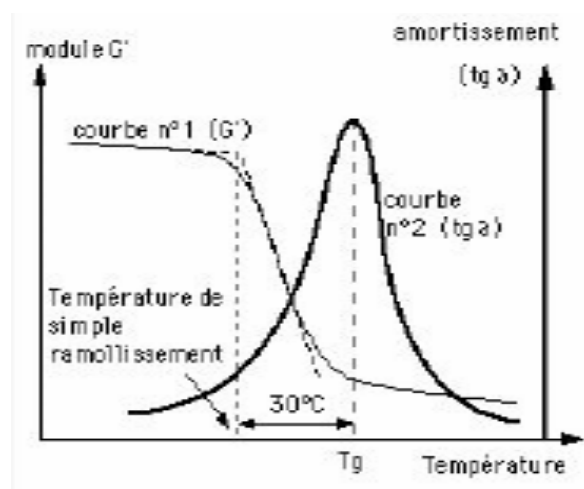


Figure 3. 4 Mesure de la température de transition T_g [69]

3. 6. 3. 3. Autres propriétés:

Les polymères ont d'autres propriétés qui sont aussi mises à profit dans des applications concrètes [102], quelques exemples en sont:

- **Propriétés de protection physique et chimique:** La résistance chimique face aux solvants, l'imperméabilité aux liquides et aux gaz, ainsi que la capacité à résister aux rayons UV sont autant de caractéristiques des polymères qui trouvent une utilité pratique.
- **Isolation électrique:** C'est une propriété importante dans le domaine électrique, qui induit à l'utilisation courante des polymères dans ce domaine.

3. 6. 5. Catégories des polymères destinés aux bitumes

Les polymères sont principalement destinés à l'industrie, et grâce à leurs propriétés importantes, sont couramment employés dans la production de liants bitumineux depuis plusieurs années, et ils restent aujourd'hui parmi les adjuvants bitumineux les plus utilisés dans le domaine des chaussées [103].

L'amélioration des performances mécaniques et rhéologiques du bitume est fiable par l'ajout des divers types d'additifs comme les polymères [104]. Il est important de noter que la structure chimique du bitume et celle des polymères en fonction de leurs densités, facilitent l'amélioration de certains aspects des propriétés du bitume telles que l'augmentation de la résistance à la fatigue et aux déformations permanentes, de la limite d'élasticité, et de flexibilité à basse température, et la réduction de la sensibilité thermique [105].

Dans ce contexte, Lewandowski (1994), a regroupé les polymères utilisés comme additifs dans les bitumes en deux catégories principales, à savoir:

- Elastomères
- Plastomères (le type utilisé dans notre étude expérimentale)

3. 6 .6. La fibre:

La fibre ou les fibres sont également employées pour renforcer les propriétés des enrobés bitumineux, où diverses recherches et essais sont réalisés à propos des mécanismes d'amélioration de ce matériau, et son influence sur les enrobés bitumineux s'il est employé comme améliorant principal [106]. Il a été prouvé que le poly-acrylonitrile, l'amiante, le

polyester, et la lignine sont utilisés aussi comme agent de couplage avec d'autres polymères améliorants pour faciliter et maintenir la compatibilité bitume-polymère, car les fibres donnent une compatibilité avec le bitume ajouté par la structure linéaire. Les résultats obtenus des essais réalisés de type FRAC (Fiber-Reinforced Asphalt Concrete), à l'enrobé bitumineux de classe élevée à température ambiante, indiquent qu'une amélioration significative d'une résistance au vieillissement est obtenue, à basse température, et l'enrobé bitumineux résiste mieux à la déformation ultime à la flexion, et à la traction indirecte. D'après Qinwn Xu et al. 2010, l'ajout de la fibre polymère à l'enrobé bitumineux d'un dosage de 0.35% améliore la résistance à la traction indirecte fractionnée et aussi la résistance à l'orniérage. Il a été montré que les mélanges bitumineux résistent mieux à l'humidité, par l'ajout de la fibre de verre d'un dosage de 0.2% et 0.6%, et leurs fissures diminuent à haute température [108].

3. 7. Notion de compatibilité

D'après S. Dekhli 2015, l'état de stabilité du mélange obtenu après fabrication, et le phénomène de dispersion du polymère utilisé dans le bitume, sont deux problèmes majeurs rencontrés pendant l'utilisation et la préparation d'un mélange bitume-polymère. Il est évident que différents types de traitement du pétrole brut donne des bitumes de compositions chimiques différentes [87]. Cela a également une grande influence sur la compatibilité bitume-polymère, ainsi que le procédé de fabrication utilisé lors du raffinage, sans négliger le type de polymère utilisé, donc la compatibilité ne peut pas être prédéfinie. Pourtant il a été prouvé que la théorie de cette notion et sa dépendance des deux facteurs; les asphaltées et les malmènes [109]. Lors du malaxage, le phénomène de gonflement ou la solubilité des polymères sont conditionnés par les composants et la structure du bitume [110].

La structure colloïdale des bitumes réagit très rapidement à chaque type d'ajout à chaud, à fin de le modifier chimiquement ou physiquement, que se soit positivement ou négativement par rapport aux propriétés du bitume [58].

Les tests de Lesueur Didier en 2002, sur les échantillons des enrobés bitumineux ont illustré que les polymères ont une incompatibilité dans les asphaltènes, par contre une bonne compatibilité est apparue dans les résines et les aromatiques [45]. Ces conditions sont illustrées dans le tableau 3. 7 ci-dessous

Tableau 3. 7 La compatibilité de bitume-polymère

Caractéristiques	Compatibilité bitume-polymère
Forte teneur en asphaltènes	Faible
Faible teneur en asphaltènes	Faible
L'aromaticité des maltènes dans la gamme optimale	Bonne

3. 8. Stabilité au stockage

Seuls les bitumes modifiés qui peuvent subir des problèmes d'instabilité pendant le stockage, qui reviennent principalement à la phase de modification et la compatibilité [111]. Le test de stabilité au stockage peut détecter ces problèmes et consiste aussi à évaluer l'homogénéité du bitume modifié. C'est pour cela que la stabilité au stockage joue un rôle important pour déterminer la durée et les conditions lors cette phase de stockage des bitumes modifiés, et même l'étape de transport. Cette phase se caractérise par l'arrachement de l'agent modificateur du polymère et la remontée de ce dernier en dessus du mélange [66]. Cette qualité a donné l'avance de l'utilisation des thermoplastiques dans la modification des bitumes [112].

- **Principe de l'essai:** À la température de 160°C, on verse le bitume dans un tube en aluminium fixé verticalement pour une durée de 48h, puis on le refroidit à -7°C pendant 24h (voir figure 3. 5), l'échantillon sera par la suite coupé en trois sections de longueurs égales. Ensuite la mesure de la différence du point de ramollissement entre les parties inférieure et supérieure de tube est effectuée [66].

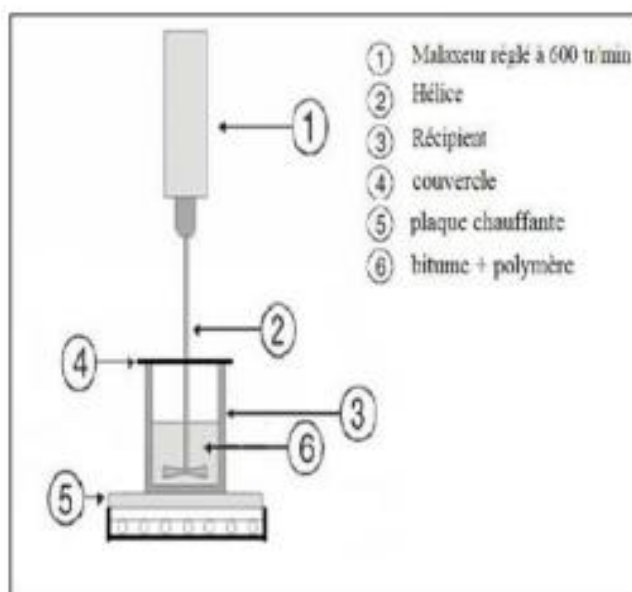


Figure. 3. 5 Appareillage de l'essai de stockage

- Valeur de billes et anneaux < 2.5 °C : le bitume est stable.
- Valeur de billes et anneaux > 2.5 °C: le bitume est instable.

3. 9. Objectifs de l'emploi des bitumes modifiés par polymères:

Ce type de bitume est codifié dans la norme NF EN 14023, et cette classification est après obtention des résultats d'analyse des performances développées. Le bitume modifié a une large utilisation dans divers axes de la construction et la réhabilitation:

- En émulsion comme couche d'accrochage
- Anti humidité en enduit superficiel.
- Empêcher la remontée des fissures en surface.

Dans les chaussées routières ce type de bitume intervient souvent dans les trois niveaux de la chaussée:

- ✓ **Couche d'assise:** si le site possède des problèmes techniques et ne pouvant pas être résolu par le bitume non modifié.
- ✓ **Couche de liaison:** pour faire face aux déformations internes dans la couche de liaison, dues à la transmission des charges du fort trafic. Les bitumes modifiés sont employés comme liants bitumineux.
- ✓ **Couche de roulement:** dans le but d'assurer la plus longue durée de vie de cette couche, le confort des usagers et la sécurité routière. Le bitume modifié est utilisé grâce aux caractéristiques suivantes:
 - la résistance à haute température, la souplesse, et l'élasticité à basse température
 - absorption rapide des turbulents et chocs thermiques dans les couches d'enrobé, ce qui mène à la minimisation du bruit.
 - résistance aux charges de fatigue à basse et à haute températures
 - propriétés mécaniques et la dureté développées
 - très large intervalle de température de service, et large gamme de plasticité
 - un bon drainage et tenue à l'eau.

3. 10. Impact de la modification des bitumes sur l'environnement

3. 10. 1. Le plastique dans le monde:

La production du plastique dans le monde existe depuis le siècle passé, elle est liée aux besoins nécessaires appropriés aux différents domaines tels que l'industrie, l'agriculture, et d'autres domaines d'usage courant. En 2017, les statistiques ont montré que la production mondiale de plastique est estimée à 380 tonnes/année [11]. La production du plastique est guidée par les besoins quotidiens, de différentes utilisations, et l'emballage prend la grande part d'après les statistiques faites depuis 1950 jusqu'à 2015 (voir figure 3. 6). Selon le taux de l'augmentation de la production, les chiffres déclarés devraient doubler d'ici 2050 [113]. Ces chiffres font appel à l'inquiétude, si une politique de gestion efficace des déchets plastiques n'est pas mise en place dès aujourd'hui.

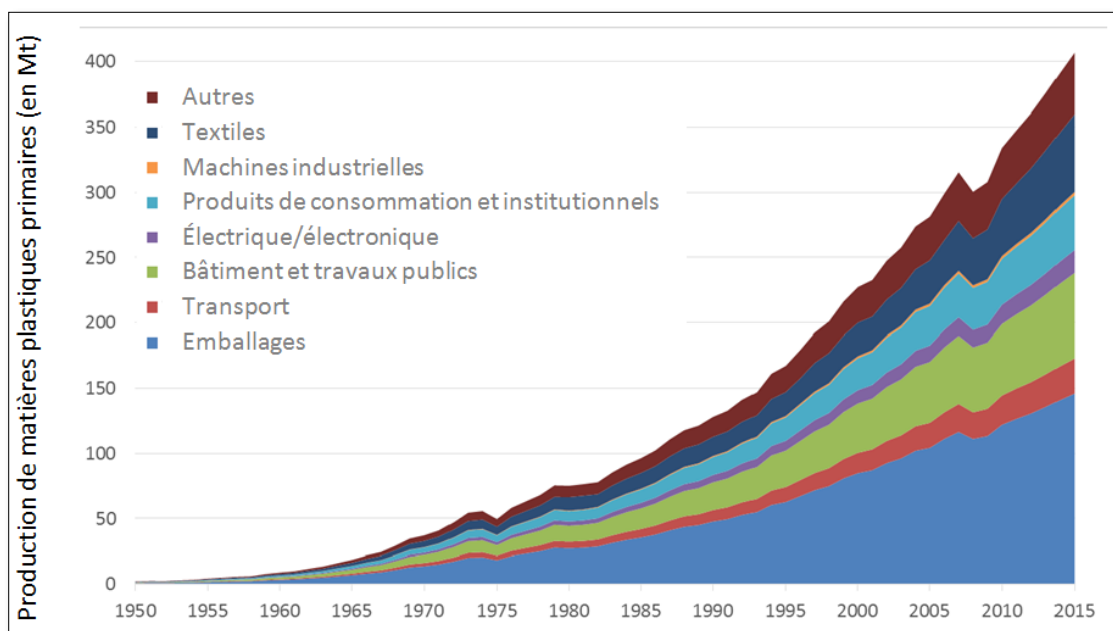


Figure 3. 6 Production de matières plastiques de base en fonction des années [113].

L'emploi des différents polymères a augmenté grâce à leur forte rigidité. D'ailleurs depuis les années 1970, quelques utilisations d'acier ont été remplacées par le plastique, et la production des polymères est en augmentation continue [114]. Le type de polymère qui domine la production des polymères est le polypropylène grâce à ces propriétés avantageuses et à sa rigidité élevée. En 2015, les statistiques ont enregistré un pourcentage de 19% de la production de ce polymère (voir figure 3. 7). La question qui doit être posée, c'est de connaître l'impact de cette production sur l'équilibre écologique et environnemental.

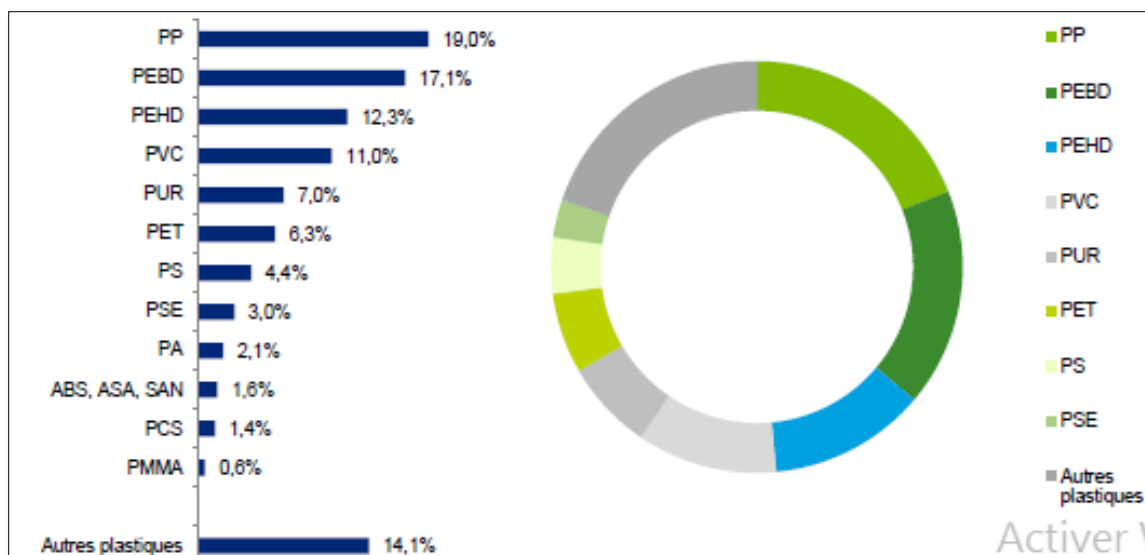


Figure 3. 7. Taux de production des différents polymères [115]

3. 10. 2. Risques liés au plastique dans l'environnement

Le plastique représente un danger réel, et les risques de son utilisation abusive sur l'environnement à court ou à long terme sont de plus en plus grands. Les effets de la pollution plastique sont:

3. 10. 2. 1. Risques sur le sol et sur l'air:

Les plastiques chlorés peuvent libérer des substances chimiques nocives dans le sol environnant, qui peuvent ensuite s'infiltrer dans les eaux souterraines ou d'autres sources d'eau environnantes. Cela peut nuire gravement aux espèces vivantes qui consomment cette eau d'une part, et la dégradation des plastiques entraîne la libération de méthane, qui contribue fortement à l'effet de serre, d'une autre part. Certaines décharges prennent des initiatives en installant des dispositifs pour capturer ce méthane et l'utiliser comme source d'énergie, mais la plupart d'entre elles n'ont pas intégré cette technologie [116]. Les plastiques biodégradables se dégradent également s'ils sont laissés sur le sol, auquel cas la dégradation prend plus de temps estimé par des centaines d'années [44]. Il a été prouvé qu'un changement atmosphérique est causé par la modification de gaz émis à effet de serre (GES), qui est le responsable sur l'équilibre atmosphérique de la planète. Les émissions de Carbone contribuent au déséquilibre environnemental par la déforestation et par l'emploi des énergies fossiles (plus de 60%), dont plus de 92 % du CO₂ de cette dernière est issu du plastique [116]. La figure 3. 8 montre ce changement atmosphérique, exprimé par un écart de 25% de carbone entre 1990 et

2019. Avec ce rythme, le carbone va atteindre une valeur minimale de 93% dans l'atmosphère à l'horizon 2048 [117].

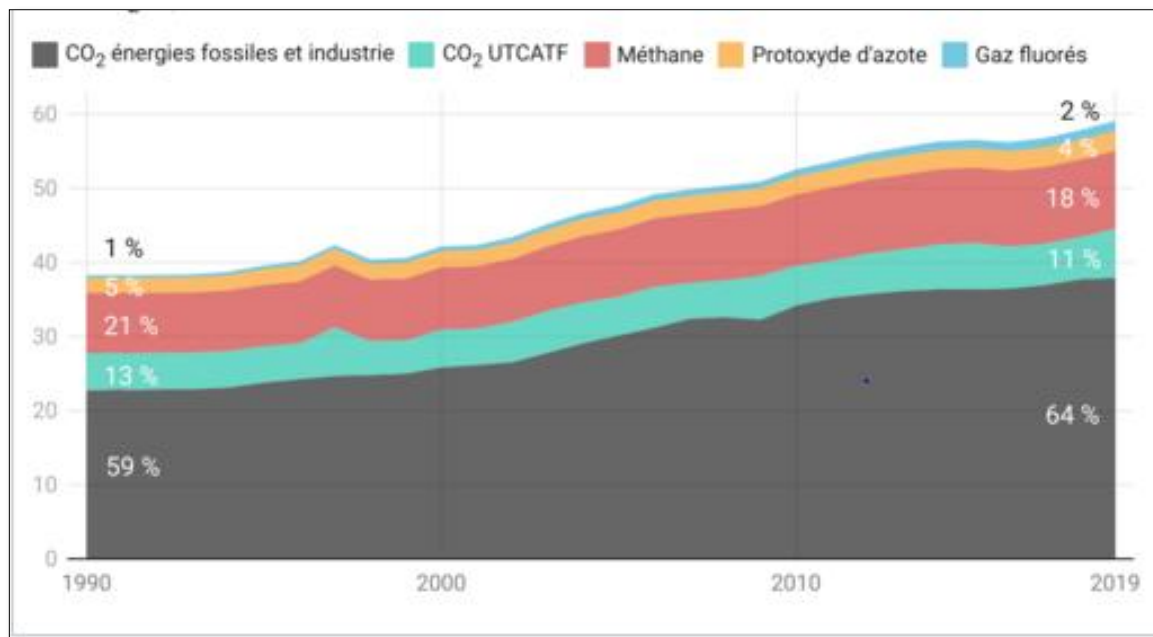


Figure 3. 8 Les pourcentages des gaz à effet de serre émis de 1990-2019 [117]

3. 10. 2. 2. Risque sur l'océan:

Les plastiques présents dans les océans se dégradent généralement en l'espace d'un an, mais pas entièrement, et au cours de ce processus, des produits chimiques toxiques tels que le bisphénol A et le polystyrène peuvent s'infiltrer dans les eaux à partir de certains plastiques, où les sacs domestiques et les récipients alimentaires constituent la majorité des débris océaniques [116]. En plus du cycle mondial de carbone qui a été influencé principalement par la pollution plastique, une estimation d'environ 165 millions de tonnes de pollution plastique dans les océans a été enregistrée en 2012. Les animaux peuvent être empoisonnés par cette pollution, ce qui peut avoir des conséquences négatives sur l'alimentation humaine. Quelques espèces marines comme les tortues de mer, contenaient de grandes quantités de plastique dans leur estomac, ces animaux meurent généralement de faim, car le plastique bloque leurs tubes digestifs. Les mammifères marins peuvent parfois s'emmêler dans des produits en plastique tels que les filets, ce qui peut les blesser ou les tuer. D'ailleurs l'analyse statistique faite en 2004, montre que les mouettes de la mer du Nord avaient en moyenne trente morceaux de plastique dans leurs estomacs [44].

3. 10. 2. 3. Risque sur l'humanité:

Les plastiques contiennent de nombreux types de produits chimiques différents, en fonction du type de plastique. Certains produits chimiques utilisés dans la production de plastique peuvent être absorbés par les êtres humains par absorption superficielle, ou peuvent provoquer des dermatites (inflammations) au contact de la peau humaine. Des tests importants sont souvent nécessaires pour s'assurer que les éléments toxiques sont contenus dans le plastique par un matériau inerte ou un polymère [44]. La pollution par le plastique peut également affecter l'homme en créant une nuisance visuelle qui empêche de profiter de l'environnement naturel.

3. 10. 3. La gestion des déchets plastiques:

Pour la biodiversité et pour un écosystème sain, la gestion des déchets plastiques est devenue un défi mondial, malheureusement, en Afrique la gestion des déchets plastiques est mauvaise, puisque plus de 80 % de ces déchets ne sont pas recyclés, et ceci représente un souci pour l'humanité. En 2019, la consommation annuelle de plastique en Algérie s'élevait à environ 25.8 kg / habitant, cela a conduit à une gestion inappropriée de près de 80 % de ces déchets avec un pourcentage de traitement inférieur ou égal à 60 % sur une période de 15 ans. Notre pays affiche néanmoins un taux relativement meilleur que de nombreux autres pays africains (voir figure 3. 9) [84]. Il est observé qu'une décision gouvernementale sérieuse devrait favoriser la disponibilité des innovations technologiques et sociales, orientées vers une économie circulaire du plastique. Quelques solutions efficaces peuvent être envisagées:

- Restreindre et interdire l'emploi de la matière plastique à usage unique.
- Sensibiliser la population sur les divers risques du plastique.
- Installer des unités de recyclage à côté de chaque agglomération avec des stratégies appropriées.
- Encourager l'investissement dans l'économie circulaire.

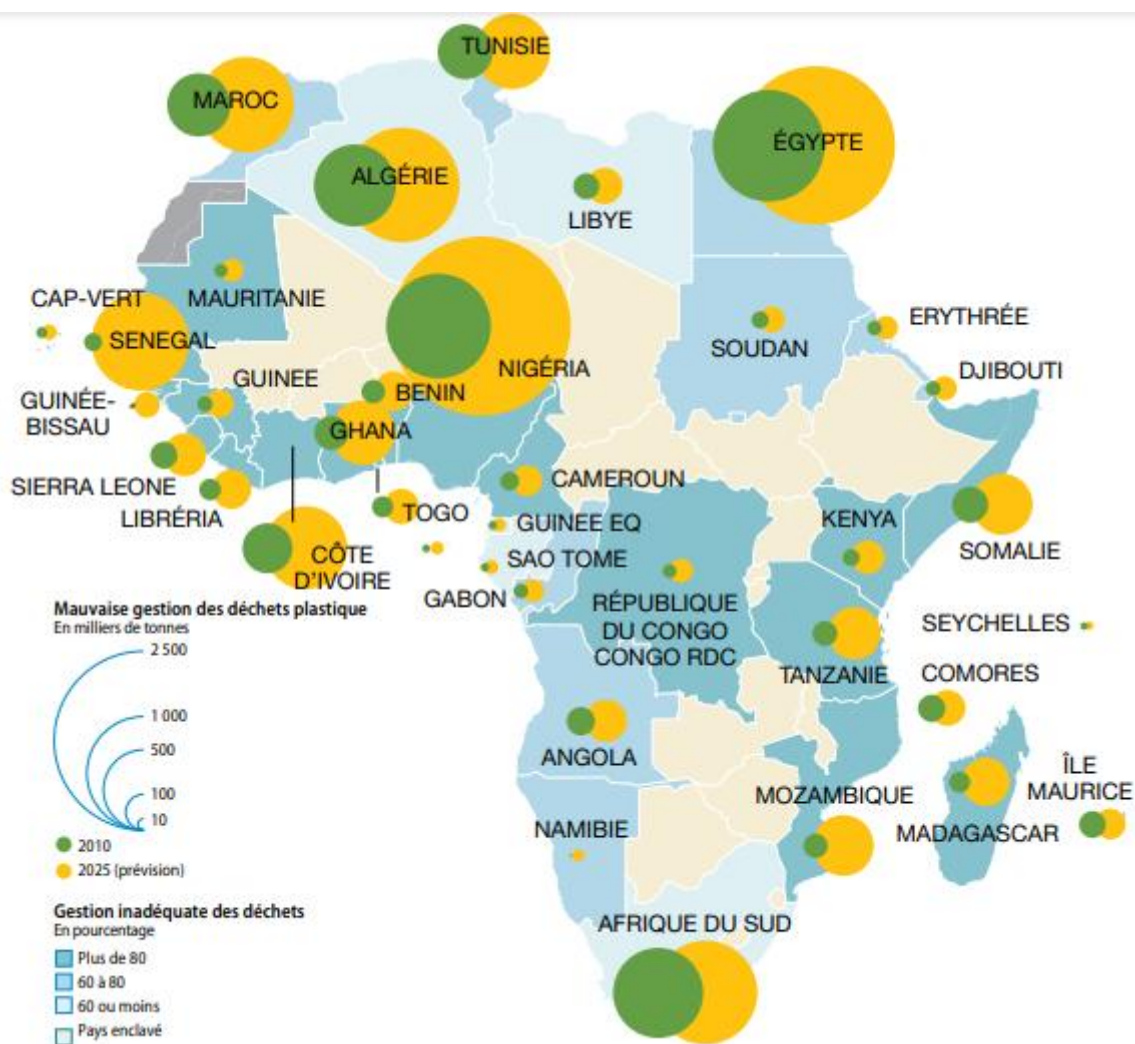


Figure 3. 9 La gestion inadéquate des déchets entre 2010 et 2025

3. 10. 4 Le recyclage des déchets plastiques:

Jusqu'à ce jour, le recyclage du plastique n'a pas sa vraie part dans la pratique, où le taux de recyclage est estimé à 18 % de la production mondiale de cette matière. Un taux très faible par rapport à la production mondiale de ce produit. Il implique une véritable procédure de valorisation des déchets avant que l'Afrique ne soit noyée dans les déchets plastiques. La consommation mondiale de l'énergie nécessaire pour le recyclage du plastique est très faible par rapport à celle de la production du plastique vierge selon les statistiques faites en 2009 (voir figure 3. 10), ce qui devrait favoriser l'utilisation de la technique de recyclage [117].

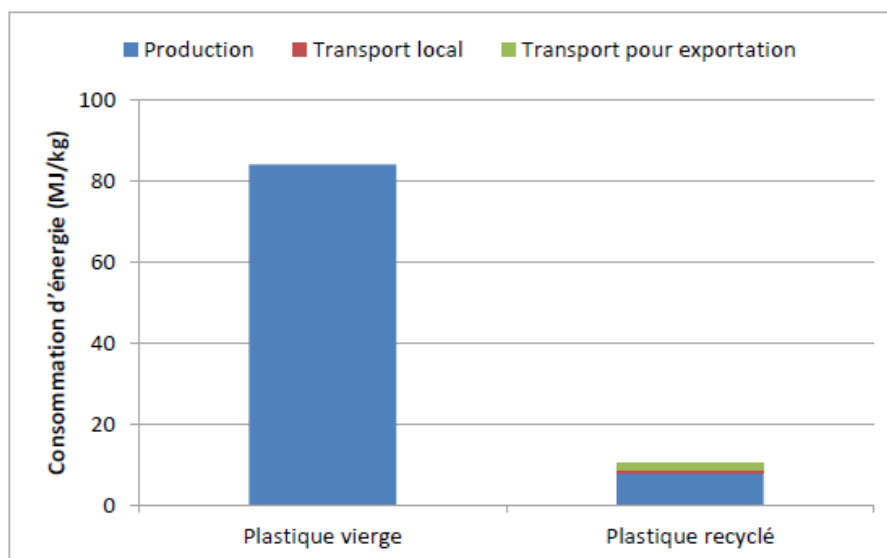


Figure 3. 10 L'énergie de production de deux types de plastiques

3. 10. 4. 1. Le recyclage des polymères:

Parmi les différents types de déchets plastiques, ceux de polypropylène présentent 2.04% de la composition totale [118], généralement, la production de masse de polymères et le contrôle insuffisant des produits en plastique en fin de vie ont entraîné une augmentation annuelle du plastique dans l'environnement. L'utilisation du recyclage des polymères a donné lieu à deux catégories de recyclage selon la réutilisation de ces derniers [119]:

- **Le recyclage mécanique:** Après le tri homogène des polymères, ils sont broyés puis fondus, pour passer ensuite dans la production de nouveaux produits.
- **Le recyclage chimique:** il consiste à mettre le polymère ou le plastique en immersion dans un solvant dans l'objectif de dissoudre le polymère visé.

Aujourd'hui, l'industrie mondiale se base énormément sur la reproduction (le recyclage) de ce matériau. L'Algérie est l'un des pays qui encourage la politique de l'économie circulaire, et opte même pour la modification des textes juridiques sur la gestion des déchets plastiques [120].

3. 10. 5. Politique de recyclage dans le domaine routier

Il est très important de mettre l'accent sur le recyclage du plastique dans les routes. Les pays développés ont intégré ce processus dans la construction routière d'une manière avancée [121], mais c'est devenu nécessaire que les pays sous-développés l'adoptent aussi.

Le recyclage dans le domaine routier consiste à utiliser les déchets de différents matériaux, et les introduire dans les revêtements des couches de surface, il peut être un recyclage à froid ou à chaud [86]. Ce dernier peut se faire par voie sèche ou par voie humide selon l'objectif technique recherché et d'autres conditions techniques et économiques.

Le processus sec facilite la formulation des matériaux de revêtement routier sur terrain [122], il est adapté aussi pour les régions à haute température [123]. Le processus humide est avantageux que le processus sec en terme de rigidité qui favorise l'orniérage. Grâce aux essais menés sur les enrobés bitumineux, ce processus facilite considérablement l'étape de compactage de ces matériaux [125].

Le recyclage de déchets plastiques ou de polymères dans les revêtements routiers, soit dans la construction, ou dans la réhabilitation des routes, dépend de plusieurs facteurs, notamment la capacité de construction, la disponibilité, le coût et les performances attendues [126]. Il ya aussi le facteur environnemental qui est menacé par les déchets plastiques, ces derniers sont non biodégradables dans les sols et les eaux [123], et ils réagissent positivement dans l'amélioration des performances mécaniques de béton bitumineux. C'est l'une des solutions pour les éliminer scientifiquement [127].

En 2012, et d'après la documentation du CTPP, l'Algérie a introduit le renforcement du béton bitumineux par le PR PLAST MODULE incorporé à 0.7% dans le mélange bitumineux utilisé dans le revêtement de la 2eme Rcade autoroutière d'Alger, dont la durée de vie de 20 ans prévue par un BB conventionnel est passée à 30 ans. La réussite de cette expérience, doit encourager notre pays à basculer réellement vers les chaussées durables et écologiques.

3. 11. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modification des caractéristiques mécaniques de l'enrobé bitumineux, par introduction de matériaux comme les fibres et les polymères. Un aperçu détaillé est fait sur les polymères, leurs types, leur fabrication, leurs structures chimiques, et leurs différentes propriétés, en illustrant les problèmes liés à la compatibilité bitume-polymère, et les risques de l'instabilité au stockage des bitume modifiés.

À la fin de ce chapitre un aperçu sur les statistiques faites sur l'accumulation du plastique non biodégradable, sa production et les risques liés à son accumulation dans l'environnement. Le recyclage de ce matériau dans le domaine routier est présenté comme

l'une des solutions pour atteindre l'objectif de la protection de l'environnement par le recyclage des plastiques et la gestion des déchets par l'économie circulaire.

Dans ce domaine, les recherches précédentes sur la modification des propriétés du béton bitumineux avec des additifs sont très riches en informations, et constituent une base pour de prochaines études, surtout si elles sont validées par des analyses expérimentales.

Partie 2. Etude pratique

CHAPITRE 4
ETUDE EXPERIMENTALE SUR
SITE ET AU LABORATOIRE

4. 1. Introduction

L'étude pratique concerne l'analyse de la modification des caractéristiques rhéologiques et mécaniques de l'enrobé bitumineux de la route nationale RN25 de Tizi-Ouzou. Il est préférable d'entamer le travail par une reconnaissance, pour identifier les propriétés des matériaux utilisés et l'état de la chaussée réelle et déduire la durée de vie résiduelle, avant la procédure de la réhabilitation. Cette première étape pratique sur terrain, est faite en collaboration avec la Subdivision des Travaux Publics (STP) de Draa-El-Mizan, avec l'accord de la Direction des Travaux Publics (DTP) de Tizi-Ouzou, et le Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP) de Tizi-Ouzou.

L'étude expérimentale consiste à analyser les caractéristiques rhéologiques et mécaniques de l'enrobé bitumineux modifié à chaud, et les comparer aux résultats d'un autre enrobé témoin non modifié, à cet effet une série d'essais a été réalisé en deux laboratoires:

- L'analyse de bitume est faite au niveau du LCTP le laboratoire central des travaux publics d'Alger.

- La caractérisation mécanique de l'enrobé bitumineux a été réalisée au niveau du laboratoire de l'organisme national de contrôle technique des travaux publics (CTTP) d'Alger.

Ce chapitre illustre principalement la faisabilité de modifier le comportement mécanique de l'enrobé bitumineux à chaud par voie humide en employant le recyclage du polypropylène, en passant par les étapes suivantes:

- Ausculter les sections concernées de la RN25 et relever les anomalies.
- Réaliser le test de déflexion, et calculer le renforcement nécessaire.
- Réaliser des essais mécaniques sur les mêmes matériaux utilisés dans la conception de la RN25.
- Réaliser des essais mécaniques sur l'enrobé bitumineux modifié par le polypropylène.
- Réaliser des essais mécaniques sur l'enrobé modifié par l'enrobé bitumineux modifié par les déchets plastiques.

4. 2. Expertise

La DTP de Tizi-Ouzou nous a autorisés à participer à l'expertise faite en collaboration avec le LCTP de Tizi-Ouzou, et en collaboration avec la STP de Draa-El-Mizan sur un tronçon de 18,700 km sur la RN 25, et notre analyse était faite sur la partie la plus dégradée. Ce diagnostic s'est réalisé sur deux étapes: l'analyse visuelle et le test de déflexion.

4. 2. 1. Le test visuel

Le test visuel sur le tronçon le plus dégradé de la RN25, limité par les points kilométriques PK10+900 et PK29+100. Et pour bien organiser le travail, ce tronçon est divisé en 4 parties, représentées dans le tableau 4.1:

Tableau 4.1. Les parties à étudier et leurs points kilométriques

Partie i	Les limites des points kilométriques
Partie 1	De PK10+900 au PK 13+400
Partie 2	De PK17+200 au PK19+300
Partie 3	De PK22+900 au PK25+100
Partie 4	De PK26+600 au PK29+100

Des dégradations significatives ont été constatées sur la deuxième et la troisième section, pour lesquelles nous avons élaboré le test de déflexion, tandis que la première et la quatrième section ont été traitées par le LCTP et la STP. Les détails sont regroupés dans le tableau 4.2, et le tableau 4. 3 respectivement:

Tableau 4. 2. Les anomalies observées sur la partie n°2 du PK17+200 au PK19+300

Points kilométriques	Linéaire (m)	Types de dégradation
De PK17+200 à PK17+800	600	1- fissures transversales 2- faïençage dispersé à mailles fines 3- fort affaissement de rive 4- légères fissures longitudinales
De PK17+800 à PK18+600	800	1- faïençage localisé à mailles fines 2- orniérage 3- moyenne fissures longitudinales 4- faible affaissement localisé 5- fort affaissement de rive
De PK 18+600 à 18+800	200	En bon état
De PK18+800 à PK 19+300	500	1-faïençage étendu à mailles large 2- faible affaissement de rive 3- fortes fissures longitudinales 4- moyen affaissement généralisé

Tableau 4. 3 Les anomalies observées sur la partie n°3 de PK22+900 au PK25+100

Points kilométriques	Linéaire (m)	Type de dégradation
De PK23+300 à PK23+600	300	1- faïençage à mailles fines 2- faïençage localisé à mailles larges 3- affaissement localisé
De PK23+600 à PK24+100	500	1- affaissement de rive 2- faïençage à mailles larges 3-affaissement généralisé 4- fissures longitudinales
De PK 24+100 à PK24+700	600	1- orniérage 2-fissures transversales 3-affaissement de rive 4-moyennes fissures longitudinales 5-fissures longitudinales
De PK24+600 à PK 25+100	500	2-affaissement générale 3-fissures longitudinales 1-faïençage à mailles fines localisées 4-affaissement de rive

4. 2. 2. Le test de déflexion HDW

L'essai de déflexion HDW (Heavy Weight Deflectometer) sert à analyser la déformation verticale de la chaussée sous la charge d'un poids appliqué, au moment où des géophones mesurent le déplacement vertical de la chaussée (voir figure 4. 1). Le déflectomètre est muni d'une remorque qui contient la masse libérée de 250kg, sous pression de 920 MPa, et des géophones qui captent et enregistrent 9 mesures de déplacement vertical, espacées d'une distance de 1 à 2m. Ce paramètre est exprimé en micromètre, l'espacement entre deux stations de déflectomètre est d'environ 200m. La figure 4.1 illustre le principe de déflexion. La prise de mesures est faite tout le long du tronçon.

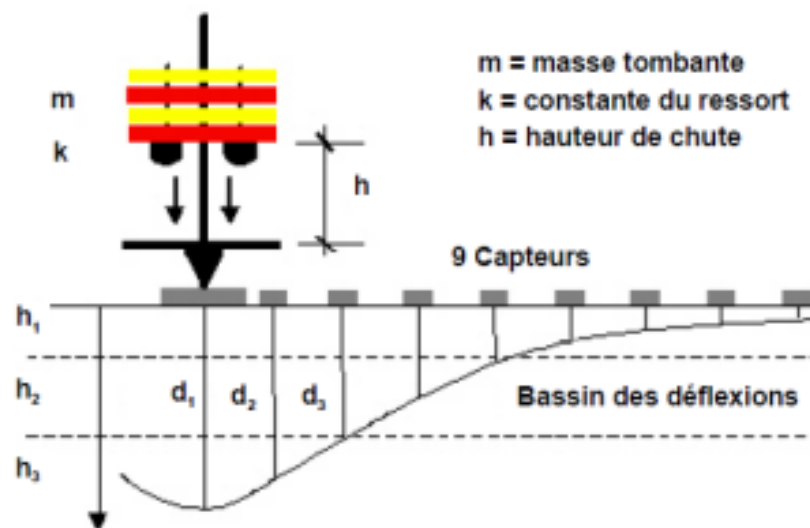


Figure 4. 1. Schéma de principe de l'essai de déflexion [37]



Figure 4. 2 Le déflectomètre HDW [37]

Cet essai est principalement utilisé pour mesurer la capacité portante d'une chaussée neuve et estimer la durée de vie de la structure routière, et est aussi employé pour l'auscultation d'une chaussée dégradée (cas de la RN25) afin de procéder à des renforcements et réhabilitations nécessaires.

4. 2. 3. Résultats et discussion:

Les valeurs de déflexions enregistrées par les géophones des deux parties 2 et 3 sont illustrées consécutivement dans les tableaux 1 et 2, de l'annexe I. Ces valeurs sont représentées en forme de courbes montrées dans les figures 4. 3, et 4. 4:

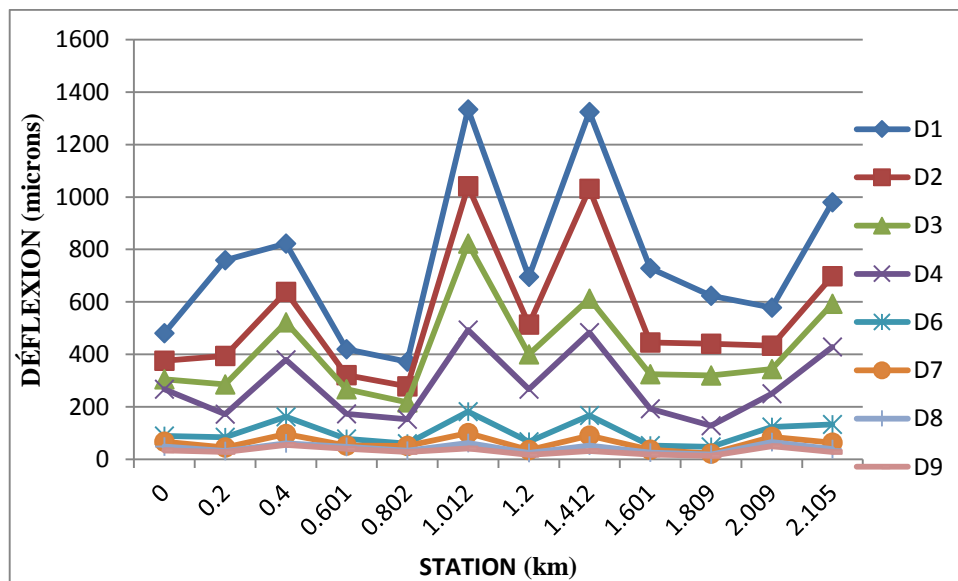


Figure 4.3. La variation de la déflexion en fonction des différentes stations enregistrées pour la partie N° 2 du PK17+200 au PK19+300

D'après la figure 4. 3, la déflexion minimale enregistrée dans cette partie est de 372 microns à la station 0.802 km qui correspond PK18+002, et la déflexion maximale est de 1334 microns enregistrée à la station 1.012 correspondant au PK18+212.

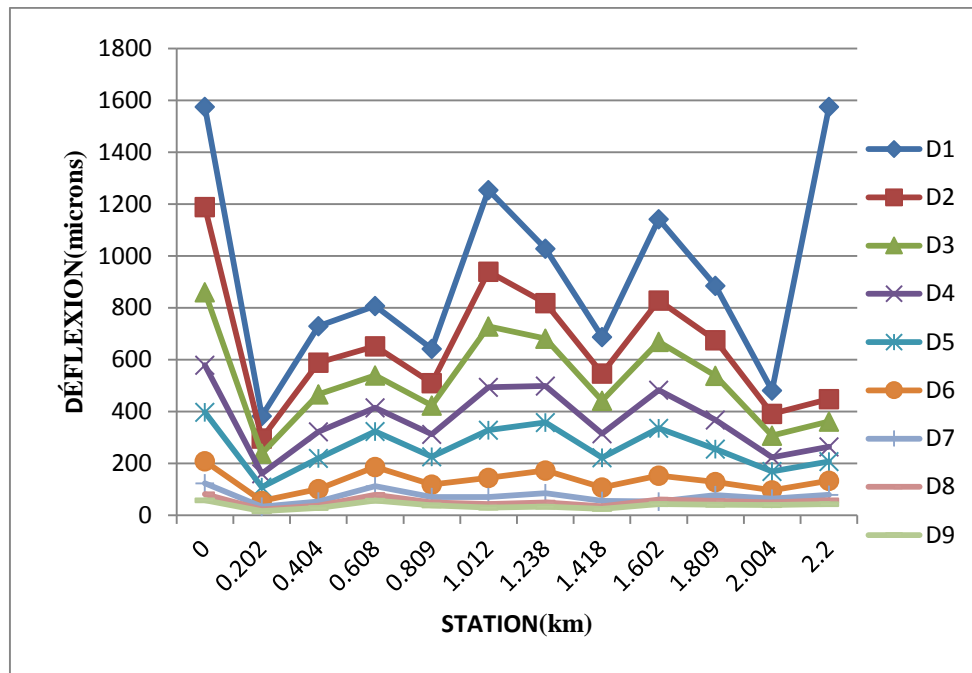


Figure 4. 4. La variation de la déflexion en fonction des différentes stations enregistrées pour la partie N°3 du PK22+900 au PK25+100

D'après la figure 4. 4, le déplacement minimal enregistré dans cette partie est d'une valeur de 383 microns à la station 0.202 km qui correspond PK23+102, et il est maximal de 1575 microns à la station 0 correspondant au PK22+900. Donc cette section qui contient la valeur maximale (1575 microns) de la déflexion est captée au PK22+900, et la déflexion minimale est captée dans la section N°2 (372microns) au PK18+002; ce grand écart du déplacement vertical de la chaussée, signifie que la déflexion n'est pas homogène le long des sections analysées du tronçon routier.

4. 2. 4. Exécution des sondages

Après le diagnostic, trois sondages sont prévus concernant tout le tronçon analysé. Pour pouvoir proposer les remèdes adéquats, la position et l'épaisseur d'un sondage dans une partie dépendent de la localisation et de la gravité des dégradations, les sondages désignés, et leurs positions sont mentionnés dans le tableau 4. 4

Tableau 4. 4. Localisations des sondages proposés

N° de sondage	Position PK	Épaisseur (cm)
1	PK18+500	0.58
2	PK24+000	0.68
3	PK28+200	0.60

Les sondages réalisés, sur le tronçon étudié montrent que la RN25 s'identifie par la structure suivante:

- ✓ Un sol support de nature argileuse
- ✓ Une couche de fondation de nature TVO, de 15 cm d'épaisseur
- ✓ Une couche de base de nature TVO, de 15 cm d'épaisseur
- ✓ Une couche de roulement de nature enrobé bitumineux de 6 cm d'épaisseur

4. 2. 5. Calcul des épaisseurs de renforcement

L'expertise des anomalies et des dégradations visualisées sur le tronçon de la RN25 étant faite, on déduit les différentes causes qui ont mené à cette situation. Ces causes sont comme suit:

- ✓ L'effet du trafic journalier des poids lourds répété.
- ✓ La structure de la chaussée.
- ✓ La nature des matériaux utilisés dans la conception de chaque couche de la chaussée.
- ✓ La nature du sol support.
- ✓ Les conditions climatiques (la température estivale et hivernale, les précipitations saisonnières).

Il est nécessaire d'utiliser le logiciel ELMOD6, le plus adapté au niveau de l'organisme de contrôle technique des travaux publics, pour fournir des informations sur la durée de vie résiduelle de la chaussée, les dimensions nécessaires de renforcement, en employant des données obtenues par le déflectomètre (mesures de champs de déflexion), les données pluviométriques, la température, la charge portante, et les caractéristiques des matériaux constituant les couches de la chaussée. Les résultats trouvés ont été comparés à ceux du CTPP et une différence de 5 à 10 millimètre en ce qui concerne l'épaisseur du BB, et une différence de 0.1 à 0.18 ans pour la durée de vie résiduelle de l'enrobé bitumineux. Les résultats graphiques du programme sont mentionnés dans l'annexe I et les valeurs des épaisseurs de renforcement et sa durée de vie, ainsi que la durée de vie résiduelle des couches de la chaussée sont mentionnés dans le tableau 4. 5

Tableau 4. 5. Résultats de calcul de la structure

Tronçon	Durée de vie résiduelle (ans)	Epaisseur de l'enrobé bitumineux (mm)	durée de vie prévue du renforcement (ans)
de PK10+900 au PK 13+400	5.8	58.2	10
de PK17+200 au PK19+300	0.4	140	10
de PK22+900 au PK25+100	0.3	151.9	10
de PK26+600 au PK29+100	1.5	134.3	10

La durée de vie résiduelle de la structure est de 2 ans, ce qui signifie que le segment étudié a anticipé la fin de la durée de vie de l'ouvrage, et il est nécessaire de passer à la réhabilitation.

4. 2. 6. Renforcement réel à réaliser:

Puisqu'il s'agit d'un renforcement, et pour assurer l'homogénéité de la structure, sans influencer sur la rigidité de la chaussée à renforcer, les épaisseurs trouvées ont été modifiées.

Le tableau 4. 6 donne le type de matériau choisi pour chaque couche et l'épaisseur correspondante:

Tableau 4. 6. Les caractéristiques de renforcement correspondant aux sections dégradées

Tronçon	Type de matériau	Épaisseur (cm)
De PK10+900 à PK13+400	-Béton Bitumineux	6
De PK17+200 au PK19+300	-Béton Bitumineux -Grave Bitume	6 10
De PK22+900 au PK25+100	-Béton Bitumineux -Grave Bitume	6 14
De PK26+600 au PK29+100	-Béton Bitumineux	8

Les sections 2 et 3 sont les plus affectées par les diverses dégradations citées précédemment dans les tableaux 4. 2 et 4. 3, ce qui signifie que les déformations ont atteint une profondeur jusqu'à 20 cm dans la structure de la chaussée, raison pour laquelle le renforcement est doublé (voir tableau 4. 6).

4. 4. 7. Calcul des contraintes verticales et horizontales avec ALIZE

les déformations verticales et horizontale calculées par le programme ALIZE sont vérifiées et comparées aux déformations admissibles obtenues au niveau de l'organisme. En injectant dans le programme, les caractéristiques des matériaux et la charge appliquée de 13 tonnes d'un essieu standard portant les caractéristiques suivantes:

- Surface de contact au sol, par roue: 0.19 m²
- Pression des pneumatiques: 8 bars
- Écartement des roues: 1.8 m
- Charge par roue: 6,5 tonnes
- Pression moyenne de contact 6 bars
- Poids vide d'un essieu: 5 tonnes
- Nombre de roues: deux roues jumelées

Les caractéristiques des matériaux de chaque couche sont mentionnées dans le tableau 4.7, et quelques étapes de calcul avec le logiciel sont mentionnées dans l'annexe I.

Tableau 4.7. Caractéristiques des matériaux de la structure

Nature de la couche	Epaisseur (cm)	ν	E (MPa)
Béton bitumineux	6	0.35	3800
Béton bitumineux	8	0.35	3800
Grave bitume	10	0.35	5000
Grave bitume	14	0.35	5000
Sol argileux	infinie	0.40	50

Les paramètres de déformation verticale et horizontale calculés par ALIZE sont donnés en mètres, et sont comparés aux résultats admissibles proposés par l'organisme. Ces paramètres sont présentés dans le tableau 4. 8.

Tableau 4. 8. Déformations calculées et déformations admissibles

Segment	Déformation verticale calculée ε_z	Déformation Verticale admissible ε_{zad}	Déformation horizontale calculée ε_t	Déformation horizontale admissible ε_{tad}
De PK10+900 à PK13+400	$6.11 * 10^{-4}$	$8.84 * 10^{-4}$	$1.51 * 10^{-4}$	$2.79 * 10^{-4}$
De PK17+200 au PK19+300	$4.20 * 10^{-4}$	$1.01 * 10^{-3}$	$1.54 * 10^{-4}$	$1.84 * 10^{-4}$
De PK22+900 au PK25+100	$3.29 * 10^{-4}$	$1.03 * 10^{-3}$	$1.55 * 10^{-4}$	$1.95 * 10^{-4}$
De PK26+600 au PK29+100	$5.1 * 10^{-4}$	$1.57 * 10^{-3}$	$1.59 * 10^{-4}$	$2.53 * 10^{-4}$

D'après le tableau 4. 8, toutes les valeurs des déformations horizontales et verticales calculées sont inférieures à celles admissibles, ce qui signifie que la structure calculée, et l'attribution des matériaux sont vérifiés. D'après les résultats du code ELMOD6, la durée de vie de renforcement de la RN25 est estimée à 10 ans, à la fin de ces 10 ans, ou peut être avant, les organismes concernés doivent encore procéder à une réhabilitation plus importante ou à la reconstruction. En considérant toutes les conditions aux limites, le sol support est l'une des ces conditions inévitables, en prenant en compte le fort trafic journalier circulant sur cette chaussée, il faut trouver une meilleure solution, pour prolonger la durée de vie de la route au lieu de la renforcer tous les 10 ans ou moins. À cette étape là, nous avons opté pour le renforcement des caractéristiques de l'enrobé à la station d'enrobage, au lieu d'un renforcement après sa mise en service.

Notre tâche sur terrain étant achevée, le reste de notre travail se fait aux laboratoires. Pour se faire, voici la méthodologie adoptée dans cette étude:

4. 3. Matériaux

Les matériaux utilisés dans cette partie sont les agrégats, le liant, et les ajouts : le polypropylène et les déchets plastiques.

4. 3. 1. Agrégats

4. 3. 1. Caractéristiques intrinsèques et de fabrication:

Les granulats utilisés ont été récupérés au niveau du parc de matériaux de l'entreprise EGTPO. Ces granulats sont de fractions 0/3, 3/8, et 8/15 de la carrière de Ain-Touta à El-Hachimia dans la wilaya de Bouira, et présentent des caractéristiques intrinsèques conformes

aux normes: NA 458, NA 457 et NA255, et des caractéristiques de fabrications conformes aux normes: NA256, NF P18-591, et NF EN 933-8 (voir tableau 4. 9).

4. 3. 2. Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique de ces agrégats réalisée selon la norme NA 2607, sont présentés dans le tableau 4. 10. La courbe granulométrique des fractions granulaires est représentée dans la figure 4. 5.

Tableau 4.9 Caractéristiques générales des granulats

Essai	Résultats			spécifications
	0/3	3/8	8/15	
Caractéristiques intrinsèques				
LOS ANGELES	-	21	22.75	
Coefficient MICRO-DEVAL	-	18	14.80	
Masse volumique (g/cm ³)	2.70	2.69	2.70	
Caractéristiques de fabrication				
Coefficient d'aplatissement		16.17%	20.68%	<25%
Propreté superficielle		0.6%	1.20%	< 2%
Equivalent de sable	47.85%			> 40%
Indice de plasticité	6,10%			-

Tableau 4. 10. Résultats d'analyse granulométrique des agrégats

Tamis	Fractions			
	Fillers	Sable 0/3	Gravier 0/8	Gravier 0/15
20	100	100	100	100
16	100	100	100	100
14	100	100	100	88
12.5	100	100	100	63
10	100	100	100	25
8	100	100	99	7
6.3	100	100	73	1
5	100	100	24	1
4	100	100	5	1
3.15	100	79	4	1
2	100	65	3	1
1	100	45	3	1
0.63	100	36	2	1
0.315	100	25	2	1
0.25	100	23	2	1
0.16	100	19	2	1
0.08	100	13	2	1

Tableau 4. 12. Mélange proposé des fractions granulaires

Tamis	Mélange proposé
14	97
12.5	90
10	79
8	74
6.3	66
5	53
4	45
3.15	41
2	33
1	23
0.63	19
0.315	13
0.25	12
0.16	10
0.08	7

Ces pourcentages des fractions granulaires ont permis d'obtenir la courbe granulométrique (figure 4. 6) qui s'insère parfaitement dans le fuseau de la référence au béton bitumineux semi grenu 0/14.

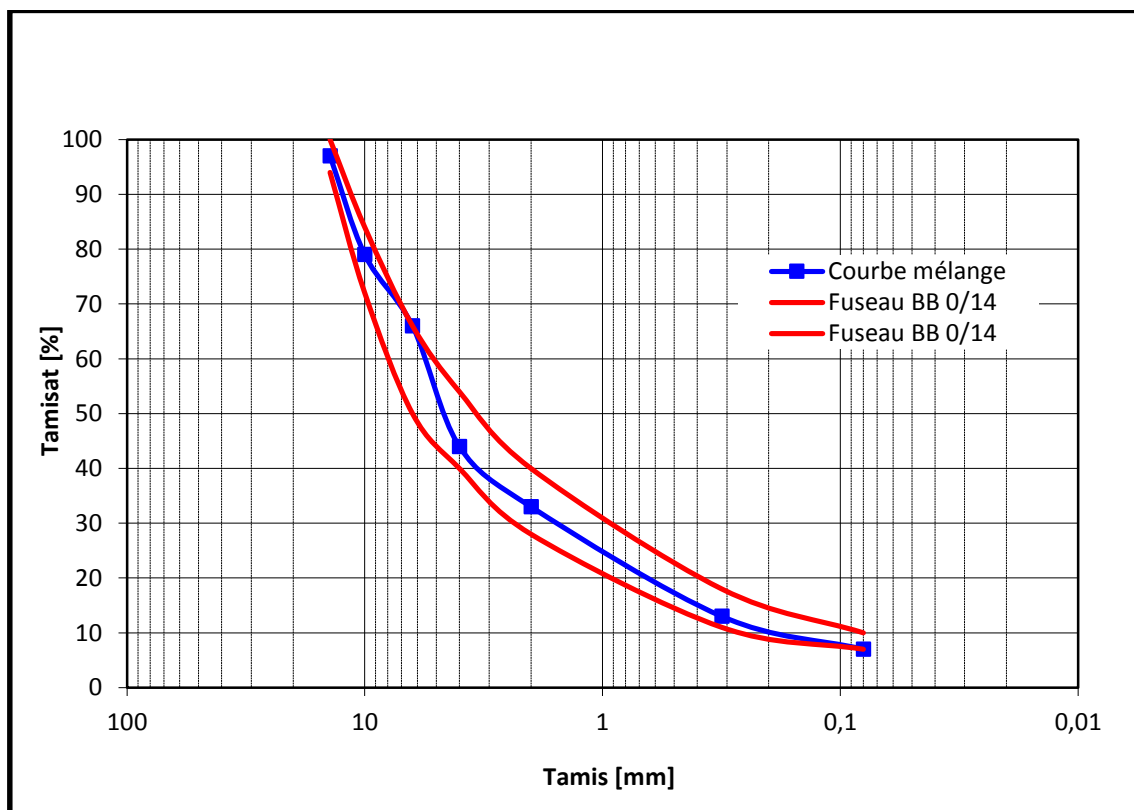


Figure 4. 6. Courbe granulométrique du mélange 0/14

La figure 4. 7. montre les trois fractions granulaires utilisées 0/3, 3/8, et 8/15



Figure 4. 7. Les agrégats utilisés dans le mélange

4. 4. 3. La teneur optimale en liant:

La teneur optimale en liant est calculée selon l'équation (2. 2) dans le chapitre 2:

- La surface spécifique des granulats:

$100 \Sigma = 0.17G+0.33g+2.3S+2.3s+135f$ d'après les données du tableau 4.10, on trouve

$$\Sigma = 11.47 \text{ m}^2/\text{kg}$$

- Calculer le coefficient α à partir de l'équation (2. 4) : $P = \alpha k^5 \sqrt{\Sigma}$

Si la masse volumique réelle des granulats est différente de 2.65 t/m^3 , α tient compte de cette masse volumique par la formule: $\alpha = \frac{2.65}{MVR_g}$

MVR_g : la masse volumique réelle des granulats

$$MVR_g = \frac{\text{desité de } 0/3}{\% \text{ de } 0/3} + \frac{\text{desité de } 3/8}{\% \text{ de } 3/8} + \frac{\text{desité de } 8/15}{\% \text{ de } 8/15}$$

$$MVR_g = \frac{2.67}{40} + \frac{2.69}{20} + \frac{2.69}{40} = 2.68 \text{ t/m}^3$$

$$\alpha = \frac{2.65}{2.68} = 0.98 \text{ cela implique que, } \alpha \approx 1$$

k est une constante qui représente le module de richesse des enrobés bitumineux 0/14 et est égale à 3.55.

Utilisant l'équation 2. 4, on aura : $P = 5.87\%$. Ce pourcentage représente la teneur en liant dans le mélange bitumineux à confectionner.

4. 4. 4. Le liant utilisé:

Le liant utilisé est le bitume de classe 40/50 provenant de NAFTAL(Algérie). Le choix de la classe de liant utilisé dépend du trafic, de l'altitude, et du climat (Tableau 3, 4, et 5 de l'annexe 1). La wilaya de Tizi-Ouzou est classée dans la zone I, et considérée septentrionale du Tell, humide, et avec un climat méditerranéen. Le bitume est choisi selon les critères de site de la RN25, illustrés dans le tableau 4.13:

Tableau 4. 13. Critères de choix de la classe de bitume utilisé (RN25)

Caractéristique	Unité de mesure	Valeur
Altitude	m	> 500
Trafic circulant	PLMJA	> 500
Température minimale moyenne au sol	°C	$-2.5 < T_{\min} < 2.5$
Température maximale moyenne au sol	°C	< 45
Hauteur de la précipitation annuelle	mm	> 600

Ce bitume présente des caractéristiques d'identification conformes aux normes, NA 2617, NA 5192 et NA 5224 successivement. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau 4. 14, et la figure 4. 8, montre le bitume utilisé dans le mélange bitumineux.



Figure 4. 8. Le bitume 40/50 à l'état liquide

Tableau 4.14. Caractéristiques d'identification du liant utilisé

Essai	Résultats obtenus	Spécifications
Point de ramollissement(°)	49	47 à 60
Pénétrabilité à 25° C	46	40 à 50
Densité relative à 25° C	1,04	1,01 à 1,04

4. 5. Les additifs:

4. 5. 1. Le polymère :

Le polymère utilisé est de type homopolymère nommé Polypropylène PP500P à granulats blancs arrondis de 3mm environ de diamètre, récupéré de SABIC dépôt à Alger et importé de l'Arabie Saoudite. Ce polypropylène présente des propriétés mécaniques et thermiques conformes aux normes, qui sont fournies par le même organisme (tableau 6 en annexe).



Figure 4. 9. Le polypropylène PP500P

4. 5. 2. Les déchets plastiques:

Les déchets plastiques utilisés dans cette étude sont les déchets de brosses et de balais plastiques de nettoyage fabriqués à base de polypropylène à Réghaia (Alger), où les fibres sont de même diamètre et coupés en petites chutes de 0/3mm de long environ, comme le montre la figure 4. 10.

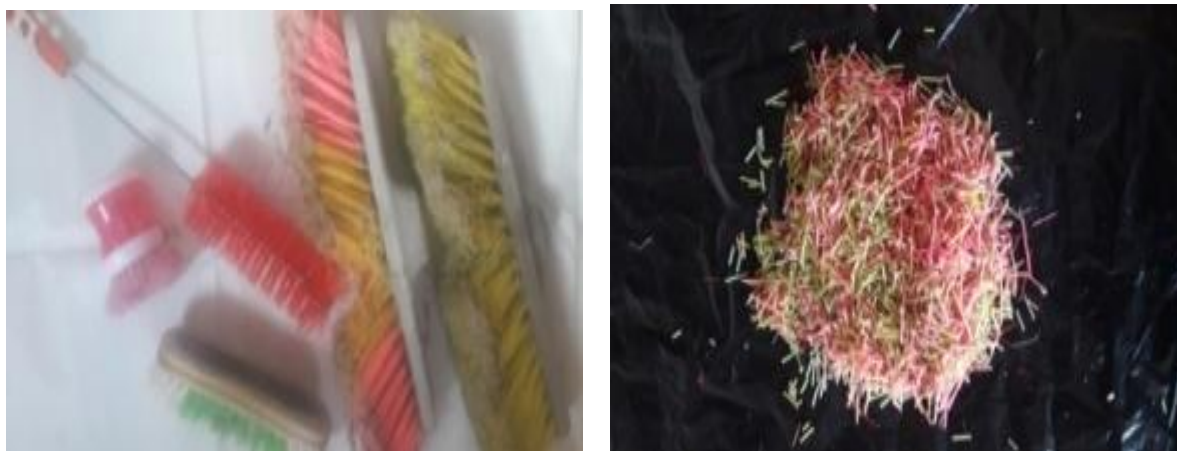


Figure 4. 10. Les déchets des brosses et balais plastiques à base de polypropylène PP500P

4. 6. Détermination des caractéristiques du bitume

L'étude expérimentale de modification du bitume est réalisée en deux parties : la première partie consiste à modifier le bitume avec le polymère neuf en graines, et la deuxième partie consiste à le modifier avec des déchets plastiques dérivés du polypropylène. La méthodologie de l'étude est d'analyser d'abord la vitesse de malaxage du bitume avec les deux additifs avant de confectionner l'enrobé bitumineux.

4. 6. 1. Modification par le polymère PP500P

Dans cette partie, l'ajout de polymère PP500P en graines se fait avec différents pourcentages en poids (2%, 4%, 6%, 8%, 10%) du mélange, le temps de malaxage est variable (1h, 2h, 3h) et la vitesse et la température de malaxage sont : 700tour/min et 175°C. On se propose d'analyser les paramètres suivants du bitume modifié : la pénétrabilité, le point de ramollissement, la ductilité, et la stabilité au stockage.

4. 6. 1. 1. Essai de pénétrabilité:

Une aiguille normalisée, chargée à 100g et maintenue à une température de 25 °C, pénètre pendant un temps de 5secondes, dans l'échantillon de bitume à l'aide d'un pénétromètre. La profondeur d'enfoncement de cette aiguille dans le bitume est la pénétrabilité, exprimée en dixièmes de millimètres. La figure 4. 11, montre l'un des essais de pénétrabilité réalisés, et les résultats sont mentionnés dans le tableau 4.15



Figure 4. 11 Essai de pénétrabilité réalisé

Tableau 4. 15 Valeurs de pénétrabilité du bitume modifié par le polymère

	Pénétrabilité à 25° C (1/10mm)					
PP500P(%)	0	2	4	6	8	10
T = 1h	46	44	43	42	41	39
T = 2h	46	43	42	41	39	38
T = 3h	46	42	38	38	36	35

4. 6. 1. 2. Essai de point de ramollissement bille et anneau (TBA):

Cet essai consiste à chauffer le bitume, jusqu'à ce qu'il se liquéfie, puis le verser dans deux anneaux en laiton, après le refroidissement à la température ambiante, on met une bille d'acier au centre de l'anneau, ensuite l'ensemble est soumis à un chauffage progressif par une échelle de 5°C/min. Le moment où la bille d'acier touche la plaque inférieure est le point de ramollissement (voir figure 4.12). Les conditions de l'essai sont normalisées aux normes NA 2617, NA 5192 et NA 5224, et les résultats de cet essai sont illustrés dans le tableau 4.16

Tableau 4. 16 Valeurs de point de ramollissement de bitume modifié par le polymère

	Point de ramollissement (°C)					
PP500P(%)	0	2	4	6	8	10
T = 1h	49	51	55	57	57	58
T = 2h	49	52	56	58	60	64
T = 3h	49	54	57	65	67	75



Figure 4.12. L'essai de point de ramollissement réalisé dans cette étude

4. 6. 1. 3. Essai de ductilité:

L'essai est réalisé selon les conditions spécifiques de 25°C et une vitesse d'étirement de 50mm/min. La distance entre les 2 mors (cm) est refaite 5 fois (figure 4. 13). La ductilité est la moyenne de 5 valeurs et les résultats sont mentionnés dans le tableau 4.17

Tableau 4. 17 résultats de l'essai de ductilité avec l'ajout de polymère

Pourcentage de PP500P (%)	0	2	4	6	8	10
Ductilité (cm) à t= 1h	60	80	97	109	116	116
Ductilité (cm) à t= 2h	60	89	101	115	126	126
Ductilité (cm) à t= 3h	60	91	108	121	132	133



Figure 4. 13. Dispositif de l'essai de ductilité

4. 6. 1. 4. Essai de stabilité au stockage:

L'essai de la stabilité au stockage sert à évaluer la compatibilité du bitume avec le polymère. La différence des points de ramollissement supérieur et inférieur mesurés des 3 parties, est repéré à 2.5°C (voir figure 4. 14). Les résultats sont mentionnés dans le tableau 4.

18



Figure 4. 14. Essai de compatibilité du bitume modifié

Tableau 4. 18. Résultats de l'essai de stabilité au stockage avec l'ajout de polymère

Stabilité au stockage	Différence de point de ramollissement °C				
	2	4	6	8	10
PP500P(%)					
t = 1h	0.7	0.9	1.2	1.6	1.6
t = 2h	0.8	1.2	1.7	1.9	1.9
t = 3h	0.8	1.2	1.5	1.8	2.2

4. 6. 2. Modification par déchets plastiques

Dans cette deuxième partie de l'étude expérimentale, les déchets plastiques déchetés sont ajoutés avec différents pourcentages en poids (2%, 4%, 6%, 8%, 10%) du mélange. Le temps de malaxage est variable (1h, 2h, 3h) et la vitesse et la température de malaxage sont: 700 tour/min, et 175°C. On se propose d'analyser les paramètres suivants du bitume modifié: la pénétrabilité, le point de ramollissement, la ductilité, et la stabilité au stockage.

4. 6. 2. 1. Essai de pénétrabilité:

C'est le même principe que pour le bitume modifié par le polymère et les résultats sont illustrés dans le tableau 4. 19

Tableau 4. 19. Valeurs de pénétrabilité de bitume modifié par déchets plastiques

Déchets plastiques (%)	Pénétrabilité à 25° C (1/10mm)					
	0	2	4	6	8	10
T = 1h	46	45	45	43	42	42
T = 2h	46	44	42	40	38	37
T = 3h	46	44	42	39	37	37

4. 6. 2. 2. Essai de point de ramollissement:

Dans cet essai, les étapes à suivre sont les mêmes que pour le bitume modifié par le polymère et les résultats sont mentionnés dans le tableau 4.20.

Tableau 4. 20 Valeurs de point de ramollissement de bitume modifié par les déchets plastiques

Déchets plastiques (%)	Point de ramollissement (°C)					
	0	2	4	6	8	10
À t = 1h	49	50	52	54	55	55
À t = 2h	49	52	53	55	57	60
À t = 3h	49	53	55	59	61	63

4. 6. 2. 3. Essai de la ductilité:

Le principe de l'essai est déjà montré dans la figure 4.13, le bitume testé est modifié par l'ajout des déchets plastiques, les résultats sont illustrés dans le tableau 4. 21

Tableau 4. 21. Résultats de l'essai de ductilité avec l'ajout de déchets plastiques

Pourcentage de Dp (%)	0	2	4	6	8	10
Ductilité (cm) à t= 1h	60	78	89	99	111	101
Ductilité (cm) à t= 2h	60	78	92	102	113	114
Ductilité (cm) à t= 3h	60	80	97	114	123	126

4. 6. 2. 4. Essai de stabilité au stockage:

L'essai est réalisé selon la figure 4. 14 et les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 4. 22

Tableau 4. 22. Résultats de l'essai de stabilité au stockage avec l'ajout de déchets plastiques

PP500P(%)	2	4	6	8	10
Stabilité à t = 1h	0.7	0.9	1.2	1.6	1.6
Stabilité à t = 2h	0.8	1.2	1.7	1.9	1.9
Stabilité à t = 3h	0.8	1.2	1.5	1.8	2.2

4. 7. Discussion des résultats:

Après avoir tracé les graphes de la variation de la pénétrabilité et le point de ramollissement des bitumes modifiés en fonction des deux additifs (polypropylène et déchets plastiques), voir figure 4. 15, figure 4. 16, figure 4. 17, et figure 4. 18, ainsi que la ductilité et la capacité au stockage des bitumes modifiés par les deux additifs, illustrées successivement dans les figures: 4.19, 4. 20, 4. 21, et 4. 22; une discussion est nécessaire pour voir l'influence de la durée de malaxage, et fixer la durée idéale avec laquelle l'étude expérimentale sera poursuivie.

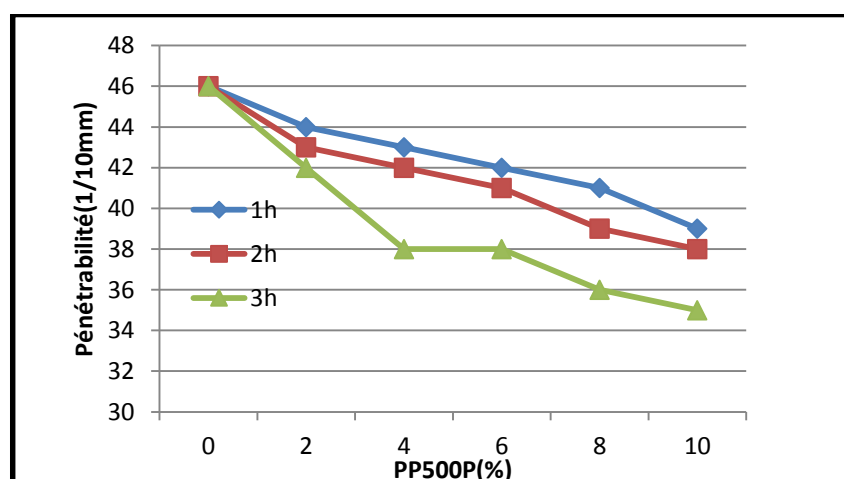


Figure. 4. 15. La pénétrabilité en fonction du pourcentage d'ajout de PP500P

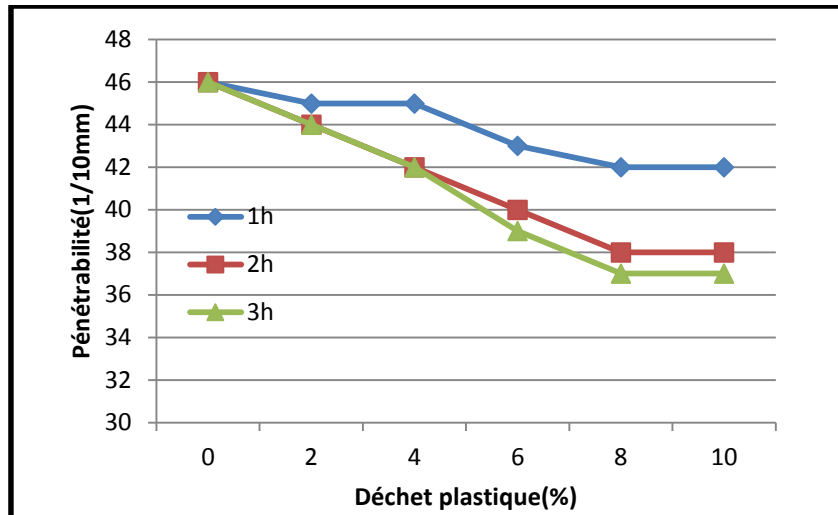


Figure. 4. 16. La pénétrabilité en fonction du déchet plastique

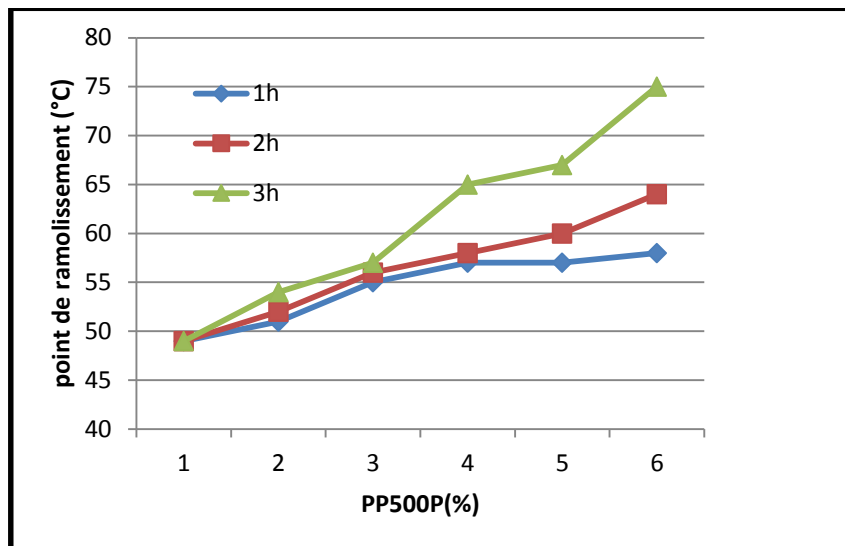


Figure. 4. 17. Le point de ramollissement en fonction de PP500P

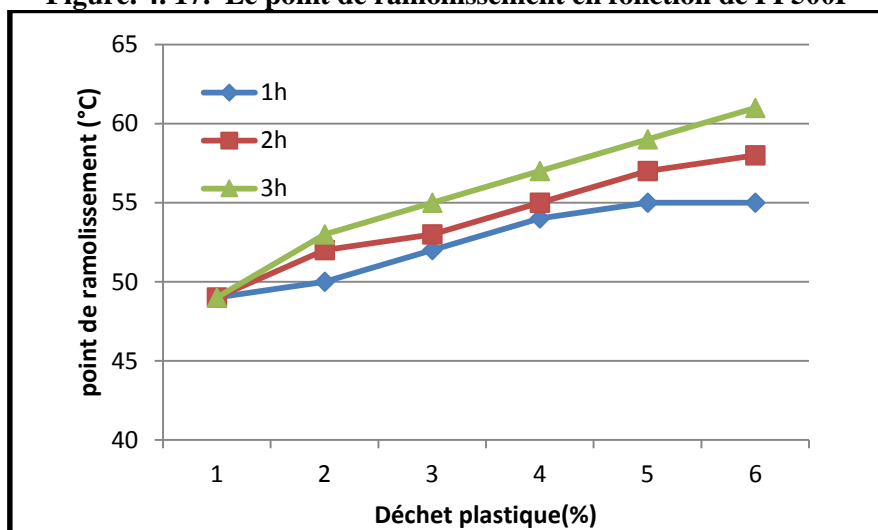


Figure. 4. 18. Le point de ramollissement en fonction du déchet plastique

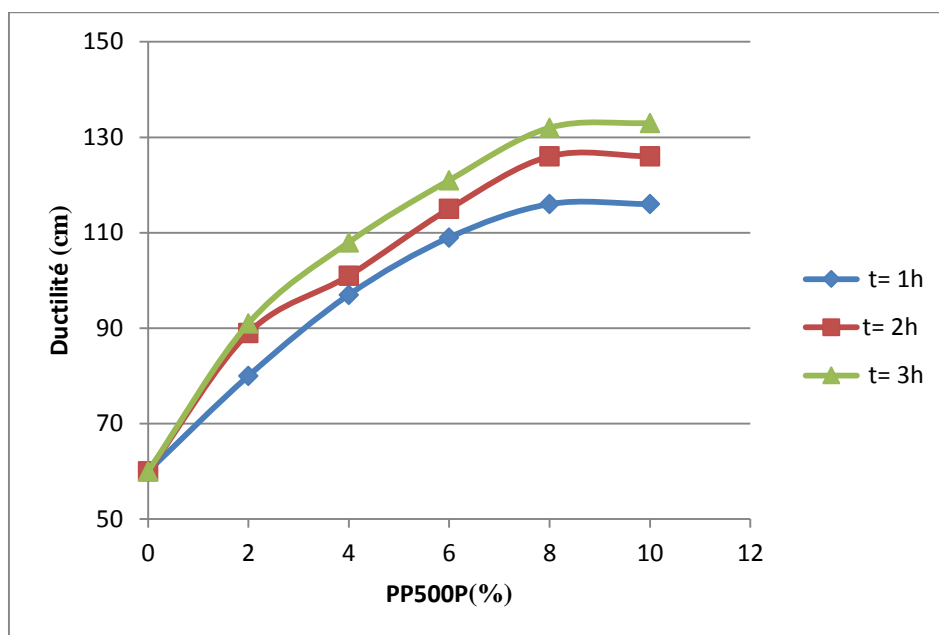


Figure 4. 19. Variation de la ductilité en fonction du polypropylène

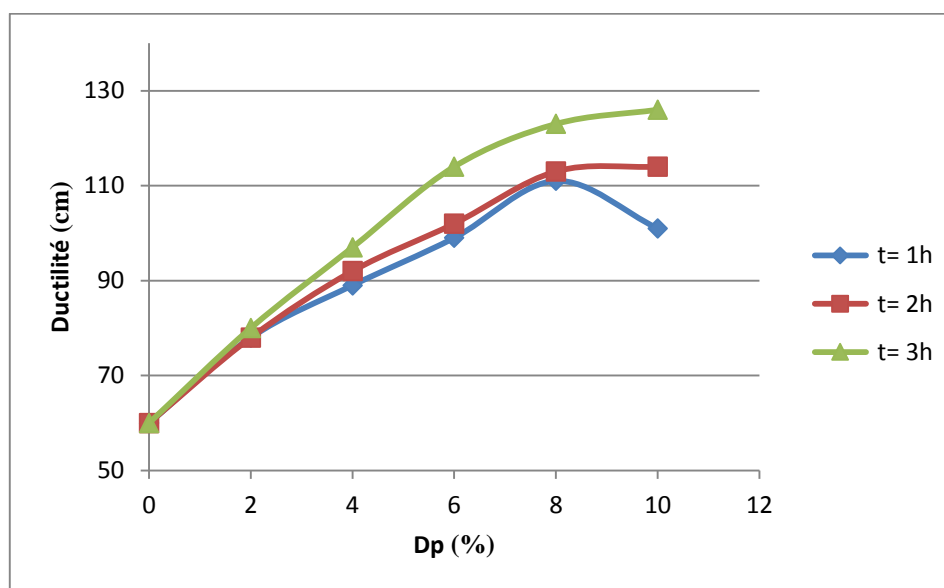


Figure 4. 20. Variation de la ductilité en fonction des déchets plastiques

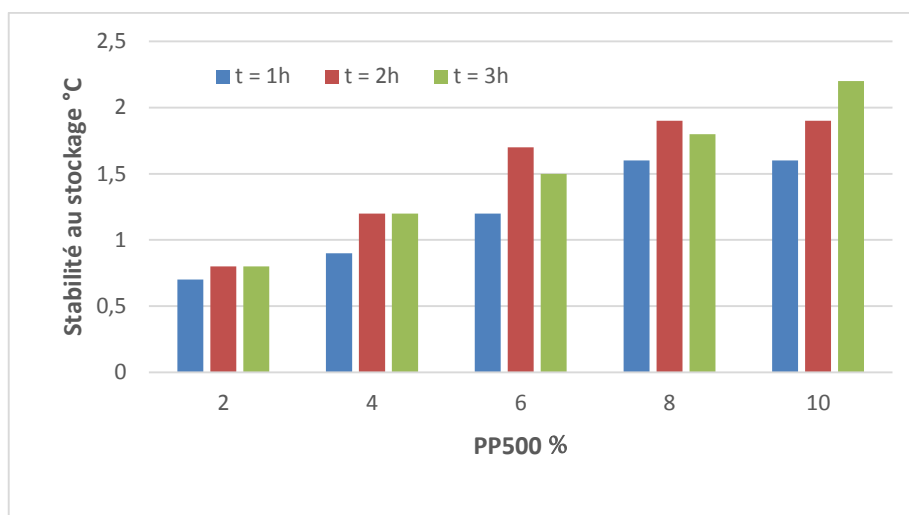


Figure 4. 21. La stabilité au stockage de bitume modifié par le polypropylène

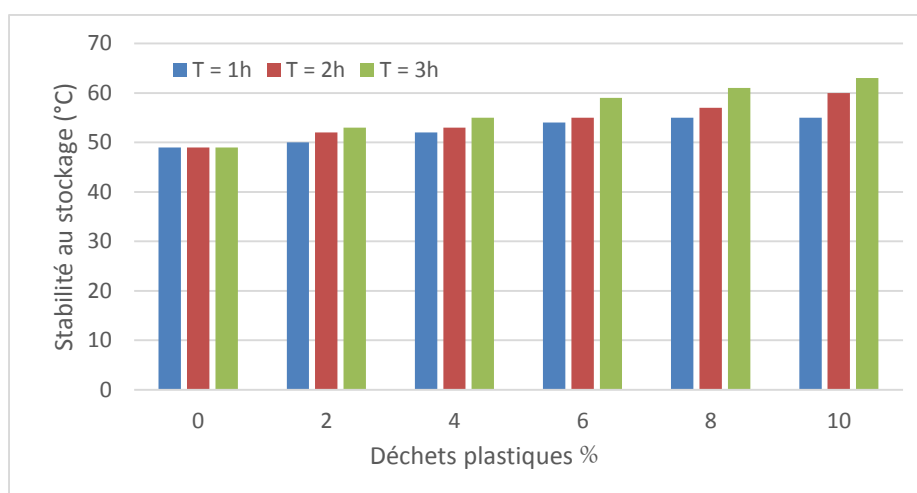


Figure 4. 22. La stabilité au stockage de bitume modifié par le plastique

4. 7. 1. Influence des modificateurs sur la pénétrabilité:

Les résultats illustrés dans la figure. 4. 15, et la figure 4. 16, montrent une diminution de la valeur de pénétrabilité de $46 \times 10^{-1} \text{mm}$ pour le bitume de base à $35 \times 10^{-1} \text{mm}$ pour le PP500P malaxé à 3h, et $37 \times 10^{-1} \text{mm}$ pour les déchets plastiques malaxé à 2h montre l'augmentation de la dureté de ce polymère à l'état intact plus qu'à son état recyclé jusqu'à 10 % de concentration.

Le polymère est malaxé pendant 3heures à une température de 175°C est supérieure à 160°C , il est à l'état fondu; le polymère absorbe une partie du pétrole et libère une fraction de faible poids moléculaire dans le bitume [128, 129], se qui augmente la viscosité de bitume et à la fin de processus après le refroidissement, le mélange durci s'est formé avec l'ajout de

PP500P plus qu'avec l'ajout des déchets plastiques. Le durcissement du bitume est bénéfique, car il augmente la rigidité du matériau ce qui mène à l'augmentation de la capacité de la charge portante, mais peut également conduire à la fissuration si la température est très faible [130]. Ce risque est moins dans le BB modifié par les déchets plastiques, ils sont avantageux vis à vis de la résistance à la fissuration que le polymère, la diminution de la pénétrabilité a une relation directe avec la viscosité, et l'amélioration de la résistance à la sensibilité à la température [131].

4. 7. 2. Influence des modificateurs sur le point de ramollissement

Les résultats obtenus à partir de la figure 4. 17 et la figure 4. 18 montrent qu'il y a une augmentation du point de ramollissement de 49°C de bitume de base à 75°C pour le bitume modifié par le PP500P et 63°C les déchets plastiques jusqu'à 10% de concentration malaxés pendant 3h du temps, l'effet de la modification thermoplastique réagit significativement sur le point de ramollissement que la pénétrabilité [128, 129], ceci est approuvé par la structure interne de l'enrobé formée par le polymère, qui semble être thermodynamiquement stable, et n'affecte pas de manière significative le point de ramollissement [132]. Le PP500P présente une augmentation importante en point de ramollissement que les déchets plastiques, cela confirme que le BB modifié par le polymère avec un point de ramollissement accru, améliore les performances de la chaussée en termes d'orniérage, de la fatigue et de sensibilité à la température [130]. À 8% d'ajout des déchets plastiques pendant 2 heures de malaxage, et à 4% d'ajout de polypropylène PP500P pendant 3heures de malaxage, le bitume présente la même valeur de pénétrabilité (38°C) et aussi la même valeur du point de ramollissement (57°C), c.-à-d. le bitume a besoin de plus de temps de malaxage (3heures) s'il est modifié avec le PP500P, et moins de temps de malaxage (2heures) s'il est modifié avec les déchets plastiques. Ces derniers offrent une moindre variation de point de ramollissement, car il y a une homogénéité obtenue lors du mélange de ce plastomère avec le bitume de base, en raison de faible poids moléculaire [133].

4. 7. 3. Influence des ajouts sur la ductilité

D'après les résultats obtenus dans les figures 4. 19, et 4. 20; les différents dosages de polypropylène et les déchets plastiques réagissent positivement sur la ductilité, plus le temps de malaxage est long, plus la ductilité augmente. Pour un malaxage de 3h, une augmentation de 73 cm pour le bitume malaxé par le PP500P à 3h, et 66 cm pour celui malaxé par les

déchets plastiques. L'augmentation de la ductilité offre au bitume la capacité à se déformer de manière plastique avant de se rompre.

4. 7. 4. Influence des ajouts sur la stabilité au stockage:

Les figures 4. 21, et 4. 22 montrent que le bitume modifié par le polymère et celui modifié par les déchets plastiques pour différents dosages: de 2 à 10 % présentent des valeurs de différences de ramollissement qui sont inférieures à 2. 5°C et cela pour 1h, 2h, et 3h de malaxage, ce qui signifie que les bitumes modifiés possèdent une bonne stabilité au stockage, c.à.d. ce polymère en granulats ou recyclé est très compatible avec le bitume utilisé de Naftal.

Dans une première conclusion; l'effet de polypropylène sur les propriétés mécaniques du bitume malaxé à 3h, est identique à celui de déchets plastiques sur les propriétés mécaniques du bitume malaxé à 2h. Dans tout le reste de l'expérimentale; le temps de malaxage de bitume-PP500P est fixé à 3h, et celui de bitume -déchets plastiques est fixé à 2h.

4. 8. La modification des caractéristiques de l'enrobé bitumineux

La seconde partie expérimentale consiste à analyser l'effet de chaque additif sur la tenue à l'eau, la stabilité Marshall, le fluage, la compacité et le pourcentage des vides des mélanges bitumineux, préparés selon la norme Algérienne (NA5227). Des mélanges bitumineux sont à base de bitume modifié par le polypropylène PP500P malaxés pendant 3heures, et des mélanges bitumineux à base de bitume modifié par les déchets plastiques malaxés pendant 2heures, en différents pourcentages (2%, 4%, 6%, 8%, 10%). Les essais de la modification de bitume et enrobé sont réalisés au laboratoire de l'organisme national de contrôle technique des travaux publics CTTP d'Alger.

4. 8. 1. Appareillage et méthodologie de l'essai Marshall

En Algérie, l'essai Marshall est le plus utilisé pour effectuer l'approche expérimentale aux laboratoires selon la norme (NA5227) afin d'étudier la formulation des enrobés bitumineux, pour cet essai il faut confectionner 4 éprouvettes de l'enrobé bitumineux:

- 2 éprouvettes pour déterminer la stabilité
- 1 éprouvette pour déterminer la densité
- 1 éprouvette comme échantillon témoin

Ces 4 éprouvettes sont façonnées pour chaque type de bitume modifié; par polymère et par déchets plastiques, ce qui donne le nombre de 8 éprouvettes pour chaque pourcentage de

chaque améliorant. Les échantillons sont confectionnés avec des moules de dimensions de : 101.6 mm de diamètre, 1200g de poids du moule plein, et 63 mm de hauteur.

Les éprouvettes sont compactées à la température de 160°C par l'exécution de 50 coups par face selon les exigences de la norme, puis elles sont mises pendant 40 min en immersion à 60 °C.

La signification de la valeur enregistrée de la force expérimentale est la stabilité Marshall à l'écrasement qui est exprimée en (KN). La déformation qui correspond à la force maximale de l'écrasement, est le paramètre de fluage exprimé en (mm). Le quotient Marshall qui signifie la résistance aux déformations permanentes, est le rapport entre le facteur stabilité Marshall et le facteur fluage [89]. La figure 4. 33 et figure 4. 24 illustrent quelques étapes de l'essai Marshall.



Figure 4. 23. Préparation de l'échantillon de l'enrobé bitumineux à base d'un bitume modifié



Figure 4. 24. Compactage et écrasement de l'échantillon

4. 8. 2. Principe et méthodologie de l'essai DURIEZ

Pour tous les enrobés bitumineux à chaud l'essai DURIEZ est utilisé pour analyser la teneur à l'eau de cet enrobé, ou l'adhésivité agrégats-liant. Pour ce faire, avec l'enrobé, 12 éprouvettes cylindriques sont fabriquées avec la machine giratoire en appliquant l'énergie de 40 girations et la vitesse de 50mm/min:

- 5 sont immergées dans l'eau pendant 7 jours
- 5 sont stockées à sec pendant 7 jours
- 2 pour évaluer la masse volumique.

R': la résistance à la compression de l'éprouvette immergée dans l'eau pendant 7 jours, après la mise à l'air libre dans une température de (20 - 25°C), puis en immersion à 60°C pendant 40 min. L'échantillon est ensuite écrasé.

R: la résistance de l'éprouvette à la compression conservée à sec (20 - 25°C) pendant 24 h, puis 40 min sous température de 60°C, et écrasée par la suite.

Dans la presse hydraulique les échantillons sont passés à l'écrasement, la résistance à la compression simple par la pression appliquée est le rapport de cette pression appliquée et la section de l'éprouvette, tel que: la tenue à l'eau du béton bitumineux à chaud, est la valeur du rapport R'/R, où les valeurs obtenues sont discutées selon les spécifications de la norme EN 12697-12, la figure 4. 25, illustre 2 étapes de cet essai:



Figure 4. 25 Étape de l'essai Duriez réalisé

4. 9. Résultats obtenus

4. 9. 1. Résultats de l'essai Marshall

Les résultats obtenus de l'essai Marshall sont classifiés en deux catégories, les résultats de l'essai Marshall sur l'enrobé bitumineux modifié par l'ajout du polymère, et ceux de l'essai Marshall sur l'enrobé bitumineux modifié par l'ajout des déchets plastiques.

4. 9. 1. 1. Modification de l'enrobé bitumineux par le polymère PP500P

Les résultats obtenus de la stabilité Marshall, le fluage, le quotient Marshall, la compacité, et le pourcentage des vides sont mentionnés dans le tableau 4. 23:

Tableau 4. 23 Résultats de l'essai Marshall sur l'enrobé modifié par le PP500P

Ajout de PP500P(%)	Stabilité Marshall (KN)	Fluage (mm)	Quotient Marshall (KN/mm)	compacité (%)	Pourcentage des vides (%)
Sans additif	10.82	3.37	3.21	95	5
2	13.27	3.20	4.14	96	4
4	14.02	2.95	4.75	96	4
6	14.98	2.67	5.61	97	3
8	15.51	3.18	4.87	98	2
10	15.52	3.91	3.96	99	1
Spécifications	>10.5	<4	-	95 - 97	3 - 5

4. 9. 1. 2. Modification de l'enrobé bitumineux par les déchets plastiques

Les résultats obtenus des paramètres analysés avec l'essai Marshall sont mentionnés dans le tableau 4. 24

Tableau 4. 24 Résultats de l'essai Marshall sur l'enrobé modifié par les déchets plastiques

Ajout des déchets plastiques(%)	Stabilité Marshall (KN)	Fluage (mm)	Quotient Marshall (KN/mm)	compacité (%)	Pourcentage Des vides (%)
Sans additif	10.82	3.37	3.21	95	5
2	12.70	3.42	3.71	96	4
4	12.65	3.71	3.40	96	4
6	13.16	3.68	3.57	97	3
8	13.85	3.5	3.95	97	3
10	14.01	4.13	3.39	98	2
Spécifications	>10.5	<4	-	95 - 97	3 - 5

4. 9. 2. Résultats de l'essai DURIEZ

Après la réalisation de l'essai Duriez, les résultats de la tenue à l'eau du béton bitumineux modifié à base de polymère sont illustrés dans le tableau 4. 25

Tableau 4. 25 Résultats de tenue à l'eau en fonction de l'ajout de polypropylène

Pourcentage d'ajout de PP500P (%)	0	2	4	6	8	10	Spécification de CTTP
Tenue à l'eau	0.76	0.82	0.81	0.82	0.83	0.85	> 0.8

Les résultats de la tenue à l'eau du béton bitumineux modifié à base de déchets plastiques sont mentionnés dans le tableau 4. 26

Tableau 4. 26 Résultats de tenue à l'eau en fonction de l'ajout de déchets plastiques

Pourcentage d'ajout de déchets plastiques (%)	0	2	4	6	8	10	Spécification de CTTP
Tenue à l'eau	0.76	0.78	0.80	0.81	0.82	0.79	> 0.8

4. 10. Discussion

4. 10. 1. Influence du polypropylène et des déchets plastiques sur la stabilité Marshall:

L'évaluation de la stabilité Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de polypropylène est illustrée dans la figure 4. 26, et la variation de ce paramètre en fonction du pourcentage d'ajout de déchets plastiques est illustrée dans la figure 4. 27

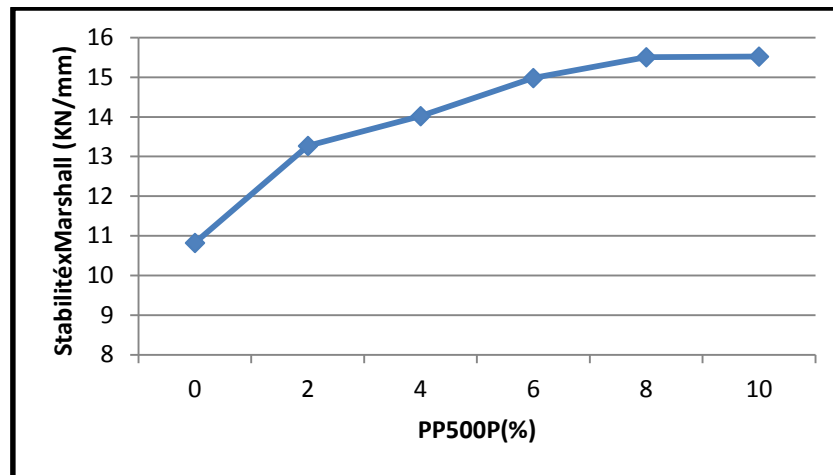


Figure 4. 26 La stabilité Marshall en fonction de l'ajout de polypropylène

D'après les courbes représentées dans les figures; 4. 26 et 4. 27, nous constatons une augmentation progressive de la stabilité Marshall du béton bitumineux modifié, à partir de la valeur minimale 10.82KN obtenue pour le BB de base, à 15.52KN pour le PP500P, et à 14.01KN pour les déchets plastiques à 10% d'ajout des améliorants, le PP500P donne une stabilité supérieure à celle de déchet plastique qui réagit aussi positivement sur la stabilité Marshall. L'augmentation de la stabilité Marshall de BB modifié est expliquée par la bonne adhérence développée entre le bitume et les agrégats revêtus de PP500P ou de plastique en raison de la liaison intermoléculaire, ces attractions intermoléculaires ont amélioré la résistance de bitume [134]. Cette amélioration est réussite par l'agglomération, de l'agrégation ou de la floculation des particules dans le système multi phase [135]. Les forces interarticulaires deviennent prédominantes ce qui contribue à l'amélioration de bitume et donc la stabilité et la durabilité de l'enrobé bitumineux [136].

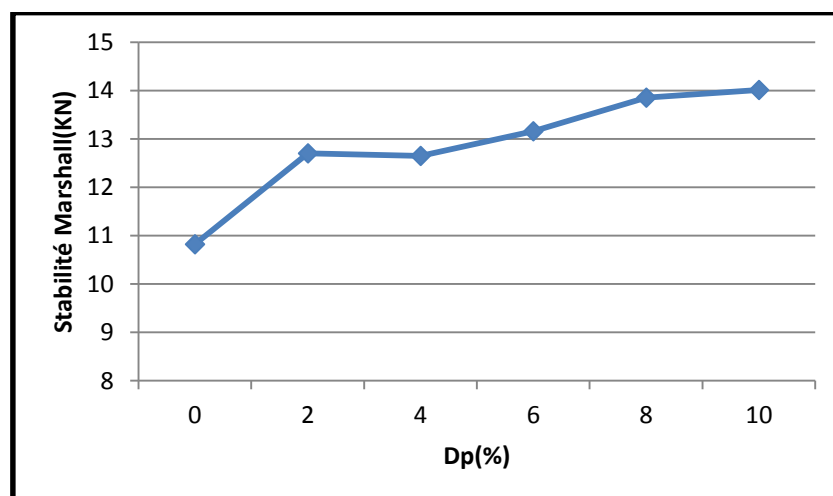


Figure 4. 27 La stabilité Marshall en fonction de l'ajout de déchet plastique

4. 10. 2. Influence d polypropylène et les déchets plastiques sur le fluage

La variation du fluage de l'enrobé bitumineux modifié à base de polypropylène est représentée dans la figure 4. 28, et la variation de fluage en fonction de pourcentage de déchets plastiques est illustrée dans la figure 4. 29

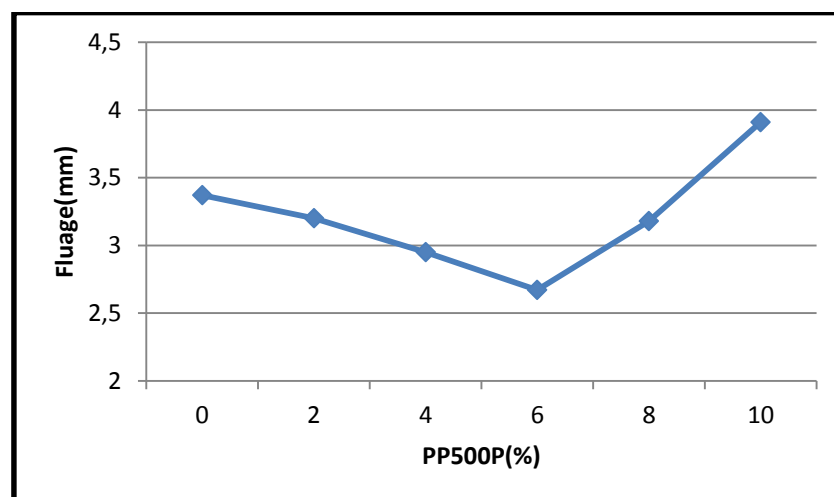


Figure 4. 28. Le fluage en fonction de l'ajout de polypropylène

D'après les deux courbes de la figure 4. 28, et de la figure 4. 29 de fluage, on constate une diminution de la valeur de 3.37mm pour le BB témoin (sans additif) à une valeur minimale de 2.67mm avec ajout de 6% de PP500P, et 3.5mm à 8% d'ajout de déchet plastique. L'ajout de PP500P réagit positivement sur le fluage, avec des valeurs normalisées, l'ajout de 2%, 4%, 6%, et 8% de déchets plastiques réagit positivement sur le fluage des bétons bitumineux. Ce comportement de BB modifié revient à la nature de l'améliorant, et aussi la structure interne de bitume de base qui joue un rôle clé [133, 137], cette variation des valeurs de fluage pourrait être attribuée à la rigidité accrue de bitume modifié au polymère, qui améliore sa résistance à la déformation permanente, ce qui donne un enrobé bitumineux relativement plus rigide qu'un enrobé conventionnel [41, 138].

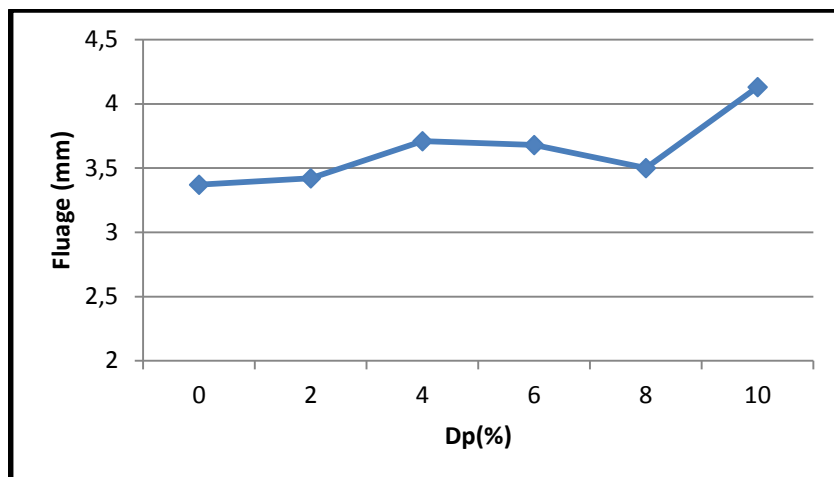


Figure 4. 29 Le fluage en fonction de l'ajout de déchet plastique

4. 10. 3. Influence de l'ajout de polypropylène et l'ajout des déchets plastiques sur la compacité de l'enrobé bitumineux modifié

La variation de la compacité de l'enrobé bitumineux modifié selon l'ajout de polypropylène et des déchets plastiques est représentée dans la figure 4. 30.

On constate que la compacité s'améliore de 95% du mélange initiale à 97% pour 6% d'ajout de PP500P, et à 8% d'ajout de déchets plastiques. Elle enregistre des valeurs défavorables à 10% d'ajout de chaque améliorant. Cette variation de la compacité due au comportement du bitume modifié qui a subi une dégradation réversible de la structure que l'on trouve couramment dans le système multi phase du bitume modifié à chaud par un polymère [135, 137], les concentrations successives de 6% et 8% de PP500P et déchets plastiques ont formé le BB idéal au terme de compactage, moins de pores entre les agrégats engendré par une diminution de risque d'ornièrage [139].

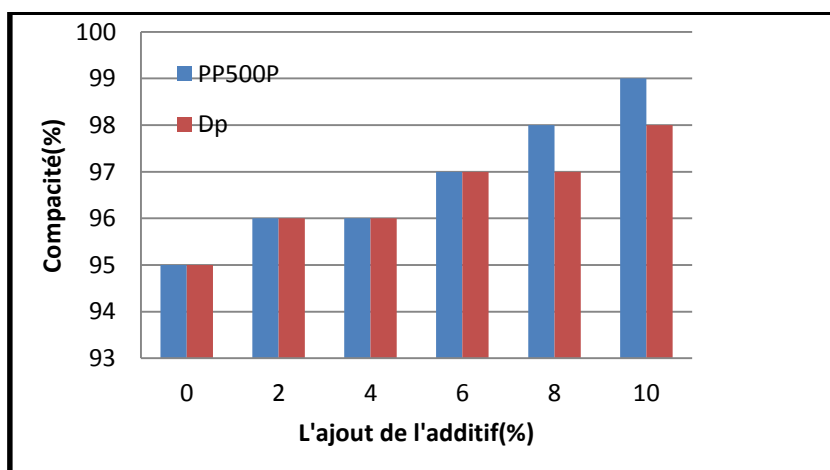


Figure 4. 30 La variation de la compacité en fonction du polypropylène et les déchets plastiques

4. 10. 4. Influence de polypropylène et les déchets plastiques sur le pourcentage des vides de béton bitumineux modifié.

La figure 4. 31 représente l'évaluation de pourcentage des vides en fonction de polypropylène et de déchets plastiques.

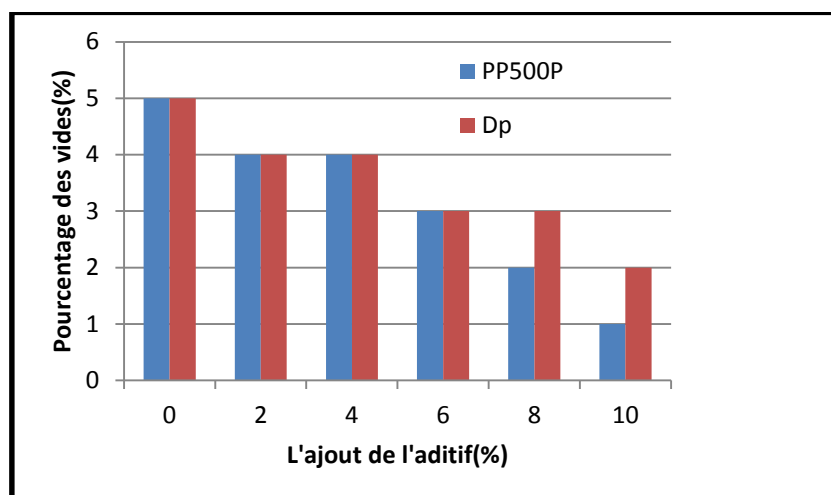


Figure 4. 31 La variation de pourcentage des vides en fonction de polypropylène et des déchets plastiques

Dans la figure 4. 31, les vides sont présents à 5% dans un enrobé ordinaire (échantillon témoin), ils diminuent à 3% de vides pour un dosage de 6% pour les deux additifs, au delà, de ce dosage le polymère donne des valeurs défavorables. Les valeurs favorables des vides d'air qui sont entre (3 et 6%) attribuent à la stabilité du mélange modifié, qui peut être facilement compacté, et par conséquent, le niveau de compactage optimal atteint [120].

4. 10. 5. Influence du polypropylène et les déchets plastiques sur le quotient Marshall de béton bitumineux modifié.

La figure 4. 32, montre la variation de paramètre quotient Marshall en fonction du pourcentage d'ajout de polymère, et la figure 4. 33 illustre la variation de ce paramètre en fonction de pourcentage d'ajout de déchets plastiques.

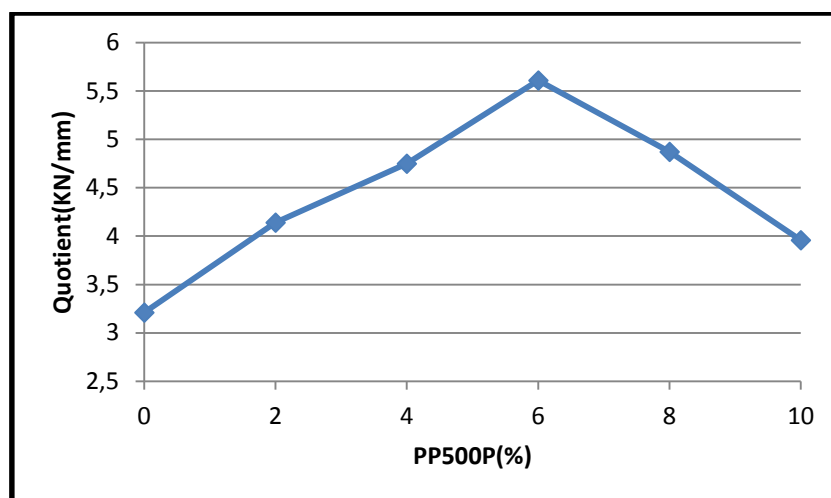


Figure 4. 32 L'effet de polypropylène sur le quotient Marshall de l'enrobé bitumineux

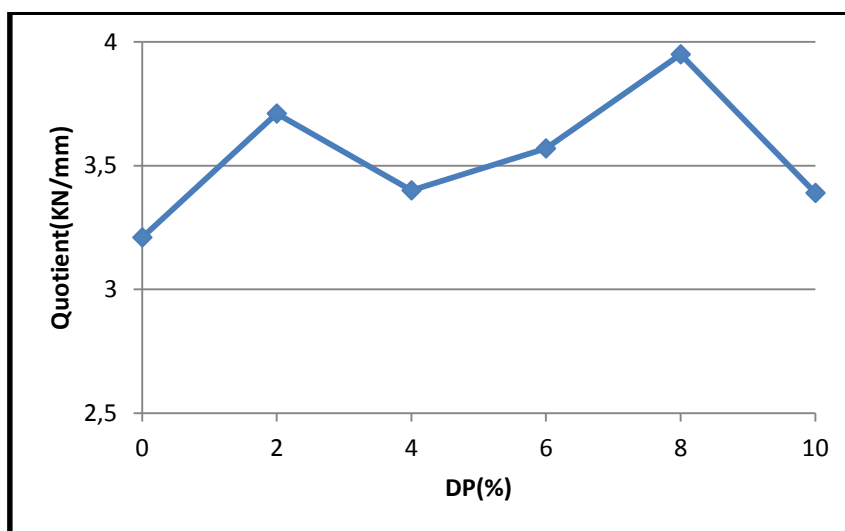


Figure 4. 33 L'effet de déchets plastiques sur le quotient Marshall de l'enrobé bitumineux

D'après les deux courbes illustrées dans les figures 4. 22, et 4. 23: on constate que le quotient Marshall fluctue entre 3. 21 KN/mm (sans ajout) et 3. 96 KN/mm (à 10% d'ajout de PP500P), avec un pic de 5.61KN/mm, (à 6% d'ajout de PP500P). En ce qui concerne les déchets plastiques, ont fait varier ce paramètre de la même valeur de l'échantillon témoin à 3.39 KN/mm à 10%, d'ajout de déchets plastiques, les valeurs de ce paramètre dépendent directement de la stabilité Marshall et du fluage; donc le pic enregistré est dû à la valeur minimale de fluage de 2.67mm. On peut dire que l'ajout de PP500P granulat ou recyclé en déchet plastique a un effet positif sur le quotient du béton bitumineux. Les valeurs améliorées de ce paramètre du BB indiquent qu'une plus grande capacité à résister à la déformation de fluage de ce BB, et que le Quotient Marshall est la mesure de la déformation permanente en service [120, 140].

4. 10. 6. Influence de polymère et les déchets plastiques sur la tenue à l'eau

La figure 4. 34 représente la variation de la tenue à l'eau des enrobés bitumineux modifiés à chaud par le polypropylène PP500P en granulats et les déchets plastiques.

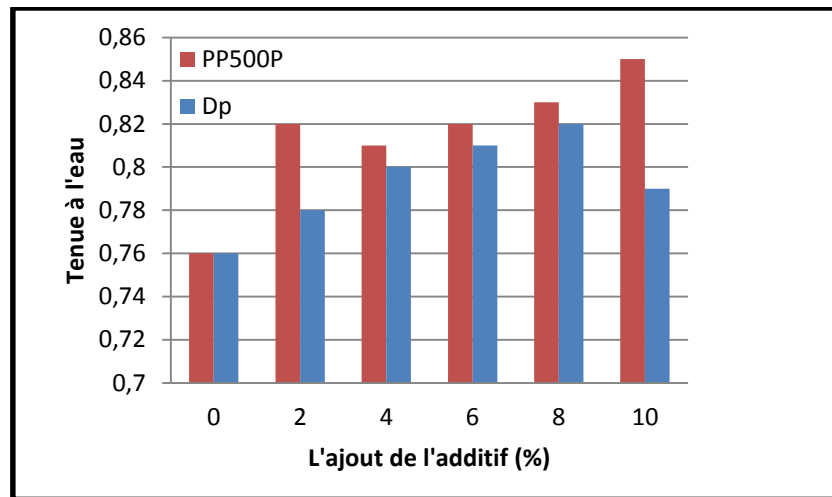


Figure 4. 34 La comparaison de la variation de la tenue à l'eau en fonction de PP500P et en fonction de déchets plastiques

La figure 4. 34, montre la variation de la tenue à l'eau en fonction de l'ajout de chaque additif, le mélange sans ajout n'a pas une très bonne tenue à l'eau (0.76) inférieur à 0.8 (spécification de CTP), en ajoutant le PP500P la tenue à l'eau augmente et enregistre des valeurs variables, pour atteindre 0.85 à 10% d'ajout de PP500P. La tenue à l'eau est de 0.82 à 8% d'ajout de déchets plastiques puis elle diminue à 0.79 pour 10% d'ajout des déchets plastiques. Donc, l'effet de l'ajout des déchets plastiques au béton bitumineux sur la tenue à l'eau de cet enrobé est positif, mais il est limité à 8%. Pendant l'essai DURIEZ et après l'écrasement de l'échantillon, si des agrégats cassés sont apparus dans l'éprouvette, c'est un indicateur de l'adhésivité agrégat-liant, cela signifie que l'imperméabilité de l'enrobé est améliorée [141], et l'étanchéité du BB s'accroît, traduit par une bonne tenue à l'humidité, c.-à-d. ce mélange diminue les dégâts causées par l'humidité, et il est recommandé pour les revêtements dans les régions humides [42].

4. 11. Conclusion

A l'issue de ce chapitre, nous pouvons conclure que l'étude expérimentale revêt une importance significative en assurant une cohérence entre la théorie et la pratique et constitue une validation de certaines hypothèses générales.

Elle est aussi considérée comme la partie la plus délicate à réaliser, au vu des difficultés rencontrées durant la saison estivale, où la température de l'environnement influence les essais mécaniques, et le temps mis pour achever une étape, qui consiste à faire fondre le bitume pendant 2h, et le malaxer pendant 3h.

L'expertise et l'essai réalisé sur terrain ainsi que l'étude expérimentale de l'analyse du comportement de l'enrobé bitumineux (modifié et témoin), permettent de tirer les conclusions suivantes:

- Le calcul des renforcements de la RN25, donne une durée de vie de 10 ans, tandis que l'intervalle entre deux procédures de réhabilitation est de 4 ans à 7 ans.
- Les dégradations constatées sur la RN25 sont influencées par l'effet du trafic de poids lourds, et avancées sous l'effet de l'environnement.
- Le temps de malaxage et la température influencent le polymère recyclé, de 3h en forme de graine, à 2h en forme recyclé et déchiquetée.
- Le bitume modifié par le polymère ou les déchets plastiques est ductile.
- Le bitume modifié est compatible avec les deux améliorants, dont il est stable dans les unités de stockages des bitumes avant la confection des enrobés, se qui facilite et favorise son emploi.
- Le béton bitumineux modifié par 10% de PP500P ou 10% de déchets plastiques, présente une stabilité Marshall améliorée, qui résistera mieux aux déformations sous l'action du trafic qui est bénéfique vis-à-vis de la résistance à l'orniérage, et les déformations internes après la mise en service.
- L'ajout du polymère à 6% a donné une réduction importante de fluage de béton bitumineux, et une valeur défavorable est enregistrée à 10% d'ajout de déchets plastiques.
- La compacité est améliorée jusqu'au dosage de 6% d'ajout de polymère et jusqu'à 8% d'ajout de déchets plastiques, les autres dosages donnent des valeurs défavorables de la compacité.
- Le dosage de plus de 8% et 10% de polymère a un effet négatif sur le fluage du BB.
- Un bon pourcentage des vides dans le béton bitumineux jusqu'à 6% d'ajout de polymère, et aussi jusqu'à 8% d'ajout de déchets plastiques, les autres dosages donnent des valeurs défavorables de ce paramètre.

- Le mélange témoin de la classe 40/50 n'a pas une bonne tenue à l'eau, et par l'ajout de (2, 4, 6, et 8 %) de polypropylène, et l'ajout de (2, 4, et 6 %) de déchets plastiques, ce paramètre s'améliore et les autres pourcentages donnent des valeurs défavorables.
- L'ajout de plus de 8% de déchets plastiques agit négativement sur la tenue à l'eau.

Conclusion générale

La chaussée routière est un ouvrage très important, lié directement aux sociétés et à l'économie des pays, la conception de ces infrastructures implique nécessairement l'emploi de la matière première et des ressources non renouvelables. En prenant en compte les contraintes écologiques, et le défi actuel vers des sociétés dé-carbonées, l'engagement vers la durabilité est très crucial, dont le domaine routier fait partie de cet engagement, l'investissement dans la durabilité exige des efforts et des moyens considérables dans la technologie et la sensibilisation de la société pour rendre cette politique prioritaire.

Les agents climatiques, les matériaux utilisés, le trafic routier notamment de poids lourds et le sol support, ont une influence sur la stabilité du corps de chaussée. A l'instar du réseau routier national, plusieurs routes de la Kabylie soumises à ces différents facteurs, subissent divers endommagements, de nombreuses dégradations, et même des ruptures sont observées au niveau de leur couche de roulement. L'amélioration des caractéristiques mécaniques du BB est l'une des solutions identifiées illustrée par notre étude de cas sur la RN25; dont une partie de cette analyse est fondée sur les essais mécaniques de la rigidité; Marshall et Duriez.

A l'issue de cette étude, on pourra tirer les conclusions suivantes :

- Une possibilité garantie d'améliorer le comportement de l'enrobé bitumineux par la modification des ses propriétés mécaniques.
- Le polypropylène est plus performant en graines qu'en fibres, mais ces derniers améliorent aussi les propriétés mécaniques du BB.
- L'enrobé amélioré par le polymère ou le plastique présente une meilleure résistance à l'humidité.
- Une possibilité d'améliorer les caractéristiques rhéologiques du bitume.
- Le bitume de NAFTAL est compatible avec les matériaux hydrocarbonés en forme de graines et de fibres tels que le polymère et le plastique.
- Le bitume modifié présente une résistance au stockage grâce à sa caractéristique de compatibilité avec le polymère ou les déchets plastiques.
- Une possibilité de valoriser les déchets plastiques dans le domaine routier.
- Une possibilité de les éliminer de la nature en toute sécurité.

- Le recyclage des matériaux contribue à la construction des chaussées plus rigides et durables, donc une réduction considérable de l'utilisation des ressources non renouvelable et les émissions des gaz dans l'atmosphère.

La recherche explicite et la déduction implicite de ce sujet nous ont conduits à finaliser cette thèse par des perspectives qui peuvent apporter une contribution à l'évolution future des revêtements de chaussées souples, particulièrement en Kabylie:

- Procéder à un investissement dans les moyens humains et matériels, par l'installation de laboratoires convenablement équipés, dont le rythme opérationnel soit continu 24/24 heures et encourager la formation dans le domaine des produits bitumineux.
- Prendre en considération les données réelles du site générales et particulières d'une région à l'autre en Kabylie, pour avoir la formulation idéale, et pouvoir confectionner l'enrobé bitumineux adéquat qui répond aux spécifications et résister aux différentes sollicitations.
- Pour la réalisation à grand échelle, il est très important de valider la formulation optimale de l'enrobé amélioré, non seulement par la réalisation les essais appropriés, mais aussi, par l'utilisation d'un modèle réduit à petite échelle, comprenant toutes les couches, y compris le sol support, tout en appliquant des actions et des charges de magnitude réelles.
- Tenir compte des températures estivales maximales induites par le changement climatique.
- Dans le contexte du recyclage, il faut effectuer des collaborations avec les unités régionales de ramassage des déchets plastiques pour préparer des enrobés bio-composites.
- Procéder au revêtement autoréparable à drainage écologique comme les fossés végétaux.
- Valoriser l'ouvrage routier par la conception des chaussées solaires, surtout les autoroutes qui produisent de l'énergie renouvelable telle que l'électricité, pour alimenter l'éclairage public, les feux de circulation, recharger les véhicules électriques prochainement et pour être injectée dans les réseaux électriques proches.
- Opter pour l'emplacement des connecteurs pour la transmission immédiate de l'état réelle de la route, le trafic, et la météo, afin d'optimiser la gestion de ces infrastructures, et aboutir au but de confort et de sécurité.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - Madeleine Boudoux d'Hautefeuille Espaces et sociétés 1/2014, la relation entre la route et développement n°156-157, p. 177-195.
- [2] - Moleaara, A.A.A., Durable and sustainable Road Constructions for Developing Countries, Procedia Engineering, n° 54/2013 p. 69-81.
- [3] - CORTE. J, Conception et dimensionnement des structures de chaussées-guide technique, LCPC, SETRA, 1994, p 260.
- [4] - Hornych, P, Etude expérimentale et modélisation du comportement des matériaux de chaussées non traités. Thèse d'habilitation, 2008, Ecole doctorale des sciences physique et de l'ingénieur de l'Université Bordeaux I.
- [5] - Hornych, P, Cyrille Chazallon, Fatima Allou, Absamad El Abd, Prédiction of permanent deformations of unbound granular materials in low traffic pavements. Roads Materials and pavement Design n°8/4, pp 643-668
- [6] - Hu. S, Fujie. Z, Lubinda. F. W, Development of a viscoelastic finite element tool for the asphalt pavement low temperature cracking analysis, Road Materials and Pavement Design, 10/2009, pp 833-858.
- [7] - Sayegh.G, Contribution à l'étude des propriétés viscoélastiques des bitumes purs et des bétons bitumineux, Université de Paris, 1996.
- [8] - Salasca. S, Phénomène de contact dans les chaussées en béton, Modélisation théorique et validation expérimentale, Thèse de doctorat, 1998, Ecole centrale de Nantes éd.
- [9] - Elabd. A, Hornych. P, Denis. B, Denis. A, a simplified method of prediction of pavement deformations of unbound pavement layers, 6th International symposium on pavement unbound, 2004.
- [10] - Le Boursicaud. V, Nouvelles utilisations des mesures de bassin de déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées, Thèse de doctorat, 2018, l'école centrale de Nantes, Comue Université Bretagne Loire.
- [11] - Bertrand.P, Durabilité mécanique du collage blanc sur noir dans les chaussées, Matériaux et structure mécanique, Thèse de doctorat, 2004, Université de, école centrale de Nantes, Université de Nantes.
- [12] - Pouteau. B, Chabot A, De Larrard. F, JM Balay fatigue test and mechanical study of adhesion between concrete and asphalt, 9th International symposium on concrete roads, 2004, Istanbul, Turkey.
- [13] - Nacer. H, Méthode de résolution de M4 - 5n par éléments finis mixtes pour l'analyse des chaussées avec discontinuité, 2016, Institut français des sciences et technologies des transports de l'aménagement et des réseaux.
- [14] - De Boissoudy. A, Appareils d'auscultation, le déflectographe 04, Bulletin de liaison laboratoires des Ponts et chaussées n°129, janvier-février.
- [15] - Mouazen. M, Évolution des propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux vers une loi vieillissement et viscosité, Thèse de doctorat, 199 p, 2011, L'école nationale supérieure des mines de Paris.
- [16] - Di Benedetto. H, Corte. J.F, Matériaux routier bitumineux: construction et propriétés thermomécaniques des mélanges. Collection traité mécanique et ingénierie des matériaux éd, Hermès sciences.
- [17] - Al- Qadi. I, Scarpas. T, Loizos. A, Pavement Cracking: mechanisms, modeling, detection, test and case histories, 6th Rilem conference on cracking pavements, 2008, CRC press balkema, Chicago, USA.

- [18] - CIM béton, Chaussées composites en béton de ciment: volume 1: Structures neuves en bac colle sur gb, Technical report, Guide de dimensionnement. Collection Technique CIM béton, 2009.
- [19] - De Larrard. F, Chabot. A, Sedran. T, Pouteau. B, Recent developments in french concrete pavement technology- global construction: Ultimate concrete opportunities.5-7July 2005, Proceedings of the international conference on concrete for transportation infrastructure, p19-26 Dundee, Scotland.
- [20] - Diab. A, Singh. D, Pais. JC, Moisture susceptibility of asphalt mixes, 4th conference of transportation research, group of India (CTRG), december 2017, Mumbai, India.
- [21] - Tran.TT, Endommagement des enrobés bitumineux soumis à des cycles gel/dégel, Thèse de doctorat, 2020, L'école Nationale des travaux Publics de l'état, France.
- [22] - Chabot. F, Hamoum. F, Hun. M, a 4pt bending bond test approach to evaluate water effect in a composite beam, proposed to european journal of environment and civil engineering EJECE 2016c.
- [23] - Castaneda. Pinzon. E.A, Contribution de méthode non destructives de l'effet de l'eau sur l'enrobé bitumineux, Thèse de doctorat, 2004, université de Nantes.
- [24] - Haddadi. S, Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des enrobés bitumineux. Thèse de doctorat, 2007, Université des sciences et de la technologie houari boumediene, Alger.
- [25] - Saunier. J, Contribution à l'étude des propriétés rhéologiques des enrobés bitumineux: Thèse de doctorat, 1968, Faculté Louis-Jean.
- [26] - Dukatz. E. L, Aggregate properties related to pavement performance, in proceedings of the association of asphalt paying technologiste, 1989, 58, pp 492-501.
- [27] - Topal. A, Sengoz. B, Détermination of fine aggregate angularity in relation with the resistance to rutting of hot-mix asphalt, Construction and building materials, 19(2), 155-163,2005.
- [28] - Bertrand. L, et Lepert.P, Catalogue des dégradations de surface de chaussées: méthode d'essai n°52, Laboratoire central des ponts et chaussées, 1998.
- [29] - Hadidane. H, Contribution à l'amélioration du comportement des corps de chaussées avec l'utilisation des matériaux recyclés, Thèse de doctorat, 2018, Université d'Annaba.
- [30] - Beghin. Alain, Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants, Thèse de doctorat, 2003, Université de paris 6, France, 190p.
- [31] - Elaroui. Y, Module complexe du béton bitumineux, PFE, DOI: 10.13140/RG.2.2.19120.92165, 2019.
- [32] - Bodin. D, Pijaudier-Cabot, De la roche. C, Piau. JM, Continuum damage approach to asphalt concrete modelling, Journal of engineering mechanics, 2004, 130(6),700-708.
- [33] -Beghin. A, Étude de la rupture des bitumes à basse température: influences des facteurs de composition de la rhéologie des liants, Thèse de doctorat, 2003, Université de Paris VI.
- [34] - Maillard. S, Hammoum. F, Gaillet. L, Such.C, Comportement à la rupture du bitume en film mince sous chargement répété - approches par des méthodes de control non destructif, 2003, journées des sciences de l'ingénieur.
- [35] - Florence. C, Fore. G, Tamgany.P, Senier. JY, Ehrilacher. A, Design of a new laboratory test simulating the reflective cracking in a pavement with cement treaded bases, cracking in pavement, 5th international RILEM conference, 2004, liège, france.
- [36] - Chabot. A, Tran, Q.D; Pouteau, B, Simplified of a modelling of a cracked composite pavement, First international conference on failure analysis, 2004, lisbonne, Portugal.
- [37] - Tamagny. P, Wendling, L; Piau, J.M;, A new explanation of pavement cracking from top o bottom: the visco-elasticity of asphalt materials, Craking pavement, the 5th international RILEM conference, 2004, liège, France.

- [38] - Nesnaks. K, et Nunn. M, A model for the top-down reflection cracking in composite pavement, Cracking in pavement, the 5th international RILEM conference, 2004, liège, France.
- [39] - Berthier Jean, Projet et constructions de route , <http://197.14.51.10:81/pmb/GENIE%20CIVIL/TECHNIQUES%20PARTICULIERES/c5500.pdf>
- [40] - André-Gilles Dumont, Jean-Claude Turtschy, Thierry Pucci, Marc Fontana, Winterthur, Romanel , Ivan Scazziga, Analyse des modèles de comportement des chaussées, Laboratoire des voies de circulation LAVOC, EPF Lausanne, n°11/99, juillet 2001.
- [41] - Zainab Ahmed Alkaisi, Effect of high temperature and traffic loading on rutting performance of flexible pavement, Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 32(2018) 1-4, <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2018.04.005>
- [42] - BAAJ Hassan. Comportement à la fatigue des matériaux granulaires traités aux matériaux hydrocarbonés. Thèse de Doctorat: INSA Lyon 2002, 199 p.
- [43] - Chabot.A, Hun. M, Hammoum. F, Mécanical analysis of a mixed mode debonding test for composite pavements, Construction and building materials, 40, Marsh 2013, (1076-1087).
- [44] - M. subba REDDY, P. SRINIVAsulu reddy, G. VENKATA subbaiah et H. Venkata Subbaiah, Effect of plastic pollution on environment, Journal of Chemical and Pharmaceutical Sciences, 2014, ISSN: 0974-2115, pp 28
- [45] - Lesueur D, The colloidal structure of bitumen: consequences on the rhéology and on the mechanisms of bitumen modification, 2009, Adv colloid interface sci (145), pp 42 - 82.
- [46] - Ramond G et Such C, Bitumes et bitumes modifiés, relations structures, propriétés, composition, 1990, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chassées 168 juillet-aout, pp 23 - 44.
- [47] - Boughamsa. W, Les bitumes modifiés par des polymères, Thèse de doctorat, 2008, université de skikda.
- [48] - Swanson JM. A Contribution to the physical chemistry of the asphalts. J Phys Chem 1942, (42), pp 141-150
- [49] - Addaci. B, Comportement mécanique des enrobé bitumineux renforcés par la fibre de verre, memoire de magister, 2008, Université de Batna.
- [50] - Nellensteyn FJ, The constitution of asphalt, Journal Inst Pet Technology, 1924, PP311 -323
- [51] - Mailan, N, Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux, Thèse de doctorat, 2009, école natinale de travaux publics de l'état, Université de lion.
- [52] - Ababsa. M, Valorisation des mélanges bitume-polymère par le procédé de la pyrolyse, mémoire de magister, 2006, Université d'Oum Elbouagui.
- [53] - Corbett LW. Composition of asphalt based on generic fractionation, using solvent deasphalting, elution-adsorption chromatography, and densimetric characterization. Anal Chem 1969;41:576–579.
- [54] - Corbett LW, Composition of asphalt based on generic fractionation, using solvant deasphalting elution- adsorption chromatography, and densimetric characterization, 1969, Anal Chem, pp 576 - 579.
- [55] - ASTM. D. 4124, Standard Test methode for separation of asphalt into four fraction, 1988, Am soc test master Phila.
- [56] - Yoon S, Lee W, Lee HY, Jeong SY, Baeg J-O, et all, Separation and characterization of bitumen from Athabasca oil sand, 2009, Korean J Chem Eng, (26), pp 64 - 71.
- [57] - Borghol. I, Mise au point et caractérisation d'un liant alternatif au bitume pétroier, produit à partir de résidus de microalgues, Thèse de doctorat, 2021, Université de GustavE eiffel, Nantes, p 291.
- [58] - Bissada K, Tan J, Szymezyk E, Darnell M, Mei M, Group-type characterization of crude oil and bitumen, Efficient separation and quantification of normal-paraffins iso-paraffins and naphthenes, 2016, Fuel, 173, pp 217-221.

- [59] - Emmanuel C, Clémence Q, Ilef B, Fabienne F, Sandrine M, Bruno B, Bitumen fractionation: contribution of the individual fractions to the mechanical behavior of road binders, *Construction and building materials*, 2021.
- [60] - Strom DA, Sheu EY, Barres RJ, Detar MM, Colloidal properties of asphaltenes in vacuum residue, *proc Chem Bitum*, 1991, (2), pp 813-841.
- [61] - El beze L, Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux: identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport.
- [62] - Merbouh M'hammed, Contribution à la modélisation du comportement rhéologique des enrobés bitumineux influence des conditions extrêmes de température et de fatigue, Thèse de doctorat, 2010, Bordeaux-1, France.
- [63] - Zemmiri A.A, comparaison des formulations d'enrobé à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniéage, *Certificat d'études supérieurs*, 2008, ENTPE Lyon, France.
- [64] - Olard F, Etude et modélisation de comportement thermomécanique des enrobés bitumineux, *Etude approfondies de génie civil*, 2000, l'école doctorale MEGA de Lyon, France.
- [65] - Dony Anne, Liants bitumes- polymères de la mise en oeuvre en enrobés: influence de la nature du bitume sur leurs propriétés mécaniques, leur microphologie et leur stabilité thermiques, *LCPC*, 1991, ISSN 1160-9761.
- [66] - Saoula, S. Approche modéliste et valorisation des enrobés modifiés par ajout de polymères-impact sur l'environnement. Thèse de Doctoral, (2010). Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Alger.
- [67] - American society dor testing and materials, ASTM D 2872, Effect of heat on air on a moving film of asphalt (rolling thin film oven test).
- [68] - Comité européen de normalisation, Bitumes et liants bitumineux, Détermination de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air, méthode RTFOT en 12607-1 et EN 12607-1, 1999.
- [69] - Ould-Henia Mehdi, Modélisation et prédiction du comportement rhéologique des mélanges bitume-caoutchouc, thèse de doctorat, 2005, Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [70] - Olard F, Comportement thermomécanique des enrobés bitumineux à basses températures, relation entre les propriétés du liant et de l'enrobé, Thèse de doctorat, 2003.
- [71] - Vatsal Patel, Snehal Popli and Drashti Bhatt, 'Utilization of Plastic Waste in Construction of Roads', *International Journal of Scientific Research*, Vol. 3, Issue: 4, ISSN No 2277 – 8179, Pg. No. 161-163, April 2014.
- [72] - LAVOC, Formulation et optimisation des formules d'enrobés, 2004, Laboratoire des voies de circulation, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne EFPL.
- [73] - XP, Matériels de construction et d'entretien des routes, fabrication des mélanges, Contrôle de fabrication des enrobés hydrocarbonés avec utilisation d'un système d'acquisition des données, pp 98-142(1), 2003.
- [74] - Doucet F et Bruno Auger, Détermination du complexe des enrobés au Ministère des transports du Québec, service des matériaux d'infrastructures, Direction des laboratoires des chaussées, ministère des transports du Québec, 2010.
- [75] - Lefeuvre Yann, Contribution to the fatigue behaviour study of bituminous material, 2001, Diss, école des ponts Paris Tech.
- [76] - Ngyen D-T, Prédiction des déformations permanentes des couches de surface, des chaussées bitumineuses, Thèse de doctorat, 2006, ENPC Paris, 194p.
- [77] - NF P98 - 251-1, Essais relatifs aux chaussées, essais statiques sur mélanges hydrocarbonés, partie 1, septembre 2002, essai Duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud.
- [78] - Moutier F, Use and possibilities of the gyratory shear press (no. special volume), 1977.

- [79] - Ninouh T, Characterization of mechanical properties of recycled asphalt, International conference on civil engineering and geohazard information zonation, Caspian journal of applied sciences research, 2013, 2(AICCE12 and GIZ 12), pp 343-348.
- [80] - Ramirez C, A. D, Characterisation of thermomechanical properties of bituminous mixtures used for railway infrastructure, Thèse de doctorat, 2016, Ecole de travaux publics de l'Etat, Université de Lyon, France.
- [81] - Bordjiba A, Valorisation et renforcement des bétons bitumineux, Thèse de doctorat, 2017, 122p.
- [82] - Dongmo- Engeland, B. J, Caractérisation des déformations d'orniérages des chaussées bitumineuses, Thèse de doctorat, 2005, Institut national des sciences appliqués, INSA de Lyon.
- [83] - D. Sybilisk, New simplified equation for the computation of absolute viscosity of polymer-bitumens, Mater. Struc. 30 (1997) pp. 182187.
- [84] - https://www.wacaprogram.org/sites/waca/files/inline-files/FR_Digital_Executive%20Summary_WA%20Circular%20Economy-digital.pdf
- [85] - Sharma, Umesh/ Giri, Harish Kumar/ Khatri, Ankita. Use of Recycled Asphalt Material for Sustainable Road Construction/ Indian Roads Congress /2018-9 / pp 29-36 / Volume 46
- [86] - Wei Hu, Xiang shu, Baoshan Huang, Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road paving, volume 235/20 octobre2019/ Pp369-377.
- [87] - Dekhli, S. (2015). Étude de l'influence de la variation de la fréquence sur le comportement rhéologique des bitumes purs et des bitumes modifiés aux polymères Eva et Sebs. Thèse de Doctoral, Université des sciences et de la technologie houari boumediene, Alger.
- [88] - PIARC. (1999). Use of modified bituminous binders, special bitumens with additives in road pavements, Laboratoire Central des ponts et chaussée.
- [89] - Haddadi, S., Ghorbel, E., & Laradi, N. (2008). Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA. Construction and Building Materials, 22(6), 1212-1219.
- [90] - Brûlé, B, Ramond, G., & Such, C. (1987). Relations composition-structure-propriétés des bitumes routiers-Etat des recherches au LCPC. Bulletin de liaison laboratoire des ponts et chaussées (148).
- [91] - Brule, B. (1977). Caractérisation de produits bitumineux par chromatographie sur gel perméable. Bulletin de liaison laboratoire des ponts et chaussées (SPEC V).
- [92] - Lesueur, D. (2002). La rhéologie des bitumes: Principes et modification. Rhéologie, 2, 1-30.
- [93] - Dony, A. (1991). Liants bitumes-polymères de la fabrication a la mise en oeuvre en enrobé: influence de la nature du bitume sur leurs propriétés mécaniques, leur micromorphologie et leur stabilité thermique (No. CR15).
- [94] - Artamendi, I., Khalid, H., Page, G. C., Redelius, P. G., Ebels, L. J., & Negulescu, I. (2006). Diffusion kinetics of bitumen into waste tyre rubber. Asphalt Paving Technology, 75-133.
- [95] - Airey, G. D., Rahman, M. M., & Collop, A. C. (2003). Absorption of bitumen into crumb rubber using the basket drainage method. International Journal of Pavement Engineering, 4(2), 105-119.
- [96] - Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., & Dalmazzo, D. (2012). Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 53, 546-555.
- [97] - Bressi, S., Fiorentini, N., Huang, J., & Losa, M. (2019). Crumb rubber modifier in road asphalt pavements: state of the art and statistics. Coatings, 9(6), 384.

- [98] - Santagata, E., Baglieri, O., Tsantilis, L., & Dalmazzo, D. (2012). Rheological characterization of bituminous binders modified with carbon nanotubes. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 53,546-555.
- [99] - Corté, J. F., & Di Benedetto, H. (2004). *Matériaux routiers bitumineux*. Editions Lavoisier.
- [100] - CHIMIE-SUP.FR, Généralités sur les polymères, Propriétés, synthèses, polymérisations utilisations. <http://chimie.sup.pagespersoorange.fr/polymeres/GENERALITESPOLYMERES.html>,
- [101] - OLGA Solomatnikova. Comportement rhéologique et propriétés cohésives et adhésives des liants bitumineux. Mémoire (M.Sc.), Université LAVAL, 1998.
- [102] - Kbaili N, L'asphalte caoutchouc, valorisation de la poudrette de caoutchouc en domaine routier, Thèse de doctorat, 2017, Université Kasdi merbah Ouargla.
- [103] - HAUDIN J.-M., Matériaux pour l'ingénieur, Chapitre VIII : Microstructure du polymères, http://mms2.ensmp.fr/mat_paris/microstructure/polycop/Ch_8_Micro_Polymeres.pdf, site consulté le 28/11/2016.
- [104] - Afroz Sultana.SK, K.S.B. Prasad, 'Utilization of Waste Plastic as a Strength Modifier in Surface Course of Flexible and Rigid Pavements' *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* ISSN: 2248-9622 Vol. 2, Issue 4, pg. no. 1185-1191, July-August 2012.
- [105] - Raouf Mahmood Raouf, Khalid Mershed Eweed, Nisreen Mizher Rahma. Recycled Polypropylene to Improve Asphalt Physical Properties. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*. Volume 9, Issue 12, December 2018, pp. 1260–1266.
- [106] - Michele Porto, Paolino Caputo, Valeria Loise, Shahin Eskandarsefat , Bagdat Teltayev and Cesare Oliviero Rossi. Bitumen and Bitumen Modification: A Review on Latest Advances. *Applied Sciences* February 2019. DOI: 10.3390/app9040742.
- [107] - Xu. Q, Chen. H, Prozzi, J. A. (2010). Performance of fiber reinforced asphalt concrete under environmental temperature and water effects. *Construction and Building materials*, 24(10), 2003-2010.
- [108] - Jaime Preciado , Gilberto Martínez Arguelles , Margareth Dugarte , Alessandra Bonicelli , Julio Cantero , Daniela Vega , Yennis Barros , Improving mechanical properties of hot mix asphalt (HMA) using fibres and polymers in developing countries, *materials science and engineering* 245, 2017, 022013.
- [109] - Luo, D., Khater, A., Yue, Y., Abdelsalam, M., Zhang, Z., Li, Y, & Iseley, D. T. (2019). The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: A review. *Construction and Building Materials*, 209, 377-387
- [110] - Laval. C, Quivoron. C, Mise en évidence d'une corrélation entre le rapport hydrophile/lipophile des résines époxydes et leur compatibilité avec le bitume routier. *crhebd acadsci, c*, (9), 743-6,1973.
- [111] - Dekhli, S. Étude de l'influence de la variation de la fréquence sur le comportement rhéologique des bitumes purs et des bitumes modifiés aux polymères Eva et Sebs. Thèse de Doctoral, (2015). Université des sciences et de la technologie houari boumediene, Alger.
- [112] - Van Beem, E. J., & Brasser, P. (1973). Bituminous binders of improved quality containing Cariflex thermoplastic rubber. *J. Inst. Petrol*, 59(566), 91-97.
- [113] - Économie circulaire – Améliorer le recyclage des matières plastiques, Direction de l'environnement, Comité des politiques d'environnement, 16 mai 2018
- [114] - Les plastiques dans l'environnement, Rapport de l'académie des sciences, 16 mars 2021 Institut de france.
- [115] - La chaine de valeur du recyclage des plastiques, Etude économiques, Analyses, mars 2015, ISBN 978-2-11-1392219-9.

- [116] - La science des plastiques, Comité intergouvernemental de négociation chargé d'élaborer un instrument international juridiquement contraignant sur la pollution plastique, y compris dans le milieu marin, Uruguay, 28 novembre - 2 décembre 2022.
- [117] - https://fr.wikipedia.org/wiki/Gaz_%C3%A0_effet_de_serre
- [118] Nouali Mohammed, Valorisation des déchets de sachets plastique pour des enrobés routiers plus performants, RUGC 2021- Prix René HOUPERT, pp 251-258
- [119] - Centre National de l'informatique et de Statistiques <https://www.cnis.fr/>
- [120] - Kebaili N, Zerzour A, Belabdelouhab F, Influence of rubber fine powder on the characteristics of the Bitumens in Algeria, International conférence on technologies and materials for renewable energy, environment and sustainability, 2015.
- [121] - Navarro, F. J, Partal, P, Martinez-Boza, F, Gallegos, C. (2004). Thermo-rheological behavior and storage stability of ground tire rubber-modified bitumens. Fuel, 83(14-15), 2041-2049.
- [122] - Les principaux résultats de l'étude sur la chaîne de valeur du recyclage des plastiques menée pour l'Association Alliance Chimie Recyclage (2ACR), l'ADEME et le Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique, mars 2015, édition Martine Automme, Nicole Merle-Lamoot, ISBN : 978-2-11-1392219-9
- [123] - Camilo Vargas et Ali El hanandh, Features Importance and Their Impacts on the Properties of Asphalt Mixture Modified with Plastic Waste: A Machine Learning Modeling
- [124] - Investigating the engineering properties of asphalt binder modified with waste plastic polymer, Ain Shams Engineering Journal 12 num 2(2021) 1569–1574, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.035>
- [125] - Noor Zainab Habib, Ibrahim Kamaruddin, Madzalan Napiah and Isa Mohd Tan. Rheological Properties of Polyethylene and Polypropylene Modified Bitumen. International Journal of Civil and Environmental Engineering 3 (2) 2011.
- [126] - Johnson Kwabena Appiah, Victor Nana Berko-Boateng, Trinity Ama Tagbor. Use of waste plastic materials for road construction in Ghana. Case Studies in Construction Materials 6 (2017), pp 1–7.
- [127] - United Nations Environment Programme (2021). From Pollution to Solution. A global assessment of marine litter and plastic pollution Nairobi, ISBN: 978-92-807-3881-0 Job number: DEP/2379/NA, <https://www.unep.org/>
- [128] - Luc De Bock, Alexandra Destrée, Stefan Vansteenkiste, Ann Vanelstraete, recyclage des plastiques dans les enrobés-une analyse, centre de recherches routières, bruxel 2020, <https://www.crr.be>
- [129] - A.A. Yousefi, A.A.T. Kadi, composite asphalt binders: effects of modified RPE on asphalt, Journal Mater Civil Engineering, May 2000, PP 113-123.
- [130] - Golestani B, Nejad FM, Galooyak SS, Performance evaluation of linear and nonlinear nanocomposite modified asphalts, Construction and Building Materials 2012; 35: 197-203.
- [131] - Johnson Kwabena Appiah, Victor Nana Berko-Boateng, Trinity Ama Tagbor.
- [132] - Estabraq N. Ezzat, Alaa H. Abed, Prediction of modified asphalt concrete rutting depth using statistical model, Materials Today: Proceedings, Volume 42, Part 5, 2021, Pages 1784-179
- [133] - Tladi. M, Mashifana. T, Sithole, N. T, Utilization of Plastic Waste and Waste Rubber Tyres to Modify Bitumen Binder in Road Construction. In Key Engineering Materials (Vol. 947, pp. 131–138, 2023, Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-16e0qr>
- [134] - Brajesh Mishra, Ravi Shankar Mishra. (A Study on Use of Waste Plastic Materials in Flexible Pavements), International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 4, Issue 8, August 2015, PP 6927-6935

- [135] - Zhu, J., Birgisson, B., Kringos, N. (2014) Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54: 18-38 [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005](http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005)
- [136] - Haibin Li, Lichang Zhou, Jianmei Sun, Sirui Wang, Mingming Zhang, Yihong Hu, and Ahmed Abdulakeem Temitope, Analysis of the Influence of Production Method, Plastic Content on the Basic Performance of Waste Plastic Modified Asphalt, *polymers* 2022, 14(20), 4350, [https://doi.org/ 10.3390/polym14204350](https://doi.org/10.3390/polym14204350)
- [137] - N.Z. Habib, I. Kamaruddin, M. Napihah, I.M. Tan, Rheological properties of polyethylene and polypropylene modified bitumen, *Int. J. Civ. Environ. Eng.* 3(2) (2011).
- [138] - Merusi F, Giuliani F, Filippi S, Polacco G, A model combining structure and properties of a 160/220 bituminous binder modified with polymer/clay nanocomposites. A rheological and morphological study, *Materials and Structures* 2013 DOI 10.1617/s11527-013-0096-3.
- [139] - Zhu, J., Birgisson, B., Kringos, N. (2014) Polymer modification of bitumen: Advances and challenges. *European Polymer Journal*, 54: 18-38 [http://dx.doi.org/ 10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005](http://dx.doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2014.02.005)
- [140] - Olard F, Di benedetto, H Dony, A Vaniscot, J C, Properties of bituminous mixtures at low températures and relations with binder characteristics, 6th international rilem symposium on performance testing and evaluation of bituminous materials, Zurich, 2003.
- [141] - Olumide Moses Ogunidipe The Use Of Polyethylene Terephthalate Waste For Modifying Asphalt Concrete Using The Marshall Test. *Slovak Journal of Civil Engineering*. Vol. 27, 2019, No. 2, pp 9– 15. *Polymers* 2022, 14(20), 4350; [https://doi.org/ 10.3390/polym14204350](https://doi.org/10.3390/polym14204350)

Tableau .1. Résultats de déflexion en microns enregistrés de la partie n°2 de PK17+200 au PK19+300

Station km	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
0	481	376	305	268	149	90	68	49	35
0.2	759	394	286	172	101	85	45	32	28
0.4	822	638	522	380	284	163	97	61	55
0.601	420	321	267	174	101	78	53	48	41
0.802	372	279	218	153	106	60	52	34	28
1.012	1334	1041	823	493	350	182	101	63	42
1.2	696	514	401	268	174	67	36	25	18
1.412	1324	1031	613	483	240	168	91	53	32
1.601	729	446	325	193	117	53	37	26	19
1.809	624	441	320	128	102	48	23	19	14
2.009	578	433	344	251	195	124	86	66	51
2.105	980	698	593	429	276	133	64	40	29

Tableau .2 Résultats de déflexion en microns enregistrés de la partie n°3 de PK22+900 au PK25+100

Station km	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
0	1575	1189	860	579	397	209	124	82	58
0.202	383	296	238	161	109	56	33	22	16
0.404	730	589	467	322	220	101	53	37	29
0.608	807	652	540	415	323	186	113	79	57
0.809	642	510	423	313	226	119	70	49	38
1.012	1255	940	729	494	328	144	71	43	30
1.238	1029	819	682	499	358	173	85	50	33
1.418	688	547	442	315	222	107	56	35	25
1.602	1142	829	669	483	336	153	53	60	43
1.809	885	675	538	368	256	129	78	56	41
2.004	482	392	307	224	169	96	64	50	39
2.2	1575	448	362	264	208	133	79	58	43

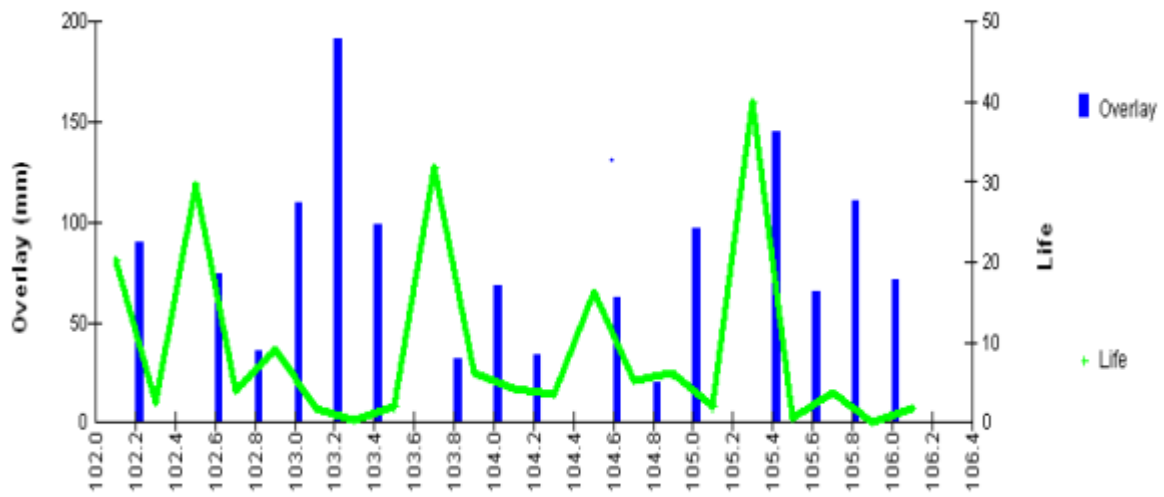


Figure 1. La durée de vie résiduelle de la section n°2

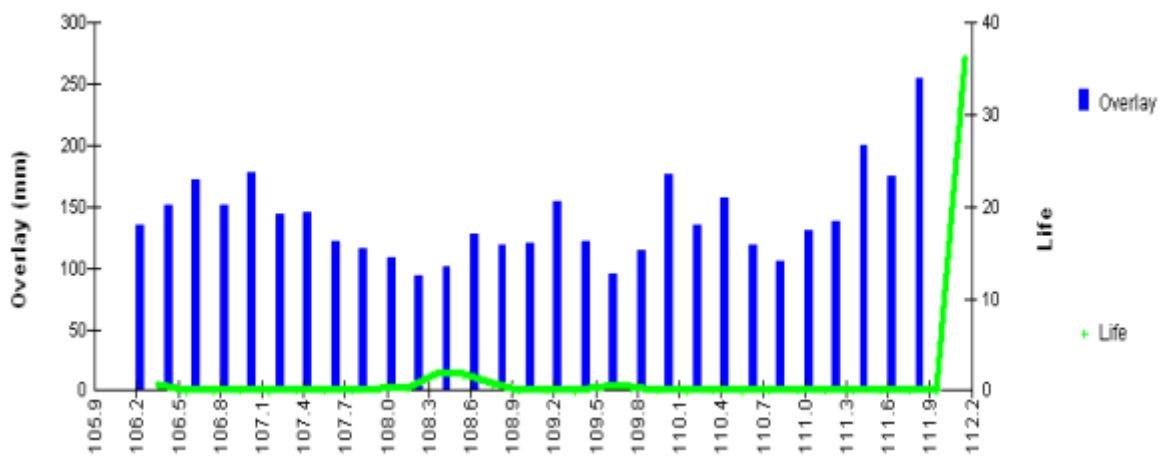


Figure 2. La durée de vie résiduelle de la section n°3

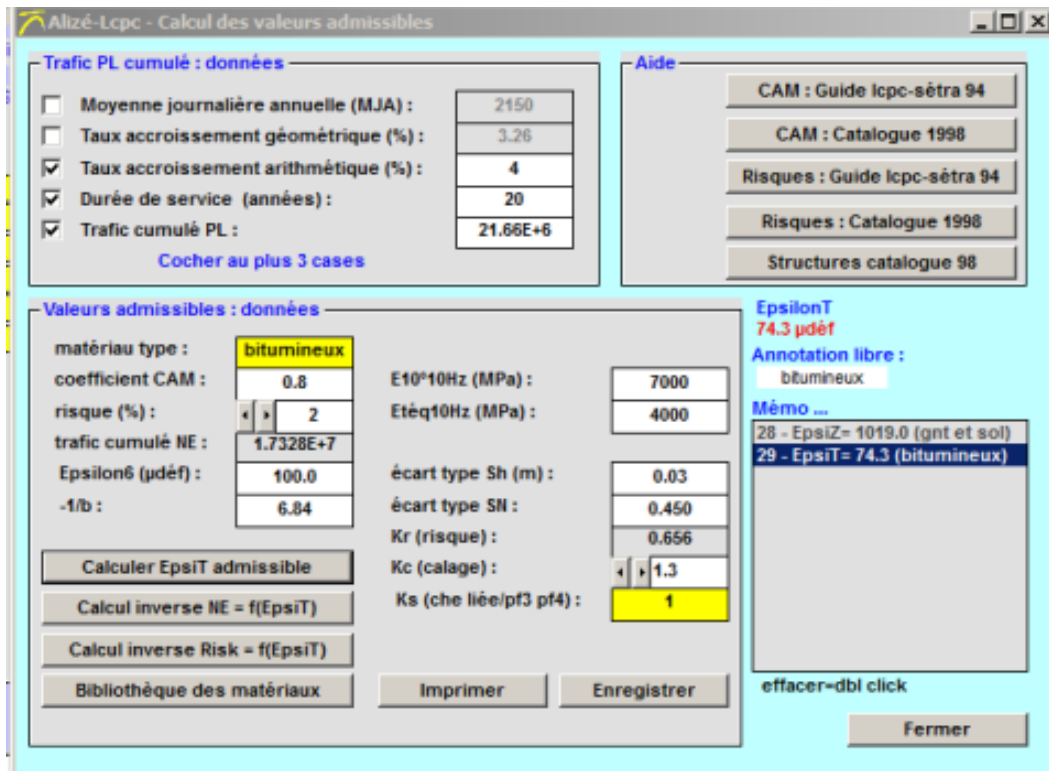


Figure 3. Étape de calcul de la déformation admissible du corps de chaussée de la RN25

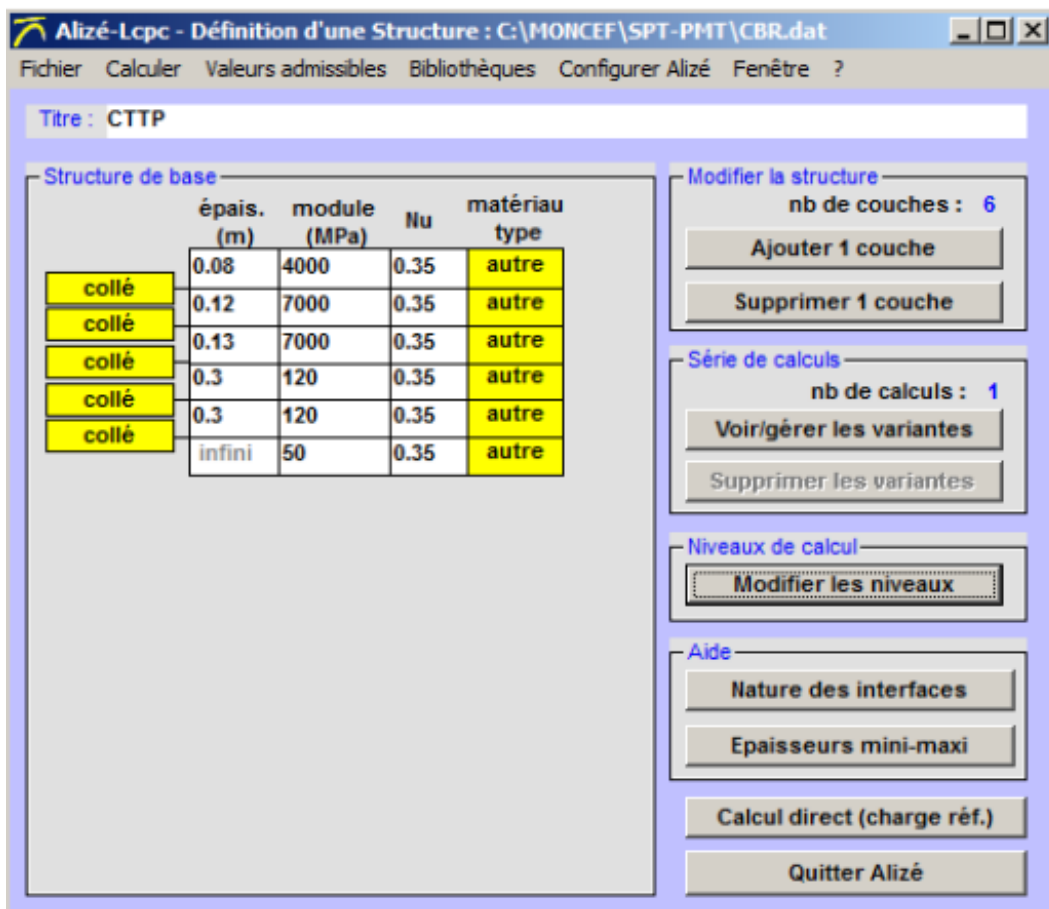


Figure 4. Étape de calcul des couches de la structure de la RN25 par le ALIZE

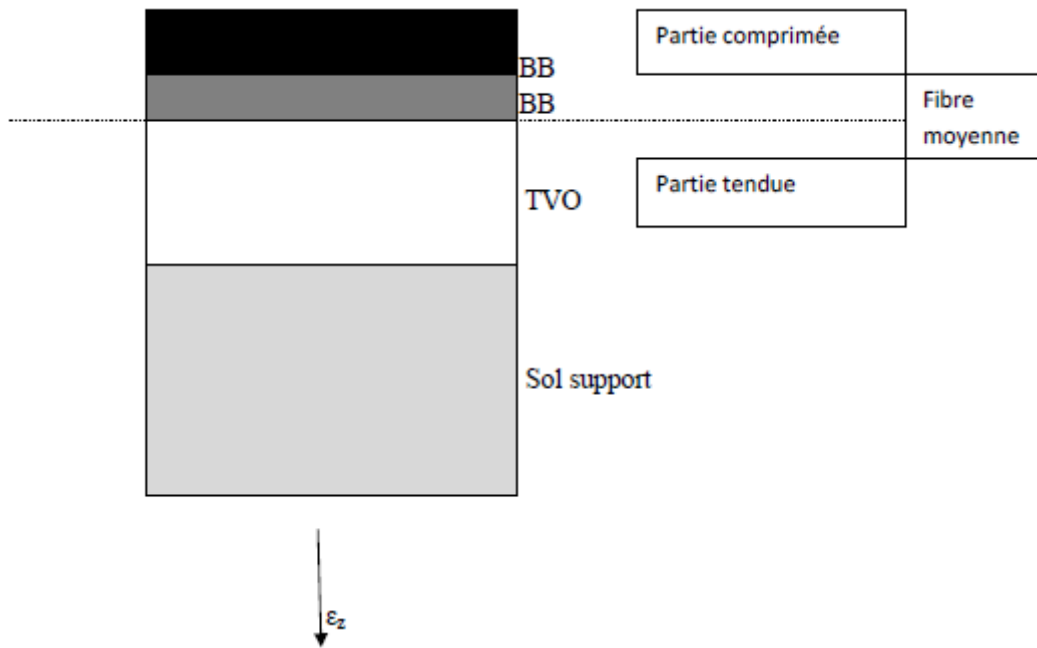


Figure 5. Premier type de modélisation du la structure

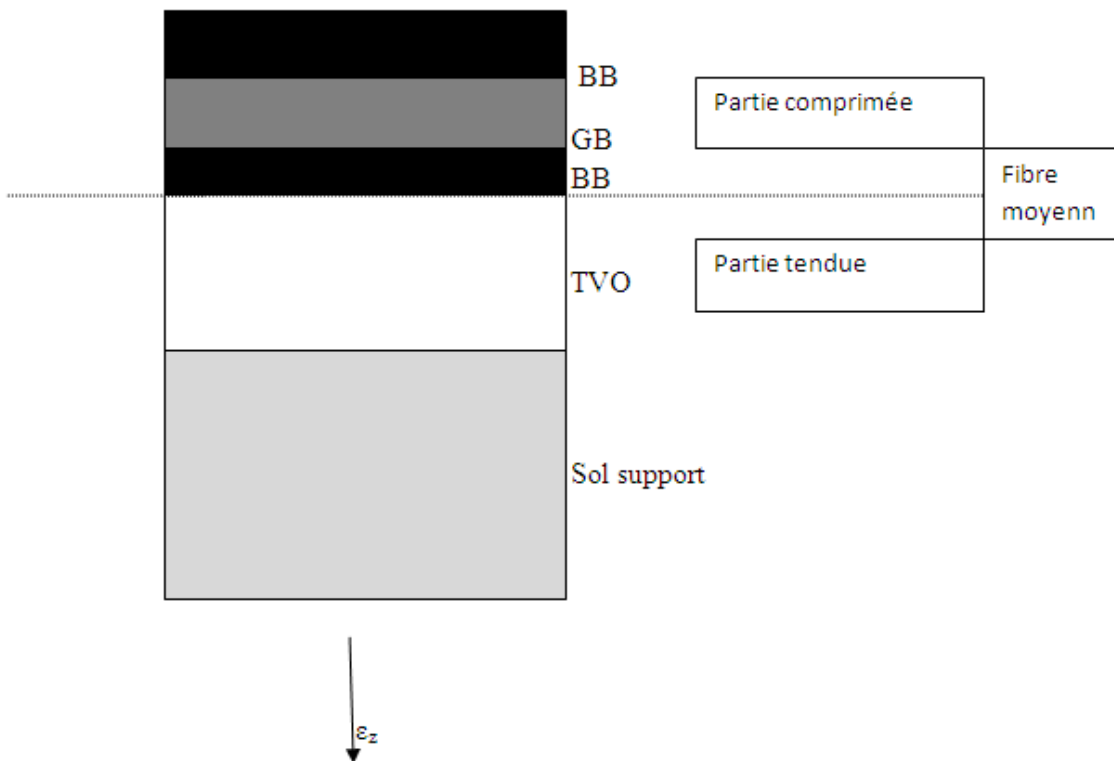


Figure 6. Deuxième type de modélisation du la structure

Tableau 3. Propriétés des différentes classes de bitume selon les spécifications du CTPP

Caractéristiques		Normes	Liants			
			20/30	40/50	60/70	80/100
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)		NA 5192	20 à 30	40 à 50	60 à 70	80 à 100
Température bille et anneau (°C)		NA 2617	57 à 62	52 à 57	47 à 52	41 à 47
Température bille et anneau (°C)	Bitume soufflé	NA 5192	62 à 68	57 à 61	52 à 56	46 à 51
Ductilité à 25°C (cm)		NF T66-006	≥ 25	≥ 60	≥ 80	≥ 80
Différence de TBA après RTFOT (ΔTBA)		ASTM D 2872-85	≤ 8	≤ 9	≤ 9	≤ 9
Perte de masse au chauffage (%)		NA 5193	-	< 1	< 1	< 2
Point d'éclair (°C)		NF T60-118	≥ 250	> 230	> 230	> 230
Densité à 25°C		NA 5224	1 à 1,1	1 à 1,1	1 à 1,1	1 à 0,07

Tableau 4. Classe de bitume selon l'altitude et le trafic

Zone	Altitude (m)	Classe / trafic (PL.MJA)		
		trafic < 150	150 ≤ trafic < 500	trafic ≥ 500
I	alt ≤ 500	60/70	40/50 ou 60/70	40/50
	alt > 500	80/100	60/70 ou 80/100	60/70
II	alt ≤ 500	40/50	20/30 ou 40/50	20/30
	500 < alt ≤ 1000	60/70	40/50 ou 60/70	40/50
	alt > 1000	80/100	60/70 ou 80/100	60/70
III	500 ≤ alt ≤ 1000	40/50	20/30 ou 40/50	20/30
	alt > 1000	60/70	40/50 ou 60/70	40/50

Tableau 5. Caractéristiques des zones climatiques

	Température maximale moyenne au sol (°C)	Température minimale moyenne au sol (°C)	Hauteur de la précipitation annuelle moyenne (mm)
Zone I	≤ 45	$- 2,5 \leq T_{min} \leq 2,5$	$h \geq 600$
Zone II	$45 < T_{max} \leq 50$	$< - 2,5$	$h < 600$
Zone III	> 50	$\geq - 5$	$h < 100$

Tableau 6. Propriétés de polypropylène récupéré de SABIC

Mechanical Properties	Metric	English	Comments
Hardness, Rockwell R	102	102	ASTM D785
Tensile Strength, Yield	35.0 MPa	5080psi	ASTM D638
Elongation at Yield	10 %	10 %	ASTM D638
Flexural Modulus, 1% Secant	1500MPa	218000 psi	ASTM D790A
Izod Impact, Notched	0.250 J/cm	0.468 ft-lb/in	ASTM D256
Thermal Properties	Metric	English	Comments
Deflection Temperature at 0.46 MPa (66 psi)	100°C	212°F	ASTM D648
Vicat Softening Point	152°C	306°F	ASTM D1525B
Processing Properties	Metric	English	Comments
Processing Temperature	235 - 250 °C	455 - 482 °F	Barrel Temperature