

N° d'ordre : 15/2011-M/G C

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE

FACULTÉ DE GÉNIE CIVIL



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de **MAGISTER**

En Génie Civil

Spécialité : GEOTECHNIQUE

Par: **GUESSABI NOUREDDINE**

Sujet

**ETUDE DE L'INFLUENCE DU DECHET PLASTIQUE SUR LE
COMPORTEMENT A LA TRACTION INDIRECTE DES ENROBES
BITUMINEUX MODIFIES**

Soutenu publiquement le 19/11/2011, devant le jury composé de :

M.	A.NECHNECH	Maître de Conférences(A) à L'USTHB	Président
M.	S. HADDADI	Maître de Conférences(A) à L'USTHB	Directeur de thèse
M.	M. BELACHIA	Professeur à L'université de Skikda	Examineur
Mme.	K. AIT MOKHTAR	Maître de Conférences(A) à L'USTHB	Examinatrice
M.	M.N. OUDJIT	Maître de Conférences(A) à L'USTHB	Examineur

Dédicaces

A mes chers parents,

A tous mes enseignants et professeurs

A mon cousin Abd el Hamid que Dieu ait son âme et le compte parmi ses fidèles au paradis,

A ma femme Nadia et mes filles Salssabil et Ammani,

A mes frères Mourad, et Mohamed,

A mes soeurs Aicha, Luiza , Wahiba, Sabrina et Nawel,

A toute ma famille,

A tous mes amis.

Remerciements

Jadresse mes sincères remerciements aux personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire de magister.

Je tiens à exprimer, en premier lieu, ma gratitude et ma reconnaissance à monsieur SMAIL HADDADI, Maître de conférences à l'USTHB qui m'a encadré et guidé pour l'accomplissement de ce travail, pour ses conseils instructifs et son soutien moral, ses aides précieuses, conseils, et pour tous ses efforts.

Il m'est agréable aussi d'exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements aux personnes qui m'honorent en étant membre du jury, à noter :

-Monsieur **NECHNECH AMMAR**, maître de conférence **A** à L'USTHB, qui a bien voulu présider le jury de ce mémoire.

- Monsieur, **M. BELACHIA**, Professeur à l'Université de Skikda, qui m'a fait l'honneur d'accepter de participer au jury de ce mémoire
- Madame **K. AIT MOKHTAR**, Maître de conférence à l'USTHB, qui n'a pas hésité à accepter de me faire l'honneur d'apporter sa contribution productive à la discussion des résultats de ce travail.
- Monsieur **M.N. OUDJIT**, Maître de conférence à l'USTHB qui a bien voulu être membre du jury et juger le contenu de ce travail.

Aussi, un grand remerciement à tous les doctorants, magisters du Laboratoire Route et Aérodrome de la faculté Génie Civil, USTHB avec qui j'ai partagé de bons moments, j'ai nommé S. LAURADI, F. CHERIET, A CHACHOUA, A.EL HALIM, MADANI, T .TALEB.

- Je désire remercier S. SAOULA docteur de L'UMBB pour le soutien, les conseils et l'encouragement durant la réalisation de la partie expérimentale de ce travail

Je tiens également à remercier Monsieur M.ABBES directeur régional de LTP est de Sétif, Monsieur A .ALWAHDI PDG de la société des études techniques de Sétif "SETS", Monsieur Y.BOUBAAYA directeur de chantier "Cosider TP pole T12", et monsieur K .Merikhi chef d'antenne de LTP de BBA pour leurs conseils qui m'ont permis d'enrichir mes connaissances scientifiques et techniques. Et la disposition de la documentation bénéfique.

Résumé

L'objectif du présent travail est d'étudier l'influence du déchet plastique sur le comportement à la traction indirecte des enrobés bitumineux modifiés ainsi que leur résistance aux carburants.

Cette étude a montré que :

- L'ajout de déchet plastique aux enrobés bitumineux améliore leur performance mécanique, tels que :
 - augmentation de la stabilité, la compacité et le quotient Marshall,
 - diminution du fluage Marshall,
 - augmentation de la résistance à la traction indirecte ITS,
 - diminution des déformations à la traction indirecte,
 - augmentation de la résistance aux carburants de l'enrobé bitumineux,

En plus de ces intérêts géotechniques du déchet plastique dans la construction routière, il y a une influence positive sur l'environnement et la vie humaine par la réduction du pourcentage d'existence des matériaux plastiques polluants

Mots Clés : Bitume, déchet plastique, Enrobés bitumineux, Marshall, traction indirecte, résistance aux carburants.

Abstract.

The objective of this work is to study the influence of plastic waste has on the behavior of the indirect tensile modified asphalt and their resistance to fuel
This study showed that:

The addition of plastic waste to asphalt improves their mechanical performance, such as:

- increased stability, compactness and Marshall quotient,
- reduced creep Marshall
- increase in indirect tensile strength ITS
- reduction of distortions in the indirect tensile,
- increased resistance to fuel the asphalt,

In addition to these interests geotechnics of waste plastic in road construction, there is a positive influence on the environment and human life by reducing the percentage of existence of plastics pollution

Keywords: Asphalt, waste plastic, asphalt, Marshall, indirect tensile, resistance to fuel

ملخص

يهدف هذا العمل لدراسة تأثير اضافة فتات البلاستيك علي مقاومة الشد الغير مباشر للخرسانة المز فتة وكذا الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية الأخرى كمقاومة المازوت. أظهرت الدراسة ما يلي:

يؤدي اضافة فتات البلاستيك للخرسانة المز فتة إلى تحسين النجاعة الميكانيكية والمقاومة للمازوت و ذلك عن طريق:

- زيادة في استقرار للخرسانة المز فتة
 - زيادة في نسبة الرص و معامل مارشال
 - انخفاض تمييع مارشال.
 - زيادة في مقاومة الشد الغير مباشر.
 - زيادة في مقاومة تشوه التميع.
 - زيادة معتبرة في مقاوميه التفكك التي سببها المازوت.
- بالاضافة لهذه الفوائد الجيوتقنية لفتات البلاستيك في ميدان صناعة الطرق فان ذلك يؤثر إيجابا على البيئة و المحيط الحياتي للإنسان عن طريق التقليل من نسبة تواجد هذه المواد البلاستيكية الملوثة للبيئة.

الكلمات المفتاحية الزفت ، فتات البلاستيك ، الخرسانة المز فتة ، مارشال، الشد الغير مباشر، المقاومة للمازوت

Sommaire

Remerciements	I
Résumé	II
Abstract	III
ملخص	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
INTRODUCTION GENERALE	12
PARTIE I :ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	15
Chapitre 1 : LE BITUME	16
1.1.Introduction	16
1.2.Historique	16
1.3.Provenance	17
1.4.Structure physico-chimique	18
1.5.Fabrication	21
1.6.Utilisation	21
1.7.Types de bitume	22
1.8. Bitume en Algérie	23
1.9.Essais classiques sur le bitume	24
1.10.specification de bitume	24
1.11.La pénétration en fonction de la température	24
1.12.Comportement rhéologique du bitume	25
Chapitre 2 : LES GRANULATS	27
2.1.definition	27
2.2.caracteristiques intrinsèques	27
2.3.caracteristiques de fabrication	27
CHAPITRE 3 : LES ENROBES BITUMINEUX	29
3.1.définition	29
3.2.structure d'une chaussée	29
3.3.Sollicitations dans les chaussées	30
3.3.1.Sollicitations mécaniques (effet de trafic)	30
3.3.2.Les Sollicitations climatiques (effet de la température)	31
3.3.3. les phénomènes chimiques	32
3.4. Les dégradations de chaussées	32
3.4. 1.Dégradation par orniérage	32
3.4.2. Mécanismes d'orniérage	32
3.4.3. Types d'orniérage	33
3.4.4.Facteurs influençant l'orniérage	34
3.5. types d'enrobés	35

3.6.classement des types de comportement des materiaux bitumineux _____	37
3.7.Qualités exigées des enrobés bitumineux _____	38
3.8.Les essais sur les enrobés bitumineux _____	39
3.9.Fabrication des enrobés bitumineux _____	39
3.10.Transport et mise en oeuvre _____	20
3.11.L'enrobé modifié _____	40
3.11.1.Les avantage _____	40
3.11.2.Les Inconvénients _____	40
3.11.3.Procédés de modification _____	41
CHAPITRE 4 : POLYMERES _____	42
4.1.definition _____	42
4.2.Provenance _____	42
4.3..Structure physico-chimique _____	43
4.4.Utilisation _____	44
4.5.Types des polymeres _____	44
4.6.propriétés des polymeres _____	45
4.6.1.Thermoplastiques _____	45
4.6.2.Thermodurcissables _____	45
4.6.3. Élastomères _____	45
4.7. Polymères modifiant les bitumes _____	46
4.8. Comportement thermique _____	48
4.9. Conclusion _____	49
PARTIE II: ÉTUDE EXPERIMENTALE _____	50
chapitre 1: ESSAIS DE CARACTERISATIONS ET INTERPRETATIONS _____	
1.1.ESSAIS DE CARACTERISATIONS _____	30
1.1. Les granulats _____	51
1.2. Le bitume _____	
1.3. L'additif (déchet plastique) _____	
1.4. Les enrobés bitumineux _____	
1.2.RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS _____	52
1.2.1. caractérisation des granulats _____	52
1.2.2. caractérisation de bitume _____	56
1.2.3. l'additif (le déchet plastique) _____	59
Chapitre 2: formulation de l'enrobé _____	60
II.2. formulation de l'enrobé _____	60
2.1.Introduction _____	60
2.2. Détermination de la courbe granulométrique du mélange _____	60
2.3.Détermination des dosages en liants _____	61
2.4.Choix de la formule optimale _____	62

chapitre 3:L'enrobé modifie	64
3.1. modification par la méthode sèche	64
3.2. confections des éprouvettes bitumineuses	64
3.3. L'essai Marshall	66
a) Stabilité Marshall SM	66
b) Fluage Marshall FM	67
c) Quotient Marshall QM	68
d) La compacité	69
3.4.Tenue à l'eau des enrobés MODIFIÉS (MARSHALL 24h)	71
a) stabilité marshallà24H	72
b)Le fluage à 24H	72
c)le quotient Marshall à 24H	73
d)Variation du quotient Marshall à30min et 24H	73
3.5.La résistance à la traction indirecte (NF EN12697-23)	74
3.5.1 Objet	74
3.5.2.Presse d'essai	74
3.5.3.Analyse des résultats	75
a) la charge maximale de rupture P(KN)	75
b) Caractéristique des déformations de traction indirecte	76
c)La résistance à la traction indirecte ITS	76
3.5.4.Variation des différents paramètres de l'essai de la traction indirecte	77
3.5.5.Examen visuel des éprouvettes	79
3.5.6.conclusion	80
3.6.La résistance aux carburant (NF EN 12697-43)	81
3.6.1.Principe de l'essai	81
3.6.2.Resultats de l'essai	83
3.6.3.Conclusion	84
3.7.Conclusion de la deuxième partie	84
 CONCLUSION GENERALE	 85
 Bibliographie	 89

LISTE DES FIGURES

PARTIE I:ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Figure 1.1 : schéma de fractionnement des bitumes SARA.	19
Figure 1.2 : représentation schématique des structures « sol » et « gel ».	20
Figure 1.3 : représentation du modèle de structure colloïdale.	21
Figure 1.4 : principe de fabrication du bitume.	21
Figure 1.5 : application des bitumes.	23
Figure 1.6 : susceptibilité thermique du bitume .	25
Figure 1.7 :classement des essais mécaniques sur le liant	26
Figure 3.1: Constitution d'une structure de chaussée type	30
Figure 3.2: Schématisation des sollicitations induites par le trafic .	31
Figure 3.3: Sollicitations dans la chaussée induite par la température	31
Figure 3.4: phénomène d'orniérage .	32
Figure 3.5: types d'orniérage .	33
Figure 3.6 : Type de comportement des matériaux bitumineux	37
Figure 4.1: schéma d'une macromolécule ramifiée	43
Figure 4.4 : schéma d'une macromolécule réticulée	44
Figure 4.3 : structure du NBR	47
Figure 4.4 : diagramme de rigidité des polymères	49

PARTIE II:ETUDE EXPERIMENTALE . 60

Figure 1.1: Courbe granulométrique des fraction 0/3, 3/8, 8/15	54
Figure 1.2: susceptibilité thermique	58
Figure 1.3: l'additif (déchet plastique).	59
Figure 2.1:la courbe granulométrique du mélange BB 0/14-	61
Figure 2.2:variation du quotient Marshall	63
Figure 3.1: échantillon des éprouvettes bitumineuses	65
Figure 3.2: a)compacteur b) malaxeur	65
Figure 3.3: a)Etuve b) La cuve	65
Figure 3.4 : stabilité Marshall	67
Figure 3.5: variation de la stabilité Marshall	67
Figure 3.6:Fluage Marshall	67
Figure 3.7variation du fluage	68
Figure 3.8quotient marshall	68
Figure 3.9:variation du quotient marshall	69
Figure 3.10:la compacité	70
Figure 3.11 : Les éprouvettes immergées dans le bain thermostatique	71
Figure 3.12: Stabilité Marshall à 24 H .	72
Figure 3.13:fluage Marshall à 24H	72
Figure 3.14:quotient Marshall à 24H	73
Figure 3.15:évolution du quotient Marshall à 30min et 24H .	73
Figure 3.16:presse d'écrasement type Marshall .	74
Figure 3.17: la charge maximale de rupture	75
Figure 3.18:les déformations en fonction de la teneur en déchet	76
Figure 3.19: ITS en fonction de la teneur en déchet plastique.	77

Figure 3.20 :variation de ITS/l'enrobé témoin	78
Figure 3.21: variation de la deformation / l'enrobé témoin .	78
Figure 3.22: Variation de la charge maximale de rupture .	79
Figure 3.23: Cadre d'essai avec bandes de chargement	79
Figure 3.24:type de rupture	79
Figure 3.25: état des éprouvettes après l'essai	80
Figure 3.26: Eprouvettes avant immersion dans le carburant	82
Figure 3.27:eprouvettes (0%) après immersion dans le carburant	83
Figure 3.28:Eprouvettes (0.5%) apres immersion dsans le carburant.	82
Figure 3.29:perte de masse de l'enrobé à 0% et 0.5%	83

Liste des tableaux

PARTIE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUES

Tableau 1-1 : différents types de bitumes	20
Tableau 1-2 : spécifications des bitumes	24
Tableau 1.3 Essais mécanique sur le bitume [Has 2002)	26
Tableau 3.1 : valeurs spécifiées des BB 0/10 et 0/14	35

PARTIE II:ETUDE EXPERIMENTALES

Tableau 1.1:origine des granulats utilisés	52
Tableau.1.2: Analyse chimique sommaire	52
Tableau 1.3. Classification des granulats	53
Tableau 1.4: résultats de l'analyse granulométrique	53
Tableau 1.5: Coefficient d'aplatissement	54
Tableau 1.6. résultats de l'essai MDE	55
Tableau 1.7. Spécification de MDE	55
Tableau 1.8:résultats de l'essai Los Angeles	55
Tableau 1.9. Spécification de Los Angeles	56
Tableau 1.10 récapitulatif des caractéristiques des granulats	56
Tableau 1.11: Caractéristiques du bitume	57
Tableau 1.12:susceptibilité thermique	58
Tableau 2.1:Fuseau de référence du BB 0/14 semi grenu	60
Tableau 2.2: et Les pourcentages pondéraux du mélange	60
Tableau 2.3:dosage en liant en fonction de K	62
Tableau 2.4:résultats de l'essai Marshall sur l'enrobé pur	62
Tableau 2.5:la formulation finale de l'enrobé pur	63
Tableau 3.1:résultats de l'essai Marshall	66
Tableau 3.2:variation des paramètres Marshall	66
Tableau 3.3.variation de la compacité	70
Tableau 3.4: résultats de l'essai Marshall 24H	71
Tableau 3.5: la charge maximale de rupture P(KN)	75
Tableau 3.6:les déformations de la traction indirecte	76
Tableau 3.7:ITS à 20°C et 40°C	77
Tableau 3.8 Variation des paramètres de l'essai à 20°C	78
Tableau 3.9variation des paramètres de l'essai à40°C	78
Tableau 3.10 résultats de l'essai de résistance aux carburant.	83

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Depuis l'Antiquité l'histoire des peuples est indissociable de celle de la route, vecteur d'échanges, est un facteur générateur du développement économique des pays.

Les structures de chaussée des routes revêtues sont cependant d'une conception beaucoup plus récente et l'utilisation de matériaux bitumineux voit le jour avec les problèmes nouveaux posés par la circulation des véhicules automobiles à partir de la fin de XIXe siècle.

Les enrobés traditionnelles, répondent le plus souvent de façon satisfaisante aux besoins des applications routières. Cependant, les évolutions du trafic routier en termes de volume et d'agressivité, et des techniques d'application, toutes deux de plus en plus exigeantes à l'égard de la qualité des enrobés, a fait apparaître certaines limites à leur emploi et conduit les chercheurs à trouver des solutions pour rendre les enrobés plus performants en leur ajoutant divers composés. Parmi ceux-ci, les polymères occupent une place prépondérante, pour des raisons économiques liées aux crises du pétrole des années 1970, les techniques routières se sont orientées depuis plus de deux décennies vers la construction de chaussées en couches plus minces, dont les structures réduites doivent néanmoins garantir des propriétés mécaniques au moins équivalentes à celles des chaussées traditionnelles.

L'apparition des bétons bitumineux spécialisés, enrobés drainant, enrobés à module élevé(EME), enrobés résistants aux hydrocarbures, etc., exige des additifs des performances en termes de cohésion, d'adhésivité, de résistance aux agressions chimiques dont l'oxydation et aux sollicitations mécaniques que n'offrent pas en toutes circonstances les enrobés à base de bitume pur.

La modification des enrobés bitumineux avec des polymères ou des déchets compatibles peut s'avérer bénéfique. Elle peut être réalisée :

- Par modification de la structure du bitume à l'aide des polymères.
- Par ajouts d'additifs (polymère, pneus recyclés, produits chimiques ...).

Et afin de satisfaire aux critères de durabilité des revêtements routiers, il conviendra d'élaborer un enrobé performant, qui est l'enrobé modifié.

L'objectif de ce travail est d'étudier la résistance des couches de roulement à l'orniérage vis à vis l'effet du trafic, par modification de béton bitumineux avec un polymère, déchet plastique d'emballage alimentaire.

Et pour cela nous nous proposons la modification de l'enrobé par l'ajout du déchet plastique par la méthode sèche, qui consiste à injecter l'additif directement dans le malaxeur en même temps que le bitume et les granulats.

L'additif utilisé dans cette étude est un déchet plastique rougeâtre destiné à l'agro-alimentaire, ce sont des sacs d'emballage alimentaire.

Le travail que nous nous proposons d'étudier se divise en deux parties.

La première partie est entièrement consacrée à une synthèse bibliographique axée sur :

- Généralité sur les bitumes, les granulats, et les enrobés bitumineux.
- différents polymères utilisés pour la modification des enrobés bitumineux.
- structure d'une chaussée et les sollicitations influent.
- les procédé de modification de l'enrobé.
- La rhéologie et les propriétés thermomécaniques des bitumes purs.

La deuxième partie, présente les matériaux d'étude et les méthodes expérimentales utilisées :

- Essais de caractérisations sur granulats et bitume.
- Elaboration de la formulation de l'enrobé.
- Confection des éprouvettes bitumineuses.
- Essais mécanique sur l'enrobé modifié (Marshall -traction indirecte).
- La résistance aux carburant de l'enrobé modifié par rapport à celui de l'enrobé traditionnel.

Partie: I

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

Dans cette partie, nous allons présenter une étude bibliographique sommaire sur l'enrobé bitumineux et ses composant « bitume, granulats, polymères » à savoir :

- ✓ Des notions générales sur les bitumes, les granulats et les enrobés.
- ✓ Une étude du comportement chimique et structural du bitume.
- ✓ Une étude du comportement rhéologique du bitume.
- ✓ Une analyse critique des spécifications sur le bitume.

Cette étude bibliographique nous permettra d'avoir une vision globale sur ces matériaux d'étude afin de mieux aborder notre partie expérimentale.

Chapitre1

LE BITUME

1.1. Introduction

Le bitume est le produit de base de la majorité des techniques employées dans le domaine de la construction routière moderne où ses qualités font l'unanimité.

C'est un liant hydrocarboné, celui-ci est un matériau adhésif noir, visqueux, composé d'hydrocarbures, il contient du carbone et de l'hydrogène avec de faibles proportions d'oxygène, d'azote et de soufre ainsi que des métaux à l'état de traces.

Contenant du bitume, ou du goudron, ou les deux, un liant hydrocarboné agrégé avec des granulats, fournit des matériaux enrobés et ceci grâce à sa propriété essentielle qui est le collage permettant l'agglomération des matériaux.

Pour des raisons économiques et environnementales, le goudron n'est plus utilisé en construction routière, au profit du bitume.

En plus des bitumes purs, les liants hydrocarbonés courants dans la construction routière sont : les bitumes fluidifiés ou cut-backs, les émulsions de bitume et les bitumes modifiés.

Industriellement, le bitume fabriqué à partir de pétrole brut d'où sont extraites, au préalable, les fractions les plus légères.

Dans le langage courant, le bitume est souvent confondu avec le goudron d'origine houillère, ou avec l'asphalte dont il n'est qu'un composant.

1.2. Historique

Le bitume est un matériau exploité depuis toujours pour ses qualités d'adhésivité et d'étanchéité. De l'Arche de Noé aux citernes d'Egypte, des jardins de Babylone aux navires grecs et romains, nombreuses sont les civilisations qui ont su l'utiliser.

Selon l'Ancien Testament, c'est lui qui a été utilisé pour calfater l'Arche de Noé et le berceau de Moïse. A Babylone, l'étanchéité des terrasses, des palais et des jardins suspendus était assurée par du bitume. Les Egyptiens s'en servaient pour recouvrir les voies sacrées des temples, colmater canaux, digues et citernes.

En France, dès la fin du XVIIIème siècle, le bitume a été exploité pour les encres d'imprimerie, pour l'étanchéité des fortifications ou encore le graissage des essieux de canon.

Au début des années 1820, il sert de revêtement pour les trottoirs et les rues de Paris et de Londres. C'est le début d'une longue histoire entre le bitume et les voies de circulation. Aujourd'hui, c'est plus de 85 % de la production française de bitume qui est utilisée pour la construction des routes et des voiries urbaines.

L'emploi du bitume s'est accru avec le développement de l'automobile.

L'utilisation du bitume, naturellement collant, a permis de régler le problème de la poussière engendrée par la circulation sur le macadam. Progressivement, grâce à leurs caractéristiques de résistance, d'imperméabilité, et de facilité de mise en œuvre, des revêtements bitumineux ont recouvert pratiquement toutes les routes.

Née en Europe, l'industrie du bitume connaît alors son premier essor aux Etats-Unis, elle reviendra massivement sur le vieux continent après la seconde guerre mondiale, pour remplacer le goudron.

1.3. Provenance

Le bitume, corps plus au moins viscoélastique, est un corps complexe et il est illusoire de vouloir identifier la totalité de ses composants. De ce fait, le fractionnement des bitumes en familles chimiques est apparu comme l'approche la plus efficace.

Le bitume est composé d'hydrocarbures de poids moléculaire élevés appartenant en majorité aux groupes naphthénique et asphaltiques [Ait 1994].

En générale il existe trois types de liants hydrocarbonés :

- Les liants naturels, qui se trouvent dans la nature et qui sont utilisés depuis des temps très anciens. C'est une roche asphaltique telle qu'elle se présente dans le gisement et qui, après broyage est dénommée asphalte.
- Les bitumes de pétrole, qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers.
- Les goudrons, qui proviennent de la pyrogénéation à l'abri de l'air, du lignite et de la tourbe et du bois.

Mais les bitumes utilisés de nos jours pour le revêtement des routes et certains usages industriels sont fabriqués en distillation des pétroles bruts.

1.4. Structure physico-chimique

Le bitume est composé en moyenne de :

- 80 à 85 % de carbone.
- 10 à 15 % d'hydrogène.
- 2 à 3 % d'oxygène.
- Faibles quantités de soufre et de l'azote.
- Traces de nickel et d'aluminium.

Le bitume est un mélange d'hydrocarbures à poids moléculaire élevé pouvant appartenir aux groupes suivants : aliphatique, naphénique, aromatique et oléfinique.

L'utilisation comme solvant sélectif d'un hydrocarbure léger en grand excès, permet de fractionner un bitume en deux parties :

✓ Les maltènes

Ils représentent 70 % et plus du bitume. C'est la partie dissoute, elle a l'aspect d'une huile visqueuse de couleur foncée. Ils sont composés de résines, d'huiles aromatiques et d'huiles saturées.

✓ Les asphaltènes

Ils peuvent représenter jusqu'à 30 % du bitume. C'est la fraction précipitée, elle est constituée par des corps de poids moléculaire très élevé se présentant sous la forme d'un corps solide et noirâtre, cassant, à point de ramollissement élevé. Le pourcentage des asphaltènes sera d'autant plus élevé que le bitume sera plus dur.

Il n'y a pas de discontinuité entre maltènes et asphaltènes, le fractionnement obtenu dépend du solvant employé.

La figure 1.1 représente le schéma de fractionnement SARA du bitume.

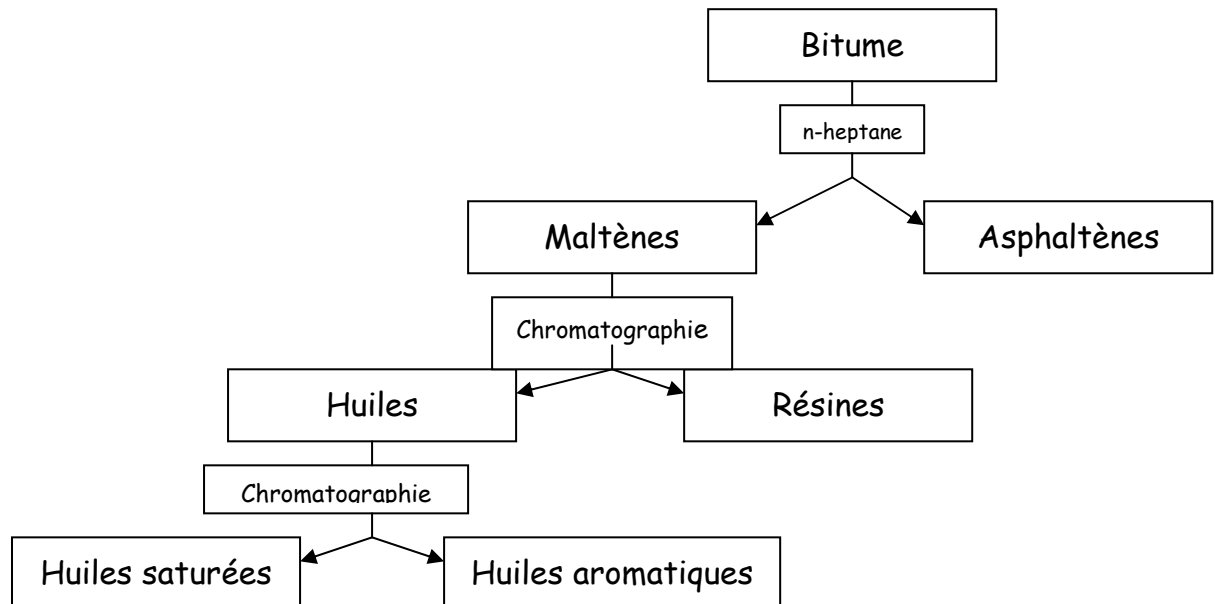


Figure1.1.schéma de fractionnement des bitumes SARA. [Laëtitia 2008]

✓ Macrostructure des asphaltènes

Le modèle de « Yen » considère le bitume comme un mélange hétérogène, un milieu colloïdal complexe, où des agrégats dispersés de molécules ou micelles (les asphaltènes) sont distribués dans la phase continue (les maltènes).

1.4.1.Structure colloïdale

Trois types de structures apparaissent :

a.Structure I

L'édifice structural est assuré par un squelette d'asphaltènes. Le milieu dispersant est faiblement structuré par les résines. Les bitumes ont une structure « gel » et un comportement élastique.

b.Structure II

C'est une suspension diluée d'asphaltènes dans un milieu fortement structuré par les résines. Dans ce cas, les asphaltènes ne sont pas en interaction.

Les bitumes ont alors une structure « sol » et un comportement visqueux. Ils résistent bien aux sollicitations rapides mais ils sont plus sensibles que les bitumes « gel » aux sollicitations lentes ainsi qu'aux variations de la température.

c. Structure III

C'est une structure intermédiaire que possède la plupart des bitumes routiers. Les bitumes ont une structure « sol-gel » et un comportement Viscoélastique.

Les différents types de bitumes en fonction de leur composition chimique sont représentés dans le tableau 1.1

Tableau.1.1. Différents types de bitumes en fonction de leur composition [Had 2007]

Types de bitumes	% d'asphaltènes	% de résines	% d'huiles
Gel	>25	<24	>50
Sol	<18	>36	<48
Sol-gel	21 à 33	30 à 34	45 à 49

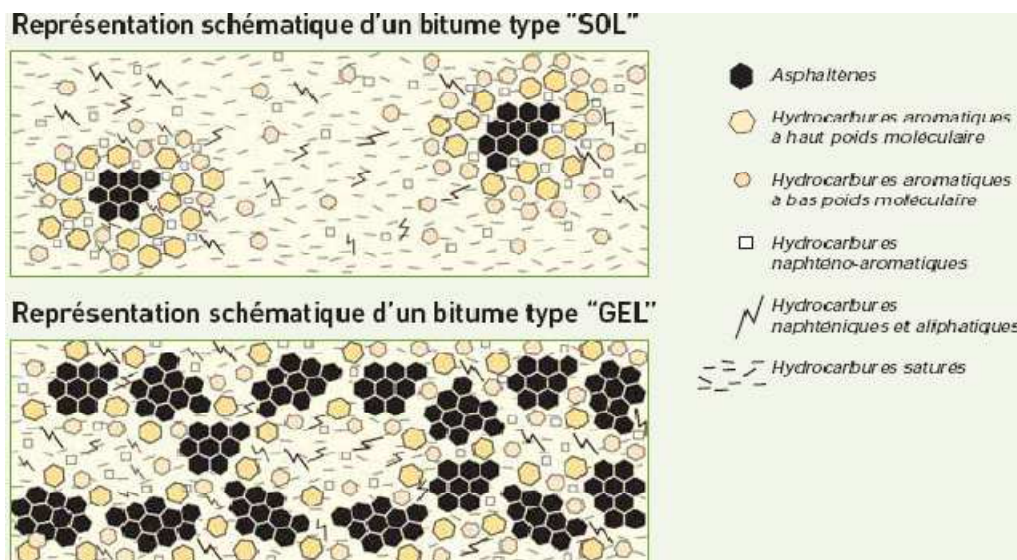


Figure 1.2 : représentation schématique des structures « sol » et « gel ». [Had 2007]

1.4.2. Stabilité colloïdale

$$I_c = \frac{\text{Asphaltènes} + \text{Saturés}}{\text{Résines} + \text{Aromatique}}$$

Est l'indice d'instabilité colloïdale défini par Gaestel.

Plus la teneur en asphaltènes est grande, plus le bitume est de type « gel » et plus la structure est instable, ceci correspond à un « I_c » d'autant plus grand.

La figure 1.3. représente un modèle de structure colloïdale.

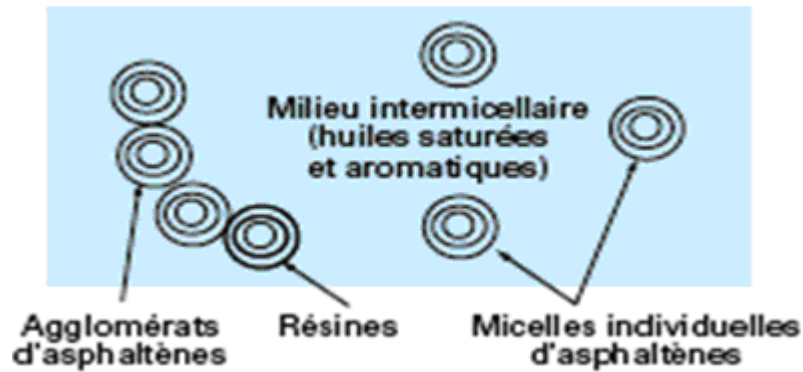


Figure 1.3. Représentation du modèle de structure colloïdale. [Yves 2003]

1.5. Fabrication

Les différents procédés de fabrication sont:

- La distillation
- La séparation
- Le soufflage
- Le craquage:

La figure 1.4 représente le schéma de principe de fabrication du bitume.

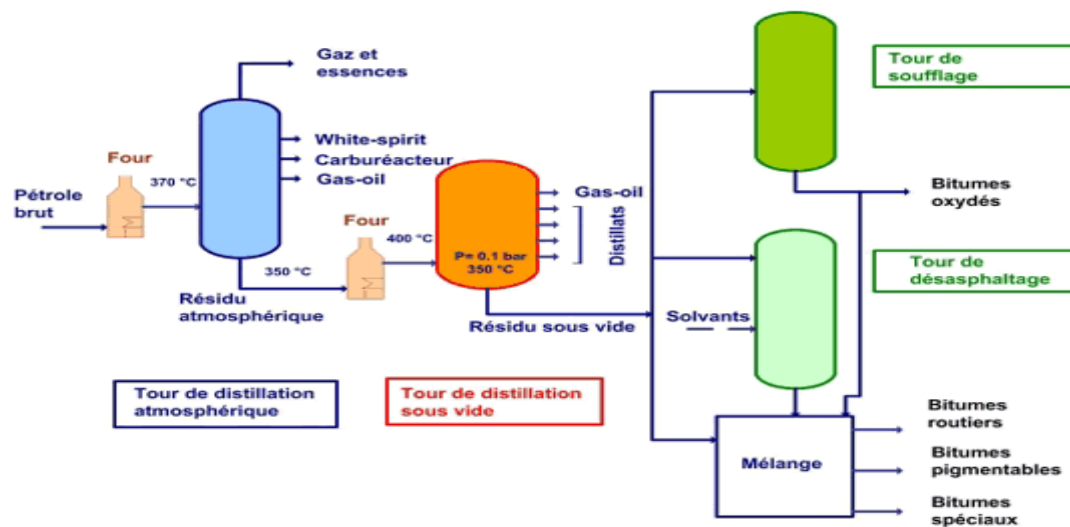


Figure 1.4. Principe de fabrication du bitume [Mag 2009].

1.6. Utilisation

Le bitume:

- Possède un grand pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, métal, verre.
- Est un excellent isolant thermique et diélectrique.
- Est léger, ductile et souple.

- Se comporte comme un matériau plastique ou élastique.
- Est insoluble dans l'eau.
- Est pratiquement inerte vis-à-vis de la plupart des agents chimiques.
- Isolant sonore et électrique.

Vu ses propriétés, le bitume est surtout employé dans les travaux routiers, aéroportuaires et même ferroviaires comme :

- Produit d'étanchéité.
- Mastic bitumineux pour la protection des berges et les piles de viaduc contre les affouillements.
- Mastic pour réparation de toitures.
- Revêtement insonorisant dans les voitures.
- Lien entre les câbles électriques et téléphoniques.
- Revêtements intérieurs et extérieurs de tuyauteries.
- Membranes étanches à l'eau pour les joints de ponts.
- Peintures.
- Des batteries.
- Encres pour impression.

Pour utiliser le bitume, trois manières sont possibles :

a. Le chauffage

C'est ce qui est fait lors de l'enrobage à chaud au bitume pur et le durcissement se fait par simple refroidissement.

b. La fluidification

C'est mélangé le bitume avec des huiles destinées à s'évaporer à la mise en œuvre.

c. L'émulsion

Dans l'eau qui s'évapore après la mise en œuvre. Ces deux derniers procédés concernent les techniques à froid.

1.7. Types de bitume

Bitume de pénétration

Résidu de la distillation sous vide du pétrole brut. Il y a la classe 20/30, qui est des bitumes très durs, 35/50 bitumes durs, 50/70 semi-durs, 70/100 mous. Les plus utilisés sont les types 70/100, pour des revêtements soumis à des charges relativement faibles et le 35/50 ou 50/70 pour les revêtements et couches intermédiaires soumis à une charge plus importante ou encore les sous-couches.

Bitume modifié

Bitume dont les propriétés rhéologiques ont été influencées en cours de production par la mise en œuvre d'une substance chimique dans le but d'améliorer ses caractéristiques.

Bitume fluxé

Composé d'un bitume de pénétration dont la viscosité a été réduite par ajout d'un fluxant.

Bitume fluidifié

Composé d'un bitume de pénétration dont la viscosité a été réduite par ajout d'un solvant. La quantité et la nature du solvant déterminent le type de bitume fluidifié et son comportement.

Emulsion de bitume

Systèmes dans lesquels de très petites particules de bitume (de 1 à 10 µm) sont divisées dans l'eau.

Bitumes oxydés

Issus de l'oxydation du bitume, utilisés dans l'étanchéité et les diverses industries. La figure 1.5 représente les différents types de bitumes et leurs applications.

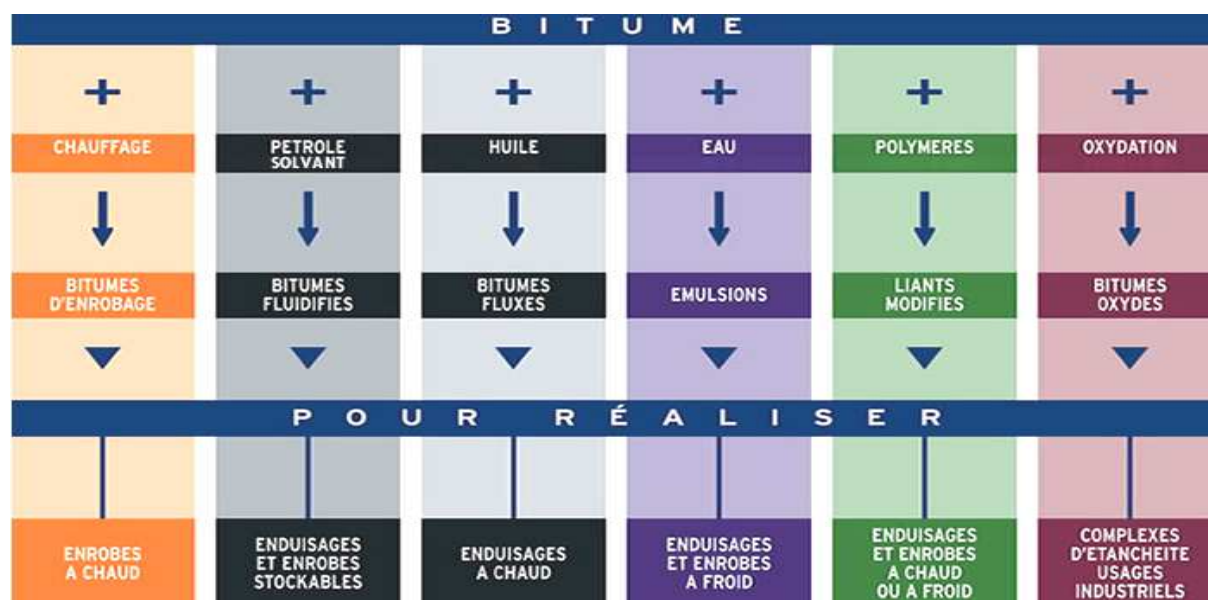


Figure 1.5. Application des bitumes.

1.8. Bitume en Algérie [Sao2008]

Les classes de bitumes purs employées en technique routière en Algérie sont 35/50 et 70/100.

Le pétrole algérien n'est pas assez dense pour en extraire du bitume, celui-ci est alors importé soit sous forme de matière première : brut réduit, raffiné à Arzew et Skikda, ou bien d'un produit fini : bitume pur.

Le bitume 35/50 est fabriqué à la raffinerie d'Arzew par soufflage, il est destiné aux enrobés à chaud.

Le 70/100 est fabriqué à Skikda par la distillation sous vide.

Pour ce qui est du bitume fluidifié, il est fabriqué aux unités de NAFTAL à partir du bitume pur (70/100) auquel il est ajouté un solvant.

1.9. Essais classiques sur le bitume

Parmi les essais effectués sur le bitume nous pouvons citer:

- ✓ Pénétrabilité à l'aiguille (NF T66-004)
- ✓ Point de ramollissement : (NF T66-008)
- ✓ Densité relative : (NF T66-007)
- ✓ Perte de masse au chauffage : (NF T66-011)
- ✓ Solubilité : (NF T66-012)
- ✓ Ductilité : (NF T66-006)
- ✓ Point de flamme et point de feu : (NF T66-118)
- ✓ Viscosité.
- ✓ Teneur en paraffine : (NF T66-015)
- ✓ Vieillessement :
 - a. Essai d'exposition :
 - b. Essai d'étuvage en couche mince : Fraas: (T66-026)

1.10. Les spécification de bitume pur

L'ensemble des résultats de l'expérimentation permet de proposer des spécifications à respecter qui résumant les caractéristiques des différentes classes de liants utilisées qui sont représentées dans le tableau 1.2.

Caractéristiques	Méthodes normalisées de référence	classes			
		20-30	35-50	50-70	70-100
Pénétrabilité (1/10e mm)	NF T66 - 004	20/30	35/50	50/70	70/100
Point de ramollissement (TBA) (°C)	NF T66 - 008	55/63	50/56	45/51	42/48
Densité relative	NF T66 - 007	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0-1,1	1,0 - 1,07
Perte de masse au chauffage %	NF T66 - 011	-	-	-	-
Pénétrabilité restante après perte de masse au chauffage	NF T66 - 011	-	-	-	-
ΔT bille et anneau après RTFOT (°C)	T 66 - 032	≤ 8	≤ 8	≤ 8	≤ 9
TBA minimale après RTFOT-C°	T 66 - 032	≥ 57	≥ 52	≥ 47	≥ 44
Pénétrabilité restante après RTFO T (%)	T 66 - 032	≥ 60	≥ 60	≥ 60	≥ 55
Point d'éclair (°C)	NF T-66 - 118	≥ 250	≥ 250	≥ 230	≥ 230
Ductilité (cm)	NF T66 - 006	≥ 25	≥ 60	≥ 80	≥ 100
Solubilité (%)	NF T66 - 012	$\geq 99,5$	$\geq 99,5$	$\geq 99,5$	$\geq 99,5$
Teneur en paraffine (%)	NF T66 - 015	$\leq 4,5$	$\leq 4,5$	$\leq 4,5$	$\leq 4,5$
Point de fragilité Fraass (C°)	NF T 66 -026	-	-	-	≤ -10

Tableau1.2. Spécifications des bitumes

1.11. La pénétration en fonction de la température

P. feiffer et Van Doormaal (1936) ont démontré la relation suivante :

Logarithme (pénétration) = A T + C.

A : la susceptibilité thermique qui est comprise entre 0,015 et 0,06.

T : la température.

C : une constante.

L'indice de pénétration IP est défini par la relation :

$$IP = (20 - 500A) / (1 + 50A).$$

IP varie de -3 pour des bitumes très susceptibles à la température jusqu'à +7 pour les moins susceptibles.

A et IP peuvent être calculés à partir des mesures de pénétrations à deux températures T1 et T2 grâce à l'équation :

$$A = [\text{Logarithme (pénétration) à T1} - \text{Logarithme (pénétration) à T2}] / (T1 - T2).$$

La figure 1.6 représente la courbe de la susceptibilité thermique.

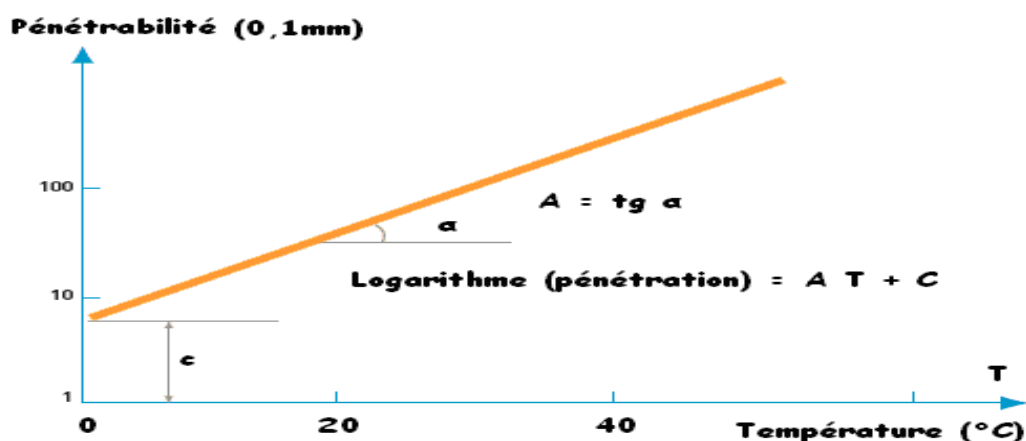


Figure 1.6. Susceptibilité thermique du bitume.

1.12. Comportement rhéologique du bitume

La rhéologie est la science d'étude la déformation pour les solide et l'écoulement pour les fluides. On a caractérisé les matériaux par la rhéologie pour pouvoir prédire leur comportement sous sollicitation mécanique.

Certains matériaux est de comportement élastique c'est à dire la contrainte de cisaillement est proportionnelle à la déformation (loi de Hooke), par contre il y a des matériaux de comportement visqueux c'est à dire la contrainte de cisaillement est proportionnelle au taux de cisaillement (loi de Newton).

Mais il existe de matériaux de comportement intermédiaire viscoélastique. Ce sont des matériaux ou bien des mélange complexes (bitume, polymère...).

1.12.1. Programme SHRP

Au début des années 1990 l'administration américaine avait lancé à une grande échelle un programme de recherche dite SHRP (Strategic Highway Research Program) pour l'objet de mesuré les caractéristique des liants.

Quatre essais ont été choisis dans ce programme, ils sont présentés dans le tableau 1.3.

Tableau 1.3 .Essais mécanique sur le bitume [Has 2002]

Type de l'essai	But de l'essai
Dynamic Shear Rheometer (DSR) (Rhéomètre de cisaillement dynamique)	Mesurer les propriétés du liant à hautes et moyennes températures
Rotational Viscometer (RV)	Mesurer les propriétés du liant à hautes températures
Bending Beam Rheometer (BBR) (Essai de flexion de poutre)	Mesurer les propriétés à Basse température
Essai de traction directe (DTT)	Mesurer les propriétés à Basse température

Le programme SHRP classe ces essais selon la température de l'enrobé bitumineux et selon le phénomène à étudier. Ce classement est représenté dans la figure 1.7

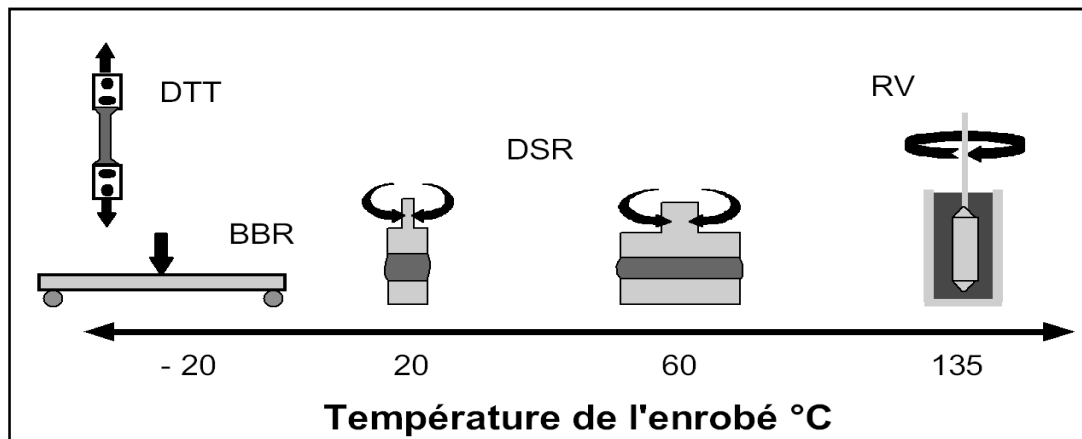


figure 1.7.classement des essais mécaniques sur le bitume

DTT – BBR : fissuration à basse Température

DSR (petits échantillons) : Fissuration par fatigue.

DSR (grands échantillons) : phénomène d'orniérage

RV : Construction.

Chapitre 2.

Les Granulats

2.1. Définition

Les granulats proviennent de carrières où les roches massives sont concassées, ou bien sont d'origine alluvionnaire.

Les granulats sont répartis en différentes classes granulaires normées qui sont définies par le diamètre minimal et le diamètre maximal du granulat (norme P18-101). Ainsi classés en fines, sables, gravillons, cailloux et graves.

L'intégration des granulats dans le mélange bitumineux nécessite de connaître différentes caractéristiques :

2.2. Caractéristiques intrinsèques

Ce sont, celles qui tiennent à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance aux chocs).

Il existe ensuite divers tests pour connaître la qualité d'un granulat. Ces tests sont :

2.2.1. Essai de Los Angeles : (N.P 18.573)

Consiste à mesurer la résistance aux chocs d'un granulat dans des conditions normalisées.

2.2.2. Essai M.D.E : (N.F.P.18.572)

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

2.2.3. Essai C.P.A (Coefficient de Polissage Accéléré) :

Ce test consiste à déterminer la variation de la rugosité après polissage accéléré.

2.3. Caractéristiques de fabrication

Celles qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité).

2.3.1. La granulométrie (NFP 18-304)

Les granulats sont caractérisés par :

- Leur **taille**, notée d/D avec d la dimension des plus petits éléments et D celle des plus gros.

- Leur **granulométrie** calculée grâce à des tamis de différentes tailles (0.08 mm, 0.200 mm, 0.315 mm, 0.5 mm, 1 mm, 2 mm, 3.15 mm, 4 mm, 5 mm, 6.3 mm, 8 mm, 10 mm, 12.5 mm, 14 mm, 16 mm, 18 mm, 20 mm, 25 mm,).

On peut les classer en **quatre** catégories selon leur granulométrie :

- ✓ les **sables**, dont la taille est du type 0/2, 0/4, ou 0/6.
- ✓ les **gravillons**, du type 2/4, 4/6, 6/10, 10/14, ou 14/20 .
- ✓ les **cailloux**, du type 20/40, 40/60.
- ✓ les **graves** du type 0/10, 0/14, 0/20, ou 0/30 qui peuvent être soit.

Naturelles soit reconstituées en mélangeant différentes catégories de granulats.

2.3.2.La forme (coefficient d'aplatissement): (NF.P.18.561)

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d'écartement $d/1,58$, exprimé en pourcentage les granulats qui passent sur des grilles normalisées, il donne une idée sur la forme des granulats plat ou cubique.

2.3.3. L'angularité

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

2.3.4.La propreté : (NFP 18-591)

Il s'agit de l'absence dans un granulat d'éléments fins indésirable. Ce sont soit des fines plastiques naturelles (argile), soit des fines issues du concassage ou du broyage des roches, elle influe sur l'adhésivité du bitume; Une faible propreté diminue l'adhésivité du bitume.

Chapitre 3 :

LES ENROBES BITUMINEUX

La réalisation d'un projet routier ne se limite pas à un bon tracé en plan et à un bon profil en long, en effet, une fois réalisée, elle devra résister aux agressions des agents extérieurs et à la surcharge d'exploitation : action des essieux des véhicules lourds, effets des gradients thermiques pluie, neige, verglas,.... Etc. pour cela il faudra non seulement assurer à la route de bonnes caractéristiques géométriques mais aussi de bonnes caractéristiques mécaniques lui permettant de résister à toutes ces charges pendant sa durée de vie.

La qualité de la construction des chaussées joue à ce titre un rôle primordial, celle-ci passe d'abord par une bonne reconnaissance du sol support et un choix judicieux des matériaux à utiliser, il est ensuite indispensable que la mise en œuvre de ces matériaux soit réalisée conformément aux exigences arrêtées.

3.1. Définition

On appelle enrobé hydrocarboné tout mélange de granulats et de liant hydrocarbonés, le terme est donc plus général que celui de béton bitumineux puisqu'il inclut les mélanges dont le liant n'est pas forcément un bitume (goudron, liant à base de bitume fluidifié,...etc.).

C'est un mélange à chaud ou à froid de **granulats** de type **0/D**, et de **bitumes pur ou modifié**, et **filler** (calcaire broyé) et d'éventuels **ajouts** (polymères, déchets,... etc.).

L'obtention des enrobés par mélange de granulats et de bitume fait appel à des propriétés bien spécifiques au bitume :

- Un pouvoir d'adhésion aux granulats.
- Une consistance variable avec la température.

3.2. Structure d'une chaussée

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches (figure 3.1), qui sont mises en œuvre pour répartir les charges induites par le trafic que le sol support seul ne pourrait pas soutenir.

Au sein de ces structures multicouches, chaque couche remplit une ou plusieurs fonctions particulières et contribue aux performances de l'ouvrage et à la résistance globale.

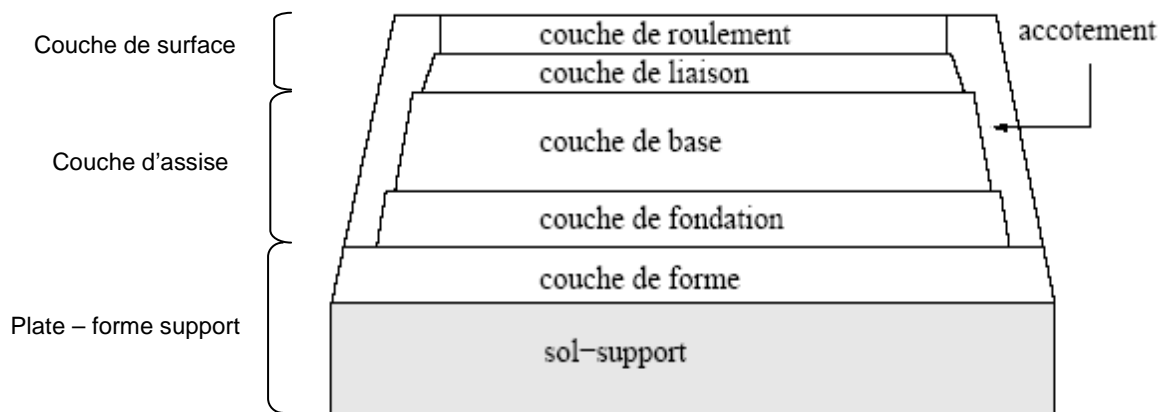


Figure 3.1 Constitution d'une structure de chaussée type.

3.3. Sollicitations dans les chaussées

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

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

Ces actions diverses, agissant simultanément sur la couche bitumineuse conduisent aux dégradations couramment observées,

3.3.1. Sollicitations mécaniques (effet de trafic) :

Principalement les effets dynamiques dus aux passages répétés des poids lourds, les effets statiques lors du ralentissement du trafic et les frottements de surface pneu-chaussée.

En première approximation, chaque couche de chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic. Le calcul des efforts et déformations qui apparaissent nécessite, en premier lieu, la connaissance du module complexe et éventuellement du coefficient de Poisson. Soulignons qu'en raison des propriétés particulières apportées par le bitume (viscoélastique), les enrobés bitumineux ont un comportement (donc un module) fortement dépendant de la température et de la vitesse de chargement.

Les tractions répétées à la base des couches sous l'effet du passage des véhicules créent des «micro» dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Ce phénomène est la fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Les effets du trafic ont été abondamment étudiés de par le monde et les publications relatives y sont abondantes.

Les compressions répétées sous le passage des véhicules peuvent induire des déformations permanentes qui, si elles sont trop importantes, se traduisent par un orniérage à la surface de la chaussée (figure 3.2).

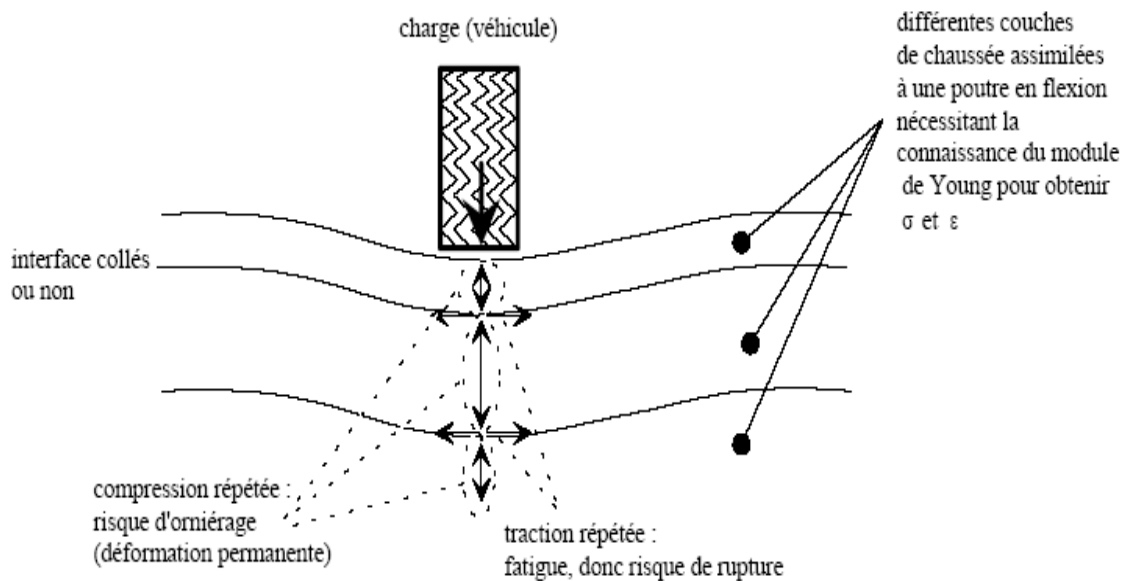


Figure 3.2: Schématisation des sollicitations induites par le trafic[Vin 2005].

3.3.2. Les Sollicitations climatiques (effet de la température) :

Entraînant des variations de température au sein des enrobés bitumineux. Ces variations sont soit de courtes durées (journalières) où soit de longues durées (saisonniers).

Mais à part l'accélération du vieillissement du matériau et les pertes de portance des chaussées en période de dégel dues à la présence de sols gélifs dans les couches d'infrastructure, les variations de la température ont deux effets mécaniques principaux (figure 3.3).

- ✓ Variation du module de l'enrobé bitumineux (facteur jusqu'à 100x),
- ✓ Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations contractions thermiques lors des changements de température (couplage thermomécanique).

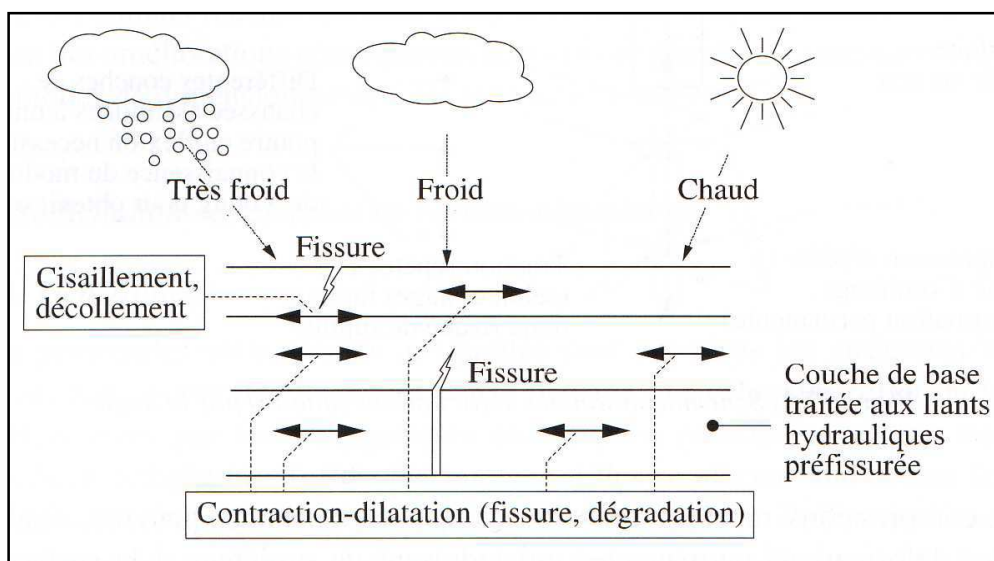


Figure. 3.3. Sollicitations dans la chaussée induite par la température [Mag 2009]

3.3.3. Les phénomènes chimiques :

Dus à l'oxydation naturelle des liants hydrocarbonés, à l'action des sels de déverglaçage provenant des entretiens hivernaux, et aux dégradations de surface de la chaussée par le rayonnement solaire.

3.4. Les dégradations de chaussées [Bas 2006]

3.4.1. Dégradation par orniérage :

La croissance du trafic lourd accélère l'apparition de la dégradation prématurée notamment l'orniérage, L'orniérage constitue la cause principale de dégradation des chaussées souples c'est une dépression longitudinale dans les traces du pneu Elle s'intensifie à température élevée.

La sensibilité des chaussées souples à l'orniérage dépend des caractéristiques des chaussées, de la teneur en liant, du type et de la granulométrie, la figure 3.4 illustre un exemple d'une chaussée atteinte d'orniérage.



Figure 3.4.phénomène d'orniérage

3.4.2. Mécanismes d'orniérage :

L'orniérage résulte des déformations dans la couche de surface ou dans les autres couches. Plusieurs mécanismes peuvent être à la base de l'orniérage. L'orniérage initial est causé par la densification de la chaussée sous le passage des pneus. Cependant, l'évolution de l'orniérage est liée à la déformation de cisaillement, Cela peut être constaté dans la montée à la surface de la chaussée entre et à l'extérieur du chemin de passage de pneus (bourrelet). Toutefois, pour les chaussées bien compactées, la contrainte de cisaillement dans la couche de l'enrobé bitumineux constitue le mécanisme principal de l'orniérage de la chaussée est causé par trois mécanismes différents :

- ✓ la déformation plastique permanente verticale dans la couche de surface.
- ✓ le fluage latéral dans la couche de surface.
- ✓ la déformation des couches inférieures.

Les études réalisées par «The American Association of State Highway Officials» (AASHO) montrent que la déformation de cisaillement est la déformation dominante de formation de la déformation permanente liée à l'orniérage. Des mesures expérimentales aussi bien que des simulations numériques ont montré, que l'orniérage se produit dans l'enrobé bitumineux très près de la surface où la contrainte de cisaillement prédomine.

L'orniérage dépend de la structure des chaussées et des caractéristiques des matériaux. Pour les chaussées avec une faible épaisseur d'enrobé bitumineux, le frottement et l'interaction entre les granulats constituent le mécanisme principal. Lorsque l'épaisseur de l'enrobé augmente, la contribution du frottement et d'interaction des granulats diminue et les propriétés rhéologiques du liant jouent un rôle principal pour résister à la décohésion.

3.4.3. Types d'orniérage

Les ornières peuvent être classées en trois niveaux :

petites (6 à 12,5mm); moyennes (12,5 à 25mm) et élevés (>25mm) .

Toutefois, on signale l'existence de trois types d'orniérage dans les chaussées souples classés en fonction de leur forme, comme illustré dans la figure 3.5.

- ✓ Les ornières d'usure qui sont dues à la perte progressive des particules de granulats de la couche de surface, ce type d'orniérage est causé par la combinaison des facteurs d'environnement et de trafic.
- ✓ Les ornières d'instabilité qui sont dues au déplacement latéral des matériaux dans la couche de l'enrobé bitumineux. Elles sont importantes pour des chaussées ayant des couches de surface de mauvaises caractéristiques.
- ✓ Les ornières structurelles qui sont dues à la déformation verticale permanente dans les couches inférieures.

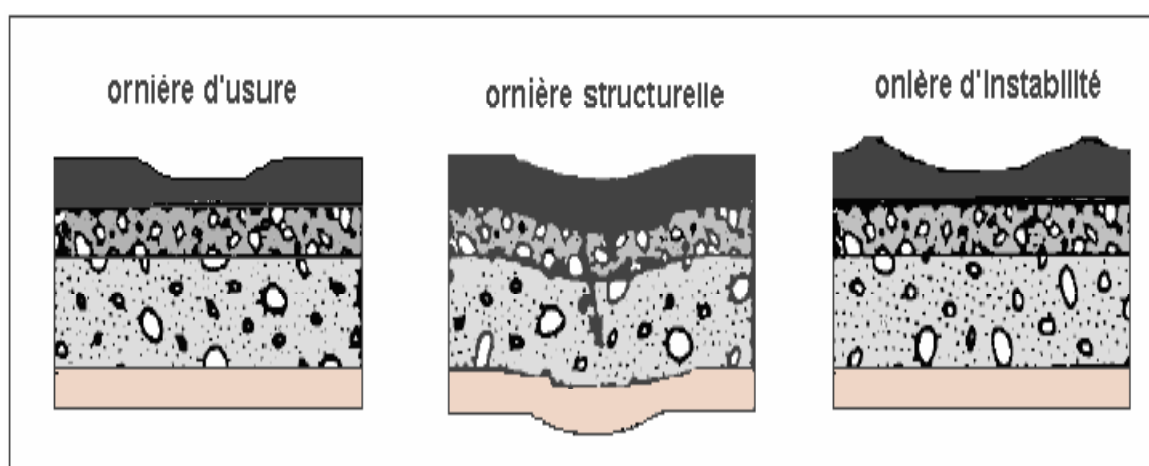


Figure 3.5: type d'orniérage

3.4.4. Facteurs influençant l'orniérage :

Les facteurs affectant l'orniérage sont classés en deux catégories. Les facteurs internes comme les propriétés des matériaux, de la structure des chaussées ,et les facteurs extérieurs comme le trafic et l'environnement.

3.4.4.1. Structure de chaussée :

Le niveau des contraintes dans une chaussée constitue un facteur majeur dans le mécanisme d'orniérage. Il dépend de l'épaisseur de la chaussée et de l'amplitude du chargement. Pour les chaussées de faible épaisseur, un défaut de compactage de plate-forme support accélère l'orniérage. La déformation permanente dépend aussi de l'épaisseur de la couche de surface. Dans le cas d'une couche mince, on a une distribution du chargement mauvaise, ce qui induit de fortes contraintes dans la couche d'assise, qui produisent ainsi des déformations permanentes . Ces déformations conduisent à l'orniérage d'instabilité

3.4.4.2. Facteurs liés au trafic :

Le passage des véhicules induit des contraintes qui peuvent conduire à des déformations permanentes dans les chaussées et à l'orniérage. On donne ci-dessous une présentation des paramètres du trafic qui influencent l'orniérage:

a- Charge par essieu :

Le passage de véhicules entraîne des déformations élastiques, plastiques et visqueuses dans la chaussée. Les charges élevées causent des déformations permanentes, qui entraînent des ornières dans la chaussée.

b- Configuration des essieux :

Trois configurations d'essieux sont utilisées : essieu simple; tandem et tridem. Le nombre et l'espacement d'essieux sont des facteurs déterminants pour la transmission des charges à la chaussée. L'augmentation du nombre d'essieux réduit la charge transmise à la surface de la chaussée.

Un essieu simple produit plus d'endommagement qu'un essieu tandem, également un essieu tridem produit moins d'endommagement qu'un essieu tandem.

c- Type de pneus :

La réponse de la chaussée est également affectée par le type de pneus ,ont indiqué que des pneus single produisent plus d'orniérage que les pneus jumeaux.

d- Vitesse de circulation :

La dégradation de la chaussée augmente avec la réduction de la vitesse de circulation. Une vitesse de circulation faible (notamment sur l'intersection en milieu urbain) conduit à une augmentation du temps de chargement, et par conséquent à une augmentation du risque d'orniérage.

3.5. Types d'enrobés

3.5.1. Les enrobés à froid :

Dans les enrobés à froid contrairement aux enrobés à chaud, les granulats ne sont pas chauffés, le liant utilisé est alors un bitume fluidifié ou émulsion de bitume, les enrobés à froid sont utilisés, le plus souvent, en reprofilage et pour l'entretien des routes.

3.5.2. Les enrobés à chaud :

Ces enrobés à chaud sont obtenus à partir de granulats passés dans un tambour sécheur (pour le chauffage et la déshydratation). Dans ce cas le liant utilisé est un bitume pur ou un bitume fluidifié très visqueux. Les enrobés à chaud peuvent être utilisés sous deux formes :

a- Les Graves bitumes (GB) :

Elles sont destinées en général pour la réalisation des couches de bases, des couches d'assises des chaussées et des couches de fondation. Les graves bitumes ont une granulométrie 0/20 ou 0/25 et contiennent 4 à 4,5% de bitume.

Mises au point au début des années 70, elles représentent aujourd'hui la première technique de construction d'assises de chaussée, comme leur nom indique les **Graves Bitumes** sont constitués de gros granulats (en général 0/20)

De plus ce type d'enrobé lui confère de bonnes résistances mécaniques, en effet, la grave bitume est souvent utilisée dans la l'assise des chaussée.

b- Les Bétons Bitumineux (BB) :

Ils sont destinés aux couches de roulement pour chaussées neuves ou pour le renforcement des chaussées. On définit deux catégories de formules : une formule grenue, et une formule semi grenue, par l'indication des pourcentages de refus aux tamis 2 et 6 mm.

Plus dosés en liant que les Graves bitumes, ils sont destinés essentiellement pour la réalisation des couches de roulement .Ils ont une granulométrie 0/14 ou 0/10 et contiennent généralement une teneur en liant élevée($\geq 5\%$) Selon la compacité recherchée.

Tableau 3.1. représente les valeurs spécifiques des BB 0/10 et 0/14

	Formule semi grenue (%)	Formule grenue (%)
BB 0/10 -Tamis 6 mm. -Tamis 2 mm	25 à 35 55 à 70	35 à 45 60 à 75
BB 0/14 -Tamis 6 mm. -Tamis 2 mm	40 à 50 60 à 75	50 à 60 60 à 75

Seules les formules semi grenue sont pratiquement utilisées car les formules grenues à teneur élevée en gravillon sont difficiles à mettre en œuvre, on doit respecter la composition granulométrique dans toutes les phases de fabrication et

mise en œuvre, sinon on risque d'avoir des zones trop riches en gravillons et qui ne peuvent pas être compactés.

Pour des couches de roulements type des chaussées neuves et des renforcements, c'est les bétons bitumineux semi grenue 0/14, mise en œuvre à une seule couche de 8 cm qui sont les plus intéressants.

3.5.3. Classification des bétons bitumineux :

Les bétons bitumineux sont classés selon les critères suivants :

3.5.3.1. Granulométrie :

- Continue (couche de base et liaison), semi grenue (couche de liaison et couche d'usure), grenue (couche d'usure),
- Discontinue (lorsqu'une classe granulaire intermédiaire n'est pas utilisée).
- Les Bétons bitumineux semi grenus (BBSG), très utilisés en France pour les couches de roulement. Epaisseur de couche d'environ 6 cm.

3.5.3.2. Epaisseur :

- **Les bétons bitumineux mince (BBM), très mince (BBTM), et ultra mince (BBUM) :**

Ils s'appliquent aussi bien sur chaussée neuve qu'en entretien, ils ont une épaisseur de mise en œuvre comprise entre 3 et 5 cm pour les BBM, entre 1,5 et 3 cm pour les BBTM et de 1,5 cm pour les BBUM, selon la granulométrie utilisée.

Très utilisé en France pour les couches de roulement, elle permet de réaliser une couche d'usure qui, après quelques années, pourra être rabotée et refaite.

- **Les Bétons Bitumineux Drainant (BBDr) :**

Ils sont caractérisés par un pourcentage de vides élevé. La particularité de ces vides est qu'ils sont communicants afin d'assurer le drainage de l'eau (l'eau de pluie en général) dans l'enrobé.

Il existe les bétons bitumineux drainant classiques dont le pourcentage des vides est de l'ordre de 20% et les bétons bitumineux drainant à teneur en vides élevée; de l'ordre des 30%. L'épaisseur nominale d'application est de 4 cm.

- **Les Bétons bitumineux à module élevé BBME**

Sont des enrobés à base de bitume dur, dont la composition a été optimisée pour garantir de bonnes performances tant en matière de stabilité que de durabilité.

Ces produits permettent des économies substantielles grâce à la réduction des épaisseurs de chaussée.

Les corps de chaussée réalisés avec des BBME et des EME sont constitués de la façon suivante:

- une couche de fondation en grave reconstituée humidifiée
- une couche de base en grave bitume (GB ou EME)
- une couche de roulement en béton bitumineux (BBMA ou BBME)

Dans les années 80, les techniciens français ont développé et mis en œuvre des bétons bitumineux à hautes performances, à savoir des couches de support

richement dosées en bitume très dur, à utiliser dans les cas de sollicitations sévères (fort trafic lourd canalisé, par exemple) en remplacement des matériaux normés de l'époque. Le but recherché était d'avoir une gamme d'enrobés d'entretien à très haute tenue à l'orniérage et à la fatigue.

Le bilan actuel peut être résumé comme suit : les enrobés à module élevé EME testés et observés rendent tous les services escomptés. Les performances recherchées vis-à-vis de la résistance à l'orniérage et à la fatigue sont très bonnes.

3.6. Classement des types de comportement des matériaux bitumineux :

[Yan 2001, Dan 2006].

La figure 3.6 présente les principaux domaines du comportement des enrobés bitumineux lors des essais de caractérisation mécanique. Ainsi on distingue trois catégories principales d'essais en fonction du nombre de cycles imposés et de la norme de la déformation imposée, ϵ :

- ✓ Pour un faible nombre de cycles de chargement et des déformations élevées (quelques pourcents), le comportement est fortement non linéaire.
- ✓ Pour des chargements comprenant quelques centaines de cycles et des déformations faibles, le comportement est considéré, en première approximation, viscoélastique linéaire.
- ✓ Le phénomène de fatigue se produit lors de chargements de plusieurs dizaines de milliers de cycles et des déformations "faibles" qui favorisent le développement de l'endommagement.

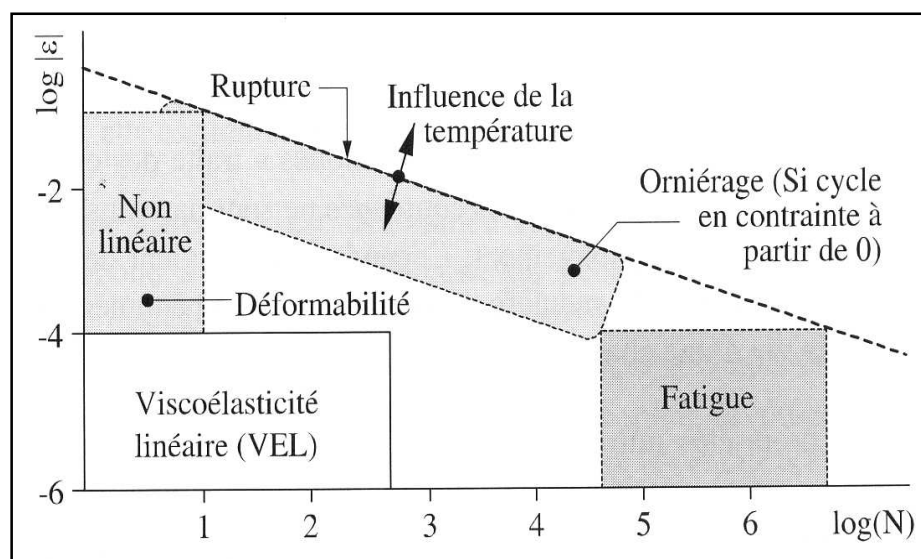


Figure. 3.6 type de comportement des matériaux bitumineux [Yan 2001]

La figure 3.6 fournit un ordre de grandeur de différents domaines de comportement type pour une température fixée. Les frontières considérées correspondent, bien sûr, à des ordres de grandeur qui peuvent varier sensiblement selon le matériau, la température et la direction du chemin de sollicitation (compression, cisaillement, ...).

Les quatre propriétés mécaniques importantes pour les matériaux traités aux liants hydrocarbonés utilisés en technique routière sont :

- ✓ la rigidité ou le module (comportement viscoélastique linéaire) ;
- ✓ le comportement à la fatigue ;

- ✓ le comportement à l'orniérage qui correspond à l'accumulation de déformations permanentes.
- ✓ la fissuration et la propagation des fissures. En particulier les phénomènes de fissuration par apparition de contraintes liées aux variations de température (dilatation et/ou contraction thermique) sont un aspect important qui introduit un couplage thermomécanique.

Ces quatre propriétés sont analysées selon des procédures plus ou moins rationnelles dans les méthodes de dimensionnement de chaussées.

3.7. QUALITES EXIGÉES DES ENROBES BITUMINEUX

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

3.7.1. La stabilité

La stabilité est la résistance à la déformation permanente de la couche sous l'effet des charges statiques et dynamiques . Elle est liée :

- A la nature du liant.
- Au dosage en liant et au fillers.
- A la nature et à la forme des grains.

L'enrobé est d'autant plus stable que l'angle de frottement interne des granulats ainsi que la dureté du liant sont élevés.

L'insuffisance de la stabilité se traduit par un fluage avec formation de dépressions ou d'ornières.

3.7.2. La flexibilité

C'est l'aptitude de l'enrobé à admettre sans se fissurer des déformations d'ensembles provoquées par les déflexions des couches.

La ductilité du liant doit donc demeurer suffisante aux basses températures pour éviter la fissuration du tapis qui risque de résulter d'une insuffisance de flexibilité.

3.7.3. Insensibilité à l'eau

La stabilité à l'eau dépend de deux facteurs :

- ✓ l'adhésivité du liant aux granulats
- ✓ l'absence d'élément argileux

3.7.4 La durabilité

C'est la résistance à la fissuration par fatigue liée directement au mastic (qualité, quantité et teneur en bitume).

L'enrobé utilisé en couche de surface doit, en plus de toutes ces qualités, avoir certaines propriétés telles que :

- ✓ La résistance aux efforts tangentiels et au poinçonnement.
- ✓ Une bonne rugosité.

- ✓ L'imperméabilité à l'eau.

3.7.5. La durée de vie de l'enrobe

Lorsqu'on soumet les enrobés bitumineux à des sollicitations répétées, ils se rompent après un certain nombre de répétitions de la sollicitation.

Le nombre de cycles répétés jusqu'à la rupture de l'enrobé représente la durée de vie de ce dernier.

3.8. Les essais sur les enrobés bitumineux :

Parmi les essais de laboratoire utilisés sur les mélanges bitumineux on cite :

- ✓ Essai Duriez. [NF P 98-251-1]
- ✓ L'essai Marshall. [NF P 98-251-2]
- ✓ La Presse à Cisaillement Giratoire. [NF P 98-252]
- ✓ L'essai de la résistance aux carburant. [NF P 98-818-43]
- ✓ L'essai d'orniérage. [NF P 98-818-22]
- ✓ L'essai de traction indirecte. [NF P 98-818-23]
- ✓ Essai de fluage statique.
- ✓ Essai de fluage dynamique.
- ✓ les essais de module. [NF P 98-818-26]
- ✓ Les essais de fatigue. [NF P 98-818-24]

3.9. Fabrication des enrobés bitumineux :

La fabrication de l'enrobé s'effectue aux alentours de 145°C à 160°C selon la classe du bitume dans des centrales d'enrobage.

Ces centrales, appelées aussi postes, sont composées de plusieurs parties :

- ✓ de **pré doseurs** volumétriques ou pondéraux pour les **granulats**.
- ✓ de **doseurs** pondéraux pour le **filler**.
- ✓ d'un tambour **sécheur dépoussiéreur** pour sécher les **granulat**.
- ✓ d'une ou plusieurs **citernes** pour le stockage du **bitume**.
- ✓ d'un malaxeur pour mélanger bitume, granulats et les divers ajouts.
- ✓ de trémies de stockage et de chargement.

Les camions type 25 tonnes font ensuite l'aller-retour entre la centrale et le chantier. Ces postes peuvent être soit fixes soit mobiles.

3.10. Transport et mise en œuvre

Les enrobés sont déposés par les camions d'approvisionnement, conservant l'enrobé à la température d'application idéale en fonction de la classe du bitume dans la trémie de stockage puis nivelés, et pré compactés par la table. Le compactage final est ensuite assuré par des compacteurs deux billes, en pratiquant un nombre de passage défini en fonction de la porosité et de la rugosité de surface à atteindre.

3.11. L'enrobé modifié

Le bitume rentre dans la composition des enrobés constituant la couche de roulement et l'assise de chaussée. Dans les chaussées souples l'enrobé bitumineux doit être assez souple à faible température de service, pour empêcher la fissuration et d'être suffisamment rigide à haute température de service pour prévenir l'orniérage.

Les problèmes d'orniérage des couches de surface sont le résultat de l'accumulation de déformations permanentes, et ceci, sous l'effet de températures élevées.

Plusieurs études ont montrées que la cause principale de ces dégradations était la faible stabilité de la couche de roulement. Pendant les périodes chaudes, l'orniérage est d'autant plus important que la circulation est canalisée et à faible vitesse dans les zones d'accélération ou de décélération. Le type d'orniérage le plus rencontré sur les chaussées souples est issu du fluage de l'enrobé bitumineux.

La modification des enrobés par des polymères ou par déchets polymériques offre une solution pour corriger ce problème de stabilité et de minimiser les désordres de la chaussée sur des formules d'enrobés.

Les polymères sont utilisés pour la modification des liants bitumineux et ceci depuis plus de 30 ans afin d'améliorer la maniabilité du liant pendant la construction et sa résistance aux déformations de services.

L'incorporation de ce modifiant aux bitumes entraîne une modification qui est fonction du bitume lui-même, du copolymère et de sa teneur. La modification peut s'opérer de deux manières, la première étant la modification du bitume (procédé A), la deuxième consiste en l'ajout direct du modifiant lors de l'opération de malaxage de l'enrobé (procédé B).

3.11.1 L'avantage de l'enrobé modifié

Les avantages de l'enrobé modifié sont:

- ✓ Augmentation de la résistance à l'orniérage pour couche de roulement. application pour BBME et EME.
- ✓ Augmentation importante du module d'élasticité des enrobés avec un bitume 35/50 ou 50/70. Application pour EME.
- ✓ Augmentation de la cohésion et de la souplesse de la surface.
- ✓ Luter contre le bruit de roulement des véhicules.
- ✓ Assurer la qualité anti-carburant sur une surface.
- ✓ Luter contre les fissures dans les chaussées très sollicitées.
- ✓ Augmenter la durée de vie de l'enrobé bitumineux et donc de la chaussée.
- ✓ Réduire l'épaisseur des couches d'enrobés bitumineux dans le dimensionnement des chaussées.
- ✓ Augmenter le module de l'enrobé bitumineux.
- ✓ Améliorer la résistance de l'enrobé bitumineux aux déformations permanentes, au poinçonnement et à l'orniérage.
- ✓ Réduire la sensibilité des enrobés bitumineux aux hautes températures.

3.11.2. Les inconvénients

Les inconvénients qui peuvent présenter les enrobés modifiés sont :

- ✓ un coût assez nettement plus élevé que les enrobés classiques.
- ✓ difficulté de la maîtrise d'exécution.

3.11.3. Procédés de modification

La modification des enrobés peut-être réalisée par deux procédés :

- ✓ la modification du liant par ajouts de polymères, pneus recyclés, produits chimiques et autres,
- ✓ la modification de l'enrobé en centrale par ajout d'additif de type polymère, poudrette de pneus recyclé, etc..

a. L'enrobé modifié par la méthode sèche :

L'enrobé est fabriqué selon les proportions de l'étude de formulation des différentes fractions des granulats et du bitume, la quantité de l'additif est choisie comme un pourcentage en poids du squelette granulaire. L'additif est incorporé avec le squelette granulaire lors du malaxage, le bitume est introduit par la suite.

Une fois les granulats enrobés, des éprouvettes de type Marshall sont confectionnées.

Pour évaluer l'effet des polymères sur les performances mécaniques de l'enrobé, nous avons effectué l'essai Marshall [NFP, 98].

b. L'enrobé modifié par la méthode humide (Bitume modifié) :

Le procédé humide consiste à modifier le bitume pur avec des polymères à très haute température. Le résultat est un liant souvent référencé par le terme « bitume modifié ». Les recherches ont montré que les propriétés des mélanges bitume-polymère dépendent énormément de la nature du polymère, de sa finesse et de sa concentration, du temps de malaxage et sa température, et enfin de l'énergie de malaxage. Le processus physico-chimique d'interaction polymère-bitume est évidemment complexe.

Chapitre 4.

LES POLYMERES

La notion de macromolécule n'est apparue que tardivement dans l'histoire de la chimie, de nombreux chercheurs ne voient là que des agrégats ou micelles. Il faut attendre les années 1920-1930 pour que l'idée de macromolécule soit acceptée.

Dans le début des années 1950, Carothers et Flory admettent l'existence d'édifices covalents de masse molaire supérieure à 105 g/mol. C'est le fondement de la théorie des polymères. Dès cette époque, la notion de polymères a été établie.

4.1. Définition

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs et « meros » parties soit « plusieurs parties » ou « plusieurs unités ».

C'est une substance généralement organique, liquide ou solide à température ambiante, de masse moléculaire élevée. Elle est caractérisée par la répétition d'un ou plusieurs types de motifs monomères liés les uns aux autres par des liaisons covalentes.

Le nombre moyen de monomères dans un polymère est le degré de polymérisation.

Le haut polymère est celui dont le degré de polymérisation est élevé, si celui-ci est faible, le composé est un oligomère.

4.2. Provenance

Un polymère peut être d'origine naturelle, ou obtenu par modification chimique d'un polymère naturel, ou bien entièrement synthétisé par voie chimique ou enzymatique par une réaction de polymérisation en établissant des liaisons covalentes entre de petites molécules monomères issues du craquage à la vapeur de la fraction légère d'essence dite naphte ou naphtha, produit de la distillation du pétrole brut.

Cette polymérisation conduit à la formation de macromolécules pouvant avoir une structure tridimensionnelle.

Les polymères industriels peuvent être fabriqués à partir d'un seul type de monomères, ils sont alors dits homopolymères, ou bien à partir de plusieurs types de monomères et ils sont dits copolymères.

On distingue deux grandes catégories de réactions chimiques permettant la préparation des polymères :

✓ La polyaddition

Dite aussi polymérisation en chaîne qui est une réaction conduisant à la formation de polymères par additions successives de monomères sur une extrémité active de la chaîne macromoléculaire.

✓ Polycondensation

Dite aussi polymérisation par étapes qui est une réaction chimique entre molécules de base possédant des groupements fonctionnels différents. Cette réaction mène à l'élaboration de macromolécules dites polycondensats.

4.3. Structure physico-chimique

✓ Structure primaire

Les liaisons covalentes constituant le squelette macromoléculaire sont le plus souvent des liaisons carbone - carbone mais peuvent également résulter de la liaison d'atomes de carbone avec d'autres atomes, notamment l'oxygène ou l'azote. Il existe également des polymères pour lesquels l'enchaînement résulte de liaisons ne comportant pas d'atomes de carbones.

Cet enchaînement de motifs répétés présente chez les polymères les plus simples une structure linéaire. Il peut également y avoir des branches latérales, résultant soit d'une réaction chimique parasite au cours de la synthèse du polymère, soit d'une réaction de greffage pratiquée volontairement sur le polymère pour en modifier les propriétés physico-chimiques.

La macromolécule ramifiée est représentée par la figure 4.1.

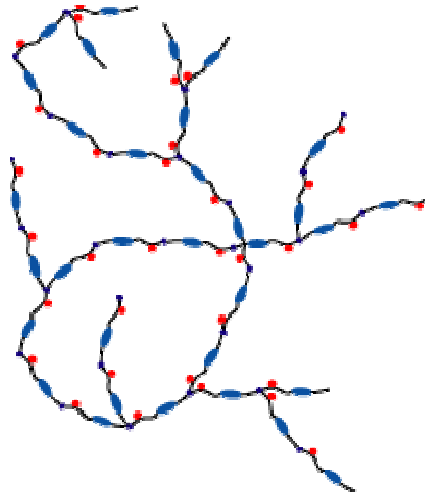


Figure 4.1. Schéma d'une macromolécule ramifiée

✓ Structure bi ou tridimensionnelle

Il existe parfois des liaisons covalentes vers d'autres morceaux de chaînes polymères, les molécules sont alors dites branchées ou ramifiées. Lorsque de nombreuses chaînes (ou chaînons) ont été réunies par un certain nombre de liaisons covalentes, elles forment alors un réseau réticulé.

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermomécaniques, il existe alors des thermoplastiques, des thermodurcissables, des élastomères.

La macromolécule réticulée est représentée par la figure 4.2.

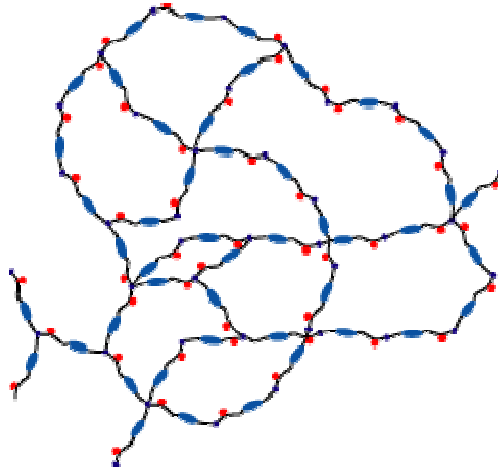


Figure 4.2. Schéma d'une macromolécule réticulée.

4.4. Utilisation

Vu leur légèreté et leurs bonnes propriétés mécaniques ainsi que leur faible prix de revient, les polymères industriels sont utilisés dans :

- ✓ L'étanchéité.
- ✓ Le renforcement, la séparation et le drainage.
- ✓ Les réseaux de transport d'énergie ou de fluides.
- ✓ Les revêtements et les équipements routiers.
- ✓ La protection des ouvrages par peinture ou revêtement plastique.
- ✓ Les appareils d'appui.
- ✓ Les gaines pour câbles de haubanage ou de précontrainte.
- ✓ Les corniches et équipements divers.
- ✓ L'emballage.
- ✓ Le cosmétique.
- ✓ Les revêtements de surface.
- ✓ Les peintures et vernis.
- ✓ Les films, fibres textiles et matériaux composites.
- ✓ Les pneumatiques.

Les polymères sont également utilisés comme des plastifiants.

4.5. Types des polymères

On peut classer les polymères en trois types selon l'origine :

a. Polymères naturels :

Ils existent en l'état dans la nature, ils sont couramment subdivisés selon leur provenance végétale, animale ou minérale, tels que le caoutchouc, la cellulose, le collagène et l'amylose.

b. Polymères artificiels (régénérés) :

Ils résultent d'une transformation chimique de constituants de base d'origine naturelle, tels que les dérivés cellulosiques dont la molécule de base est la cellulose.

C .Polymères synthétiques :

Ils sont souvent proches des polymères naturels bien que leurs constituants de base n'existent pas dans la nature, tels que le caoutchouc synthétique (PE) et le polypropylène (PPRO).

4.6. Les propriétés des polymères

4.6.1. Thermoplastiques

Ils sont constitués de macromolécules de structure linéaire ou ramifiée qui sont liées entre elles par des liaisons faibles qui peuvent être rompues, soit par élévation de la température, qui entraîne un ramollissement progressif réversible, soit par dissolution dans un solvant adéquat. Après refroidissement ou évaporation du solvant, les liaisons se rétablissent et le polymère retrouve son état solide initial. Les thermoplastiques sont donc faciles à mettre en œuvre et recyclables et peuvent être combinés au bitume à température élevée.

4.6.2. Thermodurcissables

Ils sont constitués de macromolécules formatant un réseau tridimensionnel. L'élévation de la température ou l'addition d'un solvant ne permettent pas de rompre les liaisons covalentes. Les thermodurcissables sont alors infusibles et insolubles après réticulation d'où ils sont non recyclables.

4.6.3. Élastomères

Ils sont obtenus à partir de polymères linéaires par une réticulation (ou vulcanisation), dont la densité est beaucoup plus faible que dans le cas des polymères thermodurcissables, ce qui conduit à la formation d'une structure partiellement tridimensionnelle.

La vulcanisation (ou pontage) permet de transformer un polymère à comportement plastique en un matériau à comportement élastique. Du fait de la légère vulcanisation, ce matériau a de grandes déformations élastiques réversibles.

Les élastomères sont difficilement recyclables, ils résistent bien à l'influence des produits tels que les huiles, les essences et sont insensibles à l'eau et ils résistent également bien à l'oxygène et au rayonnement solaire; donc au vieillissement naturel.

Les élastomères contiennent de 50 à 60 % de polymères, le reste est composé de charges, agents de vulcanisation, accélérateurs, produits retardant le vieillissement et d'autres additifs.

Les composés élastomères comme les pneumatiques sont souvent un mélange de caoutchouc naturel et de caoutchouc synthétique.

Les élastomères sont classés en trois familles principales :

- ✓ Elastomères à usages généraux tels que :
 - Le caoutchouc naturel (NR).
 - Le polyisoprène (IR).
 - Le copolymère butadiène-styrène (SBR).
- ✓ Elastomères à usages plus spécifiques tels que :

- Le polychloroprène (CR).
- Le copolymère acrylonitrile-butadiène (NBR).

✓ Elastomères thermoplastiques (TPE) :

Ils ne sont pas vulcanisés (ou réticulés) lors de la fabrication, mais ils possèdent, à la température de service, des propriétés similaires à celles du caoutchouc vulcanisé.

Les élastomères thermoplastiques sont :

- Les copolymères séquencés (ou à blocs) à base de styrène tels que le butadiène-styrène (SBS) et le styrène-isoprène (SIS).
- Les mélanges physiques de polymères (dérivés des polyoléfines TPO).
- Les copolymères polyesters (CPE).
- Les polyuréthanes thermoplastiques (TPU).
- Les copolymères polyester-polyamide (CPA).

4.7. Polymères modifiant les bitumes :

4.7.1. Polymères thermoplastiques

Ils sont caractérisés par le ramollissement durant le chauffage et le durcissement durant le refroidissement, tels que :

- ✓ Le polyéthylène (PE).
- ✓ Le polypropylène atactique et isotactique (aPP, iPP).
- ✓ Le chlorure de polyvinyle (PVC).
- ✓ Le polystyrène (PS).
- ✓ L'éthylène-acrylate de méthyle (EMA).
- ✓ L'éthylène-acrylate de butyle (EBA).
- ✓ L'éthylène-acétate de vinyle (EVA).

Les EVA sont les plus utilisés pour la modification des enrobés bitumineux. L'acétate de vinyle améliore la souplesse et l'adhésivité et l'éthylène améliore la susceptibilité thermique.

Ils sont compatibles avec les liants, non toxiques, recyclables, élastiques et solides à température ambiante.

4.7.2. Caoutchoucs naturels et synthétiques : tels que :

- Le polybutadiène.
- Le butyle caoutchouc.
- Le caoutchouc styrène-butadiène (SBC).
- Le polychloroprène connu sous le nom de néoprène.
- Le latex (polyisoprène) :

Le latex est un matériau élastique élaboré à partir du latex naturel de l'hévéa ou synthétisé artificiellement par polymérisation.

Il est utilisé pour son adhérence et son imperméabilité, en couche de roulement ultramince sur un support peu déformé.

Le caoutchouc naturel est susceptible à la décomposition et à l'oxydation.

il possède un poids molaire trop élevé pour être directement dissous dans le bitume, il doit être partiellement décomposé et mécaniquement homog.

4.7.3. Caoutchoucs thermoplastiques

- Le styrène-isoprène-styrène (SIS).
- Le styrène-butadiène (SB).
- Le styrène-butadiène-styrène (SBS) :

Malgré leur coût onéreux, les SBS sont les plus utilisés comme agent modifiant dans les bitumes de par leurs propriétés suivantes :

- Au fur et à mesure que la température s'élève, ils se comportent comme des corps plastiques et le phénomène est parfaitement réversible car lors du refroidissement, le comportement est à nouveau élastique.

- Ils se comportent comme des thermoplastiques aux températures de mise en œuvre.

- Ils diminuent la susceptibilité thermique.
- Ils augmentent la cohésion.
- Ils améliorent le comportement rhéologique des bitumes.

- L'éthylène-propylène-diène (EPDM) :

C'est un élastomère amorphe ayant une bonne résistance à la chaleur, aux intempéries, aux produits chimiques et à la lumière solaire ainsi qu'une bonne résilience élastique et une flexibilité à basse température.

- L'éthylène-propylène rubber (EPR) :

C'est un caoutchouc thermoplastique contenant quelques 50 à 60% d'éthylène. Il se mélange bien avec les bitumes, ainsi il sert à ajuster les propriétés des bitumes comme la viscosité.

- Les copolymères butadiène acrylonitrile (NBR) :

Couramment appelés caoutchoucs nitrile NBR, sont des caoutchoucs synthétiques fabriqués comme les SBR, en émulsion par voie radicalaire à chaud ou à froid.

Les élastomères NBR existent en cinq grades de base dont les propriétés physiques et chimiques varient en fonction de leur teneur en acrylonitrile.

Les caractéristiques typiques des NBR sont en fonction de la teneur en ACN :

- Souplesse moindre à basses températures.
- Perméabilité aux gaz.
- Meilleure résistance au vieillissement par la chaleur.
- Meilleure résistance à la traction et à l'abrasion.
- Meilleure dureté.
- Meilleure densité.

Les NBR sont mis en œuvre lorsqu'il est nécessaire d'avoir une bonne résistance aux hydrocarbures aromatiques entre -40 et +120 °C. Ils représentent à peu près 2 % du tonnage mondial.

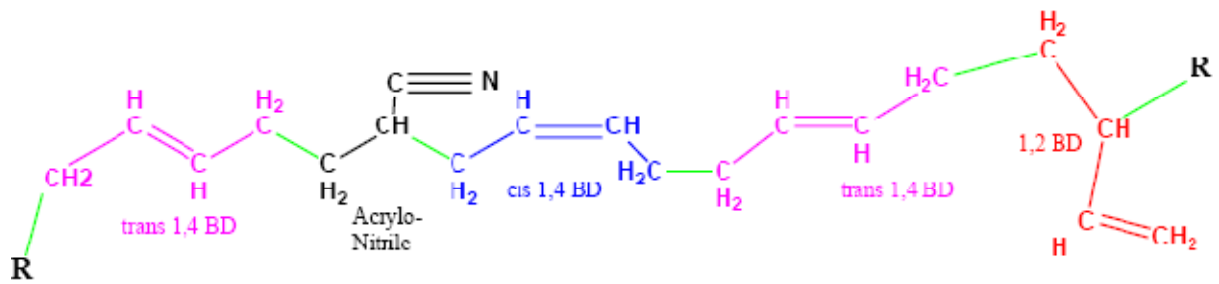


Figure 4.3. Structure du NBR.

4.7.4. Caoutchoucs thermodurcissables

Ils ne se ramollissent pas durant le chauffage. Ils ne sont pas très utilisés dans le pavage des routes, en raison de leur coût élevé et de la méthode de leur mise en œuvre. Toutefois, les propriétés qu'ils confèrent au bitume sont remarquables.

Les produits les plus connus sont basés sur des résines époxy. Ils sont utilisés en mélange de deux composants dont l'un contient la résine et l'autre un durcissant qui réagit chimiquement pour former une structure tridimensionnelle forte.

4.7.5. Poudrettes de caoutchouc

Ce sont des déchets industriels et des pneumatiques usagés réduits sous forme de poudrettes produisant le caoutchouc qui, introduit dans le bitume ou le mélange bitumineux chauds, réagit et gonfle par absorption de fractions aromatiques du bitume. L'emploi de ces poudrettes présente un avantage environnemental et économique.

4.8. Comportement Thermique

La particularité des polymères est qu'ils fluent sous sollicitations statiques ou dynamiques, même à basse température.

Les propriétés sont donc conditionnées par la température. Ils peuvent être ductiles et flexibles à 20 °C et fragiles et rigides à 4 °C. Au dessous de 200 °C, peu de polymères résistent à un effort.

À basse température, la plupart des polymères présentent un état vitreux, ils sont rigides. Lorsque la température augmente, ils passent par un état de transition, pour une plage de températures spécifique du polymère, les chaînes macromoléculaires glissent les unes par rapport aux autres et le polymère se ramollit. Cette plage de températures est dite température de transition vitreuse (Tg).

À une température plus élevée, le polymère passe par un plateau caoutchoutique, son comportement est viscoélastique.

Enfin, lorsque la température des polymères peu réticulés est élevée, ils subissent une phase d'écoulement visqueux, correspondant au désenchevêtrement des chaînes. Ce dernier comportement est utilisé pour mettre en forme les matières plastiques.

Certains polymères présentent également un point de fusion, supérieur à Tg.

Les polymères étant utilisés la plupart du temps à température ambiante, ils sont dits élastomères si leur température de transition vitreuse est inférieure à la température ambiante (comportement caoutchoutique), ils sont plastomères (comportement rigide) dans l'autre cas.

La nature du polymère, sa masse moléculaire moyenne, son degré de polymérisation, sa structure influent énormément sur la largeur de ces différents domaines et sur leur seuil d'apparition en fonction du temps ou de la température.

La figure 4.4 représente le diagramme de rigidité des polymères en fonction de la température.

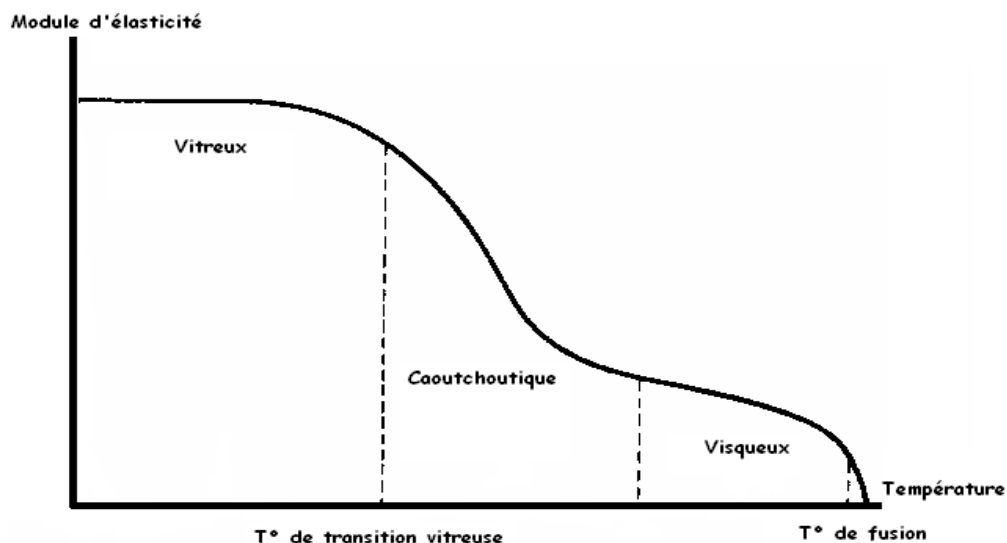


Figure4.4. Diagramme de rigidité des polymères.

4.9. Conclusion

Les polymères utilisés dans différentes industries où ils ont souvent remplacé des substances naturelles, ont été utilisés avec succès dans la fabrication des enrobés bitumineux et ce, depuis des années.

Les polymères demeurent encore aujourd'hui le type d'adjuvants non bitumineux le plus populaire. Les polymères élastomères tels les élastomères caoutchoucs de styrène butadiène et le caoutchouc granulaire, tout comme les polymères plastomères, dont l'acétate éthylène vinyle, le polyéthylène et le polypropylène, sont les plus utilisés.

L'utilisation d'un polymère recyclé quant à elles, a un double avantage. D'un côté, cela résout le problème de son élimination, d'un autre côté, il est plus économique d'utiliser des polymères usés que des neufs. Ainsi, le prix final du liant baisse considérablement, alors que dans le cas contraire son prix serait plus élevé que le bitume à base de pétrole. De plus, ce type de bitumes présente de bonnes caractéristiques et se comporte nettement mieux qu'un enrobé traditionnel dans le cas de routes supportant de lourdes charges, ou même dans des applications particulières, comme les circuits ou les pistes d'atterrissage.

Partie: II

ETUDE EXPÉRIMENTALE

Dans cette partie nous exposons les différentes techniques expérimentales qui ont été utilisées lors de l'élaboration de cette étude pour les différents matériaux de ce travail à savoir, le bitume, le polymère et les granulats. On retrouve notamment:

- ✓ Les essais de caractérisations sur granulats et bitume.
- ✓ L'élaboration de formulation de l'enrobé.
- ✓ Confection des éprouvettes bitumineuses.
- ✓ Essais mécanique sur l'enrobé modifié (Marshall 30min-24H), la traction indirecte à 20°C et 40°C).
- ✓ La résistance aux carburant de l'enrobé modifié par rapport à celui de l'enrobé traditionnel.
- ✓ Le procédé de modification de l'enrobé par l'ajout de déchet plastique.

Chapitre1:

ESSAIS DE CARACTERISATION ET INTERPRETATIONS

1.1. Essais de caractérisations

Dans cette étude trois classes granulaires, 0/3, 3/8, 8/15 ont été utilisées. Elles nous ont été fournies par l'entreprise des travaux publics EGCR de Boumerdes. Le bitume provient également de l'entreprise EGCR. Le déchet plastique utilisé dans ce travail provient des sacs d'emballage alimentaire.

1.1.1. Les granulats

Les trois classes granulaires ont été soumises aux essais d'identification au laboratoire, routes et aéroports de faculté de génie civil -USTHB selon un programme d'essais conformément aux normes en vigueur qui sont :

- ✓ Analyse granulométrique NFP 18-304.
- ✓ Equivalent de sable NFP 18-598.
- ✓ Propreté superficielle NFP 18-591.
- ✓ Essais Los-Angeles NFP 18-573.
- ✓ Essai micro Deval NFP 18-572.
- ✓ Essais coefficient d'aplatissement NFP 18-561.
- ✓ Granulats : définition –conformité –spécifications XP 18-540.
- ✓ la densité NF T 66 007,

L'analyse chimique sommaire a été réalisée au LCTP d'Hussein Dey.

1.1.2. Le bitume

Les essais suivants ont été réalisés sur le bitume :

- ✓ Pénétrabilité (NF T 66-004)
- ✓ Point de ramollissement (température bille anneau) (NF T 66-008)
- ✓ Densité (NF T 66-007)
- ✓ La ductilité (NF T 66 006)
- ✓ Essai de vieillissement RTFOT (NF T66-032)
- ✓ susceptibilité thermique

1.1.3. L'additif (déchet plastique)

Nous avons réalisé un essai sur déchet plastique :

- ✓ Densité (NF T 66-007)

1.1.4. Les enrobés bitumineux

Sur les enrobés bitumineux nous avons procédé comme suit :

- ✓ l'essai Marshall (NF P 98-251-2)
- ✓ l'essai de la traction indirecte. (NF EN12697-23)
- ✓ la tenue à l'eau (Marshall 24H)
- ✓ la résistance aux carburants (NF EN 12697-43)

1.2. Résultats et interprétations

1.2.1. Caractérisation des granulats

Nous avons procédé à la définition et l'identification des granulats rentrant dans la constitution de béton bitumineux destinés a la réalisation de la couche de roulement.

Pour chaque classe granulaire, des essais physiques, chimiques et mécaniques ont été réalisés permettant de caractériser les matériaux et de les classer selon une normalisation.

1.2.1.1. Origine des granulats

Les granulats utilisés dans le cadre de ce travail sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des bétons bitumineux (0/14) destinés aux couches de roulement.

Tableau 1.1. Origine des granulats

Matériau	Carrières
Sable 0/3	EL Hachemia (wilaya de Boumerdes)
Gravier 3/8	
Gravier 8/15	

L'analyse des granulats provenant de la carrière El Hachimia a donné les résultats récapitulés dans les tableaux ci –après.

1.2.1.2. Analyse chimique sommaire :

Les minéraux jouent un rôle important, sur la qualité de l'adhésivité avec les liants hydrocarbures.

Les analyses ont été effectuées au LCTP (Hussein Dey), les résultats sont présentés dans le tableau 1.2 :

Tableau1.2. Analyse chimique sommaire

Échantillon	Sable 0/3 (%)	Graviers 3/8 (%)	Graviers 8/15 (%)
Insolubles (SiO ₂ +Silicates)	4,8	6,3	5,2
Oxyde de fer et d'Al Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃	1,83	1,75	2,6
Gypse (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	Traces	Traces	Traces
Chlorures (NaCl)	0,29	0,47	0,41
Carbonates (CaCO ₃)	94,78	92,04	91,65
Anhydride Carbonique CO ₂	41,70	40,50	40,32
Perte au feu PF	42,66	41,68	41,98
Eau de constitution	0,96	1,18	1,66
Bilan chimique pondéral	102,66	101,74	101,52

Les granulats analysés sont classés comme suit. [XP P 94-011 (1999)]

Tableau 1.3. Classification des granulats

Teneur en carbonate (%)	Classification
< 10	Non calcaire
70 à 90	fortement calcaire

L'analyse chimique montre que :

- Les graviers 3/8 et 8/15 proviennent de la même roche mère.
- Le sable et les gravions (3/8 et 8/15) provenant de la carrière d'El Hachimia sont constitués d'un pourcentage élevé de carbonates (>91 % de CaCO₃) ce qui montre que c'est un sable fortement carbonaté,

1.2.1.3. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est un essai qui a pour but la détermination de la granularité des granulats dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 80 mm. Nous avons utilisé une série de tamis pour chaque classe comme le montre le tableau ci-après.

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés dans le tableau 1.4

Tableau 1.4. Résultats de l'analyse granulométrique

Tamis en (mm)	Tamisat en%		
	8\15	3\8	0\3
20	100	100	100
16	89.66	100	100
12.5	56.33	100	100
10	24.61	100.00	100
8	6.21	92.68	100.00
6.3	1.89	60.63	100.00
5	1.03	33.44	98.51
4	1.03	12.55	93.00
2	1.03	4.26	79.97
1	1.03	4.26	55.51
0.5	1.03	4.26	33.36
0.4	1.03	4.26	29.82
0.315	1.03	4.26	26.27
0.2	1.03	4.26	21.91
0.1	1.03	4.26	17.56
0.08	1.03	4.26	13.64

Ce qui nous permet de tracer les courbes de chaque fraction granulaire comme indiquée sur la figure 1.1

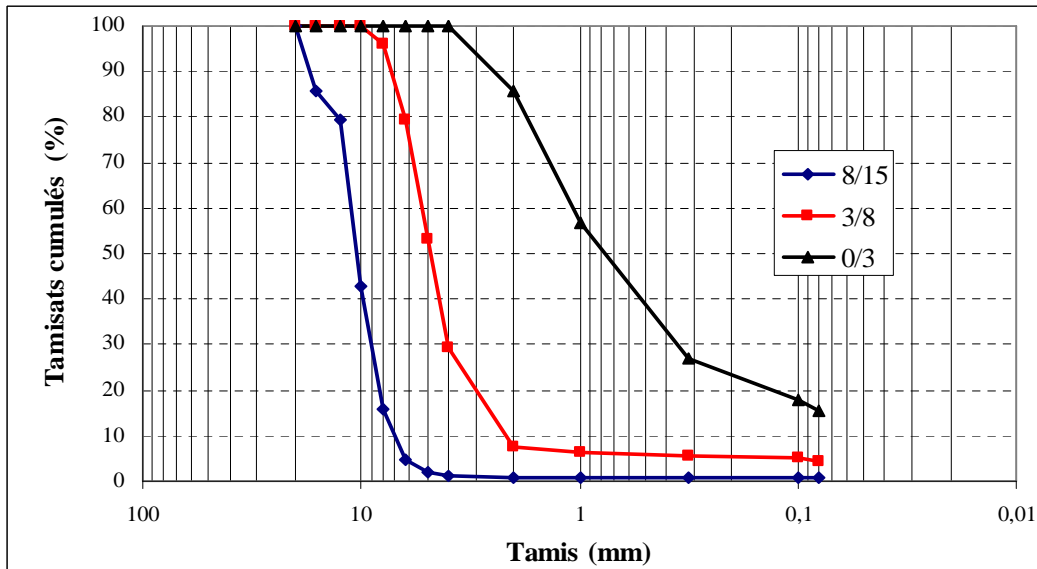


Figure 1.1. Courbe granulométrique 0/3,3/8,8/15

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

Les fractions granulaires sont classées conformément en respectant la tolérance.

1.2.1.4. Coefficient d'aplatissement (A%) (P18-560) :

Les résultats des essais d'aplatissement sont illustrés dans le tableau 1.5

Tableau 1.5. Coefficient d'aplatissement

Échantillon	provenance	Coefficient A%)	Spécification
3/8	El Hachimia	13,88	< 20
8/15	El Hachimia	8,97	< 20

1.2.1.5. Les essais de résistance à l'usure et au choc :

Pendant la fabrication d'un béton bitumineux, le malaxage est source de frottements intenses entre les grains. De même, une chaussée en exploitation subit de multiples agressions mécaniques liées essentiellement au trafic des poids lourds. Les granulats doivent résister à l'usure en surface de la couche de roulement mais aussi au choc produit par la circulation.

- **Mesure du coefficient Micro Deval (NF P18-573)**

Par frottement, les pneus des véhicules tendent à user les granulats ce qui tend à produire des éléments fins. Pour étudier ce phénomène en laboratoire, on se sert de « l'Essai Micro Deval » à sec (MDS) ou en présence d'eau (MDE). Cet essai est représentatif de la résistance à l'usure par frottement.

L'essai consiste à faire tourner dans un cylindre de 200mm de diamètre 500g de granulats avec des billes d'acier de 10 mm et 2.5L d'eau, la masse des billes dépend de la classe granulaire.

Après 12.000 rotations en 2heures, le pourcentage d'éléments fins passant au tamis de 1.6mm représente le coefficient Micro Deval (MDE).

$$MDE = \frac{M - m}{M}$$

- ✓ M : masse initial avant essai (500g)
- ✓ m : masse des granulats après essai, lavage au tamis 1.6 mm et séchage.

Résultats :

Les résultats de l'essai micro deval en présence d'eau sont mentionnés sur le tableau 1.6

Tableau 1.6. Résultats de l'essai MDE.

Echantillon	MDE	appréciations
3/8	13.03	Bon
8/15	16	Bon a moyen

Les critères de qualité concernant l'attrition sont donnés dans le tableau 1.7

Tableau 1.7. Spécification de l'essai MDE

MDE	Appréciations
≤ 13	Très bon à bon
13 à 20	Bon a moyen
20 à 25	Moyen à faible
>25	médiocre

- **Mesure du coefficient Los Angeles (NF P 18-573) :**

Selon que les granulats seront durs ou tendres, les impacts créés par le passage des véhicules et par les engins de compactages auront plus ou moins tendance à les fragmenter d'où étalement de la granularité.

Pour étudier ce phénomène en laboratoire, on se sert de l'essai « Los Angeles ». C'est un essai de fragmentation des granulats par choc par la chute de boulets d'acier dans un cylindre de 70cm de diamètre et de 50cm de longueur en rotation. Le nombre de boulets dépend de la classe des granulats. Après l'essai les matériaux sont criblés au tamis 1.6mm.

La valeur du rapport, multiplié par 100, du poids de la fraction passante à 1.6mm sur le poids de la prise d'essai est appelée coefficient Los Angeles.

- ✓ m : masse initiale des granulats avant essai (m=5000g).
- ✓ m' : masse des granulats après essai, lavage au tamis 1.6 mm et séchage.

Résultats :

Les résultats de l'essai de résistance aux chocs "LA" sont mentionnés sur le tableau 1.8.

Tableau 1.8: résultats de l'essai Los Angeles

Echantillon	Los Angeles	Qualité
3/8	16	Bon
8/15	14	Bon

Concernant la dureté, les critères de qualités sont donnés dans le tableau 1.9.

Tableau 1.9. Spécification de Los Angeles

LA	Appréciations
≤ 15	Très bon à bon
15 à 25	Bon à moyen
25 à 30	Moyen à faible
>30	médiocre

Les résultats de l'essai de caractérisations des granulats sont récapitulés dans le tableau 1.10.

Tableau 1.10. Récapitulatif des caractéristiques des granulats

Essai	Référence	0/3	3/8	8/15	spécification	Qualité
Propreté superficielle[%]	NF P 18-591	-	1.97	1.46	≤ 2%	Propre
Equivalent de sable à 10 % de fin [%]	NF P 18-597	66	-	-	>60%	Sable propre
Aplatissement	NF P 18-561		13	10	<20%	Conforme
Densité	(NF T 66 007),	2.66	2.69	2.71		
MDE	(NF P 18-572),		17	13	<20%	Conforme
LA	(NF P 18-573),		22	21	<20%	Conforme

✓

✓ Conclusion :

Les gravillons et sables destinés à la composition des mélanges d'enrobés choisis pour cette étude présentent des caractéristiques de fabrication et intrinsèques (résistance à l'usure et aux chocs) conformes aux normes.

- ✓ Le sable 0/3 de est propre pour son utilisation.
- ✓ La forme des gravillons est en générale cubique et le coefficient d'aplatissement. conforme aux exigences des normes.
- ✓ La propreté superficielle est acceptable et les gravillons sont moyennement propres.

1.2.2. Caractérisation de bitume

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bitume de base sont résumées dans le tableau 1.11.

Tableau 1.11. Caractéristiques du bitume

Type d'essai		Résultat	Spécification
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)		40	35 - 50
Température bille et anneau « TBA » (°C)		51	50-58
Densité relative (g/cm ³)		1,02	1,0 - 1,1
Ductilité à 25 °C (cm)		140	> 100
Indice de pénétrabilité « IP » (méthode LCPC)		0.9	-3 +7
Après RTFOT	Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	27	-
	TBA (°C)	54	> 52
	Pénétrabilité restante [%]		> 53
	Δ TBA [°C]	3	< 8

Les caractéristiques physico- mécaniques du bitume pur étudié concordent avec les spécifications préconisées dans la norme NF EN 12591 « Spécifications des bitumes routiers » pour la classe 35/50.

1.2.2.1. Susceptibilité thermique :

La susceptibilité thermique du bitume pur est estimée à partir de la variation de la pénétrabilité en fonction de la température selon la méthode LCPC. Pour cela, on effectue des essais de pénétrabilité à différentes températures afin de voir son évolution.

Pour notre grade de bitume, les températures suivantes sont préconisées : [20°C], [25°C], [30°C], [35°C] et [40°C],

En 1889, il a été mis au point la méthode d'essai par pénétration en fonction de la température qui après quelques modifications, a été longtemps d'usage courant en raison de sa simplicité et de sa rapidité. En 1936, Pfeffier et Van Doormaal [Pfe 1936] ont montré l'existence d'une relation Linéaire (2.1) entre le logarithme décimal de la pénétration et la température :

$$\text{Log (Pen)} = AT + C \quad (2.1)$$

Où :

A : est la susceptibilité thermique.

C : une constante.

La valeur de A varie entre 0,015 et 0,06, ce qui montre l'existence de différences considérables en terme de susceptibilité thermique .La susceptibilité thermique des bitumes routiers est représentée par un indice appelé indice de pénétrabilité (IP) exprimé par les relations suivantes :

$$50A = \frac{20 - IP}{10 + IP} \quad (2.2)$$

Où :

$$IP = \frac{20 - 500A}{1 + 50A} \quad (2.3)$$

La valeur de l'indice de pénétration varie de -3 pour les bitumes très susceptibles à la température, jusqu'à environ +7 pour les bitumes moins susceptibles. Les valeurs de A et de IP peuvent être calculées à partir des mesures de pénétration à deux températures T1 et T2, à l'aide de la relation (2.4) :

$$A = \frac{\log(\text{Pen}(T_1)) - \log(\text{Pen}(T_2))}{T_1 - T_2} \quad (2.4)$$

Les résultats des essais de pénétrabilité en fonction de la température sont représentés dans le tableau 1.12

Tableau 1.12:susceptibilité thermique

T (°C)	20	25	30	35	40
PENETRABILITE 1/10 mm	30	40	72	100	150
Log Pen	1.47	1.6	1.85	2	2.17

Sur la figure 1.2 nous représentons le graphe de la pénétrabilité en fonction de la température comme préconisé par la méthode LCPC.

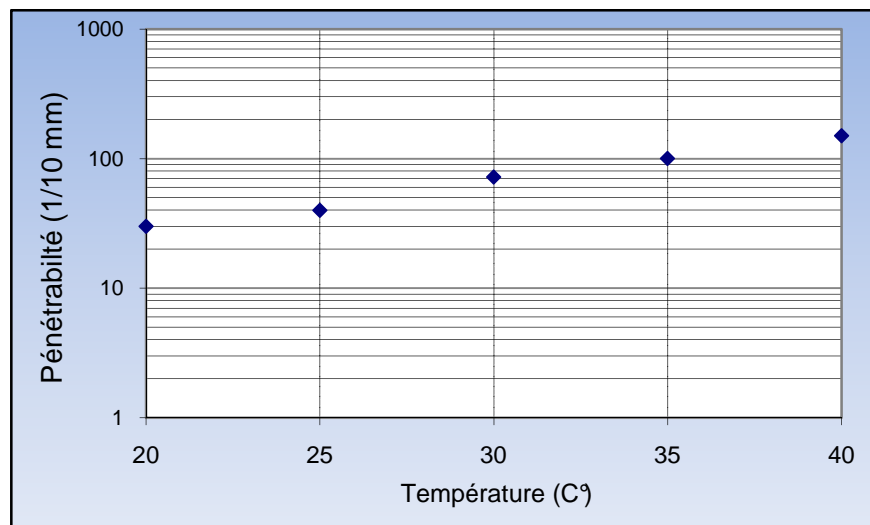


Figure 1.2:susceptibilité thermique

Après le calcul on a :

$$A = 0.035 \quad \text{et} \quad IP = 0.9$$

Cette courbe montre qu'il existe une variation linéaire en coordonnées semi-logarithmiques entre la pénétrabilité et la température.

$IP=0.9$, donc le bitume n'est pas susceptible à la température

La susceptibilité thermique « A » est égale à 0,035 est comprise entre 0,015 et 0,06 (intervalle des bitumes routiers).

1.2.3. L'additif (le déchet plastique)

a. Matière plastique

Les matières plastiques font désormais partie de notre quotidien. Certains polymères ont été découverts fortuitement.

Une matière plastique ou en langage courant un plastique désigne un mélange contenant une matière de base (un polymère) qui est susceptible d'être moulé, façonné, en général à chaud et sous pression, afin de conduire à un semi-produit ou à un objet. Le mot « plastique » dérive de plasticité.

Les matières plastiques couvrent une gamme très étendue de matériaux polymères synthétiques ou artificiels. On peut observer aujourd'hui sur un même matériau des propriétés qui n'avaient jamais auparavant été réunies, par exemple la transparence et la résistance aux chocs.

Les matières plastiques sont pratiquement nées avec le XXe siècle. Des centaines de chercheurs et de bricoleurs de génie sont à l'origine de leur essor. Les premiers plastiques, artificiels, résultaient de la transformation chimique de polymères naturels tels le caoutchouc, la cellulose et la caséine (le squelette macromoléculaire étant préservé lors de cette transformation). La première matière plastique industrielle basée sur un polymère synthétique est la Bakélite.

L'additif utilisé dans cette étude est un plastique rougeâtre destiné à l'agro-alimentaire, ce sont des sacs d'emballage,

La préparation du déchet plastique est faite au laboratoire route de la faculté de génie civil de l'USTHB.

La procédure est de couper les sacs plastique en fibres de longueur varie de 2 à 5mm

La figure 1.3 représente le déchet plastique utilisé dans cette étude.



Figure 1.3. L'additif (Le déchet plastique)

b. La densité

Nous avons réalisé l'essai de densité à l'aide d'un pycnomètre. Les résultats obtenus montrent que le déchet plastique est moyennement dense, Densité=0.89.

Chapitre 2

FORMULATION DE L'ENROBE

2.1. Introduction

Les mélanges hydrocarbonés sont constitués de deux matériaux :

- Les granulats qui constituent le squelette minéral ;
- Le bitume qui a pour but d'assurer la liaison entre ces derniers, confère aussi au mélange ses propriétés viscoélastiques.

Beaucoup d'interrogations se posent à cet égard, quel est le choix de la granulométrie, la forme des agrégats et dans quelles proportions faut-il les combiner pour pouvoir répondre à l'usage auquel ils sont destinés ? De nombreuses recherches ont été menées dans ce sens dans le nombreux pays, qui ont bien révélé l'importance de certains paramètres exerçant une influence sur les propriétés de la composition des mélanges hydrocarbonés ainsi que leurs propriétés mécaniques.

Donc le travail consiste à établir:

- un mélange optimal des différents granulats qui s'insère dans un fuseau de référence appelé "fuseau de spécification"
- un dosage en liant qui peut envelopper toute la surface de mélange granulaire et qui résiste au le phénomène de ressuage ou glaçage.

Les fuseaux limites tels que définis par les spécifications sont donnés sur le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Fuseau de référence du BB 0/14 semi grenu

Tamis	14	10	6.3	4	2	0.08
Min %	94	72	50	40	28	07
Max %	100	84	66	54	40	10

2.2. Détermination de la courbe granulométrique du mélange

Pour déterminer la courbe optimal, plusieurs mélanges à différentes proportions ont été réalisés pour la composition granulaires du BB 0/14 et ce conformément aux fuseaux spécifiés donnés dans le tableau 2.1.

Les compositions granulaires ainsi retenus et les pourcentages pondéraux du mélange sont récapitulés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2: et Les pourcentages pondéraux du mélange

Fraction	Provenance	Pourcentages pondéraux
0/3	Hachimia	40 %
3/8		30 %
8/15		30 %

De ces pourcentages pondéraux des granulats nous avons tracé la courbe du mélange de BB, qui est représentée sur la figure 2.1

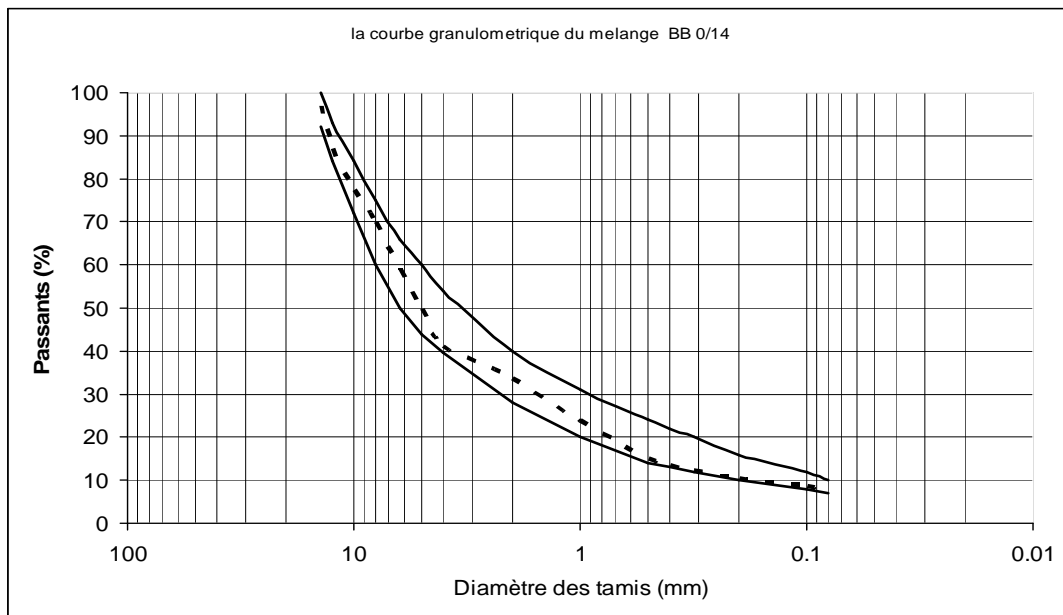


Figure 2.1: la courbe granulométrique du mélange BB 0/14

2.3. Détermination des dosages en liant

La teneur en liant est déterminée en pourcentage du poids des agrégats, et de la surface spécifique par la formule suivante

Les teneurs en liant ont été déterminées selon la formule suivante :

$$TL = \alpha K^5 \sqrt{\Sigma}$$

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

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

Σ : surface spécifique des granulats (m²/kg),

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats richesse (k varie pour un enrobé bitumineux 0/14 de 3,45 à 3,9),

$$\Sigma = (0.25 G + 2.30 S + 12 s + 135 f) / 100$$

K : module de richesse.

G : Pourcentage de refus supérieur ou égal à 6.3 mm.

S : Pourcentage de refus compris entre 0.315 mm et 6.3 mm.

s : Pourcentage de refus compris entre 0.08 mm et 0.315 mm.

f : Pourcentage de passant à 0.08 mm.

Les résultats obtenus sont :

MVRg	Σ	$\sqrt[5]{\Sigma}$	α
2.684	11.290	1.62	0.98

Les valeurs de dosage en liant retenues en fonction de la variation du module de richesse sont données sur le tableau 2.3.

Tableau 2.3. Dosage en liant en fonction de K

Formule	A	B	C	D
Module de richesse	3.45	3.60	3.75	3.9
Liant (%)	5.53	5.77	6.01	6.25

2.4. Choix de la formule optimale:

Les mélanges proposés notés A, B, C et D qui sont des formules à différents dosages en liant, ont été soumises à l'essai MARSHALL.

Le dosage qui va donner le meilleur quotient Marshall sera retenu selon les spécifications.

Essai Marshall sur l'enrobé témoin :

Le tableau 2.4 représente les résultats de l'essai Marshall effectués sur l'enrobé à base de bitume pur à différents dosages.

Tableau 2.4. Résultats de l'essai Marshall sur l'enrobé témoin

Les formules	Formule				
	A	B	C	D	
Gravillon 8/15 (%)	30				
Gravillon 3/8 (%)	30				
Sable 0/3 (%)	40				
Module de richesse K	3.45	3.60	3.75	3.9	
Teneur en liant (%)	5.53	5.77	6.01	6.25	
Densité réelle	2.48	2.46	2.45	2.44	
Densité apparente	2.32	2.33	2.32	2.34	
Essais Marshall					Spécifications
Fluage en mm	3.86	3.67	3.4	4.22	2 - 4
Stabilité en kN	10.21	10.69	9.53	9.01	> 10.5
Compacité (%)	93.5	95	95	96	92 - 97
Quotient Marshall (kN/mm)	2.46	2.91	2.8	2.13	

Afin de faire le choix de la teneur optimale la figure 2.2 représente le quotient Marshall en fonction du dosage en bitume.

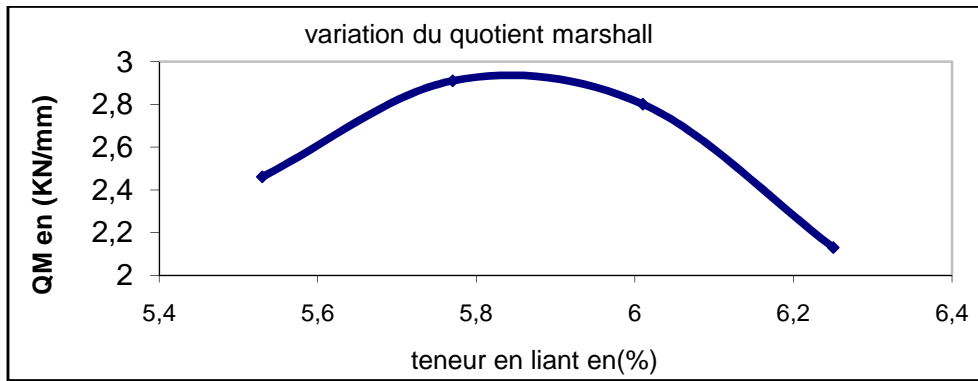


Figure 2.2:variation du quotient Marshall en fonction de teneur en liant

Les valeurs de fluages obtenus sont conformes aux spécification, elles se rapprochent entre elles pour les formules A, B et C.

La teneur de 6.25% 'formule D'a donné un fluage supérieur à 4mm

De ces résultats la formule B sera retenue, La formulation finale est donnée sur le tableau 2.5

Tableau 2.5:la formulation finale de l'enrobé pur

Fraction	Provenance	% Pondéraux
0/3	Hachimia	40 %
3/8	Hachimia	30 %
8/15	Hachimia	30 %
Liant 35/50	naftal	5.77%

Chapitre 3.

L'ENROBE MODIFIE

La modification de l'enrobe a été faite par un déchet plastique à différentes teneurs à savoir 0.2, 0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 et 1%, nous avons pour cela utilisé la méthode sèche

3.1. Modification par la méthode sèche :

L'enrobé est fabriqué selon les proportions de l'étude de formulation des différentes fractions des granulats et du bitume, la quantité de l'additif est choisie comme un pourcentage en poids du squelette granulaire.

L'additif est incorporé avec le squelette granulaire lors du malaxage, le bitume est introduit par la suite.

Une fois les granulats enrobés, des éprouvettes de type Marshall sont confectionnées.

3.2. Confections des éprouvettes bitumineuses :

La fabrication des éprouvettes bitumineuses types Marshall a été faite au laboratoire route de la faculté de génie civil,

Le procédé a été conduit sur des éprouvettes cylindriques de hauteur 63,50 mm et de diamètre 101,60 mm, compactées à 50 coups par face, selon les conditions suivants:

- ✓ la température de fabrication en fonction de la classe de liant hydrocarboné, pour notre cas : Bitume 35/50.....T=160°C +-5°C.
- ✓ les granulats chauds sont introduits dans la cuve thermo statée du malaxeur porté à la température de fabrication.
- ✓ les granulats placés dans la cuve doivent mélanger jusqu'à leur homogénéisation.
- ✓ incorporation du modifiant (déchet plastique).
- ✓ on verse le liant, à l'aide de pesées successives.
- ✓ malaxage du mélange jusqu'à un mélange visuellement homogène.
- ✓ remplissage des moules après avoir placé un disque de papier au fond du moule.
- ✓ la masse de chaque éprouvette est d'environ 1200g.
- ✓ compactage des éprouvettes à 50 coup par face.
- ✓ démoulage des éprouvettes, après l'opération de refroidissement sous un jet circulaire d'eau froide.

Les figures 3.1 ,3.2, 3.3 représentent quelques matériels de laboratoire routes et aéroports de L'USTHB pour la confection des éprouvettes bitumineuses.



Figure 3.1 a): échantillon des éprouvettes



b): vérin de démoulage



Figure 3.2.a): compacteur



b): malaxeur



Figure 3.3-a): étuve



b): la cuve

3.3. L'essai Marshall

Effectué à la vitesse de 50 mm/min après avoir conservé les éprouvettes dans un bain marie porté à la température de 60°C pendant au moins 30 minutes. six (06) éprouvettes ont été testées dans chaque cas.

Avant l'essai nous avons déterminé les compacités et le volume des vides d'air des différentes éprouvettes.

A l'issue de l'essai, nous avons noté la stabilité Marshall SM, ainsi que le fluage correspondant pour chaque teneur en déchet plastique.

Pour mieux exploiter les résultats de chaque essai, nous avons comparé entre les enrobés modifiés suivant la teneur en polymère et le bitume pur.

Les résultats de l'essai Marshall pour chaque teneur en déchet plastique sont récapitulés dans le tableau 3.1 et le tableau 3.2 donne les gains des différents paramètres de l'essai.

Tableau 3.1. Résultats de l'essai Marshall

Teneur en%	0	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	1
Stabilité (KN)	10.69	10.34	11.73	13.22	12.98	13.65	13.04	12.84
Fluage(mm)	3.67	2.85	3.19	2.35	5.06	4.34	4.55	4.98
quotient	2.91	3.62	3.67	5.61	2.56	3.13	2.86	2.57

Tableau 3.2.variation des paramètres Marshall

Teneur en (%)	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	1
Δ SM (%)	-3	10	24	18	28	22	17
Δ FM (%)	-22	-13	-36	38	16	15	36
Δ QM (%)	25	26	93	-14	8	6	-13

a) Stabilité Marshall SM :

La stabilité Marshall (SM) ; est la résistance à l'écrasement de l'éprouvette à la température de 60°C en rupture.

La figure 3.4 représente la variation de la stabilité Marshall en fonction de la teneur en déchet plastique, et la figure 3.5 représente le gain de stabilité par rapport à l'enrobé de référence.

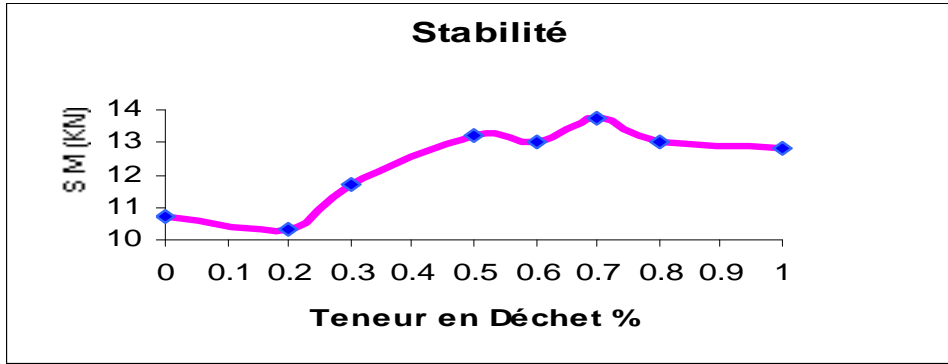


Figure 3.4. Stabilité Marshall en fonction de la teneur en déchet plastique

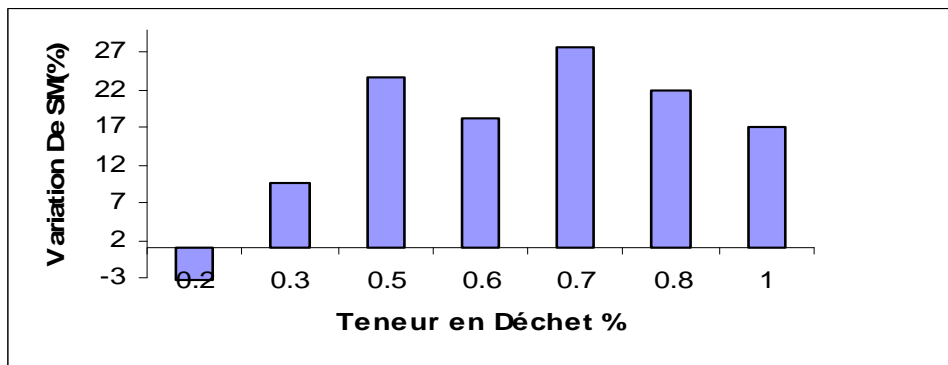


Figure 3.5. variation de la stabilité

La stabilité Marshall sauf pour 0.2% de déchet plastique, augmente et est supérieur à celle de l'enrobé témoin pour toutes les autres teneurs en déchet .Le gain de stabilité à 0.5% est de 25% environ.

b) Fluage Marshall FM:

Le fluage Marshall (FM) ; est l'affaissement de la même éprouvette au moment de la rupture.

La figure 3.6 représente la variation du fluage Marshall en fonction de la teneur en déchet plastique, et la figure 3.7 représente le gain de fluage par rapport à l'enrobé de référence.

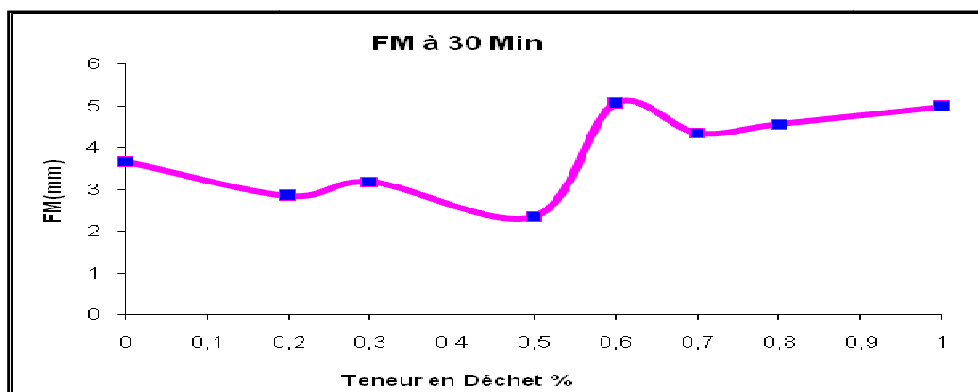


Figure 3.6. fluage Marshall en fonction de la teneur en déchet

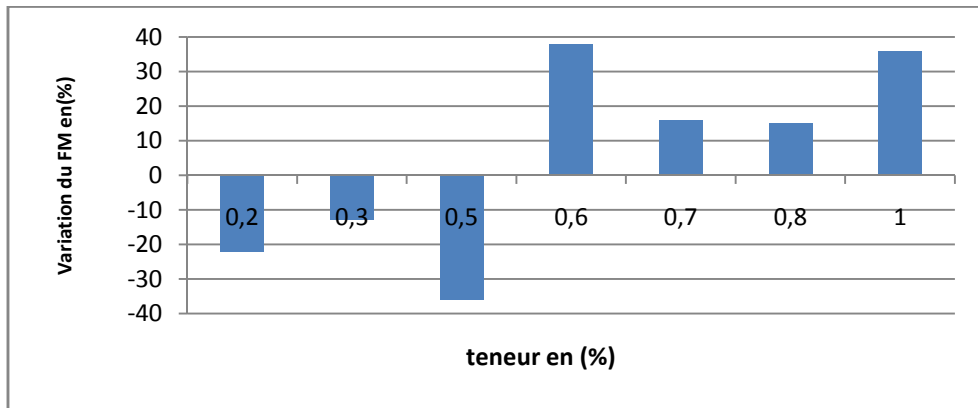


Figure 3.7: variation du fluage

Le fluage Marshall diminue jusqu'à 0.5% de déchet et reste dans la fourchette 2-4 mm.

A partir de 0.6% le fluage augmente, il est supérieur à 4mm

Le fluage à 0.5% de déchet est amélioré de 36% environ

b) Quotient Marshall QM :

Le quotient Marshall noté « QM » est un indicateur pour la résistance aux déformations, permanentes, contraintes de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux. Les plus grandes valeurs du quotient indiquent que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes.

$$QM = \frac{SM}{FM}$$

QM : Quotient Marshall,
SM : Stabilité Marshall,
FM : Déformation Marshall.

Les valeurs de QM ont été calculées pour les différents mélanges de teneur et sont représentées sur la figure 3.8. et la figure 3.9 représente le gain de quotient par rapport à l'enrobé de référence.

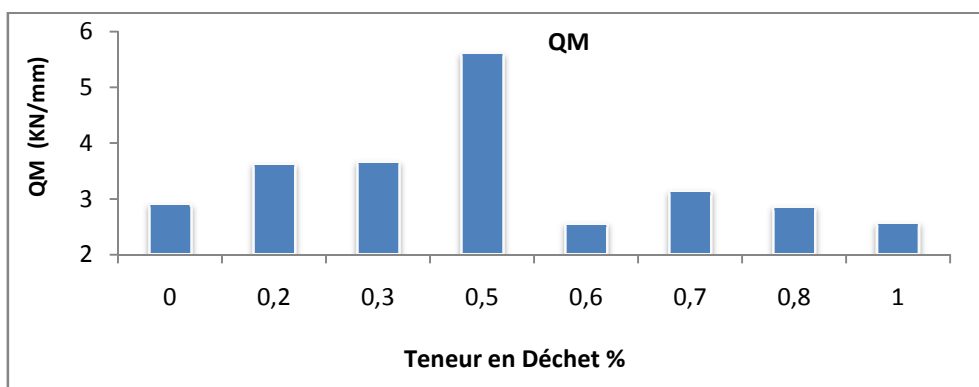


Figure 3.8. Quotient Marshall en fonction de la teneur en déchet plastique

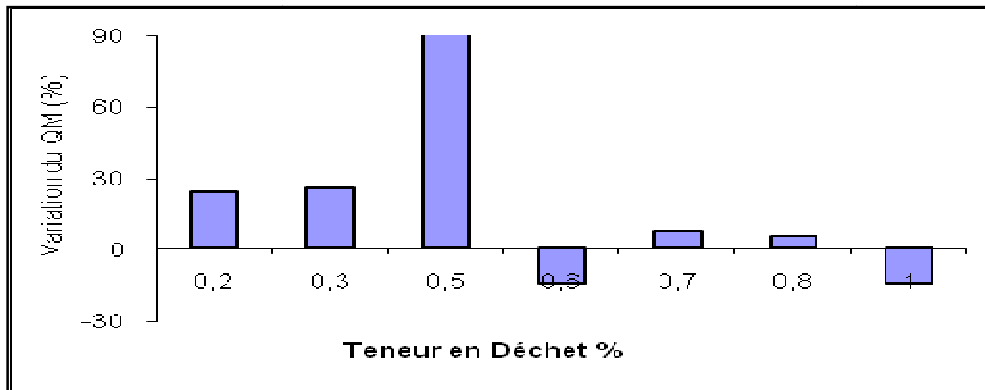


Figure 3.9. Variation du quotient Marshall

Pour les teneurs allant de 0.6 à 1% de déchet, le fluage était supérieur à 4mm, les enrobés sont à rejeter.

Entre 0 et 0.5% le quotient augmente jusqu'à atteindre un maximum à 0.5% de déchet, la valeur du QM à 0.5% est de 5.61.

Le gain du quotient à 0.5% est de 90% environ.

d) La compacité :

La compacité de l'enrobé est donnée par la formule:

$$\text{compacité} = \frac{MVA}{MVR} \times 100$$

MVA: la masse volumique apparente, c'est-à-dire celle de l'enrobé avec ses vides, est égale au rapport de la masse de l'échantillon sur son volume (déterminé par pesée hydrostatique, ou par mesure géométrique)

MVR: la masse volumique réelle, correspond à la densité qu'aurait l'enrobé sans vides, elle se calcule à partir de la MVR de chaque constituant et de leur pourcentage dans le mélange

$$MVR = \frac{100 + Pb}{\sum_1^3 \frac{Pi}{di} + \frac{Pb}{db}}$$

Pi et di: sont le pourcentage et la densité des granulats de classe i

Pb et db: sont le pourcentage et la densité du bitume

les résultats de la compacité Marshall en fonction de la teneur en déchet plastique obtenus après mesurage géométriques de volume, de chaque éprouvette sont récapitulés dans le tableau 3.3

Tableau 3.3:variation de la compacité en fonction de la teneur en déchet plastique

N° Epr	MVA	MVR	Compacité %	%de vides	la compacité moy %	Teneur en déchet %
1	2.28	2.46	93	7.20	94	0
2	2.31	2.46	94	6.04		
3	2.32	2.46	94	5.55		
1	2.30	2.46	94	6.32	95	0.2
2	2.32	2.46	94	5.87		
3	2.37	2.46	96	3.80		
1	2.35	2.46	96	4.46	97	0.3
2	2.38	2.46	97	3.24		
3	2.39	2.46	97	2.74		
1	2.37	2.46	96	3.65	95	0.5
2	2.29	2.46	93	7.11		
3	2.33	2.46	95	5.14		
1	2.32	2.46	94	5.83	93	0.6
2	2.29	2.46	93	6.99		
3	2.29	2.46	93	7.07		
1	2.30	2.46	93	6.65	94	0.7
2	2.33	2.46	95	5.40		
3	2.28	2.46	93	7.17		
1	2.30	2.46	93	6.65	93	0.8
2	2.29	2.46	93	6.99		
3	2.29	2.46	93	6.75		
1	2.30	2.46	94	6.39	94	1
2	2.33	2.46	95	5.34		
3	2.32	2.46	94	5.64		

La figure 3.10 illustre les résultats du tableau 3.3.

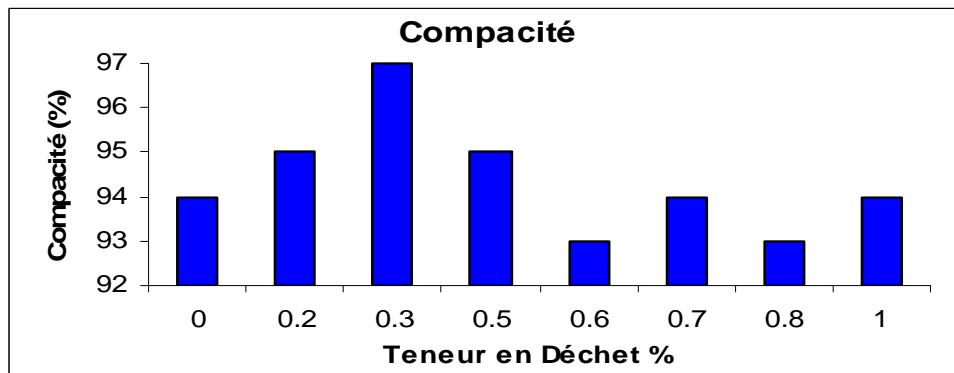


Figure 3.10. Variation de la compacité en fonction de la teneur

La compacité des éprouvettes est amélioré pour les teneurs de 0.2 ,0.3 ,et 0.5% du déchet ,alors qu'à partir de 0.6% jusqu'à 1% elle n'est qu' améliorée.

3.4. TENUE A L'EAU DES ENROBES MODIFIÉS (MARSHALL 24H)

Il existe diverses méthodes pour évaluer la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux. Pour cette étude nous avons choisis une méthode simplifiée qui consiste à mesurer la stabilité Marshall sur des éprouvettes immergées dans un bain d'eau chauffé à 60°C pendant 24h.

L'essai de Marshall 24h ou bien tenue à l'eau est le même que celui de l'essai Marshall normal (30 min) mais les éprouvettes sont conservés dans l'eau à 60°C pendant 24h et après on a écrasé et noté les valeurs de la stabilité et le fluage pour les différents teneurs en déchet plastique.



Figure 3.11 : Les éprouvettes et la mâchoire immergées dans le bain

Le tableau 3.4 résume les valeurs de l'essai Marshall 24h à différents teneurs en déchet plastique

Tableau 3.4: résultats de l'essai Marshall 24H

Teneur en %	Stabilité (KN)	Fluage (mm)	Quotient (KN/mm)
0	10.815	4.44	2.43
0.2	10.59	3.31	3.19
0.3	11.33	5.23	2.16
0.5	13.25	3.76	3.52
0.6	13.09	5.70	2.29
0.7	13.99	3.91	3.57
0.8	13.038	4.31	3.02
1	13.72	7.75	1.77

a) la stabilité marshall à 24H

La figure 3.12 représente la variation de stabilité Marshall 24H en fonction de la teneur en déchet plastique.

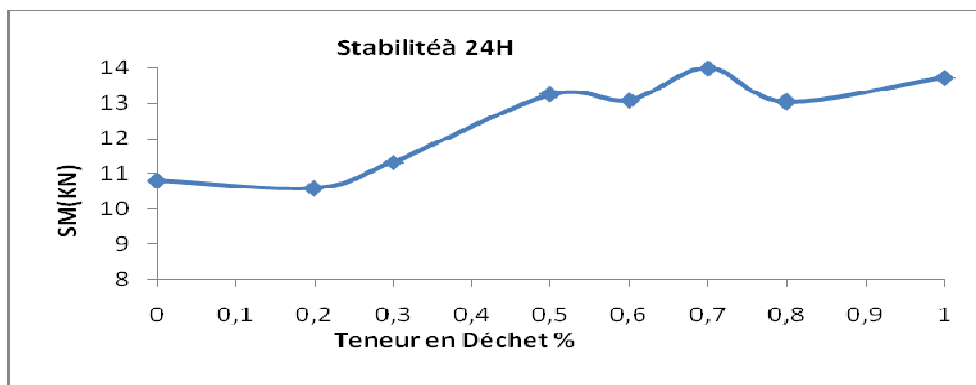


Figure 3.12 ; Stabilité Marshall à 24 H en fonction de la teneur en déchet plastique

La courbe de la stabilité Marshall 24h diminue à 0.2%,0.3%, ensuite elle augmente à 0.5, 0.7et 1% donc les teneurs 0.5et 0.7% de déchet plastique donnent les stabilité maximales.

B)Le fluage à 24H

La figure 3.13 représente la variation de fluage Marshall 24H en fonction de la teneur en déchet plastique

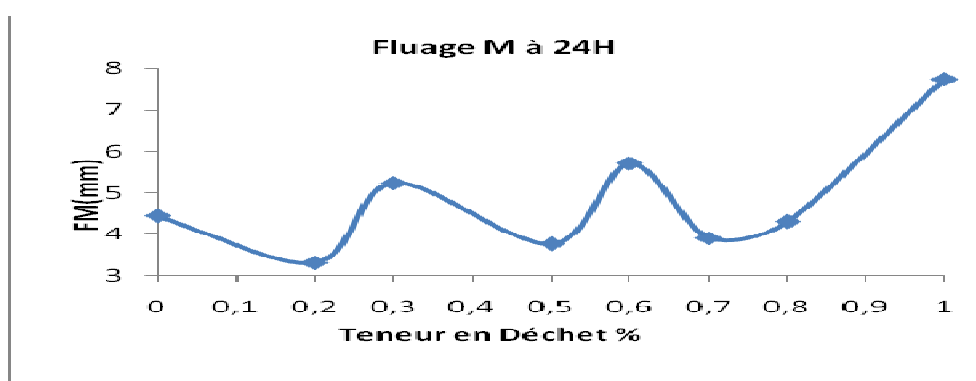


Figure 3.13. Fluage Marshall à 24H en fonction de la teneur en déchet plastique

Les teneurs de 0.2, 0.5% ,0.7% donnent des fluages conformes aux spécifications des enrobes bitumineux qui sont de 2mm à 4mm, par contre les teneurs de 0.3%, 0.8% ,1% sont hors de la fourchette de spécification, elles dépassent 4mm, alors ces enrobes ne résiste pas en présence d'eau (la saison pluviale).

c) le quotient Marshall à 24H

La figure 3.14 représente la variation du quotient Marshall 24H en fonction de la teneur en déchet plastique

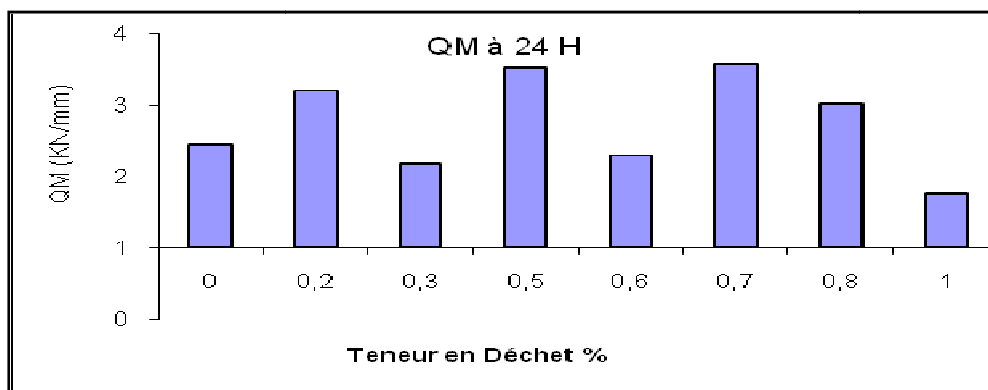


Figure 3.14. quotient Marshall à 24H en fonction de la teneur en déchet plastique

3.4.1. Variation du quotient Marshall à 30min et 24H

Une comparaison du quotient obtenu à 24 H avec de celui mesuré dans les conditions normales de l'essai Marshall 30min peut renseigner sur l'évolution de la résistance en présence d'eau.

La figure 3.15 illustre l'évolution du quotient Marshall à 30min et 24H

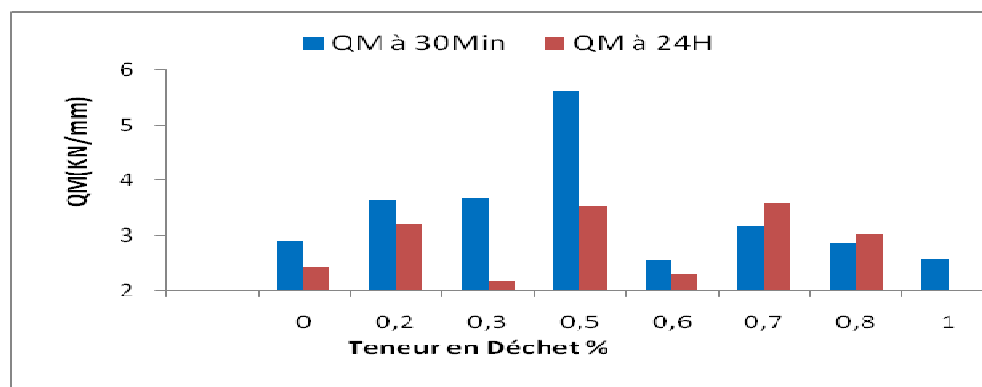


Figure 3.15: évolution du quotient Marshall à 30min et 24H

Les résultats obtenue montrent que pour:

- 0.7% de déchet plastique la stabilité Marshall est maximale.
- 0.5% de déchet plastique, le fluage est plus faible.
- 0.7% de déchet plastique, le quotient Marshall est maximal.

Alors on déduit que la teneur optimale est de 0.7% de déchet plastique.

3.5. Essai de traction indirecte (NF EN12697-23)

Le comportement des différentes formules obtenues aux températures moyennes de service sera évalué à l'aide de l'essai de la Traction indirecte.

3.5.1. Objet

L'essai permet de déterminer la résistance à la traction indirecte (fendage) d'éprouvettes cylindriques de mélange bitumineux type Marshall, ces éprouvettes doivent être enveloppées par des sacs en matière plastique souple pour les protéger de tout contact avec l'eau, et on l'immerge dans un bain d'eau thermostaté afin d'assurer une bonne transmission de la chaleur recommandée par l'essai (40°C et 20°C), la durée de conservation de la baignoire et de 2 heures, après en les soumettant, au moyen d'une presse à une charge diamétrale le long de l'axe du cylindre, à une vitesse constante de déplacement (50mm/min), jusqu'à leur rupture.

La résistance à la traction indirecte est la contrainte de traction maximale calculée à partir de la charge maximale appliquée à la rupture et des dimensions d'éprouvette.

3.5.2. Presse d'essai

Presse de type Marshall ayant une capacité minimale recommandée de 28 KN permettant d'appliquer sur les éprouvettes d'essai des charges à une vitesse de déformation constante.

Pour l'essai à basse température (5°C); la presse d'essai classique de 28 KN ne permettra probablement pas d'obtenir une charge suffisante, dans ce cas il convient d'utiliser des presses Marshall de 40KN.



Figure 3.16. presse d'écrasement type Marshall

3.5.3. Analyse des résultats

Dans cette partie nous avons réalisé des essais de traction indirecte sur des mélanges d'enrobés bitumineux de type Marshall ,les enrobés ont été modifiés par voie sèche ,avec un déchet plastique alimentaire à différents teneurs

Les résultats de l'essai Marshall ont montré que le mélange optimal est obtenu pour une teneur de 0.5% de déchet plastique.

Par conséquent nous avons choisis les teneurs de 0%, 0.3% ,0.5%,et 0.7% ,Le mélange à 0% été l'enrobé bitumineux de référence.

a) la charge maximale de rupture P(KN)

Le tableau 3.5 représente les résultats de la charge maximale de rupture de l'enrobé à 20°C et 40°C

Tableau 3.5. la charge maximale de rupture en (KN)

teneur en (%)	P (KN) à 20°C	P (KN) à 40°C
0	16.51	5.17
0.3	23.85	5.39
0.5	26.06	7.72
0.7	24.35	5.90

La figure 3.17 montre l'allure des courbes à 20°C et 40°C

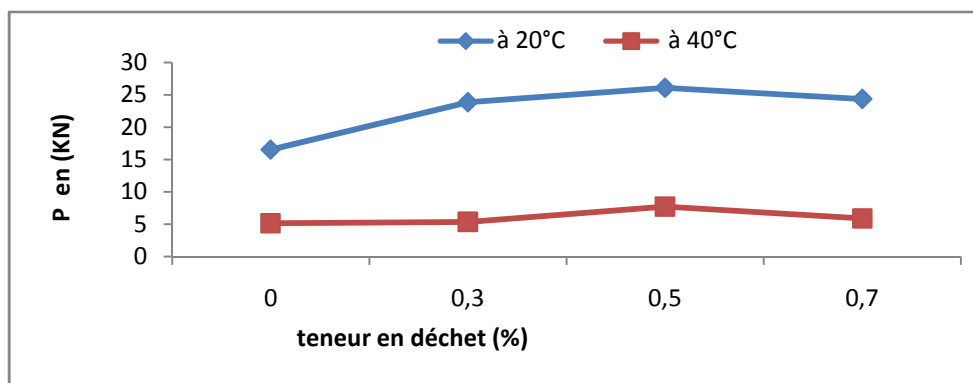


Figure 3.17: la charge maximale de rupture à la traction indirecte

La charge maximale du rupture augmente en fonction de la teneur en déchet plastique, jusqu'à 0.5%, ou elle atteint sa valeur maximale de 26 KN, pour une température de 20°C ,et 7.72KN à la température de 40°C, puis elle diminue à 0.7 %.

b) Les déformations de la traction indirecte

Les déformations des éprouvettes obtenues lors de l'essai sont représentées sur le tableau 3.6

Tableau 3.6. Les déformations de la traction indirecte

Teneur en %	Déformation à 20°C (mm)	Déformation à 40°C (mm)
0	3.162	1.607
0.3	1.814	1.783
0.5	1.325	1.336
0.7	1.20	1.771

Les résultats du tableau 3.6 sont illustrés dans la figure 3.18

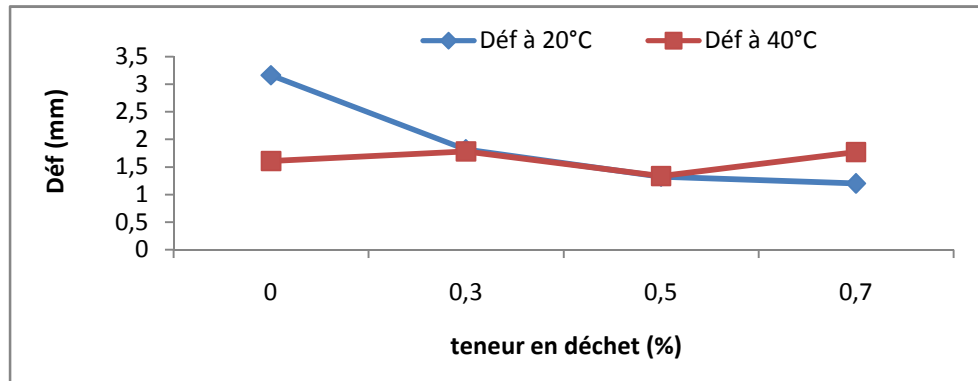


Figure 3.18. Les déformations en fonction de la teneur en déchet plastique à la traction indirecte

Les résultats montrent que:

❖ à 20°C :

La courbe montre que pour toutes les teneurs en déchet, la déformation de l'enrobé est améliorée. En effet, l'amélioration est estimée à 62% par rapport à l'enrobé pur à 0.7% et de 58% à 0.5% de déchet plastique

❖ A 40°C :

La courbe de déformation augmente et présente un minimum à 0.5 % de déchet plastique, le gain est d'environ de 17%

c) La résistance à la traction indirecte ITS

La résistance à la traction indirecte (ITS) est la contrainte de traction maximale calculée à partir de la charge maximale appliquée (P) jusqu'à rupture et des dimensions de l'éprouvette (diamètre D et hauteur H). Elle est exprimée par la formule suivante :

$$ITS = \frac{2P}{\pi D H}$$

Avec :

ITS : est la résistance à la traction indirecte en (MPa)

P : est la charge maximale (KN)

D : est le diamètre de l'éprouvette (mm) H : est la hauteur de l'éprouvette (mm)

L'évaluation de la résistance des enrobés à la traction indirecte mesurée à une température connue est traduite par la mesure de l'indice à la traction indirecte noté ITS (Indirect Tensile Strength).

Le tableau 3.7 représente les valeurs de cet indice pour chaque teneur en déchet plastique.

Tableau 3.7: ITS à 20°C et 40°C

Teneur en %	ITS (MPa) à 20°C	ITS (MPa) à 40°C
0	1.60	0.506
0.3	2.39	0.503
0.5	2.52	0.748
0.7	2.37	0.573

Les résultats du tableau 3.7 sont illustrés sur la figure 3.19.

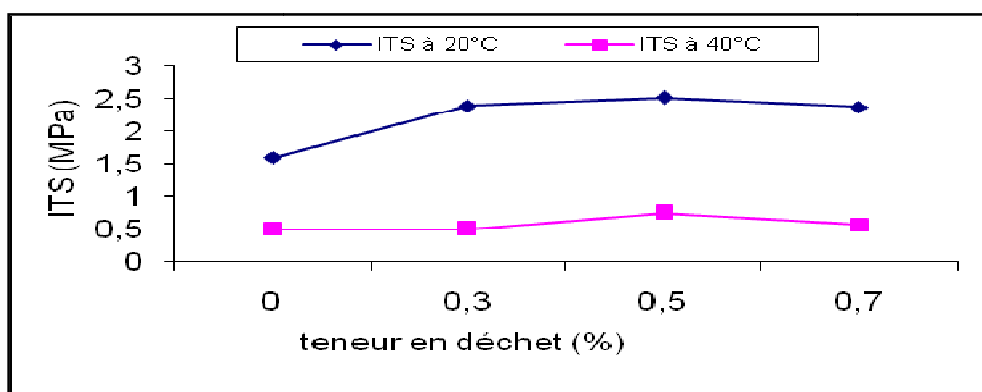


Figure 3.19. ITS en fonction de la teneur en déchet plastique

Pour les deux températures d'essais 20 et 40°C, les courbes présentent un maximum à 0.5% de déchet plastique, représentant des gains respectifs de 57% et 48%

Ces résultats montrent que, par leur comportement thermique à 20°C (considérée comme une température moyenne de service) les déchets plastiques jouent un rôle plutôt structural dans l'enrobé.

En effet, l'incorporation des déchets augmente les rigidités des enrobés testées en réduisant les vides. Il est clair que l'enrobé de 0.5% de déchet plastique confère une rigidité plus grande que celle de l'enrobé de référence

3.5.4. Variation des différents paramètres de l'essai de la traction indirecte

Une petite comparaison entre les résultats de l'essai sur l'enrobé à base de bitume pur et l'enrobé modifié, nous a permis d'évaluer l'influence de la modification de l'enrobe sur les caractéristiques mécanique de ce dernier.

Les résultats obtenus sont mentionnés sur les tableaux 3.8 et 3.9

Tableau 3.8. Variation des paramètres de l'essai de traction indirecte à 20°C

L'essai à 20°C			
Teneur (%)	Δ ITS (%)	Δ déformation (%)	Δ P (%)
0.3	49	-42	44
0.5	57.5	-58	58
0.7	48	-62	47

Tableau 3.9. Variation des paramètres de l'essai de traction indirecte à 40°C

L'essai à 40°C			
Teneur (%)	Δ ITS (%)	Δ déformation (%)	Δ P (%)
0.3	00	+11	00
0.5	+48	-17	+49
0.7	+13	+10	+14

Les résultats des tableau II.8 et II.9 sont représentés sur les figures 3.20 et 3.21 et 3.22

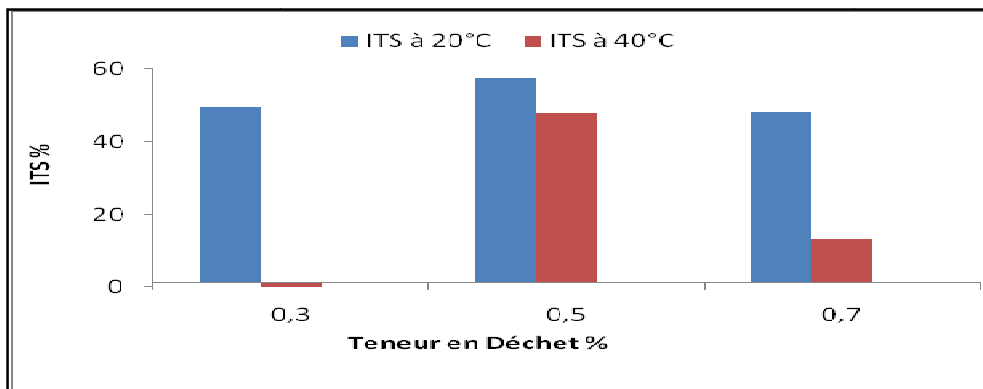


Figure 3.20. Variation de ITS/l'enrobé pur

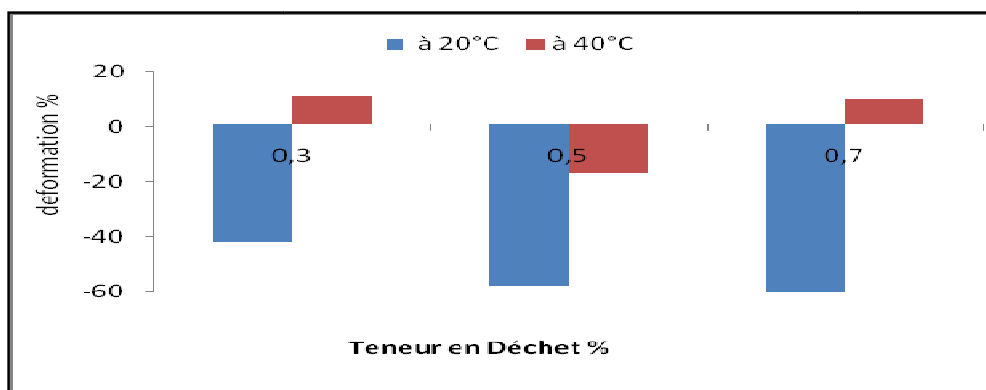


Figure 3.21. Variation de la déformation de l'essai traction indirecte

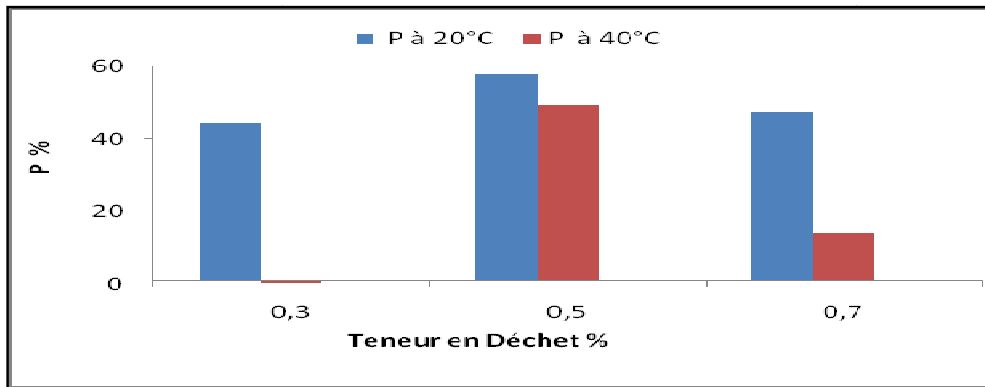


Figure 3.22: Variation de la charge maximale de rupture de l'essai de traction indirecte

La teneur de 0.5% de déchet plastique présente les meilleurs performances à la traction indirecte, elle est caractérisé par:

- un augmentation de la résistance de la traction indirecte ITS de près de 50% par rapport à l'enrobé traditionnel à 20°C et à 40°C
- un diminution de la déformation de près de 60% à 20°C et de 17% à 40° C

3.5.5. Examen visuel des éprouvettes

Après la rupture de l'éprouvette, on peut noter le type de rupture selon la classification suivante

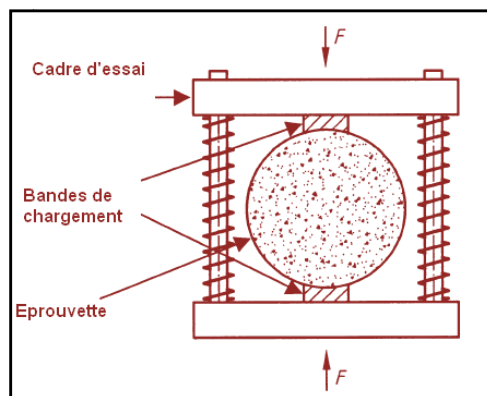


Figure 3.23. Cadre d'essai avec bandes de chargement et éprouvette.

- rupture en traction nette : l'éprouvette est cassée net sur une ligne diamétrale, à l'exception peut-être de petites sections triangulaires à proximité des bandes de chargement ;
- déformation : l'éprouvette est sans ligne de rupture clairement visible ;
- mixte : l'éprouvette présente une ligne de rupture limitée et des zones de déformation plus importantes à proximité des bandes de chargement

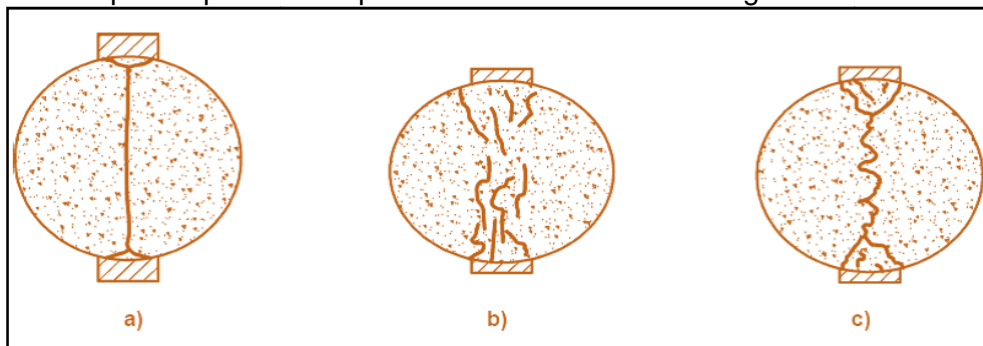


Figure 3.24. : Type de rupture

Nous avons observés des ruptures de types mixte "C" aux deux températures d'essais 20 et 40°C

La figure II.30 représente un échantillon des éprouvettes après l'essai de la traction indirecte



Figure 3.25. État des éprouvettes après l'essai

3.5.6. CONCLUSION

Les courbes ci dessus font ressortir les variation des différents paramètres par rapport à l'enrobé bitumineux à base de bitume pur (mélange témoin). Les résultats montrent que :

- Les bétons bitumineux modifiés à 0.5% de déchet plastique améliore la résistance à la traction indirecte de 57 % à une température de 20°C, et de 48% à la température de 40°C par rapport à l'enrobé témoin.
- Les bétons bitumineux modifiés à 0.5% de déchet plastique améliore les déformation de près de 60% à 20°C et de 17% à 40°C
- L'enrobé de 0.5% de déchet plastique confère une rigidité plus grande que celle de l'enrobé classique "pur".
- Le béton bitumineux modifié à 0.5 % donne la meilleure résistance à la traction indirecte, à 20°C et 40°C
- Les éprouvettes ont subi une rupture de type mixte "c"

3.6. La résistance aux carburants NF EN 12697-43

Pour montrer l'efficacité de l'enrobé modifié par rapport à l'enrobé témoin nous avons procédé à l'essai de la résistance aux carburants

3.6.1. Principe de l'essai

L'essai consiste à mesurer la résistance des enrobés bitumineux aux désenrobage par des carburants répandus accidentellement.

L'éprouvette de type Marshall est immergé dans le carburant susceptible d'être déversé, pendant 24 H ou 72H, la perte du matériau éventuelle est notée, puis l'éprouvette est soumise à une abrasion en surface par une brosse métallique animée d'un mouvement épicycloïdal pendant des périodes de 30s et 60s, la quantité du matériau détaché et le résultat de l'essai.

Nous avons fait une comparaison entre un enrobe pur (0%) et un autre modifié à 0.5% de déchet plastique (la teneur optimale).

Les figures 3.26, 3.27, 3.28 montrent l'état des éprouvettes avant et après immersion dans le carburant, le carburant étant du Gas-oil.



Figure 3.26. Eprouvettes avant immersion dans le carburant

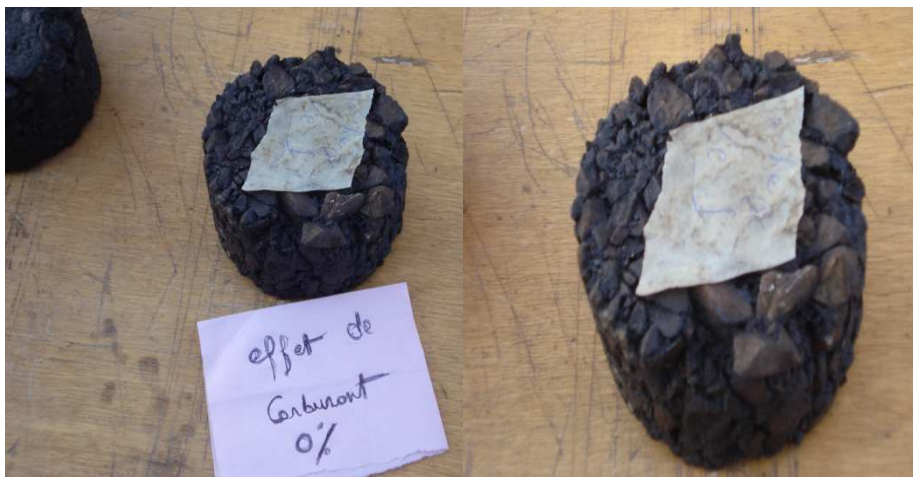


Figure 3.27. Eprouvettes (0%) après immersion dans le carburant



Figure 3.28. Eprouvettes (0.5%) après immersion dans le carburant

3.6.2. Résultats de l'essai

Les résultats de la perte de masse après immersion dans le carburant pendant 24H sont mentionnés sur le tableau 3.10

Tableau 3.10 résultats de l'essai

	diametre D	hauteur H	densité	masse m1	masse m2	masse m3	A %	B%	conclusion
teneur en dechet plastique =0%									
ep-1	101.6	64.2	2.29	1191.59	1130.69	-	5.11	-	mauvaise résistance
ep-2	101.5	63.6	2.33	1197.4	1137.21	-	5.03	-	mauvaise résistance
ep-3	101.7	64.1	2.29	1192.72	1119.02	-	6.18	-	mauvaise résistance
teneur en dechet plastique =0.5%									
ep-1	101.5	65.1	2.28	1199.47	1169.35	1162.1	2.51	0.62	Bonne résistance
ep-2	101.4	64.4	2.30	1197.53	1182.39	1178.71	1.26	0.311	Bonne résistance
ep-3	101.5	64.9	2.29	1199.6	1174.32	1164.28	2.11	0.855	Bonne résistance

La différence de la résistance aux carburants entre l'enrobé témoin et l'enrobé modifié après immersion dans le carburant "GAS OIL" pendant 24H est schématisé sur la figure 3.29

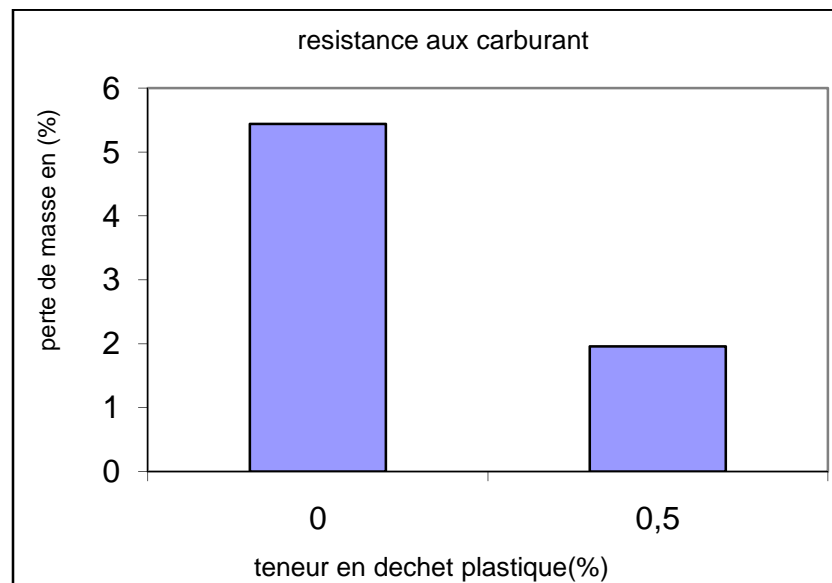


Figure 3.29. Perte de masse en fonction de la teneur en DP

La résistance aux carburants est classée en trois catégories qui répondent chacune aux exigences suivantes:

A<5% et B<1% bonne résistance au carburant

A>5% ou B> 5% mauvaise résistance aux carburant

A<5% et 1%< B<5% résistance moyenne au carburant

Sachant que:

$$A = \frac{m1 - m2}{m1} \times 100$$

$$B = \frac{m2 - m3}{m2} \times 100$$

Où,

m1: la masse initiale de l'éprouvette avant son immersion dans le carburant

m2: la masse de l'éprouvette sèche après son immersion dans le carburant

m3: la masse de l'éprouvette après son immersion et 120s de l'essai de broissage

3.6.3. Conclusion

L'enrobé pur donne une mauvaise résistance au carburant, il a perdu une quantité importante de son poids >5%, sous l'effet de carburant, et sans passer à l'essai de broissage, et par contre l'enrobé modifié a 0.5% présente une bonne résistance au carburant, le départ du matériau sous l'effet de broissage est faible ce qui traduit par une meilleure consistance

3.7. Conclusion de la deuxième partie

- la stabilité Marshall sauf pou à 0.2% de déchet plastique, augmente et est supérieur à celle de l'enrobé témoin pour toutes les autres teneurs en déchet
- Le fluage Marshall diminue jusqu'à 0.5% de déchet et reste dans la fourchette 2-4mm. A partir de 0.6% le fluage augmente, il est supérieur à 4mm
- Entre 0 et 0.5% le quotient augmente jusqu'à atteindre un maximum à 0.5% de déchet, la valeur du QM à 0.5% est de 5.61
- La compacité des éprouvettes est amélioré pour les teneurs de 0.2 ,0.3 ,et 0.5% du déchet ,alors qu'à partir de 0.6% jusqu'à 1% elle n'est qu' améliorée
- Le déchet plastique augmente la tenue a l'eau en améliorent l'adhésivité. Alors on déduit que la teneur optimale est de 0.7% de déchet plastique
- La teneur de 0.5% de déchet plastique présente les meilleurs performances à la traction indirecte, elle est caractérisé par:

-augmentation de la résistance de la traction indirecte ITS de près de 50% par rapport à l'enrobé témoin à 20°C et à 40°C

- diminution de la déformation près de 60% à 20°C et de 17% à 40°C

- Les éprouvette ont subi une rupture de type mixte "c"
- L'enrobé pur donne une mauvaise résistance au carburant, et par contre l'enrobé modifié a donné une bonne résistance.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale Et Perspectives

La recherche d'une plus grande durabilité des caractéristiques fonctionnelles des couches de surface, d'une meilleure résistance vis-à-vis de l'orniérage des couches bitumineuses, ont été les moteurs principaux des travaux de recherches et développement menées depuis une trentaines d'année pour améliorer les propriétés des enrobé bitumineux.

En premier les ingénieurs routiers basent leurs travaux sur des paramètres internes composant l'enrobé à savoir:

- la formulation qui permet un ajout de bitume suffisant
- la qualité des matériaux de construction(forme 100% concasses,et de" bonne cracteristiques intrinseques)
- un bon dimensionnement de corps de chaussée
- un bon système de drainage de la chaussée
- la maîtrise de la mise en œuvre des enrobés
- un bon profil au long de la route(minimiser les pentes)

Mais toutes ses précautions n'ont pas réglé le problème d'orniérage, et pour cela deux procédés ont été explorés :

- 1• la modification de la structure des bitumes à l'aide de polymères
- 2• l'ajout d'additifs aux enrobés.

Dans notre étude nous nous sommes intéressés au procédé2 (l'ajout d'additif aux enrobés)

La modification de l'enrobé bitumineux est effectuée avec un déchet plastique rougeâtre destiné à l'agro-alimentaire,. Afin d'étudier l'influence du chargement sur le comportement mécanique des enrobés bitumineux modifié à la traction indirecte

Ce travail a été mené au laboratoire des routes de la faculté de génie civil de l'USTHB (Université des Sciences et des Technologie Houari Boumediene), il est scindé en deux parties à savoir :

Partie I:Une étude bibliographie comportait sur

- généralités sur le bitume pur, les granulats, les enrobés bitumineux,les polymère de modification
- structure d'une chaussée et les sollicitations influent
- les procédé de modification de l'enrobé bitumineux

Partie II:étude expérimentale, comportait les analyse des matériaux composant l'enrobé tel que :

- Essais de caractérisations sur granulats et bitume
- Elaboration de formulation de l'enrobé
- Confection des éprouvettes bitumineuses
- Essais mécanique sur l'enrobé modifié (Marshall 30min-24H), la traction indirecte à 20°C et 40°C)
- La résistance aux carburant de l'enrobé modifié par rapport à celui de l'enrobé traditionnel

L'utilisation du déchet plastique s'est effectuée par le procédé sec. , elle consiste à injecter l'additif directement dans le malaxeur en même temps que le bitume et les granulats

A la lumière des résultats présentés dans ce mémoire, les conclusions suivantes sont tirées :

1-Le bitume pur

Les caractéristiques physico- mécaniques du bitume pur étudié concordent avec les spécifications préconisées dans la norme NF EN 12591 « Spécifications des bitumes routiers » pour la classe 35/50.

2-Les granulats

Les gravillons destinés à la composition des mélanges d'enrobés présentent des caractéristiques de fabrication et intrinsèques (résistance à l'usure et aux chocs) acceptables, Le sable 0/3 est propre.

La forme des gravillons est en générale cubique et le coefficient d'aplatissement conforme aux exigences des normes,

La propreté superficielle est acceptable et les gravillons sont propres.

3- L'enrobé bitumineux

a- L'essai Marshall

- L'enrobé bitumineux à 0.5% de déchet plastique améliore la stabilité de 24 %, réduit le fluage de 36 % et améliore par conséquent le quotient Marshall de près de 93%,
- Les bétons bitumineux modifiés à 0.5 % donne des meilleures performances mécaniques (stabilité et fluage) pour l'essai Marshall à 30 minutes par rapport aux autres bétons bitumineux.
- La modification du bitume par le déchet plastique améliore les capacités de l'enrobé bitumineux.
- Les bétons modifiés à 0.7 % donnent des meilleures performances pour l'essai Marshall à 24heures par rapport aux autres bétons bitumineux. Ils se comportent mieux en présence d'eau.
- la compacité est conforme aux normes de spécifications pour toutes les teneurs en déchet plastique, elle est maximale à 0.3%

b- Traction indirecte

- Les bétons bitumineux modifiés à 0.5% de déchet plastique améliore la résistance à la traction indirecte de 57 % à une température de 20°C, et de 48% à la température de 40°C par rapport à l'enrobé pur
- la meilleure résistance à la traction indirecte est obtenue à 20°C et 40°C par le béton bitumineux modifié à 0.5 % de déchet plastique
- L'enrobé de 0.5% de déchet plastique confère une rigidité plus grande que celle de l'enrobé classique "pur".

c-la résistance au carburant

- L'enrobé pur donne une mauvaise résistance au carburant, il a perdu une quantité importante de son poids >5%, sous l'effet de carburant
- L'enrobé modifié à 0.5% présente une bonne résistance au carburant, le départ du matériau sous l'effet de carburant et de brossage est faible (<3%) ce qui traduit par une meilleure consistance

Les perspectives

D'après ce travail les points suivants seraient intéressants :

- d'utiliser le déchet plastique comme additif par la méthode humide qui consiste à modifier le bitume d'abord, puis obtenir l'enrobé afin de comparer les résultats des deux méthodes
- Associer au déchet plastique un autre agent qui pourrait améliorer les performances des enrobés.
- Réaliser des planches d'essais avec des enrobés modifiés sur des routes (300m) dans différentes zones climatiques pour voir le comportement réel du mélange et l'évolution des caractéristiques mécaniques sous l'effet du trafic et du climat.
- Réaliser des essais chimiques sur le déchet plastique, tels que la chromatographie, pour mieux expliquer les phénomènes de réaction entre le polymère et le bitume.
- Approfondir des essais mécaniques sur l'enrobé modifié

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [Ait 1994] Ait Mokhtar K., Influence de l'affinité liant hydrocarboné granulat sur les caractéristiques des mélanges hydrocarbonés. Thèse de Magister, IGC/USTHB, 1994.
- [Bas 2006] Bassem, A, modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées: application à l'analyse de l'orniérage, thèse de doctorat, université des sciences et technologies de lille.
- [Ben 2003] Bensbaa kamel, Etude rhéologique des liants modifiés, impact du vieillissement intégrant la démarche, haute qualité environnementale, thèse de magistère 2003, USTHB.
- [Che 1996] Chebil S., Etude des liants modifiés par le noir de carbone et le charbon de bois pyrolytiques, sous produits de la décomposition thermique sous vide des pneus et du bois hors d'usage. Thèse de maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, 1996.
- [CTTP] Guide CTTP, Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux a chaud, Deuxième partie : L'étude de la formulation des enrobés bitumineux a chaud
- [Dan 2006] Dang-Truc, N prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineux. Thèse de doctorat à l'ENPC 2006.
- [Fra 2003] François Olard Comportement thermomécanique des Enrobés bitumineux à basses températures, Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé, Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2003, p 221.
- [Gui 2000] Ministère des travaux publics, Guide CTTP « Recommandation sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaux », Alger 2000.
- [Had 2007] Haddadi S, Influence de la poudrette de caoutchouc sur le comportement au fluage des Enrobés bitumineux .Thèse de Doctorat d'état, FGC/USTHB FGC/USTHB 2007.
- [Has 2002] Hassan BAAJ, Comportement a la fatigue des matériaux granulaires traité aux liant hydrocarbure. Thèse de Doctorat Lyon 2002.
- [Jac 1986] Jacque B et Fernand P : Matériaux bitumineux spéciaux. Rapport général Bulletin de Liaison des Laboratoires de Ponts et Chaussées. N°V144. Juil-Décembre 1986.
- [Jun 2004] Junod. A, ing. Dipl. EPF Prof A.-G. Dumont Formulation et optimisation des formules d'enrobés Mandat de recherche ASTRA 2000/421-2 Décembre 2004.
- [Kam2001] Kamel H., Etude de l'action des bitumes modifiés sur le comportement des enrobés, Thèse de Magister FGC/USTHB 2001.
- [Kra 1980] Kraus G., Rollman K.W., Morphology and mechanical behaviour of bitumen modified with S.B. block polymers, Int. Rubber Conference Nürnberg, Germany, Sep. 1980.
- [Lev 1951] Levi, F., Pizetti, G. : Fluage – Plasticité – précontrainte. Edition Dunod, Paris 1951.
- [Maill 2005] Maillard. Samuel (2005), « Fissuration et autoréparation des liants bitumineux – Apport de l'essai de rupture locale répétée sur bitume » Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes et l'Université de Nantes
- [Mou 1987] M. Mouton, (1987), « Les Polymères », Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, direction de la formation continue et de l'action internationale, n°3541.
- [Michel 1998] Michel Faure, cours de routes, tome2, ISBN2-908016-90-7. Aléas Editeur, juin 1998.
- [Mag 2009] Magramane D, Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification a base de polymère : Poudrette de caoutchouc, thèse de magister ENSTP 2009.
- [Oul 2005] Ould henia Mahdi, Modélisation et prédiction du comportement rhéologique des

- mélanges bitume caoutchouc. Thèse De Doctorat, Lausanne, EPFL 2005.
- [Mét 2001] Métiche S., Influence des paramètres de formulation sur la stabilité au fluage des sables bitumes et des bétons bitumineux, Thèse de Magister, USTHB, Alger, 2001.
- [Nic 2003] Nicolas W, Caractérisation de nouveau bitume caoutchouc. Université de Sherbrooke 2003.
- [NF P 18-586] Norme française. Analyse granulométrique par tamisage, Octobre 1978
- [T 66 – 032] Norme française, Détermination de l'effet de la chaleur et de l'air sur un film mince de liant en renouvellement permanent. Essai de durcissement simulé "RTFOT" Aout 1992.
- [NF P 18 - 591] Norme française, Détermination de la propreté superficielle Avril 1979
- [NF P 98-251-2] Norme française.,Essais relatifs aux chaussées Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés Essai Marshall,Norme française homologuée par décision du Directeur Général de l'afnor le 5 mars 1992 pour prendre effet le 5avril1992.
- [NF P 98-250-2] Norme française, Essais relatifs aux chaussées préparation des mélanges hydrocarbonés, compactage des plaques novembre1997.
- [NF P 98-250-1] Norme française, Essais relatifs aux chaussées ,fabrication d'un enrobé en laboratoire,fevrier1992.
- [NF T 66-004] Norme française. Bitumes et liants bitumineux, Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille, Décembre 1999
- [NF T 66-008] Norme française. Bitumes et liants bitumineux, Détermination de la température de ramollissement, Remplace la norme homologuée NF T 66-008, de juillet 1979.
- [NF P 18-591] Norme française. Détermination de la propreté superficielle, Avril 1979
- [NF P 18-598] Norme française. Équivalent de sable Octobre 1991
- [NF P 18-572] Norme française. Essai d'usure Micro deval, Octobre 1979
- [NF P 18-573] Norme française. Essai los angeles0 Octobre 1991
- [NF P 98-818-23] Norme française. Détermination de la résistance à la traction indirectes des éprouvettes bitumineuses, février 2004
- [NF P 98-818-23] Norme française. Détermination de la masse volumique apparentes des éprouvettes bitumineuses, Aout2003
- [NF P 98-818-43] Norme française. résistance aux carburant ,decembre2005
- [Oye 2006] Oyekunle. L.O, Certain Relationships between Chemical Composition and Properties of Petroleum Asphalts from Different Origin, Vol. 61 (2006), No. 3, pp. 433-441
- [Rec a] Recyc-Québec, les pneus hors d'usage, fiche technique.
- [Rec] « Recyclage des pneus hors d'usage au Canada » la transformation des pneus hors d'usage en produits à valeur ajoutée.
- [Rou 1999] Routes, « Les liants modifiés, les liants avec additifs et les bitumes spéciaux », AIPCR, N°303 III – 1999.
- [Sao 2008] Saoudi N, Comportement rhéologique des bitumes modifiés au polymère (NBR) influence de la température sur la résistance et le fluage des enrobés bitumineux. Thèse de magister FGC/USTHB, 2008.
- [Shu 2002] Shunin. D.G, A. G. Filippova, N. A. Okhotina, A. G. Liakumovich, and Ya. D. Samuilov Possibilities of Production and Use of Rubber3Bitumen Compounds. Russian Journal of Applied Chemistry, Vol. 75, No. 6, 2002, pp. 1020-1023.
- [Sou 2009] Soudani K, Caractéristiques mécaniques et rhéologiques des enrobés bitumineux modifiés par des polymère- Impact sur l'environnement,2009.
- [S,A,H;G 2009] Saoula S., Ait Mokhtar K., Haddadi S., Ghorbel E., Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste, Physics Procedia, Vol.2, pp.1319-1326, 2009.
- [Suc 1994] Such C., Farcas F., Ramond G., Withier P., Migliori F., Planche J-P., Germanaud L., Analyse physico-chimiques de 8 bitumes: Résultats des laboratoires LCPC, LR d'Aix et ELF, Journées de sciences de l'ingénieur du réseau des laboratoires des ponts et chaussées, Presqu'île de Giens, 1994.

- [Vin 2005] Vincent Domac M, Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux en condition de trafic simulé et de température. Thèse de doctorat 2005. Université Bordeaux 1.
- [Weg 1999] Wegan V., Brûlé B., Comparaison entre la microstructure des bitumes polymères tels quels et dans les enrobés spéciaux, Bulletin de liaison ponts et chaussées, N°219, pp. 3-16, 1999.
- [Yan 2001] Yann .L, Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux Étude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus, Expérimentation modélisation. Thèse de doctorat LNPC 2001.
- [Yves 2003] Yves, M.: Organic Materials in civil engineering, ISBN978-1-905209-11-8. Lavoisier 2003.
- [Laet 2008] Laetitia El Bese, Recyclages a'chaud des agregats d'enrobés bitumineux,these de doctorat ,université de Paul Cezanne ,2008.