REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique

Étude du comportement mécanique des enrobées bitumineux modifies par de fibre végétale de l'alfa (Essai : Marshall et presse à cisaillement giratoire PCG)

Présenté par :

Benmehal khadidja

Madhoui Amina

Ouagni Hadjira

Proposé et Dirigé par :

BENSAADA ABDELHALIM

Promotion : 2019/2020

Remerciement

Nous tenons à remercier en premier lieu et avant tout
ALLAH
Le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir notre travail dans les meilleures conditions.
Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur
BENSAADA ABDELHALIM, *Maître assistant à l'Université des Sciences et de Technologie Yahia Fares de Médéa, pour l'élaboration de ce mémoire ses aides précieuses, conseils, son soutien permanent et pour tous ses efforts.*
EPTRC,
Nous sommes très honorées par la présence de Madame ***BOUKHEKHALE DJAMILA****. Nous exprimons notre gratitude à Monsieur* ***LHADI,*** *l'ingénieur dans les travaux publique de Médéa qui nous a encouragé et guidé et qui a accepté d'examiner ce travail.*
Nous voudraient exprimer nos remerciements à tous les professeurs de l'université de Médéa, qui nous ont fait l'honneur d'accepter de participer au jury de ce mémoire.
Aussi Nous remercions tout le personnel administratif de l'université ainsi, nos enseignants durant toute notre formation, sans oublier les responsables de la bibliothèque qui nous ont beaucoup facilité notre recherche bibliographique.
En fin, Nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de prés ou de Loin, à la concrétisation de ce travail.

Dédicace

Au premier lieu, nous tenons à remercier « Allah »
Qui nous a donnée le courage et la volonté pour terminer ce travail et mon promoteur ABDELHAKIM BEN SAADA.

Je dédie ce modeste travail A mes très chers parents, mon père ***Aissa*** *et ma chérie mère* ***Fatiha*** *que dieu les protège, pour leurs soutien durant la période de ma formation. Et aussi pour leur bienveillance.*

Mes frères Mohamed, Hocine, Abdenour et Abdelmonaim.

Mes chères sœurs Hafida, Maria, Djahida et Assma. Et surtout les petits enfants Baylassan ; Abdo ; Sidra et Wassim avec ton mère Nassima .

Et un dédicace très spéciale pour Wail , Louay , Monsif et Nissma . Et a toute la famille « MADHOUI » et «BOUGASMI ».

Tous mes amis et Mon fiancé Brahim.

Mes enseignants qui mon contribuer durant ma Formation. Toute la promotion génie civil 2019 -2020.

Madhoui Amina

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A celle qui m'a donné la vie et l'envie de vivre, à celle qui m'a entouré de sa tendresse, à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, à ***ma très chère mère Ouardia****, et Merci pour avoir veillé sur moi.*

Mon très cher père Mansour*, consciente de tous les sacrifices, les efforts, et la gentillesse qu'il m'a toujours apporté.*

Mon très cher frère *: Zine Dine*

A mes chères sœurs *: Sarah et Maroua*

A mes nièces *: Maria Cintya et Litycia*

Ainsi qu'à toute la famille : Ouagni et Kerchouche A tous mes amis (e) sans exception

A tous ceux, qui ont participé, de prés ou de loin à la réalisation de ce Travail.

Ouagni Hadjira

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mon cher frère **SALAH** et mes chères sœurs **MAHDIA**, **FARIHAN**, et **MERIEM**.

A mon fiancé **ISLAM.**

Qui ma aidé et supporté dans les moments difficiles.

A mes très chers grands pères.

A toutes ma grande famille.

A mon trinômes **AMINA** et **HADJER.**

A mes amies et mes collègues de ma promo

A mon promoteur **MR BENSAADA**

Sans oublier tous les enseignants qui ont contribué à mon soutien scolaire.

A tous qui nous a aidé à réaliser ce travaille, à toute l'équipe de laboratoire de **L'EPTRC** et **L'DTP**.

Je vous remercie tous, votre soutien et vos encouragements me donnent la force de continuer.

KHADIDJA

ملخص

الهدف من هذه الدراسة هو إيجاد تأثير نسب جزيئات الحلفة النباتية على السلوك الميكانيكي للخرسانة الزفتية . استعمال مثل هذه المواد يتيح العديد من المزايا

- الاقتصاد في المواد الطبيعية (الحصى - الرمل) .
- استغلال نبات الحلفة في مجال الأشغال العمومية .

تعديل الخرسانة الزفتية بواسطة جزيئات الحلفة يحسن السلوك الميكانيكي و الريولوجي للخلطات البيتومينية ينتج عن هذا التحسين

- ❖ زيادة في الاستقرار والاكتناز وحاصل مارشال و انخفاض في ضغط مارشال.
- ❖ زيادة في معامل صلابة لخلطات الاسفلت.
- ❖ انخفاض في طاقة ضغط الخلطات البيتومينية.

Résumé

Cette étude vise à déterminer, l'influence de la teneur en fibre végétale de l'alfa sur le comportement mécanique des enrobés bitumineux. L'utilisation de ces matériaux offre plusieurs avantages :

- Economie des matériaux naturels (gravier et sable).
- Exploiter la plante d'alfa dans le domaine des travaux publique.

La modification des enrobés bitumineux par la fibre végétal de l'alfa améliore le comportement mécanique et rhéologiques des enrobés bitumineux. Cette amélioration se traduit par:

- Une augmentation de la stabilité, la compacité, et le quotient Marshall.
- Une diminution du fluage Marshall.
- Une augmentation du module de rigidité des enrobes bitumineux.
- Une réduction de l'énergie de compactage des enrobés bitumineux.

Abstract

This study aims to determine, the influence of the rations plant fiber content of Alfa particuls on the mechanical behavior of asphalt mixes. The use of these materials offers many advantages:

- Saving natural materials (gravel and sand).
- To exploit the esparto plant in the field of public works.

The modification of asphalt mixes by the plant fiber of esparto improves the mechanical and rheological behavior of asphalt mixes. This improvement is reflected in:

- An increase in stability, compactness, and Marshall's quotient.
- A decrease in Marshall Creep.
- An increase in the modulus of rigidity of asphalt mixes.
- A reduction in the compaction energy of asphalt mixes.

Liste des figures

1ere Partie : Etude bibliographique

Chapitre I :

Figure I.1 : Coupe transversale d'une route…….....04
Figure I.2 : les couches de la chaussée…….....06
Figure I.3 : Décollement de chaussée……....08
Figure I.4 : plumage …….....08
Figure I.5 : Désenrobage……...09
Figure I.6 : Pelade (a : faible – b : moyenne – c : majeur)…….…...09
Figure I.7: Têtes de chat ……...09
Figure I.8 : Nids de poule (a : faible – b : moyen – c : majeur)…….....10
Figure I.9 : Fissures transversales (a : moyen – b- majeur)…….…..10
Figure I.10: Fissure en piste de roues……....11
Figure I.11 : Fissures longitudinales (a : faible – b- majeur)…….…...11
Figure I.12 : Fissures de rives…….…...11
Figure I.13 : Fissures de gel……..12
Figure I.14 : Faïençage……..12
Figure I.15 : Epaufrures…….…12
Figure I.16 : Remontées (d'eau ou d'argile)……..13
Figure I.17 : Ressuage……...13
Figure I.18 : Boursouflure……13
Figure I.19 : affaissement……..14
Figure I.20 : Le bourrelet……...14
Figure I.21 : Le Flache……...…..15
Figure I.22 : Tôles ondulée……....15
Figure I.23 : L'orniérage…….....16
Figure I.24: Types d'orniérage……..16

Chapitre II :

Figure II.1 : Composition de l'enrobé bitumineux……....19
Figure II.2 : Différents granulats…….…..21
Figure II.3 : Bitume……...22

Figure II.4 : Fabrication des bitumes par raffinage du béton……...24
Figure II.5 : Séparation chimique des 4 familles de constituants du bitume……...24
Figure II.6 : Etat colloïdal des bitumes…….……25
Figure II.7: Schématisation des sollicitations induites par le trafic……..…26
Figure II.8 : Schématisation des sollicitations induites par la température……..……27
Figure II.9 : Les cinq niveaux de formulations des bétons bitumineux…….....28
Figure II.10 : Machine La Presse Cisaillement à Giratoire……..…….29
Figure II.11 : Principe de Cisaillement Giratoire…….....30
Figure II.12 : Principe de l'essai Duriez……..……..32
Figure II.13 : Principe de l'essai d'orniérage…….…...33
Figure II.14 : l'appareil de module…….…...34
Figure II.15 : Essai Marshall…….…38

2eme Partie : Etude expérimentales

Chapitre I :

Figure I.1 : Déférentes fractions granulaires récupérées…….……..44
Figure I.2 : Appareillage d'analyse granulométriques…….….45
Figure I.3 : Courbe d'analyse granulométrique sable 0/3…….....46
Figure I.4 : Courbe d'analyse granulométrique sable 3/8…….....47
Figure I.5 : Courbe d'analyse granulométrique sable 8/15…….…..48
Figure I.6 : Essai de coefficient d'aplatissement…….…..49
Figure I.7 : Méthode de mesure de h1 et h2 d'équivalant de sable……...52
Figure I.8 : Essai Los-Angeles……..53
Figure I.9 : le principe de la masse volumique apparente sèche (ρd)……...54
Figure I.10 : Test au bleue du méthylène avec le résultat…….55
Figure I.11 : Essai Micro-Deval…….....56
Figure I.12 : Appareille de l'essai de pénétrabilité……57
Figure I.13 : Essai de point de ramollissement……..58
Figure I.14: Essai de perte de masse au chauffage……59
Figure I.15 : la fibre d'alfa…….....60
Figure I.16 : Paysage de touffes d'alfa……..60

Chapitre II :

Figure II.1 : Disposition des courbes granulométriques des constituants par rapport la courbe médiane de fuseau……...……..65
Figure II.2 : La composition proposée……..65
Figure II.3 : Courbe de mélange granulaire s'insère au fuseau de référence BB 0/14…….66

Figure II.4 : préparation d'un enrobé bitumineux…….……69
Figure II.5 : Essai de presse à cisaillement giratoire…….69
Figure II.6 : L'évolution de compacité des mélanges bitumineux en fonction de nombre de girations ……71
Figure II.7: Les éprouvettes des mélanges de béton bitumineux modifiés après l'essai PCG…….71
Figure II.8 : Préparation des éprouvettes avec compactage……..73
Figure II.9: Les éprouvettes des mélanges du béton bitumineux à l'intérieur d'un bain marie……....73
Figure II.10 : Mesure de poids et hauteur des éprouvettes……....73
Figure II.11 : presse Marshall pour calculer la charge maximale (Stabilité Marshall)…….75
Figure II.12 : Stabilité Marshall en fonction de pourcentage de l'alfa……..76
Figure II.13 : Fluage Marshall en fonction de pourcentage de l'alfa……....77
Figure II.14 : quotient Marshall en fonction de pourcentage de l'alfa……..…77
Figure II.15 : les éprouvettes des mélanges de béton bitumineux modifiés après le passage à la presse Marshall…….….77

Liste des tableaux

1ere Partie : Etude bibliographique

Chapitre I :

Chapitre II :

Tableau II.1 : Spécification du rapport R/r pour les différents enrobés…….…...33
Tableau II.2 : Principaux agents modifiants des bitumes…….39
Tableau II.3 : Les travaux de recherche sur les enrobes bitumineux modifiés par des deux voie (sèche et humide) dans l'Algérie est dans le monde…….……40

2eme Partie : Etude expérimentales

Chapitre I :

Tableau I.1 : Analyse granulométrique sable 0/3…….…46
Tableau I.2 : Analyse granulométrique sable 3/8…….…..….....47
Tableau I.3 : Analyse granulométrique sable 8/15…….…….....48
Tableau I.4 : Coefficient d'aplatissement gravier 3/8……..….……50
Tableau I.5 : Coefficient d'aplatissement gravier 8/15. …….……...51
Tableau I.6 : Equivalent de sable……..52
Tableau I.7 : los Angeles 3/8 et 8/15…….53
Tableau I.8 : Masse volumique absolue 0/3, 3/8…….....53
Tableau I.9 : valeur de bleu de méthylène sable 0/3…….55
Tableau I.10 : Micro Deval 8/15…….....56
Tableau I.11 : Pénétrabilité de bitume…….…..….....57
Tableau I.12 : Point de ramollissement de bitume……58
Tableau I.13 : Densité relative de bitume…….……..……..58
Tableau I.14 : Perte de masse de bitume…….....59
Tableau I.15 : Composition chimique d'Alfa selon plusieurs sources…….....61
Tableau I.16 : les propriétés mécaniques de la fibre d'alfa…….....62

Chapitre II :

Tableau II.1 : Distribution granulométrique de mélange……..…..…..64
Tableau II.2 : Valeur de K selon le BBSG……...67

Tableau II.3 : composition de la formule utilisée…….....67
Tableau II.4 : Les poids de l'alfa trouvée à déférents teneurs……...……...68
Tableau II.5 : Composition du mélange……...68
Tableau II.6 : Résultats de l'essai PCG des déférents mélanges……..70
Tableau II.7 : Résultats de caractéristiques de l'éprouvette Béton bitumineux de référence……...74
Tableau II.8 : Résultats de caractéristiques de l'éprouvette Béton bitumineux modifies…….....74
Tableau II.9 : Résultats d'essai Marshall l'éprouvette Béton bitumineux de référence…….……..75
Tableau II.10 : Résultats d'essai Marshall l'éprouvette Béton bitumineux modifiés……...76
Tableau II.11 : résultats de l'essai module (15° C et 10 Hz)…….…...78

Liste des symboles

NF : Norme française

P : la page

F : Filler

S : Sable fin

S : Sable grossier

G : Gravier

K : Module de richesse

Σ : Surface spécifique

TL : Teneur en liant

J : Jours

M : Masse des éprouvettes

R : Résistance à la compression avec immersion à 18°C en Kg/cm ²

R : Résistance à la compression sans immersion à 18°C en Kg/cm²

Hmin : La hauteur minimale correspondent un pourcentage de vide = 0 %

H : Hauteur des éprouvettes

D : Diamètre

MvR : Masse Volumique Réel

MvA : Masse Volumique Apparente

V : Pourcentage de vide

PCG : Presse Cisaillement Giratoire

| E| : Module rigidité

φ : Angle de phase

BBSG : Béton bitumineux semi grenus

BB : Béton bitumineux

GB : Grave-bitume

SB : Sable -bitume

BBME : Béton bitumineux à module élevé

PCG : Essai de la presse à cisaillement giratoire

A : Coefficient d'aplatissement

LA : Essai Los-Angeles

(ρd) : La masse volumique apparente sèche

MDE : Essai Micro-Deval

E : Module De rigidité

Sommaire

Remerciement

Dédicace

ملخص

Résumé

Abstract

Listes Des Figures

Liste Des Tableaux

Liste Des Symboles

INTRODUCTION GENERALE…….…….....01

1ere Partie : Etude bibliographique

CHAPITRE I: GENERALITE SUR LES CHAUSSEE…….....…….…..…..03

I.1. Introduction…….…….... 04

I.2. Généralité sur les chaussées…….....04

I.2.1. Les composants d'une route……..04

I.2.2. Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée……..05

I.2.3. les différents types des chaussées…….06

I.3. Dégradation des chaussées bitumineuses…….....07

I.3.1 Les arrachements……07

I.3.2 Les fissurations……...10

I.3.3. Les remontées…….....….13

I.3.4 Les déformations……....14

I.4. conclusion sur les chaussées……....16

CHAPITRE II : GENERALITE SUR LES BITUMES ET LES ENROBES BITUMINEUX 17

II.1. Introduction…….……18

II.2. Définition de l'enrobe bitumineux…….....18

II.3. Les différents types des enrobés bitumineux…….....19

II.3.1. Béton Bitumineux (BB)……...19

II.3.2. Béton Bitumineux Très Mince (BBTM)…….....19

II.3.3. Béton Bitumineux Mince (BBM)…….....19

II.3.4. Béton Bitumineux Souple (BBS)…….....20

II.3.5. Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG)…….20

II.3.6. Béton Bitumineux à Module Elevé (BBME)……..……..20
II.3.7. Grave Bitume (GB)…….…….20
II.4. Constituants d'un enrobé bitumineux…….20
II.4.1. Les Granulats ……..20
II.4.1.1. Classification des granulats……..21
II.4.2. Le bitume…….....21
II.4.2.1. Origines des bitumes…….……....22
II.4.2.2. Fabrication de bitume……..…….....22
II.4.2.3. Composition chimique du bitume…….....24
II.4.2.4. Structures colloïdales du bitume……..25
II.4.2.5. Propriétés générales des liants hydrocarbonés……...……...25
II.4.2.6. vieillissement des bitumes …….…….…26
II.4.2.7. Ductilité…….……...26
II.5. Influence des actions appliquées sur les enrobés bitumineux ……..…....26
II.5.1. Effet du trafic……...26
II.5.2. Effet de la température…….27
II.6. Les Méthodes de Formulations et les Essais pour Enrobés Bitumineux …….……..27
II.7. Fabrication du mélange en laboratoire……28
II.8. Les essais sur les enrobes bitumineux…….……...29
II.8.1. Essai de la presse à cisaillement giratoire (PCG)……29
II.8.1.1. le But d'essai PCG avec un cas réel ……..……..30
II.8.1.2. Principe d'essai PCG…….……..30
II.8.1.3. La Condition de l'essai…….……30
II.8.1.4. Réalisation d'essai PCG…….……..30
II.8.1.5. Interprétation de l'essai PCG……..…….31
II.8.2. L'essai de tenue à l'eau (Essai Duriez)…….…….…..31
II.8.2.1. Le principe d'essai duriez…….…….....31
II.8.2.2. Le but d'essai Duriez …….....32
II.8.2.3. Interprétation…….…….…..32
II.8.3. L'essai d'orniérage……..…….....33
II.8.3.1. Le Principe d'orniérage…….……...33
II.8.4. Essai de Module de rigidité…….…….……..34
II.8.4.1. Le Principe des essais module……..……...…….35
II.8.5. Essai de fatigue……...…..……...35
II.8.5.1. Le Principe……..……..……35
II.8.6. Essai Marshall……...…..……35

II.8.6.1. Le But et principe de mesure……..……...35
II.8.6.2. L'Objectif de l'essai Marshall ……..……..36
II.8.6.3. La Confection des éprouvettes dans l'essai Marshall……..….36
II.8.6.4. Le domaine d'application de l'essai Marshall……..….36
II.8.6.5. Le mode opératoire d'essai Marshall …….....36
II.8.6.6. Appareillage……..……..…...37
II.8.6.7. l'écrasement des éprouvettes …….....37
II.8.6.8. Expression des résultats……..……..….37
II.9. La modification des enrobés bitumineux ……..…..38
II.10. Les additifs……..…..38
II.11. Etat de l'art de recherche sur les enrobés bitumineux…….…….39
II.12. Conclusion……41
2eme Partie : PRESENTATION DES MATERIAUX ET ETUDE EXPERIMENTALES
CHAPITRE I : PRESENTATION DES MATERIAUX D'ETUDE……....43
I.1. Introduction…….…….....44
I.2. Les granulats…….……...44
I.2.1. Essais d'identification des agrégats ……..……..…...44
I.2.2. Conclusion sur les granulats…….……56
I.3. Le bitume…….……57
I.3.1. Essai de pénétrabilité aiguille **(NF EN 1426)** ……..……....57
I.3.2. Essai de point de ramollissement **(NF EN 1427)**…….…….....57
I.3.3. Essai de densité relative A 25°C **(NF T 66 – 007)**…….……58
I.3.4. Essai de perte de masse au chauffage **(NF EN 13303)**…….……...58
I.3.5. Conclusion sur le bitume utilisé…….……...59
I.4. Le fibre végétale de l'alfa…….……..….59
I.4.1. Présentation générale sur le plant d'Alfa…….…….....60
I.4.2. Détermination de l'humidité de la fibre d'Alfa…….....61
I.4.3. Composition chimique de la fibre d'Alfa……61
I.4.4. Propriétés mécaniques……...61
I.4.5. Conclusion…….…62
CHAPITRE II : étude expérimentales sur les enrobes bitumineux……63
II.1. Etudes de formulation de l'enrobé bitumineux…….....64
II.2. Composition mélange……64
II.2.1. Détermination de la Teneur en liant……66
II.2.2. Pourcentage de l'additif de l'alfa…….……68
II.3. Préparation de l'enrobé bitumineux…….……...68

II.4. Les essais réalisées sur les enrobés bitumineux modifiés…….….69
II.4.1. Essai de presse à cisaillement giratoire (PCG) …….….69
II.4.2. Essai Marshall (EN 126976-34)……..72
II.4.3. Essai module de rigidité (EN 12697-26) ……...….78
II .5. Conclusion ……....79
Conclusion final……..80
Références bibliographiques ……...…81
Les normes…….…….83

Introduction générale

Les chaussées bitumineuses, sous l'effet conjugué du trafic en poids lourds croissant et d'une température élevée, subissent des dégradations de type déformation. La résistance aux déformations permanentes est un paramètre important qui rentre dans la conception des mélanges bitumineux appelé « stabilité », et il se définit comme étant l'aptitude d'un mélange bitumineux à résister aux déformations permanentes excessives. La mise au point de nouveaux produits adaptés aux besoins du secteur routier algérien nécessite de plus en plus la connaissance de toute la chaine de la formulation depuis le choix des bitumes jusqu'à la constitution des enrobés, qu'ils soient purs ou modifiés, ainsi que la connaissance des applications en techniques chaudes et froides [1]. La modification peut s'opérer de deux manières [2], la première étant la modification du bitume (procédé humide) [3,4], et la deuxième consiste en l'ajout direct du modifiant lors de l'opération de malaxage de l'enrobé (procédé sec) [5].

Dans cette étude, nous avons choisi, comme modifiants une fibre végétale, et sont obtenus à partir de plant de el 'alfa de longueurs variant de 2 à 5mm. L'objectif de ce travail est de contribuer à l'amélioration des caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux, et il est concentré sur l'effet de l'ajout de fibre de el 'alfa sur le comportement mécanique des enrobés bitumineux modifiés.

Le résultat des différentes recherches montre une bonne influence des polymères sur les caractéristiques des enrobés bitumineux.

L'objectif de notre mémoire est d'étudier le comportement mécanique d'un enrobé bitumineux modifié par la fibre végétale de el 'alfa, et ceci en effectuant les essais de Marshall, à la presse giratoire (PCG), de module de rigidité.

Ce mémoire se compose de deux (02) parties, la 1ère partie étude Bibliographique, et la 2ème partie, partie qui est l'étude expérimentale.

Cette dernière nous a permis d'évaluer l'intérêt de la modification des enrobés bitumineux et montrer l'amélioration du comportement mécanique des enrobes bitumineux modifier par la diminution du pourcentage du vide avec l'augmentation de la fibre végétale et l'augmentation du module de rigidité répondant aux spécifications.

1ere Partie :

Etude bibliographique

CHAPITRE I :

Généralité sur les chaussées

CHAPITRE I : Généralité sur les chaussées

I.1. Introduction :

Nous présentons dans ce chapitre le mélange d'un enrobée bitumineux. Ce dernier est constitué des granulats (Les fines, les sables et les graves) représentant prés de 94% de composition liées par le bitume. Il constitue la couche supérieure (la couche de roulement) d'une superposition d'autres couches (assise, fondation, etc.) sur laquelle circulent les véhicules. Ainsi que nous présentons les différents types des enrobés bitumineux, leurs formulations, les principaux essais de caractérisation, et en fin nous discutons sur les fibres végétales d'Alfa.

I.2. Généralité sur les chaussées :

La chaussée est la partie d'une affectée à la circulation des véhicules. Elle assure les déplacements des usagers et le transport des marchandises, quelles que soient les conditions météorologiques, dans des conditions de sécurité et de confort adapté au type d'itinéraire, D'un point de vue mécanique, son rôle est de répartir les charges mécaniques sur le sol support, quelles que soient les conditions environnantes [6].

I.2.1. Les composants d'une route [7] :

L'emprise : est la surface qui lui est affectée et qui comporte toutes ces dépendances.

L'assiette : surface du terrain réellement occupée par la route.

Plate-forme : surface de la route qui comprend la chaussée et les accotements.

Accotements : la bande de la plate-forme bordant extérieurement les deux côtés de la chaussée

La chaussée : la partie de route, usuellement revêtue, sur laquelle circulent les véhicules, la chaussée doit avoir une résistance parfaite pour supporter tout genre de véhicules et rapporter leurs poids sur le terrain de fondation.

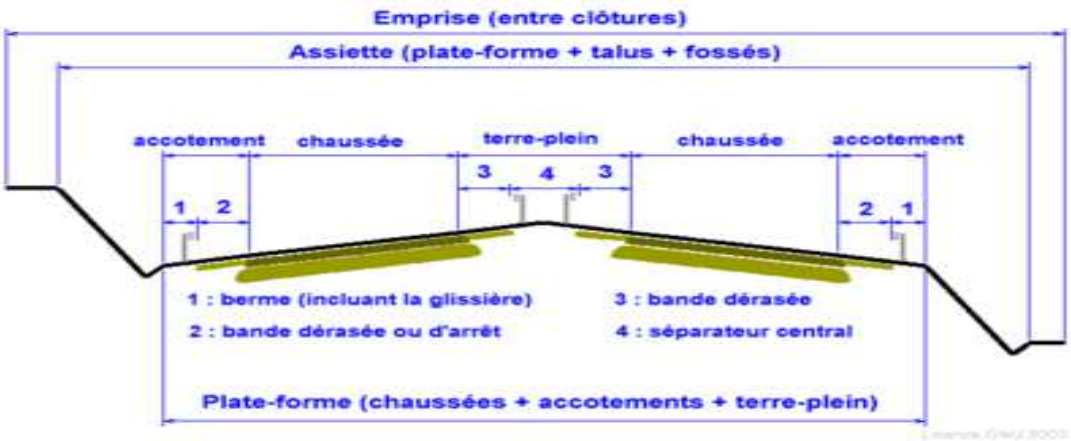


Figure I.1 : Coupe transversale d'une route.

I.2.2. Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée :

- Le sol support :

Généralement surmonté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plate-forme support de chaussée.

- La couche de forme :

La couche de forme est un élément de transition qu'on l'introduit entre le sol support et les couches de sol afin d'améliorer et d'uniformiser la portance du sol. Cette couche, ne fait pas partie intégrante de la chaussée, elle peut constituer soit de matériaux grenus roulés ou concassés, soit de matériaux traités aux liants hydrauliques.

- La couche d'assise :

L'assise de chaussée se décompose en deux sous-couches : la couche de fondation, surmontée de la couche de base.

- **Couche de fondation** : elle est composées de gravier concassé 0/40 d'une épaisseur de 20 cm. Elle répartit les pressions sur le support, afin de maintenir les déformations.
- **Couche de base (G.B)** : Elle est formée de gravier 0/25 et bitume. Elle est d'une épaisseur de 20 cm Cette couche supporte exactement l'action des véhicules à l'intérieur de laquelle les pressions élevées s'atténuent avant d'être transmise à la couche de fondation.

- La couche de surface :

La couche de surface a globalement une structure bicouche :

- **Couche de roulement** : c'est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions combinées du trafic et du climat. On lui demande des qualités d'usage précises à savoir : une forte adhérence, une bonne dérivabilité, un bon niveau d'uni et une réduction du bruit de roulement des véhicules. Selon les besoins, on utilise soit la technique des enrobés épais, soit celle des enrobés minces ou très minces.
- **Couche de liaison** : l'apport structurel de cette couche est accessoire (sauf les chaussées à assise granulaire dont la couche de surface est la seule couche liée), elle est tributaire de la pérennité de la chaussée. Le choix de la couche de surface doit résulter de la prise en considération de plusieurs objectifs tels que [7] :
  - la sécurité et le confort usagers, en relation avec les caractéristiques de surface ;
  - Le maintien de l'intégrité de la structure, par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations des eaux pluviales et des sels de déverglaças ;

- l’impact sur l’environnement, avec notamment la recherche d’une réduction des bruits de roulement ;
- les possibilités de régénération des caractéristiques de surface.

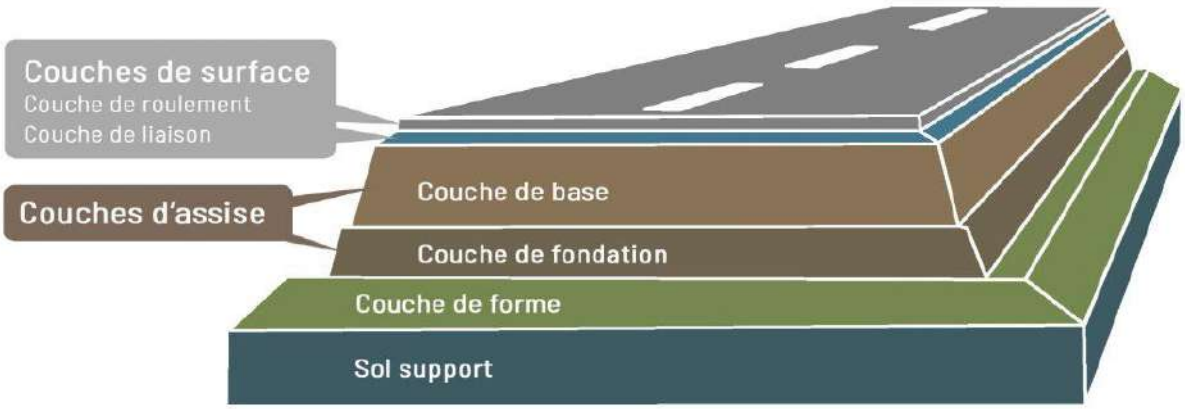


Figure I.2 : les couches de la chaussée.

I.2.3. les différents types des chaussées :

- Les chaussées rigides :

Une chaussée rigide se compose d’une dalle en béton de ciment fléchissant élastiquement sous les charges, reposant sur un sol compacté ou sur une mince fondation de pierre ou de gravier concassé, ou sur une fondation stabilisée [8].

- Les chaussées souples :

Les chaussées souples sont les plus utilisées dans le monde [7, 9]. Le corps d’une chaussée souple se compose de trois types de couches, du haut vers le bas:

- la couche de surface
- la couche d’assise
- a couche de plate-forme support

Il s'agit d’une mixtion de granulats grossiers ou fins (pierre concassée, gravier et sable) et de bitume obtenu à partir d'asphalte ou de pétrole, ou de goudron compressé et convenablement souple pour absorber le choc des roues et l'intensité du trafic.

- Les chaussées bitumineuses épaisses :

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse chapeautée un corps de chaussée d'épaisseur comprise entre 15 et 40 cm (Composé d'une couche de base et une couche de fondation) en grave traitées aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques. Vue la différence d'épaisseur de la couche d'assise entre la chaussée simple et la chaussée épaisse, leur fonctionnement se différent.

- Les chaussées semi-rigides (ou à assise aux liants hydrauliques) :

Assise traitée aux liants hydrauliques de 20à 50 cm avec couche de surface en matériaux hydrocarbonés d'épaisseur 6 à 14 cm.

- Les chaussées rigides (ou en béton de ciment) :

Sont constituées d'une couche de béton de 15 à 40 cm recouverte d'une couche mince en enrobés bitumineux. La couche de béton peut surmonter :

- ✓ Une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment ;
- ✓ Une couche drainante en matériaux non traités.
- ✓ Une couche bitumineuse qui repose sur une couche de forme
- ✓ La couche de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu) ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints.

- Les chaussées à structures mixte :

Comporte une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux (10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). De plus, le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de la chaussée est de 0,5.

- Les chaussées à structures inverse :

En les comparants aux structures mixtes, les chaussées inverses comportent une couche supplémentaire de matériaux granulaires non traités d'environ 12 cm. Cette couche introduite entre la couche bitumineuse de 15 cm d'épaisseur et la couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale de la structure est comprise entre 60 et 80 cm .

- Les chaussées à structures composite :

C'est une structure qui a été l'objet d'une étude technico-économique au début des années 1990. Cette étude a pour but d'assembler la qualité de durabilité des bétons de ciment avec les qualités souplesse et capacité d'adaptation des matériaux bitumineux. Deux nouvelles structures ont été développées

I.3. Dégradation des chaussées bitumineuses [9, 10] :

I.3.1. Les arrachements :

Généralement c'est une perte des matériaux de la couche de roulement. Nous recensons les pertes par : décollement ; plumage ; dés enrobage ; pelade ; tête de chat ; nids de poule.

- **Le décollement :**

C'est une perte d'adhérence entre la couche de surface et la couche de base.



Figure I.3 : Décollement de chaussée.

- **Plumage :**

C'est une extraction d'une partie des gravillons du revêtement, ce phénomène est appelé aussi peignage lorsqu'il se produit conjointement à l'axe de la route.



Figure I.4 : plumage.

- **Désenrobages :**

C'est une séparation du mastic (liant+ fines) et des granulats avec perte et départ des gros granulats en surface engendrant la détérioration du revêtement.



Figure I.5 : Désenrobage.

- **Pelade :**

C’est un Arrachement du vêtement de la couche de surface, par lamelles plus au moins grandes.

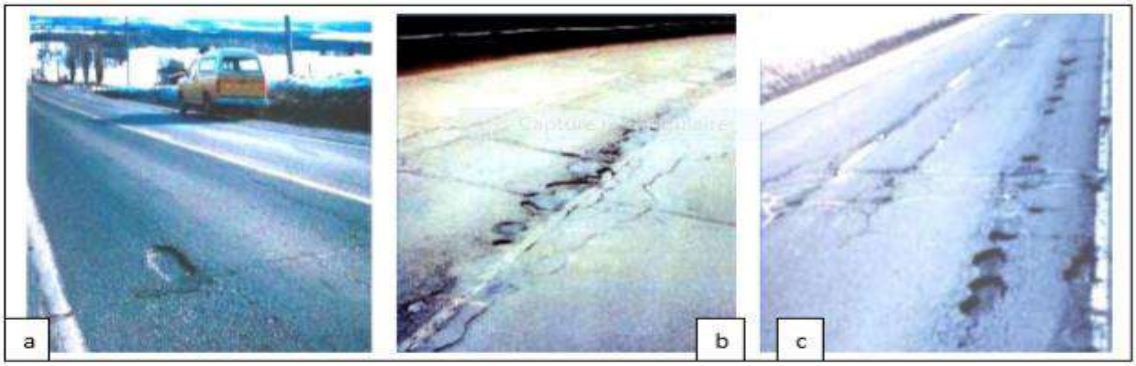


Figure I.6 : Pelade (a : faible – b : moyenne – c : majeur).

- **Têtes de chat :**

Pierres ou cailloux durs, de dimensions supérieures au granulat en place, apparaissant à la couche de surface formant saillie. Cette dégradation provient suite à l’usure de la couche de roulement.

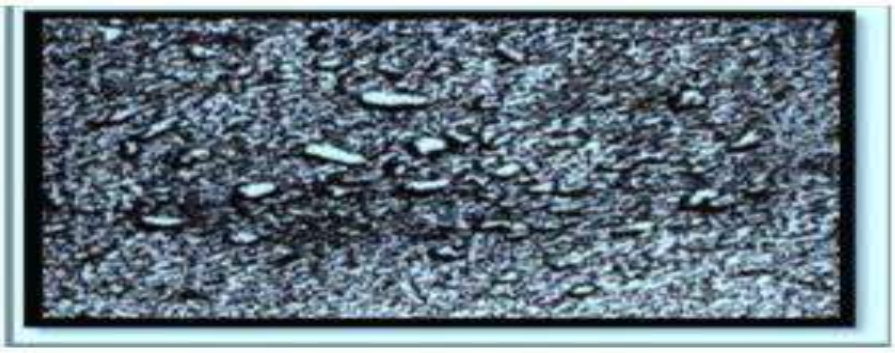


Figure I.7 : Têtes de chat.

- **Nids de poule :**

Des cavités dues à la désagrégation localisée du revêtement sur toute son épaisseur. Elles sont généralement arrondies, au pourtour bien défini, de dimension et de profondeur variables.

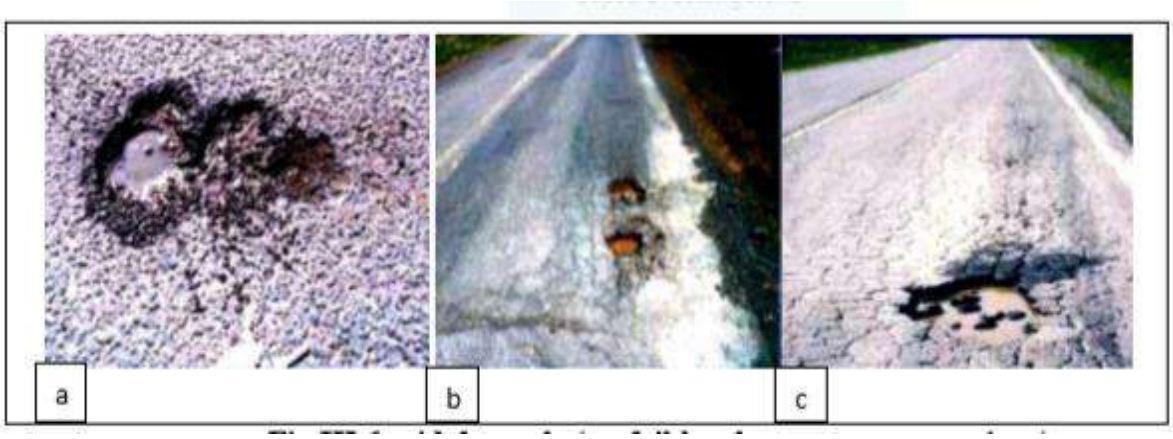


Figure I.8 : Nids de poule (a : faible – b : moyen – c : majeur).

I.3.2. Les fissurations

La fissure est une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée. Il existe plusieurs types de fissures dans la couche de roulement :

- **Les fissures transversales :**

Ces fissures se manifestent orthogonalement à la chaussée. Elles peuvent être séparées ou alternatifs d'espacement variables, elles peuvent également toucher toute la largeur de la chaussée ou une fraction.

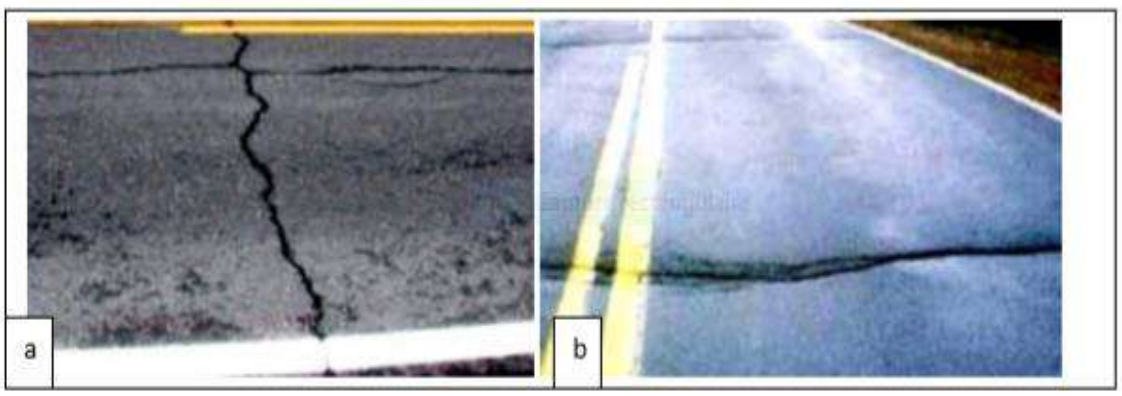


Figure I.9 : Fissures transversales (a : moyen – b- majeur).

- **Fissure en piste de roues :**

Rupture du revêtement parallèle à la direction de la route.



Figure I.10 : Fissure en piste de roues.

- **Fissures longitudinales (excepté des pistes des roues) :**

Rupture du revêtement relativement parallèle à la direction de la route, en dehors des pistes des roues.

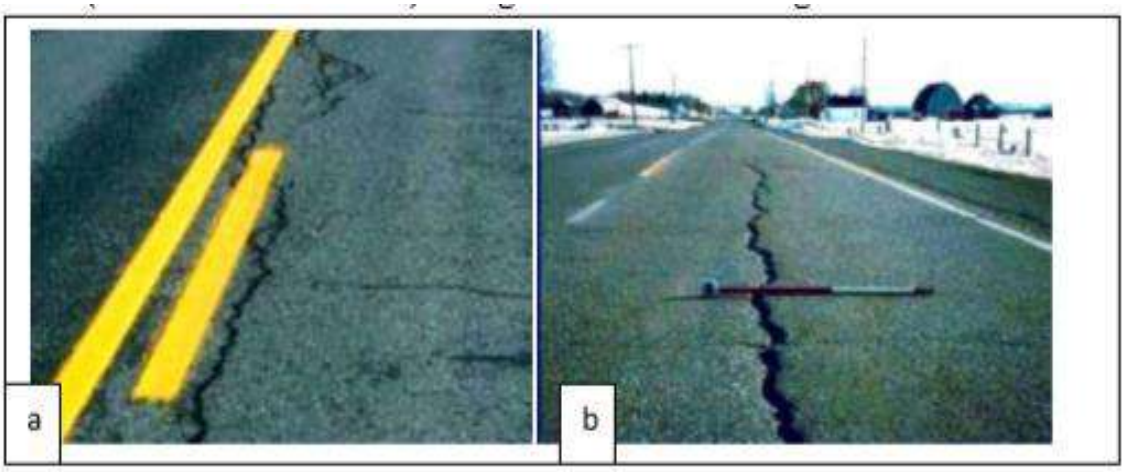


Figure I.11 : Fissures longitudinales (a : faible – b- majeur).

- **Fissures de rives :**

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



Figure I.12 : Fissures de rives.

- **Fissures de gel :** Fissures actives sous l'effet du gel, elles peuvent être :
  - ❖ Rectiligne et localisée au centre de la chaussée.
  - ❖ D'apparence gercée sans localisation précise.



Figure I.13 : Fissures de gel.

- **Le faïençage :**

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

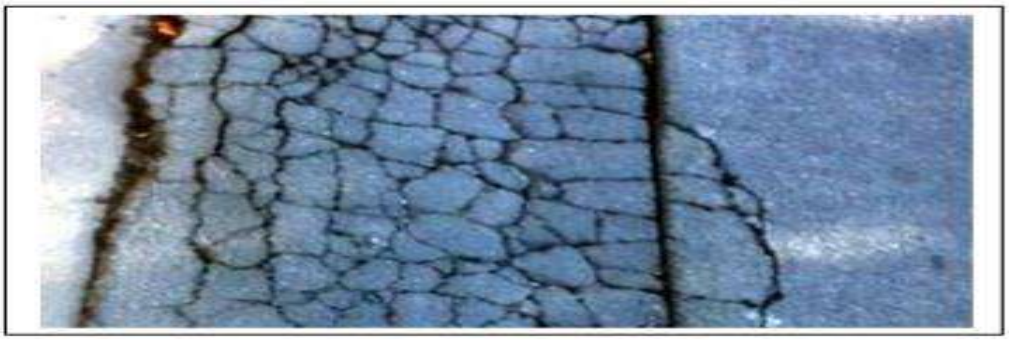


Figure I.14 : Faïençage.

- **Les épaufrures :**

Ecrasement et désintégration du revêtement en bord de chaussée ou du rail.



Figure I.15 : Epaufrures.

I.3.3. Les remontées :

- **Remontées (d'eau ou d'argile) :**

Partie de chaussée d'eau claire ou d'eau chargée en fines découlant du corps de la chaussée par remonter à travers les pores et les fissures.



Figure I.16 : Remontées (d'eau ou d'argile).

- **Ressuage :**

Élévation en surface de la haussée du liant recouvrant complètement les granulats. Cette élévation est généralement accentuée dans les pistes des roues.



Figure I.17 : Ressuage.

- **Boursouflure :**

Déformation du revêtement par zone localisées et formant une irrégularité importante.

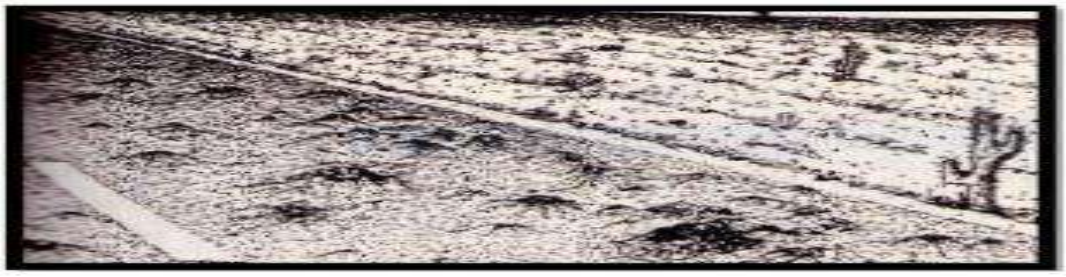


Figure I.18 : Boursouflure.

I.3.4. Les déformations :

- **L’affaissement** :

Abaissement cerné du niveau du profil de la chaussée, on le rencontre fréquemment sur les voiries secondaires dont la chaussée est souple



Figure I.19 : affaissement.

- **Le bourrelet (gonflement) :**

Ballonnement plus au moins prononcé apparaissant à la surface de la chaussée.



Figure I.20 : Le bourrelet.

- **Flache :**

Déformation de la surface de la chaussée dormant une dépression arrondie (ou elliptique) **.**



Figure I.21 : Le Flache.

- **La tôle ondulée :**

Ondulation de faible longueur d'ondes, perpendiculaire à l'axe de la chaussée.



Figure I.22: Tôles ondulée.

- **L'orniérage :**

L'apparition du trafic lourd et sa croissance ont été accompagnés par l'apparition des dégradations prématurées notamment l'orniérage qui est l'un des principaux modes de dégradation des chaussées. Est une déformation permanente longitudinale de la chaussée caractérisée par un tassement de celle ci qui se crée sous le passage répété des roues. Ce phénomène évident sur un chemin boueux où un véhicule laisse immédiatement les traces de ses pneus intervient sur tout type de route. En fonction de leur taille (profondeurs) les ornières sont classées en trois catégories :

- petites (6 à 12.5mm)
- moyennes (12,5 à25mm)
- grandes (>25mm).



Figure I.23: L'orniérage.

En fonction de leur forme, il existe trois types d'ornières :

- ✓ **Les ornières d'usure :** Sont dues au départ et à la perte progressive des particules de granulats de la couche de surface, sous l'effet combiné des facteurs d'environnement et de trafic
- ✓ **Les ornières structurelles :** Résultent de la déformation verticale permanente (tassement) dans la structure de la chaussée sous les chargements répétés du trafic.
- ✓ **Les ornières d'instabilité :** Elles résultent du mouvement et de déplacements latéraux des matériaux dans la couche bitumineuse, Elles sont plus fréquentes dans les chaussées souples à mauvaises caractéristiques.

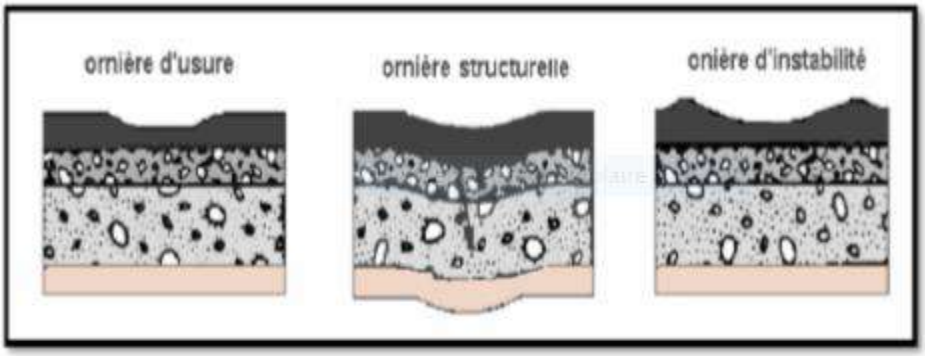


Figure I.24 : Types d'orniérage.

I.4. Conclusion sur les chaussées :

Le rôle d'une chaussée est de répartir les charges sur une plus grande surface et de réduire les pressions transmises au sol. Nous avons déjà présentés les différentes structures de la chaussée, leurs types, et les phénomènes et les problèmes exposé aux chaussés. La couche de roulement est généralement faite en enrobé bitumineux. Ce dernier va être étudié par la suite.

CHAPITRE II :

Généralité sur les bitumes et les enrobés bitumineux

CHAPITRE II : Généralité sur les enrobés bitumineux

II.1. Introduction :

Les enrobés bitumineux constituent un élément majeur dans la construction des routes. Dans ce chapitre partie nous allons présenter quelques généralités sur les enrobés bitumineux, ainsi que quelques travaux de recherches sur les enrobés bitumineux.

II.2. Définition de l'enrobe bitumineux :

On appelle enrobé bitumineux tout mélange constitué de granulats agglomérés entre eux par un liant hydrocarboné (bitume) [11] ; ce mélange peut être enrichi par des fines et éventuellement contenir des additifs en vue d'améliorer certaines propretés. Généralement la composition d'un enrobe bitumineux est comme suit :

- **Granulats** :

(Environ 90% en poids) composés de plusieurs fractions en pourcentages variables :

- ❖ Les fines < 80 µm.
- ❖ Les sables (0/3).
- ❖ Les graves (3/8, 8/15).

- **Bitumes** : (5 à 7 % en poids)
- **Vides** : (de 2 à 20% selon les matériaux).

Les enrobés bitumineux rencontrer plusieurs exigences :

- ❖ Etre maniable durant la mise en place et la compaction.
- ❖ Contribuer à la force de la structure de la route.
- ❖ Offrir une bonne résistance a l'orniérage, à la fissuration due à la fatigue et à la fissuration thermique.
- ❖ Résister aux effets de l'air et de l'eau (durabilité).
- ❖ Assurer une bonne adhérence des pneus dans des conditions climatique variées.
- ❖ Offrir un niveau acceptable de bruit du au frottement des pneus sur la chaussée.
- ❖ Offrir une douceur de roulement acceptable.

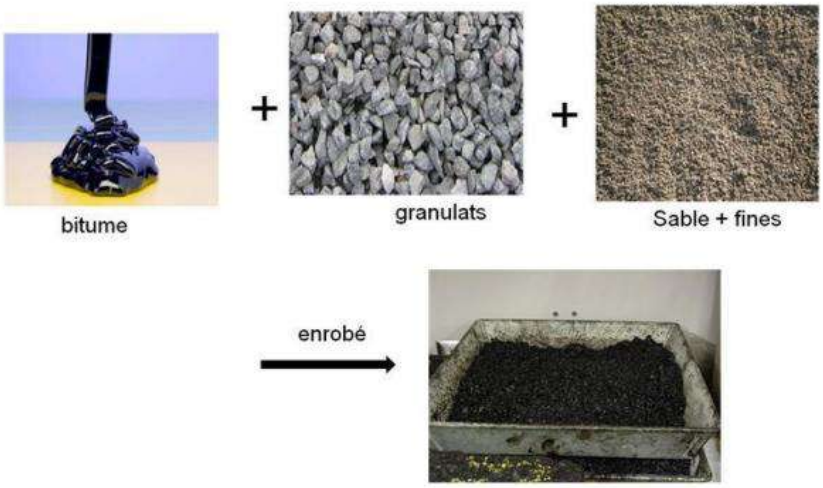


Figure II.1 : Composition de l'enrobé bitumineux.

II.3. Les différents types des enrobés bitumineux :

Les " Enrobés bitumineux" sont des matériaux résultant d'un mélange des granulats et d'un liant hydrocarboné. Le mélange liant – granulats obtenu est constitué de trois phases [12] :

- **La phase solide :** représentée par le squelette granulaire.
- **La phase visqueuse :** représentée par l'apport du liant qui assure la cohésion.
- **La phase gazeuse :** représentée par le pourcentage des vides contenu dans le mélange.

Il y a plusieurs formules d'enrobés bitumineux classer selon leur domaines d'utilisation et leurs caractéristiques mécaniques, qui seront prises en compte pour le dimensionnement des structures de chaussées [12].

II.3.1. Béton Bitumineux (BB) :

C'est un enrobé bitumineux utilisé pour les couches de roulement, il contient plusieurs classe en fonction de la granulométrie.

II.3.2. Béton Bitumineux Très Mince (BBTM) :

Ce type béton bitumineux est utilisé pour la couche roulement, leur épaisseur moyenne d'emploi est de 2.5 cm. Le (BBTM) est employé pour las couches de roulement giratoire dans le but de diminution et d'atténuation du bruit de roulement. Ses caractéristiques générales sont:

*Etude de niveau 2 au minimum *granularité 0/10 ou 0/6.3 mm.

II.3.3. Béton Bitumineux Mince (BBM) :

Il est employé en couche de roulement ou de liaison. Son épaisseur moyenne d'utilisation est de 4 cm. Ses caractéristiques générales sont :

*Etude de niveau 2. *granularité 0/10 discontinue entre 2 mm et 6.3 mm.

II.3.4. Béton Bitumineux Souple (BBS) :

Il est utilisé pour la couche de roulement des chaussées à faible trafic sur support déformable, leur épaisseur moyenne est de 4 à 6 mm Ses caractéristiques générales sont :

*Etude de niveau 2.

*granularité doit permettre l'obtention des caractéristiques mécaniques avec % des fines de l'ordre de 8%.

II.3.5. Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG) :

Il est employé pour la couche de roulement ou de liaison. Son épaisseur moyenne d'utilisation est de 5 à 7 cm. Il se caractérise par :

* Etude de niveau 2. *granularité permettre l'obtention des caractéristique mécanique.

II.3.6. Béton Bitumineux à Module Elevé (BBME) :

Son usage est en couche de roulement ou liaison pour des chaussées fortement sollicités ou en couche de roulement pour voies d'arrêts de bus. Ses caractéristiques sont : « Etude de niveau 3 au minimum » granularité permettre l'obtention des caractéristiques mécaniques.

II.3.7. Grave Bitume (GB) :

C'est un enrobé à faible teneur en bitume, il est employé en couche de base et en couche de fondation. Leur épaisseur moyenne est de 8 à 14 cm.

II.4. Constituants d'un enrobé bitumineux :

Les enrobés bitumineux à deux composants principaux pour formuler, les granulats et le bitume ;

II.4.1. Les Granulats :

Les granulats utilises dans les techniques routières peuvent être naturels ou artificiels. Ils sont dits naturels lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives, extraites in situ, et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique.

On les qualifie d'artificiels lorsqu'ils proviennent soit de la transformation thermique de roches, minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers [13].

Le rôle des granulats est d'abord mécanique. Ils sont choisis pour leur résistance aux usages, leur taille, leur origine et leur répartition afin de supporter au mieux les usages attendus.

Les matériaux granulaires constituent environ 95% de la masse de l'enrobé (80-85% du volume).

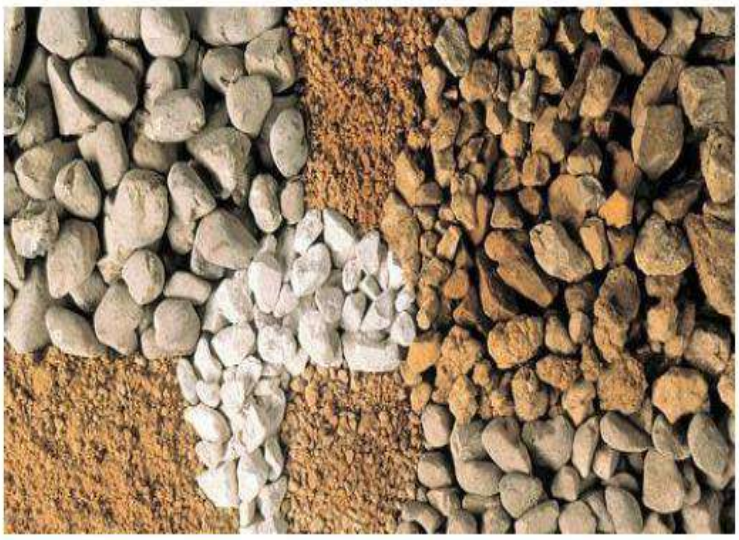


Figure II.2: Différents granulats.

II.4.1.1. Classification des granulats :

Routiers Selon leurs dimensions, les granulats sont classés par classes granulaires. La classe granulaire «d/D» est composée de granulats dont le diamètre est compris entre d et D. Selon la norme NF P 18-101, les granulats ont été répartis dans les différentes familles :

- Les fines 0/D avec $D \leq 0{,}08$ mm.
- Les sables 0/D avec $D \leq 6{,}3$ mm.
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31{,}5$ mm.
- Les graves 0/D avec $D \leq 80$ mm.
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm.

En Algérie, les granulats sont classés d'une manière différente. En effet, les différentes fractions granulaires sont : 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25. La fraction granulaire 3/8, par exemple, ne comprend que des granulats de diamètres compris entre 3mm et 8mm.

II.4.2. Le bitume :

Le bitume est un matériau viscoélastique, c'est-à-dire que la réaction du matériau dépend de différents facteurs tels que la durée et la vitesse d'application d'une charge, l'amplitude de la sollicitation d'une charge et surtout la température. Le bitume enrobe le squelette granulaire et confère la cohésion et l'imperméabilité des enrobés [14]. Le bitume contribue également à la rigidité et à la résistance aux déformations des enrobés. Effectivement, le bitume est un matériau ayant la propriété d'être plus souple à de haute température et plus rigide à basse température. Le bitume représentent près de 5 % d'un enrobé bitumineux.

Le bitume est un hydrocarboné complexe. Les caractéristiques physiques sont influencées par la source de pétrole brut, le procédé de fabrication, sa composition moléculaire et sa sensibilité à la

température. Un liant hydrocarboné est un matériau thermoplastique, c'est-à-dire un matériau qui conserve ses propriétés après chauffage, et dont la consistance varie avec la température. D'autre part, une propriété fondamentale exigée d'un liant hydrocarboné est son pouvoir adhérent à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, métal, verre. Il est insoluble dans l'eau, mais soluble dans de nombreux solvants organiques [15].



Figure II.3 : Bitume.

II.4.2.1. Origines des bitumes :

D'une façon générale, on distingue trois familles de liants hydrocarbonés à savoir :

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

II.4.2.2. Fabrication de bitume :

Après décantation, le pétrole étant chauffé à une température élevé (350-380°C), le résidu est recueilli puis traité selon l'utilisation :
Il existe quatre méthodes de fabrication des bitumes à savoir [15,16] :

-La distillation :

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

Distillation à la pression atmosphérique :

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

Distillation sous vide :

Cette opération est nécessaire pour obtenir des produits lourds, donc on commence par la distillation sous pression atmosphérique de brut choisi. Le fond de la colonne est alors envoyé à la distillation sous vide qui consiste la séparation des différents constituants en jouant sur les paramètres débit, pression et température. La pression réduite qui règne à l'intérieur de la tour est destinée à poursuivre la séparation physique des constituants sans les dégrader thermiquement. Plus on distille, plus le bitume obtenu est dur et plus sa pénétrabilité est faible.

- **L'extraction (Désasphaltage) :**

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

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

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

- **Le Craquage :**

Le craquage est un traitement des fonds de colonne sous vide à des hautes températures comprises entre 450 et 500°C et à des pressions allant de 2 à 25 bars. Dans ces conditions, certaines grosses molécules des fractions lourdes se craquent pour former des molécules plus petites, tandis que les plus stables résistent au traitement. Ces bitumes n'ont pas d'application routière.

- **Le Soufflage :**

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

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

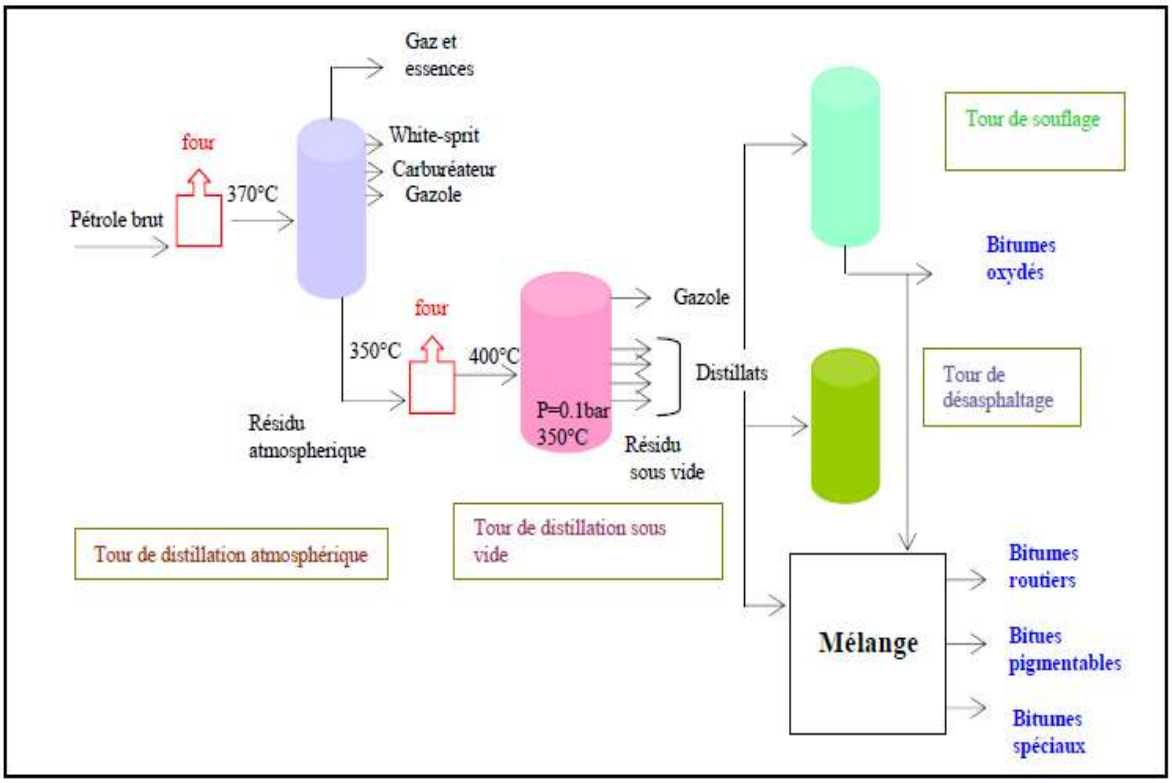


Figure II.4 : Fabrication des bitumes par raffinage du béton.

II.4.2.3. Composition chimique du bitume :

Le bitume est constitué des composés insolubles dans le n-heptane appelés « asphlatènes » (représentant j'us qu'a 20% en masse pour les bitumes routiers), et des composés solubles dans le n-heptane appelés « malténes » regroupement trois espèces chimique (saturés, aromatiques et résines), les bitumes sont constitués de quatre famille principales connues sous l'appellation de fraction SARA (saturés, aromatiques, résines et asphlatènes) [15].

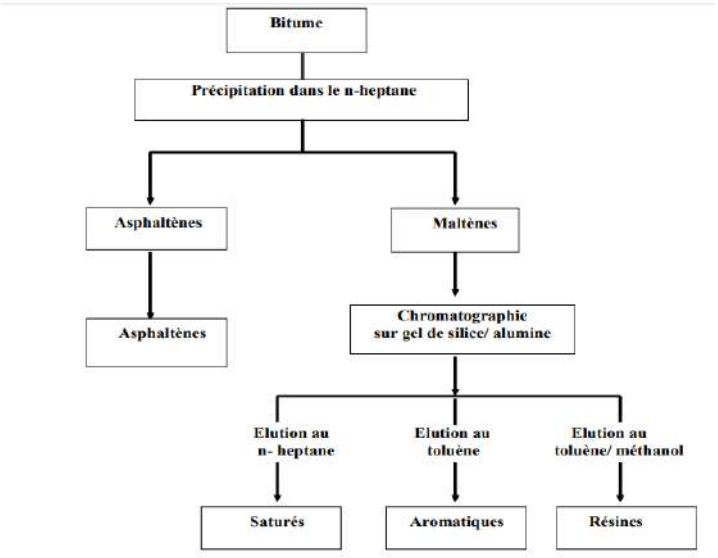


Figure II.5 : Séparation chimique des 4 familles de constituants du bitume.

II.4.2.4. Structures colloïdales du bitume :

Le bitume se présente sous l'aspect d'un système colloïdal dans lequel les « asphalaténes » peptisés par les « résines » constituent les micelles, tandis que les huiles représentant la phase inter micellaire [17]. Storm et collaborateurs [18] ont proposé que l'épaisseur de la couche des résines auteur des particules d'asphalaténes évolue avec la température. La schématisation de la structure colloïdale d'un bitume routier est représentée dans la figure suivante :

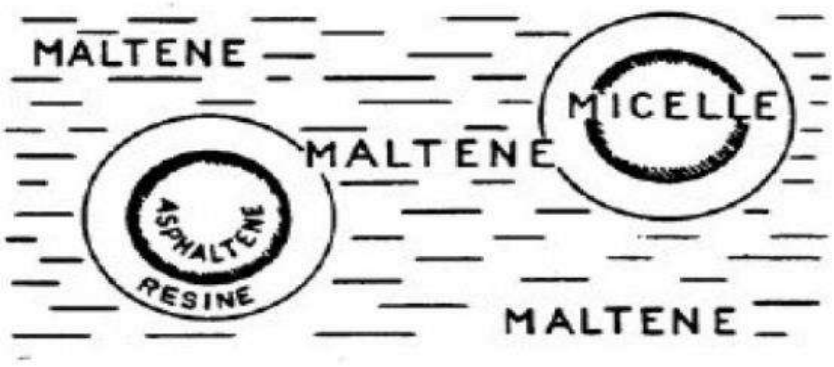


Figure II.6 : Etat colloïdal des bitumes.

L'école SOVIETIQUE et notamment KOLBANVSKAJA définissent a la température ordinaire trois types structuraux du bitume associés a trois familles de composition [19]:

- Structure de type I « état élastoplastique ».
- Structure de type II « état visqueux ».
- Structure de type III « état viscoplastique ».

II.4.2.5. Propriétés générales des liants hydrocarbonés :

Ces produits sont, en général, trop visqueux dans leur état naturel, pour pouvoir être employés directement. Il faut diminuer cette viscosité ou les liquéfier par différents procédés (chauffage, dissolution dans des solvants volatils, émulsions dans l'eau), pour pouvoir les utiliser à la place qui leur est destinée. Il est indispensable que ces traitements n'altèrent pas leurs caractéristiques essentielles indiquées ci-dessous:

- **Cohésivité :** C'est la propriété de se déformer sans arrachement ni fissuration interne en donnant des films étanches et plastiques.

- **Adhésivité :** C'est la propriété de coller aux granulats minéraux.

- **viscosité :** Elle est définie comme la résistance opposée au sein d'une masse liquide à une déformation telle que la vitesse de déplacement de différents poids soit variable, la viscosité diminue considérablement avec la température.

- **Susceptibilité :** La susceptibilité est définie, en particulier, comme la variation de la viscosité avec la température.

II.4.2.6. vieillissement des bitumes :

C’est pour le liant, la perte de certaines qualités dans le temps et notamment la perte de cohésivité ; D'une manière générale, le liant laisse échapper très lentement des huiles et devient de plus en plus dur.

II.4.2.7. Ductilité :

C’est la caractéristique du liant qui lui permet de s'allonger en un fil très mince, mais sans se rompre. L'allongement plastique qui précède la rupture diminue progressivement. Cette qualité est évidemment une conséquence de la cohésivité. De ces caractéristiques dépend l'emploi du liant ainsi que la méthodologie pour sa mise en œuvre.

II.5. Influence des actions appliquées sur les enrobés bitumineux :

II.5.1. Effet du trafic :

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l’effet du trafic. 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. Il s’agit du phénomène de fatigue qui s’observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée. Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées [20]**.**

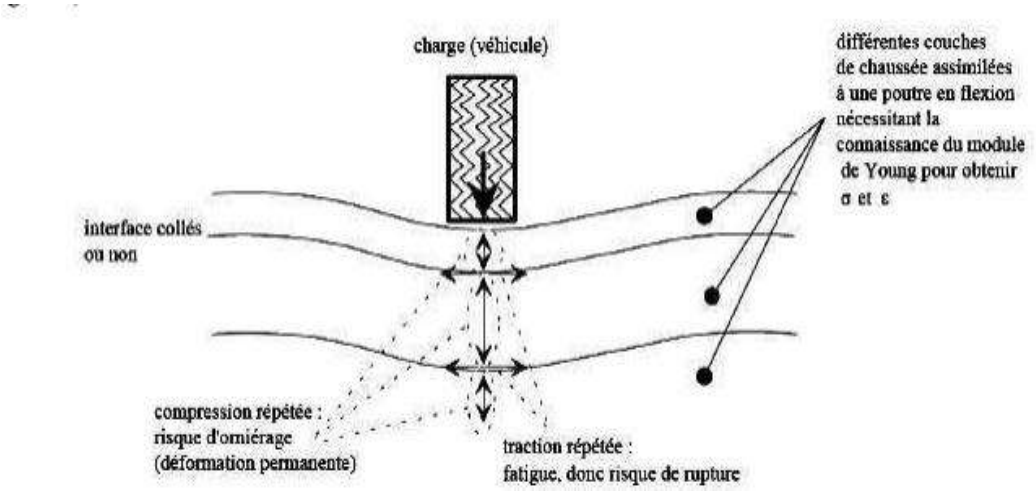


Figure II.7 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic.

II.5.2. Effet de la température :

La température à deux effets mécaniques principaux :

- Le changement du comportement du matériau.
- La Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température.
- Lorsque des températures très basses sont appliquées, des fissures peuvent apparaitre et se propager avec les cycles thermiques (journaliers ou autres).
- Lorsqu'une couche de base traitée aux liants hydrauliques existe dans la chaussée (structure semi-rigides), cette couche est sujette au retrait thermique, de prise et de dessiccation. Le retrait empêché par le frottement à l'interface peut provoquer un fissure dans le revêtement en enrobé bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut traverser la couche. Ce phénomène est connu sous le nom de « remontée de fissure» [21].

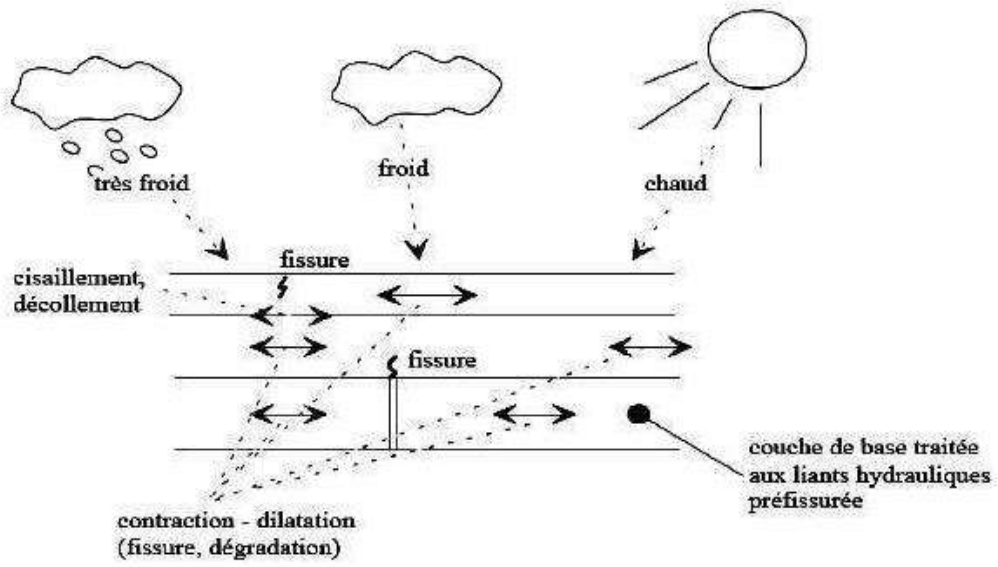


Figure II.8 : Schématisation des sollicitations induites par la température.

II.6. Les méthodes de formulations et les essais pour enrobés bitumineux (NF en 13/08-1) :

Il est prescrit cinq (5) niveaux de formulation consignés de 0 à 4 :

- Niveaux 0 : Il sert à établir une courbe granulométrique et fixer la teneur en lient.
- Niveaux 1 : Il est basé sur l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) et l'essai de tenue à l'eau (Essai Duriez).

➢ Principe : mesure le compactibilité et Effet de l'eau sur le mélange.

- Niveaux 2 : En plus des essais du niveau un (essai PCG et essai de Duriez), on utilise l'essai d'orniérage.

➢ Principe : Étude de Résistance à l'orniérage.

- Niveaux 3 : On rajoute l'essai de module aux essais précédents.

➢ Principe : mesure de la résistance opposée a une contrainte.

- Niveaux 4 : On complète les essais du niveau quatre par l'essai de fatigue.

➢ Principe : sollicitation d'une éprouvette trapézoïdale a déformation imposée.

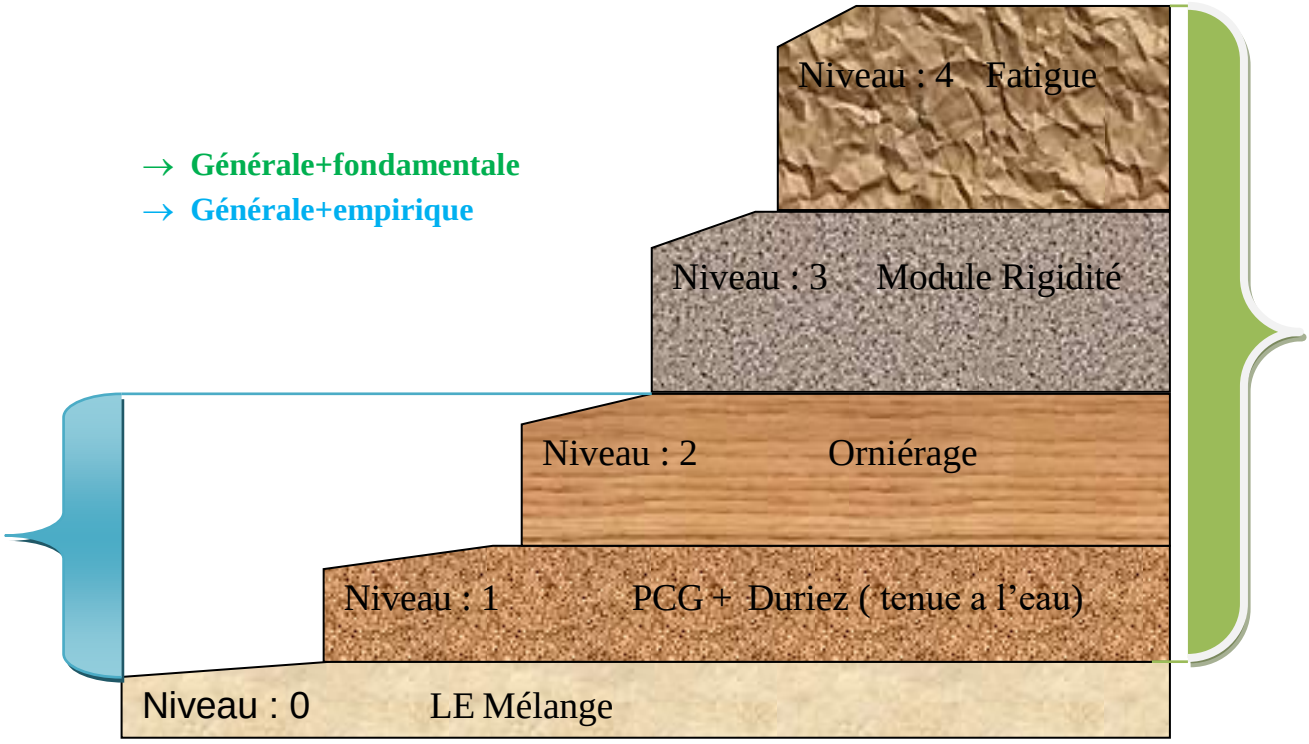


Figure II.9 : Les cinq niveaux de formulations des bétons bitumineux.

II.7. Fabrication du mélange en laboratoire (NF EN 12697-26) :

- Les constituants (gravillons, sable et fines) sont pesés et conditionnés dans une étuve ventilée à une température de (110±5°C) pendant au moins 8 heures.

- Les liants bitumineux sont préchauffés à 100°C et ils sont ensuite quartés puis chauffés à des températures plus importantes (150°C pour le bitume pur et 170°C pour le bitume modifié) juste avant la fabrication des mélanges. Le malaxeur doit être conditionné à la même température que les mélanges constitutifs (granulats, bitume, fins) soit 150°C **(EN 12697-35)**.On introduit les différentes tailles de granulat dans le malaxeur. Puis, on mélange l'ensemble à sec pendant 30 secondes .On introduit ensuite le bitume dans le malaxeur et on poursuit le malaxage pendant 2 min. Ce temps nous permet d'obtenir un mélange homogène.

II.8. Les essais sur les enrobes bitumineux :

Les mélanges préparés au laboratoire à différents dosages en liant (autour des dosages calculés), seront soumis aux différents essais au but de déterminer leurs performances mécaniques selon les quatre niveaux d'étude de formulation [22].

II.8.1. Essai de la presse à cisaillement giratoire (PCG) (NF EN 12697-31) :

L'essai à la presse à cisaillement giratoire est développé pour la formulation des enrobés bitumineux français depuis 1972. Au début, il a été utilisé majoritairement dans les laboratoires de l'administration. Progressivement, d'autres laboratoires, entreprises routières, sociétés pétrolières, laboratoires étrangers, se sont équipés. En 1980, une expérience d'exactitude a été réalisée avec dix-sept laboratoires, dont une forte proportion de laboratoires de l'administration. Depuis cette époque, les utilisateurs de l'essai sont devenus plus nombreux et la répartition des types d'utilisateurs a considérablement évolué. Le projet de mode opératoire de l'essai de 1979 a été transformé en norme française homologuée en 1992 (et révisée en 1993). L'essai a fait l'objet de spécifications dans dix normes de produits. Les procédés de préparation des corps d'épreuve se sont diversifiés. Cette opération est réalisée selon la norme **(NF P 98-250-1),** mais cette norme autorise l'emploi de trois types de malaxeurs différents ; l'ancien mode opératoire était plus restrictif sur ce point notamment. Devant ces évolutions, i l a été décidé d'organiser une expérience de détermination de l'exactitude, prenant en compte la norme d'essai **(NF P 98-252)**, et une répartition plus actuelle des praticiens de l'essai [23].



Figure II.10 : Machine La Presse Cisaillement à Giratoire.

II.8.1.1. Le but d'essai PCG avec un cas réel :

L'essai a pour but d'étudier le comportement d'un mélange hydrocarboné préparé en laboratoire dans un moule cylindrique soumit sur son sommet à une force verticale en même temps est incliné d'un angle faible et soumis à un mouvement circulaire. Ces différentes actions exercent un compactage par pétrissage. Avec un cas des résultats afficher sur le tableau suivant.

II.8.1.2. Le principe d'essai PCG :

Son principe consiste à diminuer le pourcentage des vides sous une force axiale plus un cisaillement giratoire, ce qui revient à l'optimisation de la composition granulaire et à la prédiction du pourcentage des vides aux chantiers.

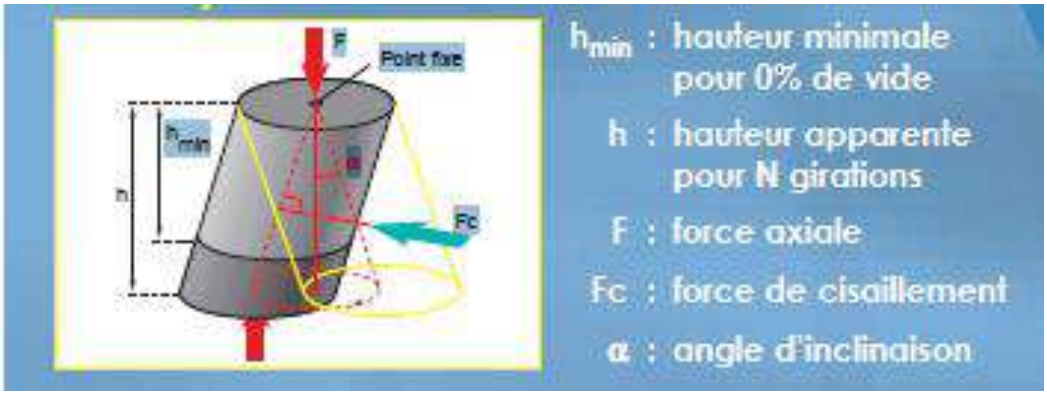


Figure II.11 : Principe de Cisaillement Giratoire.

II.8.1.3. La condition de l'essai (NF EN 12697-31) :

- Angles d'inclinaison a prédéterminés pour répondre aux normes française. Européenne et américaine à ± 0,02° prés.
- Vitesse de rotation : 30fr/min à 10% prés
- Contrainte axial : 6.10 Pa.

Soit force axiale f prédéterminée selon diamètre du moule à ± 250 n

F = 10 550 n. pour un moule 150 mm

F = 10 550 n. pour un moule 160 mm

- Température de l'essai :

Selon le grade du liante en général de 140 °c à 180 °c ± 10 °c.

- Nombre de girations Ng=100 (en général pour les enrobés hydrocarbonés Ng = 200)

II.8.1.4. Réalisation d'essai PCG :

Les étapes de réalisation de l'essai PCG sont comme suite :

➢ Les matériaux sont préchauffés dans une étuve ainsi les accessoires de malaxage et le moule de compactage.

➢ Le technicien place les granulats préchauffés dans la une boule ou un bac sur la balance.

➢ Puis en ajout la masse de bitume chaud a le mélange (granulat sec chaud + bitume chaud).

➢ Un malaxage est effectué jusqu'à dis que les granulats sont bien enrobés de bitume.

➢ Le mélange confectionné à chaud est alors prêt à être compacté, puis technicien le verse dans le moule préchauffé.

➢ L'appareille applique une pression de 0.6 MPa, et une inclinaison de 0.82 º de moule pour exercer compactage par pétrissage, au moment de chaque giration un nombre des mesures de hauteur sont effectuée.

II.8.1.5. Interprétation de l'essai PCG :

Pour un nombre de girations donné, en fonction du type d'enrobés, de la nature des granulats et de l'épaisseur de mise en œuvre, le formulation peut prévoir le pourcentage des vides au chantier. Dans le cas de couches de roulement très minces, le but consiste plutôt à approcher la macro texture que la compacité.

►Spécifications:

- NFP 98-138 pour les GB= 5 à 10%.
- NFP 98-130 pour les BB= 4 à 9%.

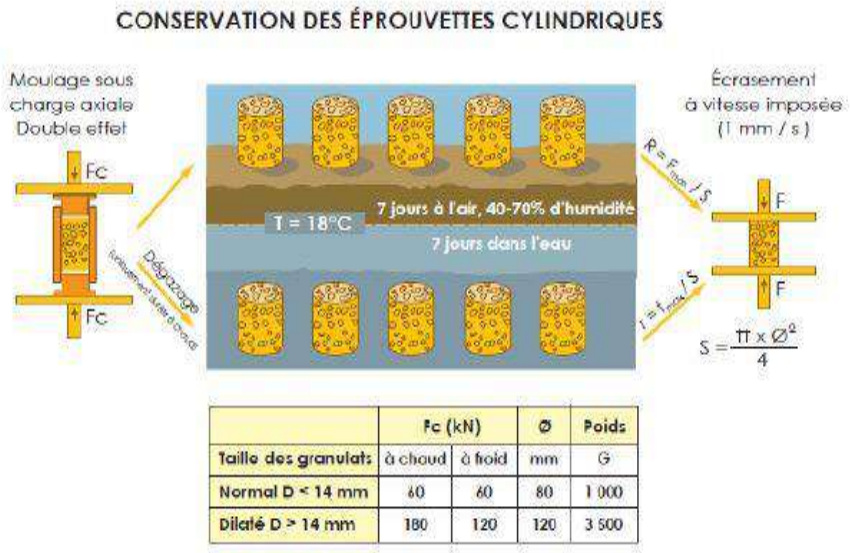
II.8.2. L'essai de tenue à l'eau (Essai Duriez) (EN 12697-12) :

La tenue à l'eau est habituellement mesurée au moyen de l'essai Duriez dans le cadre de la normalisation française. La normalisation européenne a retenu deux modalités d'essai, la compression diamétrale et la compression simple qui est dérivée de l'essai Duriez. Ces deux modalités sont censées donner des résultats équivalents, cependant la respectabilité et la reproductibilité de l'essai en compression simple (Essai Duriez) sont pratiquement deux fois meilleures que celles de l'essai en compression diamétrale.

II.8.2.1. Le principe d'essai Duriez :

Le mélange hydrocarboné est compacté dans un moule cylindrique par une pression statique à double effet 5 min. Une partie des éprouvettes est conservée pendant 7 jours sans immersion à température de 18°C et hygrométrie contrôlées, l'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression simple écrasement vertical 1mm/s. **(NF P 98-251-1)**.





	Fc (kN)		Ø	Poids
Taille des granulats	à chaud	à froid	mm	G
Normal D < 14 mm	60	60	80	1 000
Dilaté D > 14 mm	180	120	120	3 500

Figure II.12 : Principe de l'essai Duriez.

II.8.2.2. Le but d'essai Duriez :

Le but de l'essai est de déterminer pour une température et un compactage donné d'une série d'éprouvette d'un mélange hydrocarboné à chaud la résistance a la compression a sec (R) et après immersion (r).

II.8.2.3. Interprétation (NF P 98-251-1) :

Le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec donne la tenue à l'eau du mélange. La résistance à sec est une approche des caractéristiques mécaniques, et la compacité constitue un indicateur complémentaire à l'essai de compactage à la PCG. Avec :

- R résistance à la compression à sec.

- r résistance à la compression après immersion.

Tableau II.1: Spécification du rapport R/r pour les différents enrobés.

Types d'enrobés		Norme produit	Spécifications pour le rapport immersion/compression(r/R)
à chaud	BBSG	NF P 98-130	≥ 0.75
	BBA (roulement)	NF P 98-131	≥ 0.8
	BBME	NF P 98-141	≥ 0.8
	BBDr	NF P 98-134	≥ 0.8
	BBM	NF P 98-132	≥ 0.75
	BBTM	NF P 98-137	≥ 0.8
	GB cl3 ou cl4	NF P 98-138	≥ 0.7
	EME cl2	NF P 98-140	≥ 0.75
à froid	BBF	NF P 98-139	≥ 0.7
	GE	XP P 98-121	≥ 0.55

II.8.3. L'essai d'orniérage (EN 12697-22) :

L'essai d'orniérage consiste, après constitution d'une plaque, à mesurer sur un nombre important de cycles la déformation au passage d'une roue dans une enceinte thermo-régulée à 60°C.

II.8.3.1. Le principe d'orniérage (NF P 98-253-1) :

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5 cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence : 1 Hz, charge : 5 KN, pression : 6 bars), dans des conditions sévères de température (60 °C). La profondeur de la déformation produite dans le passage de la roue, est notée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications portent sur un pourcentage d'ornière à un nombre de cycles donné, qui dépend du type de matériau, et de sa classe

.

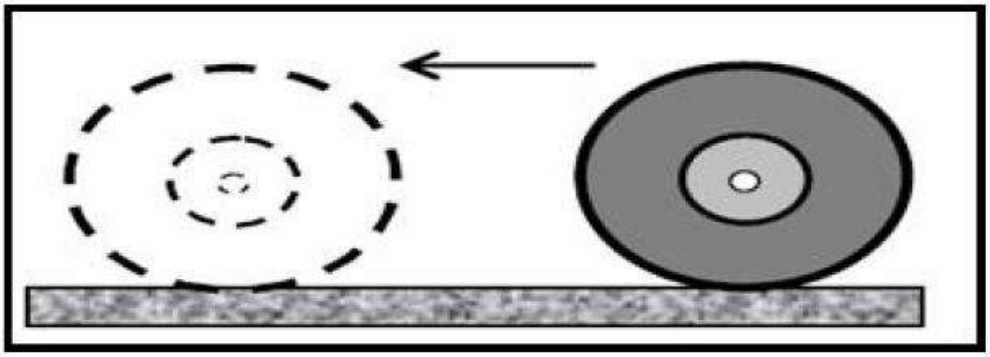


Figure II.13 : Principe de l'essai d'orniérage.

II.8.4. Essai de Module de rigidité (EN 121697 – 26) :

Le module de rigidité est un indicateur du degré de cohésion au sein de la structure d'un matériau. Plusieurs matériaux utilisés en construction (acier, aluminium, bois, etc.) présentent une cohésion quasi-stable dans le domaine des conditions d'utilisation; le module d'élasticité permet une bonne appréciation de leur comportement mécanique. Pour un enrobé, la structuration du liant hydrocarboné fait en sorte que son degré de cohésion varie en fonction de la température et de la fréquence de chargement. Pour connaître l'évolution de cette cohésion, l'étude de la relation entre la contrainte et la déformation dans divers scénarios de température et de période de charge est nécessaire et ce, dans des conditions contrôlées: c'est l'étude de sa rhéologie. La mesure du module complexe, E, est réalisée pour des sollicitations sinusoïdales de fréquences variées, dans le domaine des petites déformations. Dans ces conditions l'enrobé se comporte principalement de façon viscoélastique linéaire, si bien que la réponse du matériau à la sollicitation sinusoïdale [24].



Figure II.14 : l'appareil de module.

Les méthodes de caractérisation de la rigidité des mélanges hydrocarbonés à l'aide d'essais au choix, comprenant des essais de flexion et des essais de traction directe et indirecte. Les essais sont réalisés sur un matériau bitumineux compacté soumis à une charge sinusoïdale ou à d'autres charges contrôlées, utilisant différents types d'éprouvettes et de supports. La procédure est utilisée pour classer les mélanges hydrocarbonés en fonction de leur module de rigidité, pour servir de guide pour les performances relatives dans les chaussées, pour disposer de données utilisées pour estimer le comportement structurel des chaussées et juger les résultats d'essais en fonction des spécifications concernant les mélanges hydrocarbonés. Cet essai n'imposant pas de type particulier d'appareillage d'essai, le choix spécifique des conditions d'essai dépend des capacités et du domaine d'emploi de

l'appareillage utilisé. Pour le choix des conditions d'essai spécifiques, les exigences des normes produites sur les mélanges hydro- carbonés doivent être respectées. L'applicabilité de cet essai est décrite dans les normes produites sur les mélanges hydrocarbonés.

II.8.4.1. Le principe des essais module :

- Traction indirecte sur éprouvette cylindrique
- Température : 15° C / Fréquence : 10 Hz

II.8.5. Essai de fatigue (NF EN 12697-24 Mars 2005) :

Cet essai consiste à déterminer la résistance à la déformation d'une éprouvette cyclique de mélanges bitumineux. L'éprouvette est préparée en laboratoire ou extraite de la chaussée.

II.8.5.1. Le principe :

Une éprouvette trapézoïdale est soumise, à une température et pour une fréquence de chargement fixée, à une déformation imposée. Lorsque la contrainte appliquée pour maintenir la déformation constante est diminuée de moitié, l'éprouvette est considérée comme endommagée au nombre de cycles considéré [25].

II.8.6. Essai Marshall (EN 12697-34) :

L'essai Marshall est largement utilisé par les laboratoires Algériens, il permet d'avoir les caractéristiques suivantes :

➢ La stabilité qui est la résistance maximale à l'écrasement.

➢ Le fluage qui est le raccourcissement du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture.

II.8.6.1. Le but et principe de mesure :

L'essai Marshall est largement utilisé par les laboratoires Algériens, il permet de déterminer pour une température et une énergie de compactage données les caractéristiques suivantes :

- La stabilité qui est la résistance maximale à l'écrasement.
- Le fluage qui est le raccourcissement du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture.

Ou bien elle permet de mesurer en laboratoire la résistance d'une éprouvette à la déformation (Une forme de la stabilité) sous l'application graduelle d'une charge, et la déformation subie par cette même éprouvette au moment de rupture sous l'application de la charge maximale.

L'essai consiste à compacter des éprouvettes d'enrobés par damage dans un moule Cylindrique de 101,6 mm de diamètre à l'aide de chocs (cinquante coups par face) produits par la chute d'une dame de

poids normalisé tombant d'une hauteur bien définie selon un procédé opératoire déterminé, puis à les soumettre à un essai de compression suivant une génératrice dans des conditions bien définies.

II.8.6.2. L'objectif de l'essai Marshall (EN 12697-34) :

Détermination pour température et une énergie de compactage données de la résistance mécanique dite ((stabilité)). De l'affaissement dit ((fluage)) et du quotient Marshall des éprouvettes de mélange hydrocarboné. Répétition de l'essai pour plusieurs teneurs en liant. Dans les mêmes conditions d'essai. Teneur en liant. Retenue ; Respect des spécifications concevant les torchettes de fluage. Ainsi que la stabilité à atteindre.

II.8.6.3. La confection des éprouvettes dans l'essai Marshall (EN 12697-34) :

- ✓ Mettre le mélange et les éléments de compacteur à la température de référence, **160° C ± 5° C.**
- ✓ Introduction de mélange dans le corps de moule.
- ✓ Nombre minimal des éprouvettes par formule testée : **4.**
- ✓ Masse introduite de 1050 g à 1400 g selon le double nombre de coups : **35** à **75.**
- ✓ Généralement, application de **50 coups** (énergie de compactage) sur **1200 g** du mélange par face (face supérieure et face inférieure du mélange contenu dans le moule) en **55 s ± 5 s.**
- ✓ Durée totale de compactage, **3 mn** avec un intervalle de 5 mn entre deux éprouvettes.
- ✓ Hauteur visé de l'éprouvette **63.5 mm**, Diamètre intérieure de moule: **101.5 mm.**
- ✓ Démoulage après **4 h** au moins et refroidissement à une température ambiante.

II.8.6.4. Le domaine d'application de l'essai Marshall :

L'essai s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier (grave bitume, béton bitumineux, et autres mélanges hydrocarbonés à chaud). La température de compactage correspond à celle nécessaire au malaxage pour assurer une viscosité de 170 mm²/s et permettre en chantier le maximum de compactibilité. Les éprouvettes ainsi préparées servent à déterminer d'abord la densité brute de l'enrobé, puis sa stabilité, c'est-à-dire sa résistance à la déformation, et enfin cette déformation même. Guide technique «Les enrobés bitumineux » [26].

II.8.6.5. Le mode opératoire d'essai Marshall :

- Moyenne de résultats d'au moins trois éprouvettes.

- faire tremper l'éprouvette de 30 à 40 minutes dans un bain à une température constante de 60 ± 1°C.

- régler le cadran de la presse Marshall à zéro et vérifier les tiges de guidage.

- placer l'éprouvette entre les mâchoires de la presse.
- centrer et ajuster les mâchoires.
- placer les indicateurs de déformation (réflectomètres) et les mettre à zéro.
- mettre la presse en marche, l'arrêter au moment ou la charge maximale est atteinte et noter cette charge (l'essai doit être réalisé dans moins d'une minute).
- lire en millimètres la déformation obtenue.

La stabilité Marshall et exprimée en kilogramme et représente la.

Ce résultat fournit une mesure empirique de la résistance à la déformation. Cette dernière permet de juger si l'enrobé est conforme ou non aux exigences portant sur cette caractéristique particulière. La moyenne des trois déformations obtenues donne un indice de la fluidité ou flexibilité de l'enrobé à 60°C, température maximale que peut atteindre le revêtement.

II.8.6.6. Appareillage :

- Au moins trois moules de compactage comportant chacun, une base, un corps de moule, Le diamètre intérieur du moule doit être de 101 .6mm ± 0.1mm ;
- Deux pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule ;
- Une dame de compactage comportant un marteau pesant 4536g ± 5g. Ce marteau coulis librement sur une tige de guidage et tombe en chute libre de 457 mm ± 5 mm sur la base de la dame ;
- Au moins trois mâchoires d'écrasement, chacune étant composée de deux demi mâchoires ayant un rayon de courbure intérieur compris entre 50.9mm et 51mm ;
- Un bain thermostatique pouvant contenir au moins trois éprouvettes et trois mâchoires d'écrasement.

II.8.6.7. L'écrasement des éprouvettes (EN 12697-34) :

- Détermination préalable de la masse volumique apparente MVa en mettant h = 63.5 mm.
- Détermination de la masse volumique apparente MVa (géométrique) des éprouvettes.
- Détermination de la masse volumique apparente MVA (hydrostatique) d'une éprouvette.
- Eprouvette immergées dans l'eau à **60° C** pendant **40 mn à 60 mn.**
- Mise en température des mâchoires d'écrasement.
- Essai de compression diamétrale à l'aide d'une presse à déformation constante de **50 mm/mn.**

II.8.6.8. Expression des résultats (EN 12697-34) :

1 – Mesure de la Stabilité MARSHALL, **S**, résistance maximale de l'éprouvette à la déformation, **KN.**

2 – Mesure du fluage MARSHALL, **F**, valeur de l'affaissement de l'éprouvette selon son diamètre au moment de la rupture, **mm.**

3 – Calcul de quotient MARSHALL, rapport **S/F** entre la stabilité et le fluage, **KN /mm.**

4 – Elaboration du graphique, **S = f (F).**

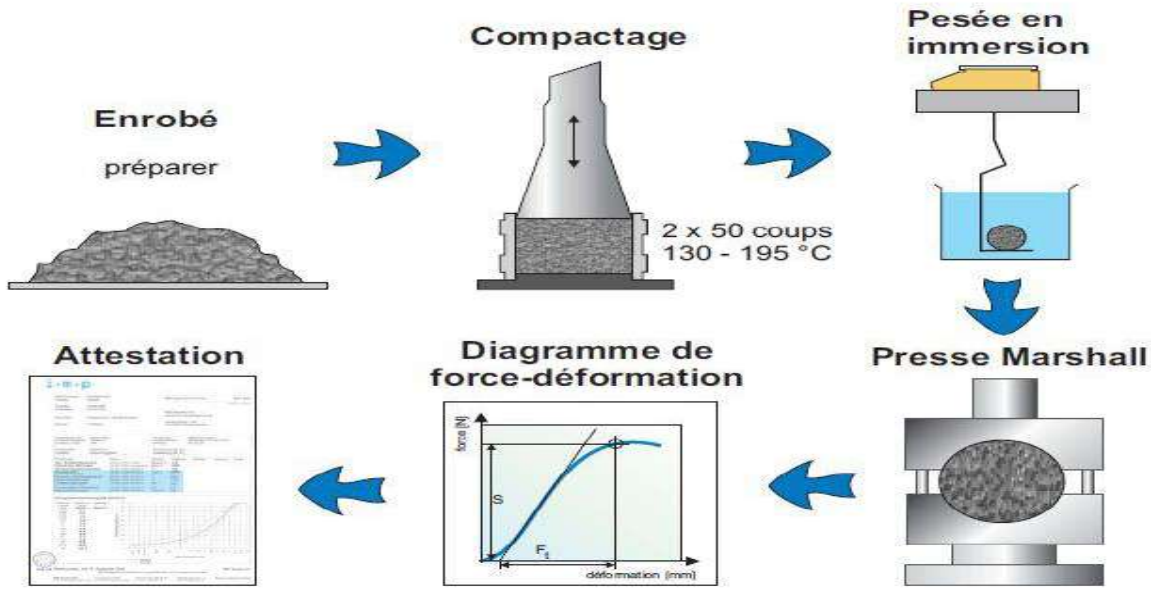


Figure II.15: Essai Marshall.

II.9. La modification des enrobés bitumineux :

La modification des enrobés bitumineuse avec des polymères compatibles peut s'avérer bénéfique. La modification peut s'opérer de deux manières [1], la première étant la modification du bitume (procédé humide) [2,3], et la deuxième consiste en l'ajout direct du modifiant lors de l'opération de malaxage de l'enrobé (procédé sec) [4].

II.10. Les additifs :

Les additifs ou les polymères généralement à base de pétrole ou les dériver de pétrole lourds sont destinés à améliorer les propriétés de l'enrobé (enrobé à module élevé). Ils peuvent être introduits soit dans le mélange au moment du malaxage soit directement dans la cuve bitume. Les polymères thermoplastiques constituent la famille d'agents modifiants chimiques la plus utilisée pour la modification des bitumes.

Ils sont subdivisés en deux familles : les élastomères et les plastomères qui se distinguent, aux températures d'usage, par des comportements différents du point de vue, en particulier, de leur rigidité, de leur déformabilité et de leur résilience.

Pour les plastomères, la déformation élastique s'accompagne d'une déformation permanente qui peut être relativement importante.

Une liste de principales agentes modifiantes des bitumes employés en technique routière classés par catégorie est donnée dans le (tableau II.1):

Tableau II.2 : Principaux agents modifiants des bitumes.

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

D'autres additifs ont montré leur apport plus ou moins bénéfique sur le comportement rhéologique des bitumes, il s'agit en l'occurrence de la lignine, le noir de carbone, le souffre et la résine époxyde et les déchets plastique alimentaire ou industrielles.

II.11. Etat de l'art de recherche sur les enrobés bitumineux :

Le tableau suivant résumé quelque travaux de recherche sur les enrobes bitumineux modifiés par des deux voie (sèche et humide) dans l'Algérie est dans le monde :

Tableau II.3 : Le tableau suivante résumé quelque travaux de recherche sur les enrobes bitumineux modifiés par des deux voie (sèche et humide) dans l'Algérie est dans le monde.

L'auteur	**L'endroit et l'année**	**Les matériaux utilisés**	**Les essais réalisés**	**résultats**
Haddadi smail [27] "Journal de construction and building (Elsevier)"	USTHB 2007	enrobés bitumineux modifiés par l'EVA à voie humide	-essai de Marshall. -essai de traction indirect.	5% d'EVA c'est optimum.
Bensaada Abdelhalim[28] Mémoire magister	USTHB 2012	enrobés bitumineux modifiés par le déchet plastique et l'EVA à voie humide	-essai de Marshall. -essai de traction indirect	3 % de déchet plastique c'est optimum.
Magramane Djamel[29] Mémoire de magister	Ecole nationale supérieure des travaux publics 2009	Enrobés bitumineux modifié par la poudrette de caoutchouc (NR) a voie humide	-Essai de Marshall -Essai de fluage statique	4 % de la poudrette de caoutchouc c'est optimum.
Zaaf Younes et Boudjighami Ahcene[6] Mémoire de master	Université de Médéa 2019	Enrobés bitumineux modifié par le déchet plastique et l'EVA a voie sèche	Essai de Marshall - Essai PCG et Duriez -Essai de module	3 % de déchet plastique c'est optimum.
Anurage V. Tiwari, Y [30]	Amravat (MS) India 2018	Enrobés bitumineux modifié par le déchet plastique à voie sèche	Essai de Marshall	8 % de déchet plastique c'est optimum.
Belltrech youcef [31] Journal de "construction and building materials (Elsevier)"	Ecole nationale supérieure des travaux publics2020	Enrobés bitumineux modifié par le fibre de palmier a voie humide	-Essai de drainage sur les enrobés bitumineux	6 % de déchet plastique c'est optimum

II.12. Conclusion :

Dans ce chapitre consacré aux enrobés bitumineux, nous avons eu l'occasion de voir :

- Les caractéristiques et les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux qui varient largement selon les conditions de formulations, de température et de chargement.
- La panoplie des essais relatifs aux enrobés. Ces essais tant classiques que particuliers ont tous pour but fondamental la connaissance du comportement mécanique des enrobés bitumineux afin de pouvoir élaborer des stratégies en matière de structure routière.

L'étude de formulation d'enrobe a (04) niveaux, nous permet d'évoluer l'ensemble des performances d'un enrobe bitumineux pour nous permette de se prononcer sur la qualité d'enrobe et sa durabilité.

Reste à noter que, pour ce qui est de notre pays, seuls les essais classiques (Marshall et Duriez) sont utilisés pour la formulation des enrobés bitumineux.

2eme Partie :

Présentation des matériaux et étude expérimentales

CHAPITRE I :

Présentation des matériaux d’étude

CHAPITRE I : Présentation des matériaux d'étude

I.1. Introduction :

Dans cette partie, il a été procédé à la définition et l'identification des composants de base rentrant dans la constitution des matériaux étudiés soit les granulats, le bitume et l'additif de l'alfa.

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

I.2. Les granulats :

Les granulats retenus dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des bétons bitumineux destinés aux couches de roulement.

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des bétons bitumineux destinés aux couches de roulement, à savoir :

- Sable de classe 0/3 de la carrière TAMOULGHA (AIN DEFLA).
- Gravier de classe 3/8 de la carrière TAMOULGHA (AIN DEFLA).
- Gravier de classe 8/15 de la carrière TAMOULGHA (AIN DEFLA).

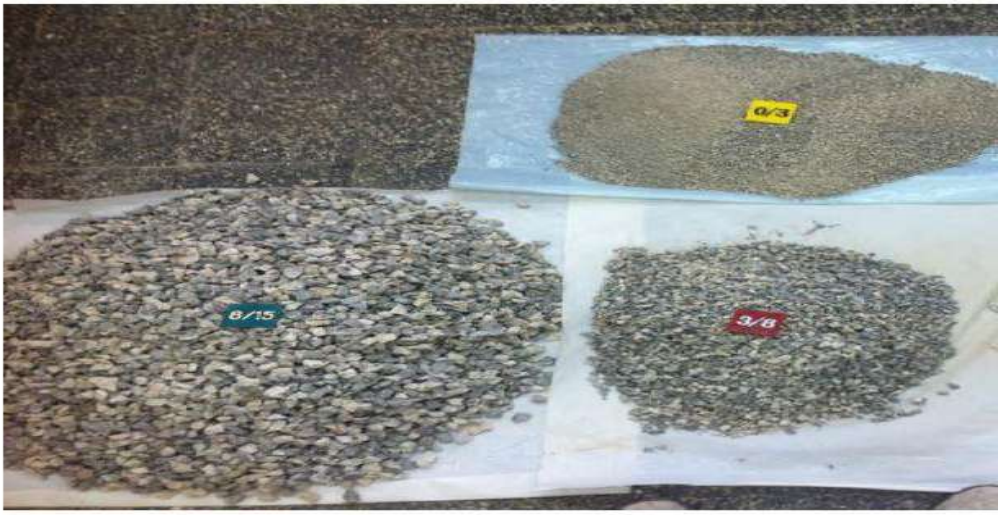


Figure I.1 : Déférentes fractions granulaires récupérées.

I.2.1. Essais d'identification des agrégats :

Afin de déterminer les caractéristiques intrinsèques des granulats, les essais suivants ont été réalisés :

- La masse volumique absolue **(NF P 18-554) .**
- La résistance aux chocs : essais LOS ANGELES **(NF P 18-573).**
- La résistance à l'usure en présence d'eau : essai MICRO-DEVAL **(NF P 18-572).**

Pour ce qui est des caractéristiques de fabrication des granulats, les essais suivants ont été réalisés:

- ➢ L'analyse granulométrique **(NF P 18-560).**
- ➢ L'essai d'aplatissement **(NF P 18-561).**
- ➢ L'équivalent de sable **(NF P 18-597).**

- Analyse granulométriques (NF P 18-560) :

La granulométrie ou analyse granulométrique s'intéresse à la détermination de la dimension des grains et la granularité concerne la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. La granulométrie ou analyse granulométrique consiste donc à fractionner des granulats au moyen d'une colonne de tamis dont les dimensions des mailles sont normalisées et décroissantes du haut vers le bas entre 80 mm et 0,063 mm. Le principal but est de classer et de déterminer la nature d'un granulat étudié par une analyse granulométrique.



Figure I.2 : Appareillage d'analyse granulométriques.

Les résultats d'essai obtenus sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau I.1: Analyse granulométrique sable 0/3.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Tamisats (%)
50	0.00	0.00	100.00
31.5	0.00	0.00	100.00
25	0.00	0.00	100.00
20	0.00	0.00	100.00
16	0.00	0.00	100.00
14	0.00	0.00	100.00
12.5	0.00	0.00	100.00
10	0.00	0.00	100.00
8	0.00	0.00	100.00
6.3	0.00	0.00	100.00
5	1	0.1	99.9
4	26.4	2.64	97.36
2	322.8	32.28	67.72
1	552.6	55.26	44.74
0.4	712.1	71.21	28.79
0.315	739.9	73.99	26.01
0.2	782.6	78.26	21.74
0.1	825.2	82.52	17.48
0.08	838.7	83.87	16.13

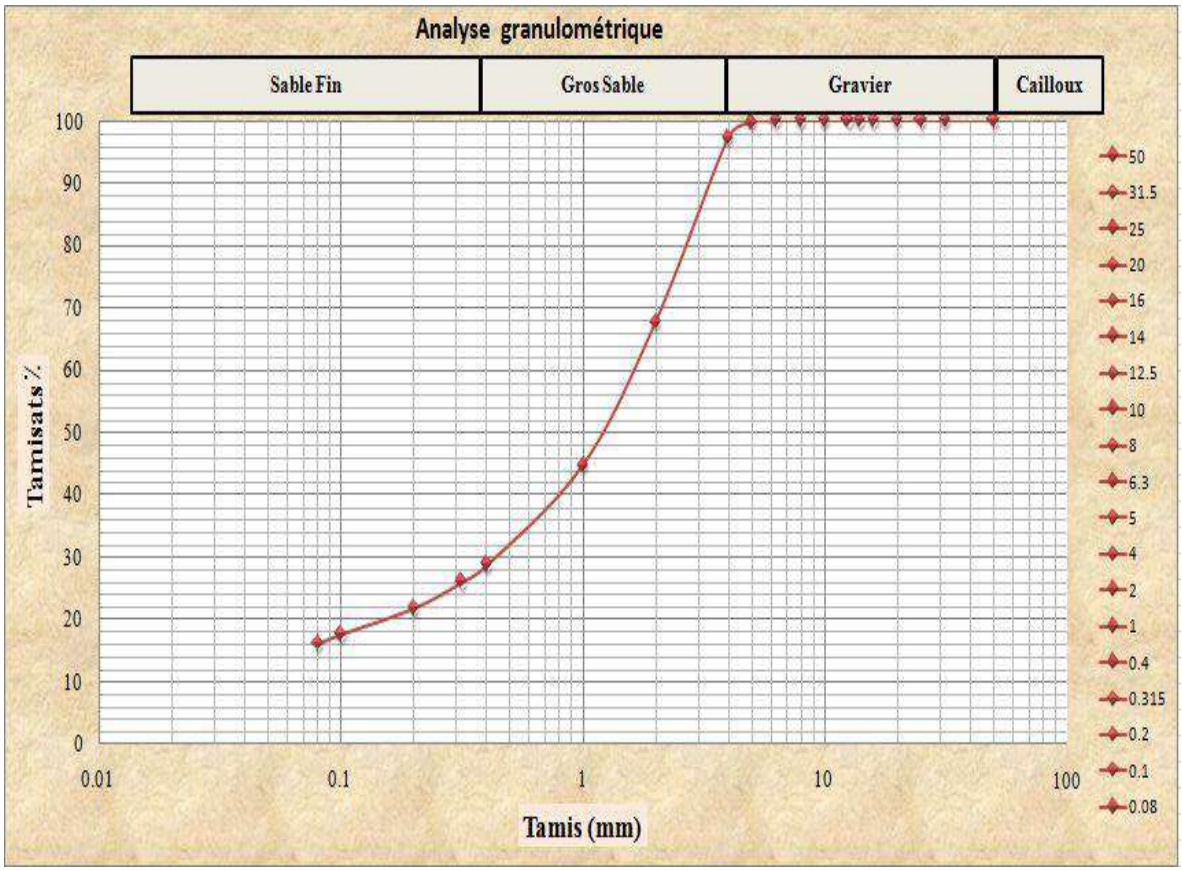


Figure I.3 : Courbe d'analyse granulométrique sable 0/3.

Tableau I.2: Analyse granulométrique gravier 3/8

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Tamisats (%)
25	0.00	0.00	100.00
20	0.00	0.00	100.00
16	0.00	0.00	100.00
14	0.00	0.00	100.00
12.5	0.00	0.00	100.00
10	0.00	0.00	100.00
8	85	4.25	95.75
6.3	549	27.45	72.55
5	1184	59.2	40.8
4	1639	81.95	18.05
2	1939	96.95	3.05
1	1968	98.4	1.6

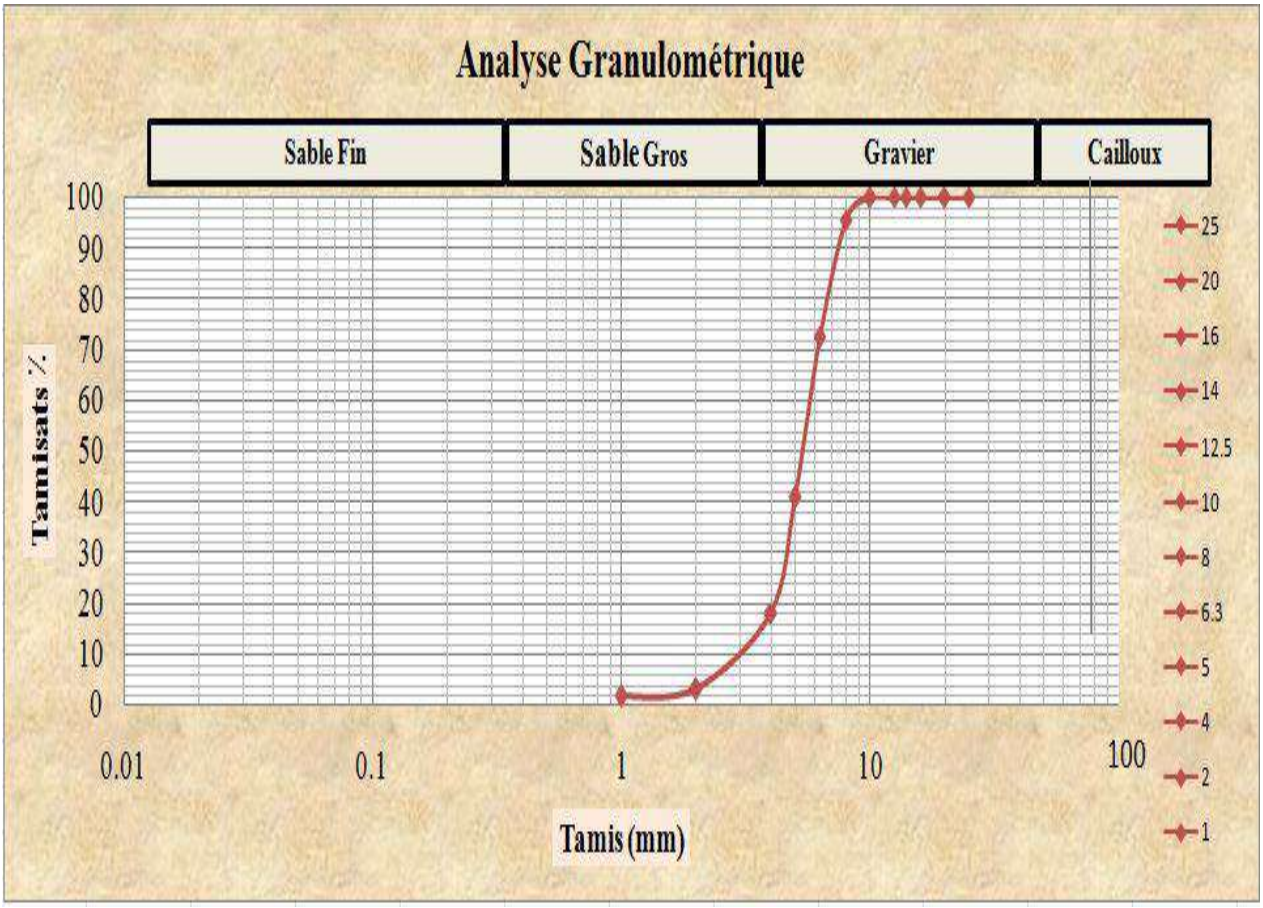


Figure I.4 : Courbe d'analyse granulométrique gravier 3/8.

Tableau I.3: Analyse granulométrique gravier 8/15.

Tamis (mm)	Refus (g)	Refus (%)	Tamisats (%)
50	0.00	0.00	100.00
31.5	0.00	0.00	100.00
25	0.00	0.00	100.00
20	0.00	0.00	100.00
16	235	7.833	92.16
14	597	19.9	80.1
12.5	1057	35.23	64.77
10	1984	66.13	33.87
8	2565	85.5	14.5
6.3	2832	94.4	5.6
5	2924	97.49	2.51
4	2958	98.8	1.2
2	2969	98.96	1.04

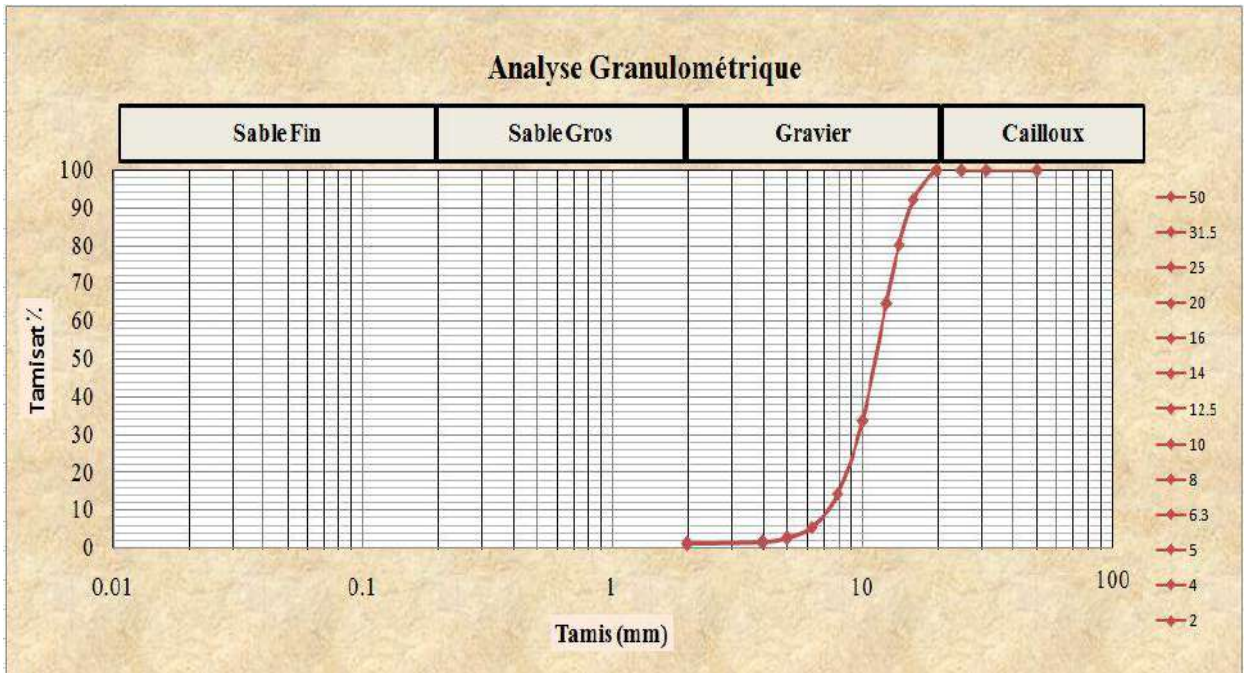


Figure I.5 : courbe Analyse granulométrique gravier 8/15.

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

- Coefficient d'aplatissement (NF P 18 – 561) :

La forme des gravillons est déterminée par l'essai d'aplatissement (A). L'essai consiste à effectuer un double tamisage, tout d'abord, au moyen de tamis d'essai, l'échantillon est fractionné en différents granulats élémentaires d/D, comme indiqué dans l'annexe I, chacun des granulats élémentaires d/D est ensuite tamisé au moyen de grilles à fentes parallèles d'une largeur d'écartement D/2.

Le coefficient d'aplatissement global est calculé en tant que masse totale des particules passant au travers des grilles à fentes, exprimé en pourcentage du total de la masse sèche des particules faisant l'objet de l'essai. Si nécessaire, le coefficient d'aplatissement de chaque granulat élémentaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes correspondante, exprimée en pourcentage de la masse de ce granulat élémentaire, il caractérise la forme du granulat à partir de sa plus grande dimension et de son épaisseur, plus (A) est élevé, plus le gravillon contient d'éléments plats

Le coefficient d´aplatissement (A) de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d´écartement d/1.58 (ou D/2), exprimé en pourcentage. Qui est donné par :

$$A = (Me/ Mg) \times 100$$

Mg : Masse de chaque classe granulaire d/D, en grammes.

Me : Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante.

Le coefficient d´aplatissement global de l´échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d´aplatissement des différentes classes granulaires d/D composant l´échantillon .

$$M = \Sigma Mg$$



Figure I.6 : Essai de coefficient d'aplatissement.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les tableaux suivants :

Tableau I.4: Coefficient d'aplatissement gravier 3/8.

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Classe granulaire	Mg	Ecartement des grille	Passant Me	**Me/Mg*100**
d/D (mm)	(grs)	s (mm)	(grs)	
31.5 – 40		20		
25 – 31.5		16		
20 – 25		12.5		
16 – 20		10		
12.5 – 16		8		
10 – 12.5	0	6.3	0	0
8 – 10	89	5	25	29.41
6,3 – 8	504	4	145	28.76
5 – 6,3	659	3.15	228	34.59
4 – 5	405	2.5	133	32.83
M = Σ Mg = 1657		**Σ Me= 531**		
Coefficient d'aplatissement est : **A= 32.04 % > 25%**				

Tableau I.5: Coefficient d'aplatissement gravier 8/15.

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Classe granulaire d/D (mm)	Mg (grs)	Ecartement des grilles s (mm)	Passant Me (grs)	**Me/Mg*100**
20 – 25	0	12.5	0	
16 – 20	181	10	34	18.71
12.5 – 16	891	8	165	18.51
10 – 12.5	932	6.3	176	18.88
8 – 10	582	5	140	24.05
6,3 – 8	236	4	54	22.88
5 – 6,3	83	3.15	16	10.27
4 – 5	27	2.5	3	11.11
M = Σ Mg = 2932		**Σ Me= 588**		
Coefficient d'aplatissement est : **A= 20.05 % ≤ 25%**				

- Essai d'équivalent de sable à 10% de fines (NF P 18-597) :

L´essai d´équivalent de sable à 10 % de fines, permettant de mesurer la propreté d´un sable, est effectué sur la fraction d´un granulat passant au tamis à mailles carrées de 2 mm et dont la proportion des éléments passant au tamis à mailles carrées de 0,08 mm a été ramenée à 10 % à l´aide d´un sable correcteur (si cette teneur en fines est supérieure à 11 %). Il rend compte globalement de la qualité des éléments fins, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui sédimentent et les éléments fins qui floculent.

La valeur de l´équivalent de sable à 10 % de fines (PS) est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse Sédimentée.

- Hauteur h1 : sable propre + éléments fine (floculant).
- Hauteur h2 : sable propre seulement.

On déduit l'équivalent de sable où on peut utiliser un piston comme la figure ci-dessous montre :

ES = 100. H2 / H1



Figure I.7 : Méthode de mesure de h1 et h2 d'équivalant de sable.

Les résultats obtenus sont ulstré dans le tableau suivant :

Tableau I.6: Equivalent de sable.

TUBE N°	Hauteur total	Hauteur H1 Sable visible	Hauteur H2 Piston	ES (%)
I	43	12.2	6.7	54.91%
II	43	11.7	7.5	64.10%
Moyenne				59.50%

- Essai Los-Angeles (NF P 18-573) :

Cet essai a pour but de mesurer la quantité m d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite par fragmentation d'un matériau en le soumettant à des chocs de boulets à l'intérieur d'un cylindre en rotation. A un coefficient Los Angeles faible correspond un excellent matériau.

Dans la machine Los Angeles, introduire avec précaution la prise d'essai M = 5000 g et la charge de boulets de la classe granulaire choisie. Après 500 rotations de la machine, à une vitesse régulière comprise entre 30 et 33 tr/min pendant 15 min recueillir le granulat et le tamiser sous l'eau sur la tamis de 1.6 mm, égoutter et sécher à 105°C le refus, le peser, soit m' le résultat de la pesée. Le passant au tamis de 1.6 mm sera

m = 5000 – m'.

Le coefficient Los Angeles est donné par le rapport :

$$LA = \frac{m}{5000} \quad 100$$



Figure I.8 : Essai Los-Angeles.

Les essais sont effectués sur la classe de référence 10 / 14 et les valeurs sont présentés dans le tableau suivant. La classe 4 -6.3 c'est le témoin (EPTRC) :

Tableau I.7: los Angeles 3/8 et 8/15.

N° De L'échantillon	Nature De L'échantillon	Classe Granulaire	Nombre De boulets	Masse sèche M après essai	Coefficient LA (%)
I	8/15	10 - 14	11	3798.2	24.03% < 30%

-Masse volumique absolue des agrégats (NF P 18 – 555) :

La masse volumique absolue est la masse par unité de volume du granulat sans tenir compte des vides entres les grains et aussi c'est la masse d'un mètre cube de ce matériau (les vides exclus).

Tableau I.8: Masse volumique absolue 0/3, 3/8.

Classes	0/3	3/8	8/15
Température (t) en °c	25	25	25
nature du liquide (densité) e	1	1	1
pycnomètre + liquide p1	978.7	978.7	/
poids de l'échantillon p2	500	500	/
poids total a = p1 + p2	1478.7	1478.7	/
picno + échantillon + liquide b = a - p2	1291.4	1292.4	/
poids liquide complémentaire c = a - b	187.3	186.3	/
volume de l'échantillon d = c/e	2.66	2.67	/
poids spécifique mV = p2 / d	1515.1	62.5	/

- Masse volumique apparente sèche des granulats (NF EN 1097-6) :

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau avec tous vides inclus, exprimée en Kg/m³. La masse volumique apparente sèche (ρd) est la masse de granulats secs (Ms) occupant un volume apparent= volume de solides : Vs + volume de vides : Vv).

$$\rho d = Ms / V$$

La masse volumique apparente prend en compte le volume des vides. La détermination de la masse volumique se fait donc simplement en mesurant, la masse et le volume correspondant des matériaux

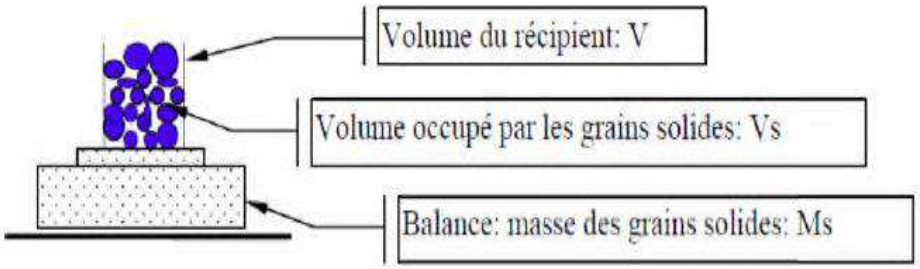


Figure I.9 : le principe de la masse volumique apparente sèche (ρd).

- Valeur de Bleu de Méthylène (EN 933 – 9) et (NF P 18- 592) :

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène. Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l´activité de surface de ces éléments. On appelle «valeur de bleu» des fines, la quantité exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines. On consonerai bien sur le résultat trouver :

La préparation de la solution du bleu de méthylène à base de 10g de poudre de bleu dissout dans un litre d'eau distillée ; la solution est portée à 40°C et agitée pendant 3h à vitesse 300 trs/min. 20g du matériau de fraction 0/2 sont trompés dans 100 ml d'eau déminéralisée, l'ensemble est agité pendant 3 min à 400 trs/min. Le matériau est injecté, minute par minute, par des doses du bleu de méthylène jusqu'à la saturation des fines argileuses qui est contrôlé par le test à la tâche sur le papier filtre. La valeur de bleu du sable est donc donnée par la formule :

$$VB = \frac{V}{M}$$

V : Volume de la solution de bleu nécessaire pour atteindre le test positif (cm3).

M : Masse sèche de la prise d'essai (g).

Les résultats du test au bleue de méthylène sont représentés dans la figure ci-dessous.

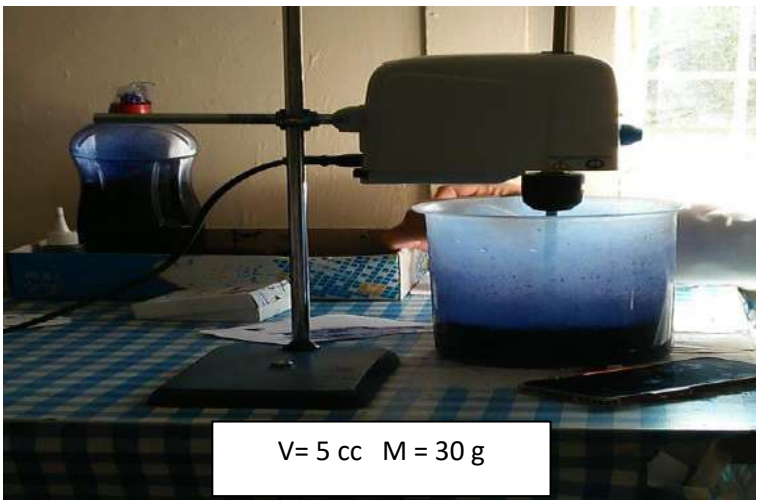


Figure I.10 : Test au bleue du méthylène avec le résultat.

Le résultat du test effectué sur notre sable est de **: VB = 5 /30 = 1.6**

VB > 1, le sable est non argileux. Il peut, donc, être utilisé dans la fabrication des bétons et des mortiers sans aucune correction (lavage sous tamis inférieur à 80µm).

Tableau I.9: valeur de bleu de méthylène sable 0/3.

MBF / Valeur au bleu d'un sable EN 933 - 9	
Masse sèche de la prise d'essai de la fraction 0/008 mm, grs	M1 = 30
Quantité totale de la solution colorée ajoutée, ml	V1 = 5
MBF exprimé en gramme de bleu pour 1000 g De la fraction 0/0,125 mm	MBF = 1.67
Avec : MBF = V1/M1 x 10	
Valeur au bleu d'un sol ou d'un matériau rocheux (D max ≤ 5 mm)	
Masse sèche de la prise d'essai de la fraction 0/5 mm, grs	M1 = 30
Quantité totale de la solution colorée ajoutée, ml	V1 = 5

- Essai Micro-Deval (NF P 18 – 572) :

Cet essai permet de mesurer la résistance d'un matériau à l'usure par frottement entre les granulats et une charge abrasive dans un cylindre de rotation. Dans un cylindre de la machine, introduire la prise d'essai, M = 500 g, et la charge abrasive (billes en acier de 10 mm de diamètre) correspondant à la classe granulaire choisie, puis, ajouter 2.5 litres d'eau. Après rotation des cylindres à une vitesse de 100 tr/min pendant 2 heures, tamiser le matériau sur le tamis de 1.6 mm, le séché à l'étuve à 105°C et le peser. Soit m' le résultat de la pesée, le passant au tamis de 1.6 mm sera m = 500 - m'. Par définition, le coefficient Micro- Derval est le rapport :

$$MDE = (500 – P') /500*100$$



Figure I.11 : Essai Micro-Deval.

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau I.10: Micro Deval 8/15.

N° De L'échantillon	Nature De L'échantillon	Classe Granulaire	Poids initial P du matériau	Poids P' après usure	MDE (%)
I	GRAVIER 8/15	10 - 14	500	426.8	14.64
II	GRAVIER 8/15	10 - 14	500	428.5	14.30

Classe Granulaire (mm)	Charge abrasive (grs)
10…….14	5000 ± 5

I.2.2. Conclusion sur les granulats :

L'analyse des granulats utilisés pour la fabrication des enrobés bitumineux a conduit aux caractéristiques suivantes :

- L'analyse granulométrique sur les trois fractions présente des granularités continues.
- Sable grossier et propre ;
- Les deux fractions de gravier 3/8 et 8/15 ont des caractéristiques mécaniques moyennes à bonnes, donc les différents essais effectués (LA, MDE.) sur les granulats montrent que les matériaux choisis présentent, de bonnes caractéristiques en qualités intrinsèques.
- Poids spécifique satisfaisants pour touts la fraction utilisés;

Les granulats ont donc de bonnes caractéristiques pour être utilisés dans la fabrication des enrobés bitumineux.

I.3. Le bitume :

Le bitume utilisé dans cette étude est de classe 35/50, il provient de l'unité de l'entreprise NAFTAL. On a procédé à la détermination de la classe du liant à partir des essais de caractérisation. Les résultats des essais d'analyse et de caractérisation qui ont été effectué sur le bitume pur, sont représentés dans les tableaux suivants :

I.3.1. Essai de pénétrabilité aiguille (NF EN 1426) :

La pénétrabilité du bitume représente la mesure de la pénétration (exprimée en dixièmes de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g. C'est donc une mesure de la consistance du bitume. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C.



Figure I.12 : Appareille de l'essai de pénétrabilité.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau I.11: Pénétrabilité de bitume.

Essai	P1	P2	P3
Valeur	49	50	50
Moyenne	49.67		
Spécification	40 **à** 50		

I.3.2. Essai de point de ramollissement (NF EN 1427) :

C'est la température à laquelle s'enfonce une bille à travers un anneau de bitume dans des conditions définies de fabrication et d'essai. Par voie de conséquence, il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement. Les résultats des deux essais empiriques précédents (Pénétrabilité à 25°C et Température Bille Anneau) permettent d'identifier le liant examiné et de le classer par rapport aux spécifications actuellement admises.

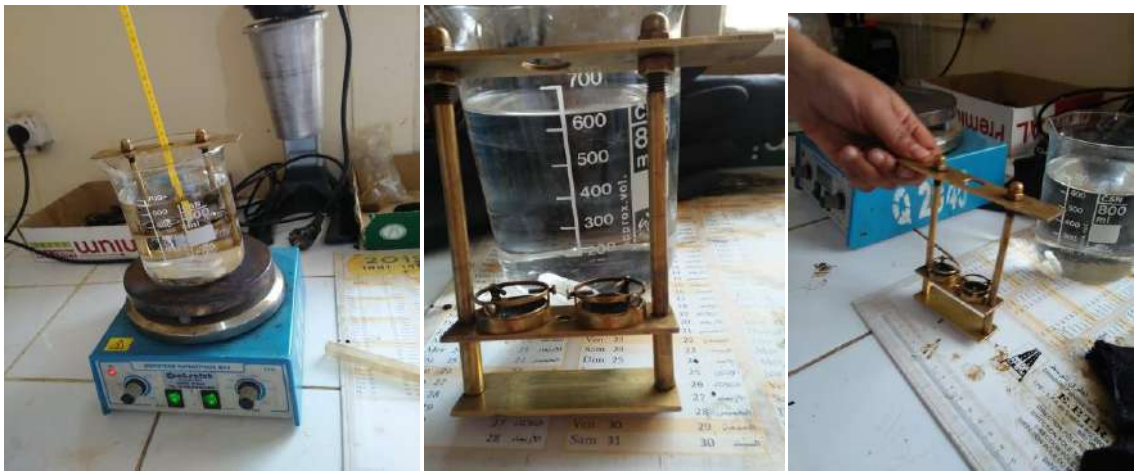


Figure I.13 : Essai de point de ramollissement.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau I.12: Point de ramollissement de bitume.

Essai	**TBA1**	**TBA2**	**TBA3**
Valeur	50	51	51
Moyenne	50.67		
Spécification	47 **à** 60		

I.3.3. Essai de densité relative A 25°C (NF T 66 – 007) :

Cette méthode d'essai couvre la détermination de la densité et gravité spécifique dans les bitumes et liants bitumineux semi solides, à l'aide d'un pycnomètre.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau I.13: Densité relative de bitume.

Essai	D1	D2	D3
Valeur	1.05	1.06	1.05
Moyenne	1.05		
spécification	1 **à** 1.1		

I.3.4. Essai de perte de masse au chauffage (NF EN 13303) :

La présente norme prescrit une méthode de détermination de la perte de masse des bitumes industriels après chauffage, On utilise cette méthode pour détecter des composants volatils.



Figure I.14 : Essai de perte de masse au chauffage.

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci-après :

Tableau I.14: Perte de masse de bitume.

Essai	M1 (g)	M2 (g)	
P1	145.62	140.88	(g)
P2	145.62	140.87	(g)
Perte De Masse	0.01	0.01	(g)
Perte De Masse	0.004	0.009	(g)
Moyenne	0.006		**(%)**
spécification	<0.5		**(%)**

I.3.5. Conclusion sur le bitume utilisé :

L'ensemble des résultats de bitume étudié sont concorde avec les spécifications recommandées pour la classe 35/50 en vigueur en Algérie.

I.4. Le fibre végétale de l'alfa :

Les fibres végétales utilisées pour ce travail sont la fibre de l'alfa. La préparation du déchet végétale est faite au laboratoire route d'ETPRC. La procédure consiste à couper les plantes d'alfa en petits morceaux de longueurs variant de 1 à 3 mm, La (figure I.15) montre la fibre d'alfa utilisé dans cette étude.



Figure I.15 : la fibre d'alfa.

I.4.1. Présentation générale sur le plant d'Alfa :

L'Alfa (de l'arabe halfa), ou sparte (Stipa tenacissima L.) est une plante, à tige cylindrique, herbacée vivace de la famille des poacées, originaire des régions arides et semi arides méditerranéennes à l'exclusion des secteurs désertiques: Afrique du Nord (le Maroc, l'Algérie la Tunisie, et la Libye) et Europe du Sud (l'Espagne et l'Italie) (Trache et al. 2014). Cette espèce, disposant de feuilles effilées, pousse en touffes d'environ un mètre de haut, formant de vastes nappes dans les régions d'aridité moyenne (Figure 1.16). La répartition territoriale connue à ce jour est estimée à (Dallel, 2012) :

- Algérie : 4.000.000 ha.
- Maroc : 3.186.000 ha.
- Tunisie : 600.000 ha.
- Lybie : 350.000 ha.
- Espagne: 300.000 ha.



Figure I.16 : Paysage de touffes d'alfa.

I.4.2. Détermination de l'humidité de la fibre d'Alfa :

Le caractère hydrophile des fibres végétales est une propriété importante dont il faut tenir compte. En effet, L'hémicellulose et la pectine contenues dans ces fibres ont de nombreux groupements hydroxyles (-OH) qui permettent à la fibre d'absorber de l'eau. Dans le domaine des matériaux composite cette spécificité des fibres végétales est synonyme de variation volumique (gonflement/retrait), de dégradation (pourrissement), de vaporisation d'eau lors de la mise en œuvre et d'une liaison fibre/matrice de mauvaise qualité [32] .La plante d'alfa étudiée dans la présente étude est originaire de Oujda au Nord-est du Maroc .Quatre échantillons des fibres de cette plante ont été pesés puis mis dans des béchers à l'intérieur de l'étuve pendant 24 h à une température de 105°C .Après ce séchage, les béchers sont couverts du papier aluminium afin d'éviter que les fibres absorbent de l'humidité ambiante . Une fois les échantillons refroidis, on effectue une deuxième pesée avec une balance de précision (0,001 g). Les résultats obtenus confirment que cette fibre renferme un taux d'humidité moyen de l'ordre de 9,79%.

I.4.3. Composition chimique de la fibre d'Alfa :

Comme toutes les fibres végétales, la fibre d'Alfa est un composite à base de lignine et d'hémicellulose renforcée par Les fibrilles en cellulose. Plusieurs chercheurs ont étudié la composition chimique de cette plante .les résultats trouvés sont regroupés dans le tableau 15 selon la source [32]:

Tableau I.15: Composition chimique d'Alfa selon plusieurs sources.

Composants	[9]%	[11]%	[10]%	[19]%
Cellulose	43.81	45	45	47.63
Lignine	18.76	23	24	17.71
Cendres	4.66	2	2	5.12
Silica	1.76			
Hémicellulose/pectines	28.4	25	24	22.15
Cires		5	5	
Autres	2.61			7.39

I.4.4. Propriétés mécaniques :

Avant d'utilisé la fibre d'alfa dans la modification des enrobés bitumineux, il est important de connaitre tout d'abord les propriétés mécaniques de la fibre. Or, ces propriétés sont facilement influencées par plusieurs facteurs, entre autres, l'origine de la plante, la variété, les conditions de croissance et de récolte [33].

Tableau I.16 : les propriétés mécaniques de la fibre d'alfa.

Densité (g/cm3)	0.89
Module de Young (GPA)	22
Contraint à la rupture (MPA)	565
L'allongement à la rupture %	5.8

I.4.5. Conclusion :

Ces fibres sont constituées de 47,63% de cellulose, une humidité relatif de 9,79% et présentent des caractéristiques mécaniques intéressantes : densité=0.89 ; Module de Young = 22 GPA; Contrainte à la rupture = 565 MPA, l'allongement à la rupture =5.8 %.

CHAPITRE II :

Etude expérimentales sur les enrobés bitumineux

CHAPITRE II : Etude expérimentales sur les enrobés bitumineux

II.1. Etudes de formulation de l'enrobé bitumineux :

Dans ce chapitre on présente le dispositif expérimental réalisé dans notre étude. Les matériaux de constitution de base sont les granulats, le bitume et les ajouts (l'alfa).

En effet, les granulats sont de provenance de la carrière TAMOULGHA. En ce qui concerne l'alfa, ceci est d'origine de plant existant en haut plateau (Djelfa). L'étude de formulation des enrobés bitumineux consiste à chercher la teneur en liant pour assurer un certain seuil de stabilité, de compacité, de résistance à l'eau (dés-enrobages) et au fluage.

II.2. Composition mélange :

Nous avons choisi d'étudier un béton bitumineux de référence (BBSG) et béton bitumineux modifiés de classe granulaire BB 0/14 mm faisant partie de la gamme de des bétons bitumineux définis par la norme **EN 13108-1.** Il s'agit d'un mélange composé des trois classes granulaire : 0/3 ,3/8 ,8/15. A partir des courbes granulométriques moyennes des différentes classes granulaires choisies pour la réalisation de l'étude de formulation, on compose un mélange dont la courbe granulométrique est inscrite dans les limites du fuseau défini par les spécifications.

Tableau II.1 : Distribution granulométrique de mélange.

Tamis (mm)	**Gravier 8/15**		**Gravier 3/8**		**Sable 0/3**		**Mélange 100%**	**Fuseau Min (%)**	**Fuseau Max (%)**
	100%	32.00%	100%	25.00%	100%	43.00%			
31.5	100.00	32.00	100.00	25.00	100.00	43.00	100.00		
25	100.00	32.00	100.00	25.00	100.00	43.00	100.00		
20	100.00	32.00	100.00	25.00	100.00	43.00	100.00		
16	73.00	23.36	100.00	25.00	100.00	43.00	91.36		
14	46.90	15.01	100.00	25.00	100.00	43.00	83.01	94	100
12.5	25.50	8.16	100.00	25.00	100.00	43.00	76.16		
10	6.80	2.18	99.25	24.81	100.00	43.00	69.99	72	80
8	0.07	0.02	80.50	20.13	100.00	43.00	63.15		
6.3	0.07	0.02	50.95	12.74	100.00	43.00	55.76	50	66
5	0.07	0.02	21.60	5.40	96.20	41.37	46.79		
4	0.07	0.02	6.95	1.74	91.30	39.26	41.02		
2	0.07	0.02	1.50	0.38	59.10	25.41	25.81	28	40
1	0.07	0.02	1.50	0.38	36.30	15.61	16.01		
0.4	0.07	0.02	1.50	0.38	21.50	9.25	9.64		
0.315	0.07	0.02	1.50	0.38	19.40	8.34	8.74		
0.2	0.07	0.02	1.50	0.38	16.00	6.88	7.28		
0.1	0.07	0.02	1.50	0.38	15.40	6.71	7.11		
0.08	0.01	0.02	1.50	0.38	14.50	6.24	6.63	7	10

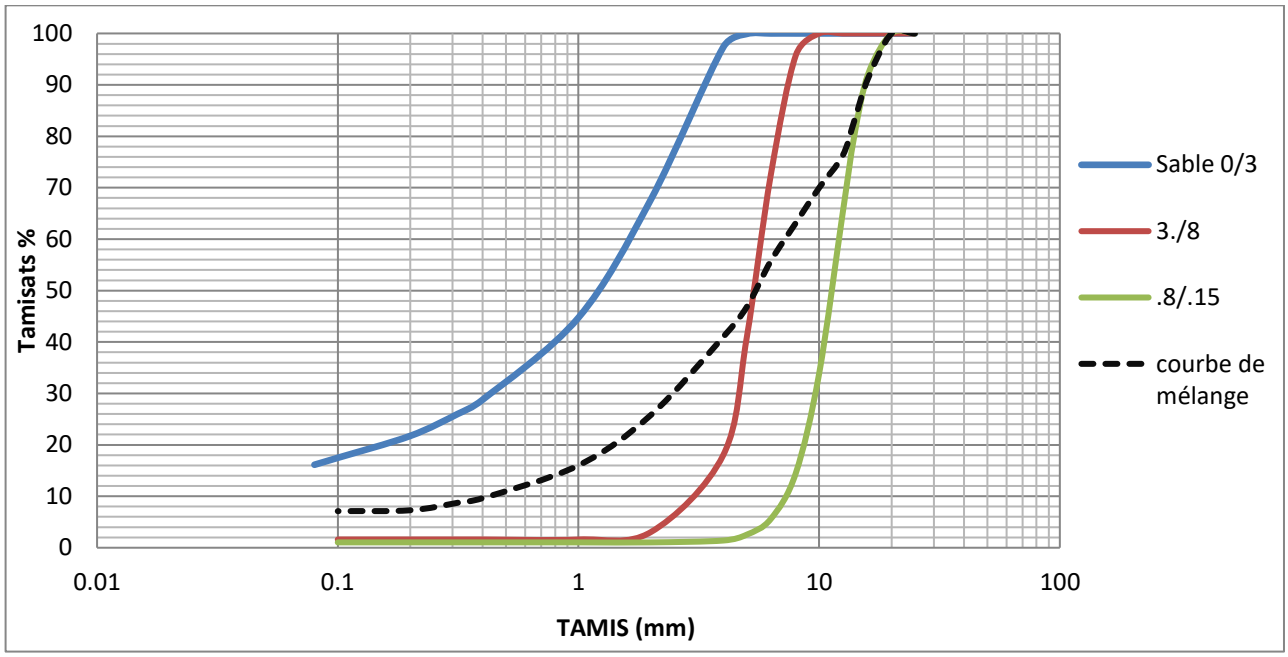


Figure II.1 : Disposition des courbes granulométriques des constituants par rapport la courbe médiane de fuseau.

À partir des courbes moyennes des classes granulaires, on calculera la courbe du mélange, le pourcentage de passants à un tamis pour la courbe de mélange ,est la somme des pourcentages de passants au même tamis des courbes des constituants pondérés par les proportions correspondantes, la figure suivante présente la composition granulaire proposés dans ce projet d'étude.

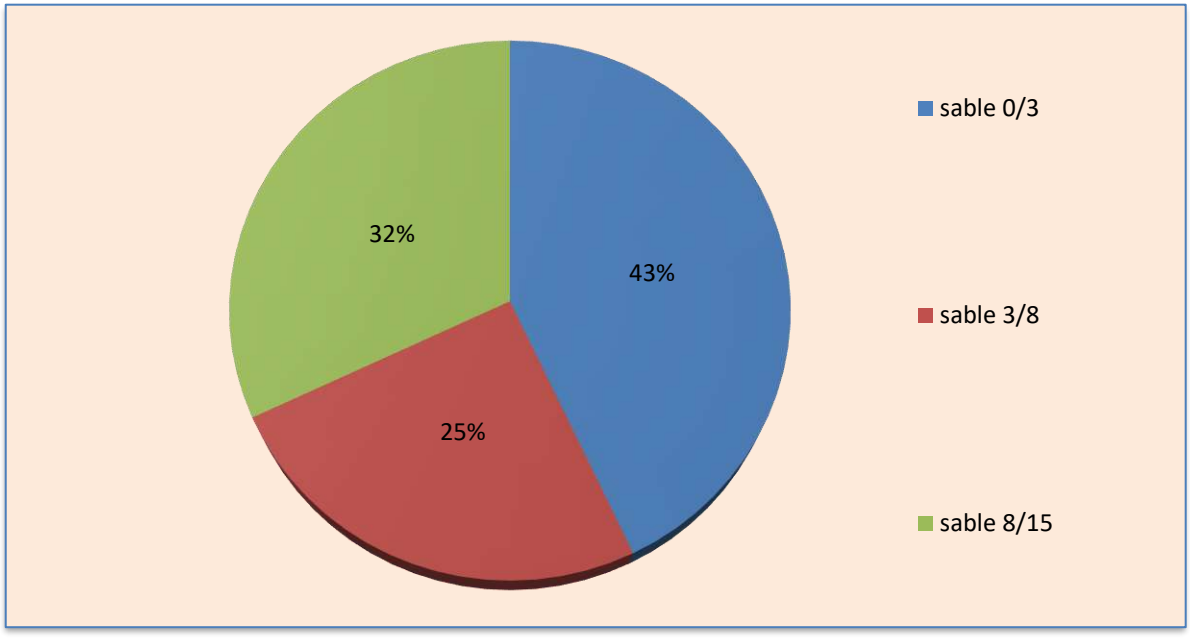


Figure II.2 : La composition proposée.

Les pourcentages obtenus sont déterminés d'après la courbe granulométrique de chaque agrégat en tenant compte du fuseau de référence 0/14, tableau et la courbe mélange est présentée ce dessous :

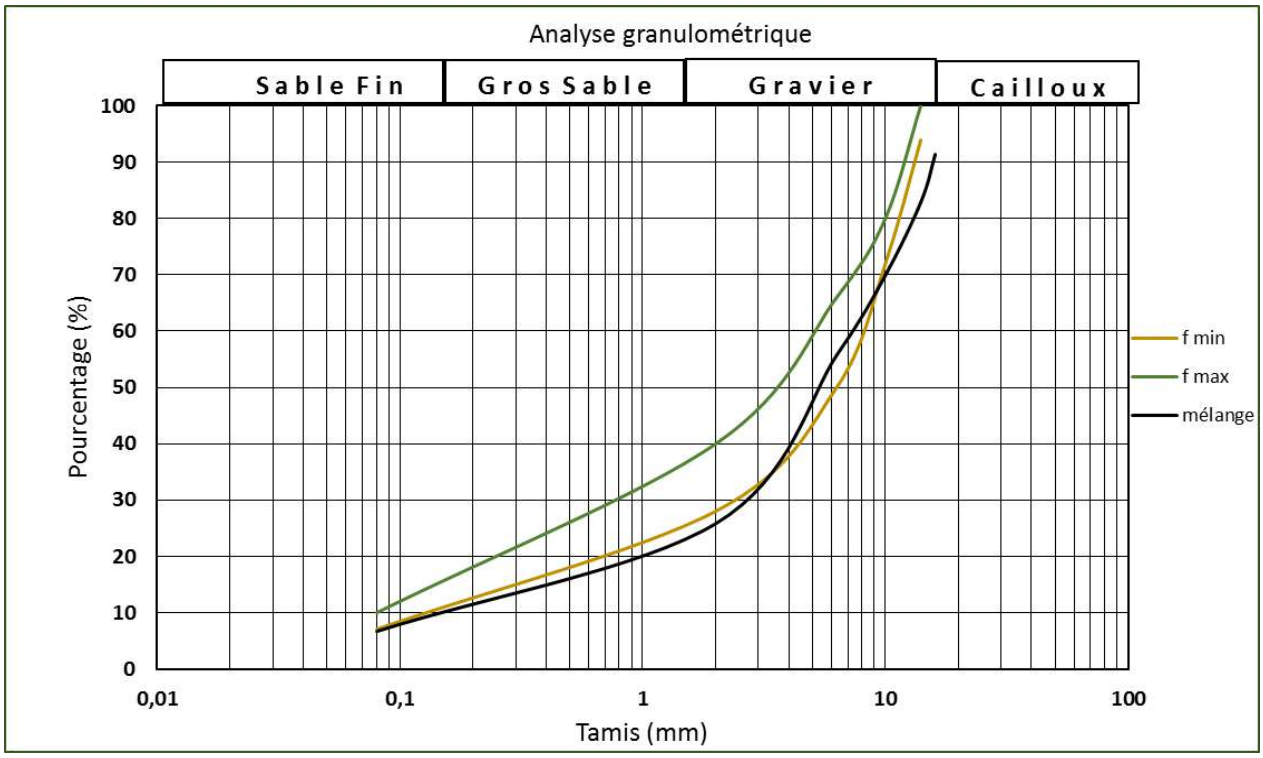


Figure. II.3 : Courbe de mélange granulaire s'insère au fuseau de référence BB 0/14.

- **Observation :**

On remarque que la courbe granulométrique s'insère bien dans le fuseau de référence préconisé en Algérie pour les bétons bitumineux semi - grenus 0/14.

II.2.1. Détermination de la Teneur en liant (Norme NF P98-130) :

La teneur en liant pour un béton bitumineux semi-grenu 0/14 est déterminée en pourcentage du poids des agrégats par la méthode basée sur le module de richesse et la surface spécifique. Pour déterminer la teneur en liant, nous introduisons la notion de surface spécifique des granulats notée Σ et exprimée en m2/kg, c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères.

Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique Σ :

$$\sum = \frac{0.25G + 2.3S + 12S + 135f}{100}$$

Avec :

- G : des éléments supérieurs à 6.3 mm
- S : des éléments compris entre 6.3 et 0.25 mm
- s : des éléments compris entre 0.25 et 0.063 mm
- f : des éléments inférieurs à 0.063 mm

La teneur en liant, fonction de la surface spécifique des granulats, est donnée par la formule expérimentale suivante :

$$\%liant = \alpha k \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

- % Liant : teneur en liant (%).

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

Si celle-ci diffère de 2.65 t/m3, nous utilisons la formule suivante :

$$\alpha = 2{,}65 / MVRg$$

Avec: $MVRg = \frac{32+25+43}{\frac{32}{2.68}+\frac{25}{2.67}+\frac{43}{2.66}} = 2.668$ **donc :** $\alpha = 2{,}65 / 2.668 = 0.993$.

❖ Calcul la Surface Spécifique des Agrégats Σ :

Σ : surface spécifique des granulats (m_2/kg),

100 Σ = 0.25**G** + 2.3**S** + 12**s** + 135**f** = 0.25 (44.24%) + 2.3 (47.02%) + 12(2.11%) + 135 (6.63%)

100 Σ = 1039.576 **m²/kg** ; Σ = 10.395 **m²/kg** ; $\sqrt[5]{\Sigma} = 01.597$

- K : module de richesse, devant avoir une valeur supérieure ou égale à celle donnée dans le tableau suivant :

Tableau II.2 : Valeur de K selon le BBSG.

Type de BBSG	BBSG 0/10	BBSG 0/14
K	3.5	3.3

❖ Calcul le Teneur en liant :

Le module de richesse Alors K=3.245

$100\%L = \alpha K \sqrt[5]{\Sigma} = 0.993 * 3.245 * 01.597 = 5.2\ \%$

L = 5.2 %

L'étude de formulation des bétons bitumineux a donné les résultats qui sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau II.3: composition de la formule utilisée.

Fraction granulaire	**0/3**	**3/8**	**8/15**
% du mélange	43	25	32
Teneur en liant (%)	5.2		

II.2.2. Pourcentage de l'additif de l'alfa :

Les pourcentages de l'alfa proposé pour l'enrobé bitumineux modifié sont (0.1, 0.3 et 0.5% de poids de bitume) et 0% pour référence. Le poids de mélange granulaire total est 15 Kg. Donc en calcul poids du bitume par rapport au teneur en liant trouvée:

→ Poids de bitume = 5.2(%) x 15(kg) = 780g

Les valeurs des poids de l'additif d'alfa sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau II.4 : Les poids de l'alfa trouvée a déférents teneurs.

Pourcentage de l'alfa ٪	0.1	0.3	0.5
Le poids de l'alfa (g)	0.78	2.34	3.9

II.3. Préparation de l'enrobé bitumineux (NF EN 13108-1 - Février 2007) :

Nous commençons par peser les masses nécessaires des différentes fractions **(0/3, 3/8, 8/15)** correspondantes aux pourcentages prédéfinis par l'étude de formulation. Nous les mettons dans un bac puis nous les transférons dans une étuve régulée à **200°C pendant 4 heures** avant le malaxage. Parallèlement, pour la préparation du l'enrobé modifié, nous chauffons le bitume pour une température de **170°C,** ensuite nous le mélangeons le bitume avec les différentes fractions granulaire, et au même temps nous ajoutant l'additif de l'alfa directement dans le malaxeur et de différents teneur et chaque fois.

La composition du mélange est donnée par le tableau suivant :

Tableau II.5 : Composition du mélange.

Choix d'enrobé Bitumineux	**Béton bitumineux de Référence**	**Béton bitumineux modifié**
Gravier 8/15	32% et en poids 4800 g	32% et en poids 4800 g
Gravier 3/8	25% et en poids 3750 g	25% et en poids 3750 g
Sable 0/3	43% et en poids 6450 g	43% et en poids 6450 g
Bitume 40/50	5.2% et en poids 780g	5.2% et en poids 780
Déchet de halfa	0%	(Tableau. II.2)



Figure II.4 : préparation d'un enrobé bitumineux.

II.4. Les essais réalisées sur les enrobés bitumineux modifiés :

II.4.1. Essai de presse à cisaillement giratoire (PCG) :

Au but de réaliser l'essai .On verse le mélange béton bitumineux dans des moules préchauffés avec un poids déterminé. Les conditions d'essai sont **(EN 12697-31)** :

- Diamètre du moule : 100.00 mm.
- Masse de l'éprouvette : 1924 kg.
- Méthode de compactage : Nb girations visé (200).
- Vitesse : 30 rév / min.
- Angle : 0.820 Deg C.
- La charge : 600 Kpa.
- H min : 100.0 mm.



Figure. II.5 : Essai de presse à cisaillement giratoire.

Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats obtenus de l'essai de presse cisaillement giratoire :

Tableau II.6 : Résultats de l'essai PCG des déférents mélanges.

Choix d'enrobé bitumineux	**Béton Bitumineux de référence**		**Béton bitumineux modifié**						**Spécifications (classe 0/14)**
Pourcentage de halfa	**0%**		**0.1%**		**0.3%**		**0.5%**		
Girations	**Pourcentage de vide %**		**Pourcentage de vides %**		**Pourcentage de vides %**		**Pourcentage de vides %**		
	Ep01	**Ep02**	**Ep01**	**Ep02**	**Ep01**	**Ep02**	**Ep01**	**Ep02**	
5	20.498	21.936	21.044	20.802	20.518	21.532	20.862	20.253	
10	17.238	18.411	17.850	17.872	17.588	18.326	17.699	17.350	**<11%**
15	15.161	16.257	15.759	15.985	15.736	16.416	15.666	15.484	
20	13.651	14.693	14.294	14.647	14.364	14.997	14.177	14.106	
25	12.461	13.436	13.146	13.508	13.290	13.891	13.001	13.001	
30	11.463	12.412	12.163	12.558	12.387	11.513	12.040	12.139	
40	9.898	10.881	10.657	11.159	10.931	10.391	10.573	10.751	
50	8.681	9.687	9.479	10.027	9.820	9.505	9.453	9.661	
60	7.731	7.788	8.601	9.161	8.867	8.166	8.601	8.788	
80	6.370	7.400	7.099	7.758	7.486	7.208	7.291	7.540	**4% à 9%**

Les courbes de l'évolution de la compacité en fonction du nombre de girations pour chaque pourcentage de l'alfa sont représentées dans la figure .II.6 :

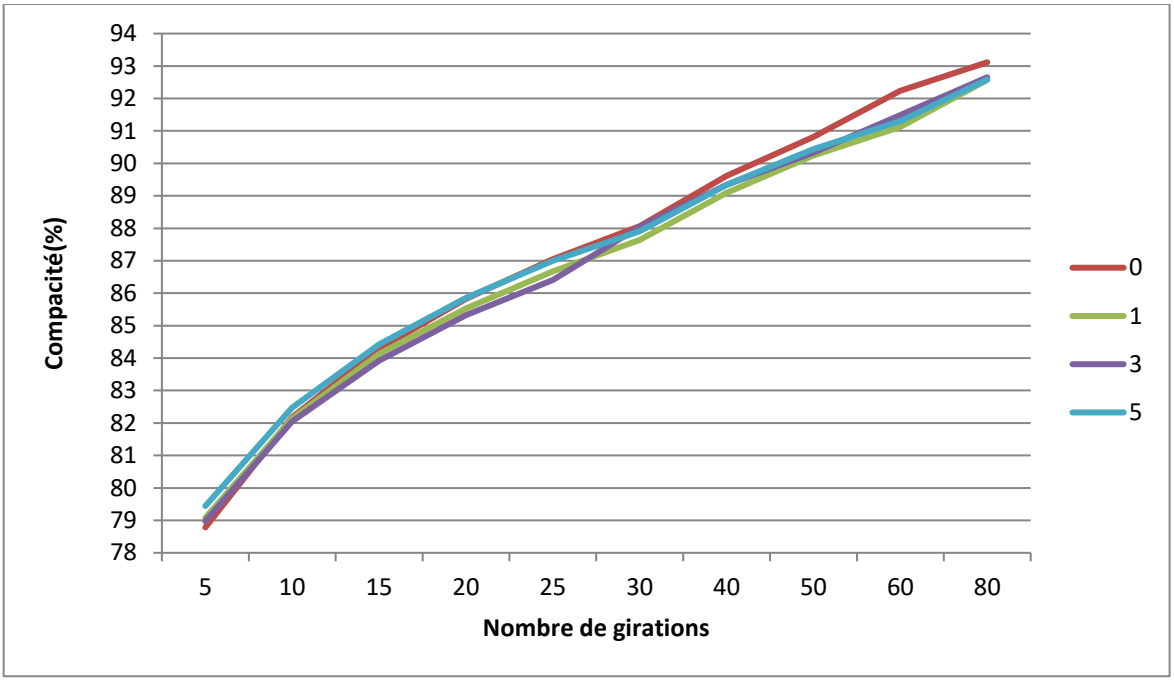


Figure II.6 : L'évolution de compacité des mélanges bitumineux en fonction de nombre de girations.



Figure. II.7: Les éprouvettes des mélanges de béton bitumineux modifiés après l'essai PCG.

Interprétation des résultats de l'essai PCG

L'analyse des courbes de l'évolution de la compacité des mélange des bétons bitumineux étudié en fonction de nombre de giration montre que :

- Le béton bitumineux de référence 0% et le mélange de béton bitumineux modifié de 0,3% de l'alfa répond aux spécifications de la norme (EN 12697-31) qui prend le nombre de girations 80 de BB de classe granulaire 0/14 comme référence ,et les deux mélanges de 0,1% et 0,5% de l'alfa ne sont pas répondes aux spécifications.
- Le mélange 0,1% et 0,3% présentent l'évolution la plus faible, et le mélange 0,5% présente l'évolution la plus élevée, ce dernier revient au phénomène de lubrification de mélange, ce qui offre aux squelettes granulaires une maniabilité, donc ils peuvent diminuer plus de vide entre eux.
- Les mélanges 0,1% et 0.3 %. nécessitent moins d'énergie de compactage pour avoir des compacités acceptables.

II.4.2. Essai Marshall (EN 126976-34) :

L'essai Marshall permet de déterminer la « stabilité » et le « fluage » Marshall d'une éprouvette cylindrique soumise à une compression exercée suivant sa génératrice et ce, pour un compactage énergétique donné (55 coups de marteau appliqués en 55 secondes environ sur chaque face de l'éprouvette). Cette compression est appliquée sur l'éprouvette à une vitesse de 50 mm/min après une demi- heure d'immersion à 60°C sur bain marie. Les mesures effectuées à partir de l'essai Marshall sont :

- La « stabilité » Marshall (SM) est la charge maximale atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette, exprimée en (kN).
- Le « fluage » Marshall (FM) est l'affaissement de cette même éprouvette à sa rupture par compression exprimé en (mm).
- 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.

On verse le mélange dans des moules avec un poids déterminé 1200g compacté par 55coups a deux faces :



Figure. II.8 : Préparation des éprouvettes avec compactage.



Figure. II.9: Les éprouvettes des mélanges du béton bitumineux à l'intérieur d'un bain marie.

On mesure le poids et la hauteur des éprouvettes de mélanges des bétons bitumineux étudié :



Figure. II.10 : Mesure de poids et hauteur des éprouvettes.

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus :

Tableau II.7 : Résultats de caractéristiques de l'éprouvette Béton bitumineux de référence

Béton bitumineux de référence				
L'éprouvette	**1**	**2**	**3**	**Moy**
La masse d'éprouvette (g)	1104.7	1118.5	1109.5	1110.8
La hauteur d'éprouvette (mm)	61	59	62	60.66

Tableau II.8 : Résultats de caractéristiques de l'éprouvette Béton bitumineux modifies

Béton bitumineux modifiés												
Pourcentage de l'alfa	**0.1%**				**0.3%**				**0.5%**			
L'éprouvette	**1**	**2**	**3**	**moy**	**1**	**2**	**3**	**moy**	**1**	**2**	**3**	**moy**
La masse d'éprouvette (g)	1211.1	1194.5	1200.4	1202	1192.2	1217.8	1202.3	1204.1	1196	1199	1189.9	1194.9
La hauteur d'éprouvette (mm)	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67	67

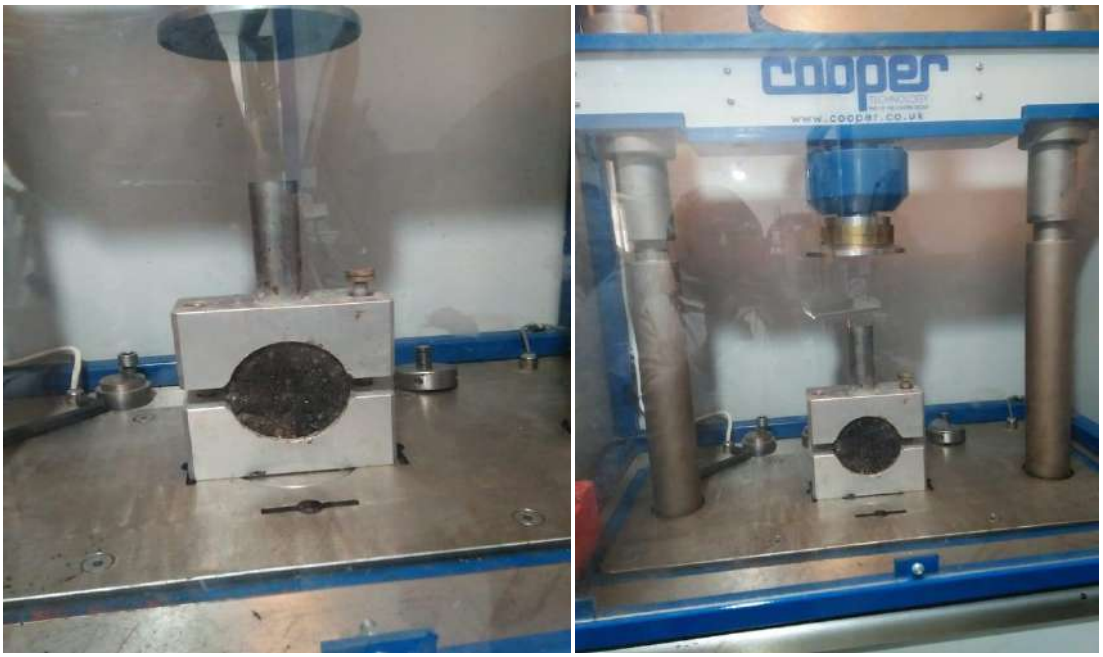


Figure. II.11 : presse Marshall pour calculer la charge maximale (Stabilité Marshall).

Le tableau ci-dessous résume les résultats de stabilité, fluage et quotients Marshall :

Tableau II.9. Résultats d'essai Marshall l'éprouvette Béton bitumineux de référence

Béton bitumineux de référence				
L'éprouvette	**1**	**2**	**3**	**Moy**
Stabilité Marshall (KN)	10.40	12.80	18.05	13.75
Fluage Marshall (mm)	3	2.5	3.5	3
Quotient Marshall (KN/mm)	4.16	4.26	5.15	4.52

Tableau II.10. Résultats d'essai Marshall l'éprouvette Béton bitumineux modifiés.

Béton bitumineux modifiés												
Pourcentage de l'alfa	**0,1%**				**0,3%**				**0,5%**			
L'éprouvette	**1**	**2**	**3**	**moy**	**1**	**2**	**3**	**moy**	**1**	**2**	**3**	**Moy**
Stabilité Marshall (KN)	17.25	18.92	19.61	18.59	15.94	15.91	17.05	16.3	11.94	13.47	14.77	13.99
Fluage Marshall (mm)	2	1	0.65	1.21	2.84	1.68	2.3	2	1.06	1.54	3.12	1.90
Quotient Marshall (KN/mm)	8.62	18.92	30.17	15.36	5.61	9.47	7.41	8.15	11.26	8.75	4.73	7.36

Les figures II.11, II.12, II.13 montrent les résultats de la stabilité, le fluage et le quotient Marshall.

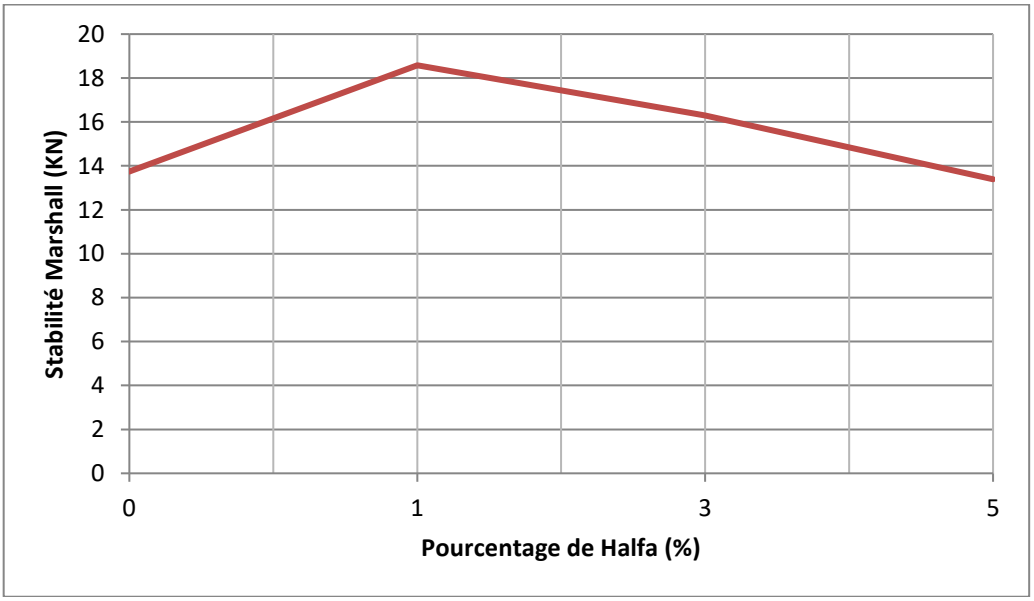


Figure. II.12 : Stabilité Marshall en fonction de pourcentage de l'alfa.

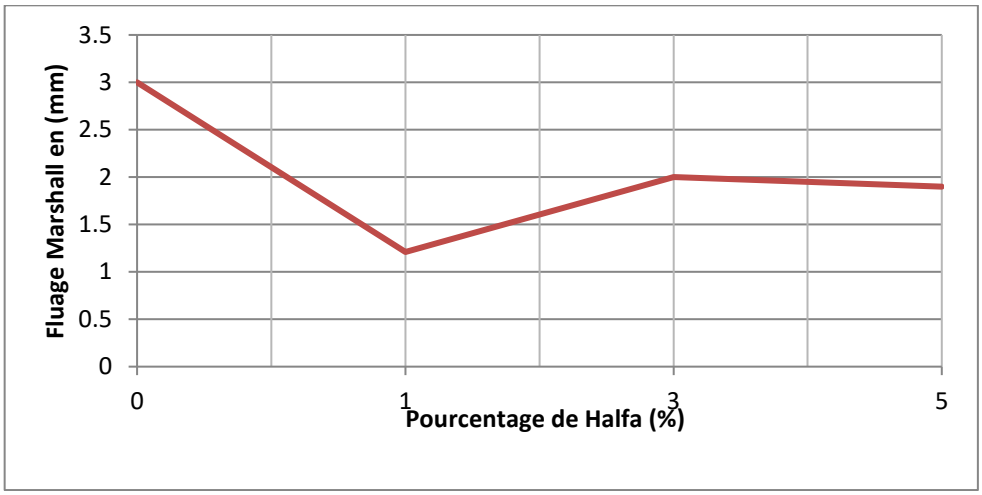


Figure. II.13 : Fluage Marshall en fonction de pourcentage de l'alfa.

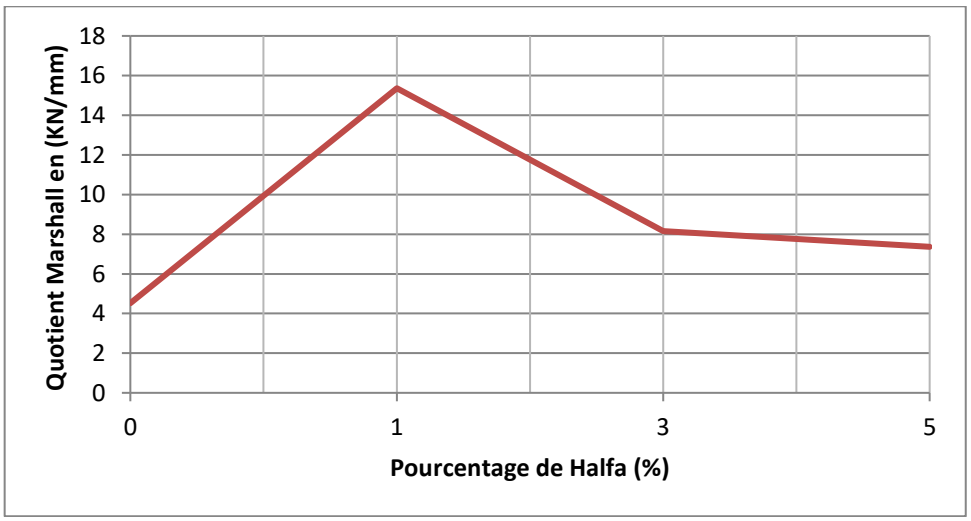


Figure. II.14 : quotient Marshall en fonction de pourcentage de l'alfa.

Les éprouvettes des mélanges de béton bitumineux modifiés après passage à la presse Marshall sont illustrées dans les figures suivantes :



Figure. II.15 : les éprouvettes des mélanges de béton bitumineux modifiés après le passage à la presse Marshall.

Interprétation des résultats

L'analyse des courbes de stabilité, fluage et quotient Marshall des mélanges des bétons bitumineux étudié en fonction de pourcentage de l'alfa montre que :

- La stabilité et le fluage Marshall de tous les mélanges repend aux spécifications de la norme **EN 126976-34.**
- L'alfa dans le mélange influe positivement sur la stabilité Marshall. Cette stabilité est maximale pour BB modifié 0,1% d'alfa.
- Le mélange 0,1% de l'alfa donne la plus grande valeur de stabilité Marshall et la plus faible valeur de fluage. Alors le mélange de 0,1% de l'alfa c'est l'optimum par apport aux autres pourcentages étudié.
- La courbe de quotient Marshall passe par un maximum à 0,1%. Qui globalement les mélanges modifiés améliorent la résistance à la déformation permanente par rapport à l'enrobé de référence. Cette amélioration est obtenue à 0,1%.
- Les variations des quotients Marshall des enrobés bitumineux modifiés par l'alfa par rapport à l'enrobé bitumineux de référence sont généralement considérable. Le gain est de l'ordre de 77 % pour les enrobés bitumineux modifiés à 0,1% de l'alfa et de 73% pour le mélange de 0,3% et de 70 % pour le mélange de 0,5%.

II.4.3. Essai module de rigidité (EN 12697-26) :

Cet essai à pour but de mesurer le comportement des enrobés à travers les valeurs de module de rigidité et module complexe, dans notre étude on a réalisé cet essai sur des éprouvettes cylindriques.
Les résultats d'essai sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.11 : résultats de l'essai module (15° C et 10 Hz).

Choix d'enrobé Bitumineux	**BBSG**	**BBME**		
Pourcentage de L'alfa	**0%**	**0,1%**	**0,3%**	**0,5%**
Module de rigidité E(Mpa)	8788	14081	13425	11026

Interprétation des résultats

- Tous les mélanges repondent aux spécifications **EN 12697-26.**
- Le mélange BB modifie 0,1% de l'alfa est le plus rigide E=14081 Mpa.
- En a classé tout les mélanges de béton bitumineux modifié (0,1% 0,3% et 0,5%) sont dans la classe des bétons bitumineux a module élevée **(BBME)**.

II .5.Conclusion :

Dans ce chapitre, des expériences ont été effectuée pour les essais de formulation on a trouvé que le béton bitumineux modifié à 0,1% de l'alfa est l'optimum par rapport les autres mélanges, et nous concluons que le béton bitumineux modifié à 0,1% de l'alfa donne une bonne performance mécanique pour la couche de roulement.

Conclusion final

Le but de notre recherche est pour l'amélioration des caractéristiques mécaniques des couches de roulement avec l'ajout de déchet plastique alimentaire.

Cette recherche a pour objectif d'apprécier l'influence de fibre végétale de l'alfa sur le comportement mécanique du béton bitumineux (0/14). En effet il s'agit, dans cette étude, de rechercher des performances mécaniques similaires à celles des bétons bitumineux (0/14) à module élevé (BBME).

Par contre, les résultats obtenus sur les enrobés à base de fibre végétale de l'alfa, enregistrent une nette augmentation des performances des propriétés mécaniques de ces matériaux. Nous notons :

- Une campagne expérimentale a été effectuée, nous avons utilisés trois types d'Alfa (0,1% ; 0 ,3% ; 0,5%). Les résultats obtenus pour la modification du liant montrent que l'apport de 0,1% en fibre végétale conduit à des bonnes performances et permet de trouver la meilleure formule granulaire, meilleures stabilités, fluage et résistance aux déformations permanentes par rapport aux autres mélanges.
- L'amélioration des performances d'une chaussée routière dépend des matériaux utilisés (agrégats, bitume et la fibre végétale) lors de la formulation des enrobés bitumineux.
- l'incorporation de fibre végétale de l'alfa a nettement amélioré le module de rigidité du béton bitumineux, se rapproche de celui du béton bitumineux à module élevé (0/14).

- Le souci primordial ayant guidé ce travail pour :
    - ✓ Réduction des épaisseurs couche de roulement.
    - ✓ L'évolution des caractéristiques mécanique et rhéologiques des mélanges sous l'effet du trafic et du climat.
    - ✓ La prise en considération du confort et la sécurité des usagers de la route.
    - ✓ L'économie (Réduire le prix) et l'aspect environnemental lié à l'impact de la réalisation d'une route.
    - ✓ Durée de vie élevée des routes.
    - ✓ Contribuer dans la réalisation des couches de roulement dans le cadre du développement durable.

Références bibliographiques

[1] LCPC Guide Technique, Emploi des liants bitumineux modifiés, des bitumes spéciaux et des bitumes avec additifs en technique routière. Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, 1999.

[2] S. Saoula, K. Ait Mokhtar; S. Haddadi, E. Ghorbel « Improvement of the performances of modified bituminous concrete with EVA and EVA-waste » Physics Procedia 2 (2009) 1319–1326.

[3] C. Gorkem et B. sengoz « Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime », Construction and Building Materials 23 (2009) 2227–2236.

[4] M. Attaelmanan, C. Pei Feng, A. Al-Hadidy « Laboratory evaluation of HMA with high densit polyethylene as a modifier », Construction and Building Materials 25 (2011) 2764–2770.

[5] Sangita, T. Alam Khan, Sabina, D.K. Sharma « Effect of waste polymer modifier on the properties of bituminous concrete mixes », Construction and Building Materials 25 (2011) 3841–3848.

[6] BOUDJIGHAMI .A et ZAAF Y, Etude de comportement mécanique des enrobes bitumineux modifiés par le déchet plastique, Mémoire de master, université de Médéa 2019.

[7] Chabrek dehbia, Etude du phénomène de l'orniérage des chaussées bitumineuse. Mémoire de magistère, Université mouloud mammeri Tizi-Ouzou 2012.

[8] OTMANE Hamid. Etude de la liaison d'échangeur CW 06 avec la 2émeRocade sud de la wilaya d'Alger En phase APD – REPUBLIQUE.

[9] Bassem Ali. Modèle numérique pour comportement mécanique des chaussées application à l'analyse de l'orniérage. Université de Lille 2006.

[10] Catalogue des dégradations de surface des chaussées technique et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC) 1998.

[11] ZEMMIRI.A. «Comparaison des formulations d'enrobes à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniérage» Certificat d'études supérieures - ENTPE de Lyon 2008.

[12] Said LALDJI, 2015 : «les enrobés bitumineux», ETS Cours, P3.

[13] AIPCR : Comité technique AIPCR des routes souples, Comité technique AIPCR des caractéristiques de surface « les enrobes drainants» P135, Belgique1993.

[14] Bitume Québec, Guide de bonne pratique : la mise en œuvre des enrobés. Canada. (2008).

[15] Shell Bitumes., « Techniques et Utilisations », Ed. Société des Pétrole Shell, 1991.

[16] Ministère des Travaux Publics, Algérie « Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud » (2004).

[17] Sebben P, « approche multi-échelles des émissions d'un procédé d'élaboration des enrobés à chaud ». Thèse de doctorat génie de procédé, universités de Rouen, février 2007.

[18] Lesueur D, « la rhéologie des bitumes : Principe et modification ». Vol 2 1-30, 2002.

[19] Hakima K., « Etude de l'action des bitumes modifiés sur le comportement des enrobés ».Thèse de magister F.G.C/USTHB, 2001.

[20] ALI. B, SHAHROUR, I & K WOZNICA : «Etude du comportement mécanique des chaussées souples application à la prévision de l'orniérage» communication au 17ème Congrès Français de Mécanique.

[21] NGUYEN, Mai Lan « Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux» Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliques des Lyon, 264P, 2009.

[22] Jean-Luc DELORME, Chantal De La ROCHE, Louisette WENDLING, (2007) : « Manuel LPC D'aide A La Formulation Des Enrobés », Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées, Paris, France.

[23] Laboratoire Régional Des Ponts Et Chaussées De L'est Parisien Centre De Melun Bulletin Des Laboratoires Des Ponts Et Chaussées - 211 - Septembre-Octobre 1997 - Réf. 4140 - Pp. 15-24.

[24] Mandel, (1955) : « Les Corps Viscoélastiques A Comportement Linéaire - Comptes Rendus De l'Académie Des Sciences », T. 241, Pp. 1910-1912, Paris, France.

[25] Cours Route ''CETE DE L'OUEST'' Smail hamlat Laboratoire D'argers.

[26] Guide Technique « Les Enrobés Bitumineux » Mise A Jour Janvier 2002.

[27] S. Haddadi, E. Ghorbel, N. Laradi «Effects of the manufacturing process on the performances of the bituminous binders modified with EVA» Construction and Building Materials 22 (2008) 1212–1219.

[28] A. Bensaada., Etude de l'influence de l'association (EVA-NBR) et (EVA-déchet plastique alimentaire) sur le vieillissement a court terme des bitumes et influence de l'association (EVA-dechet plastique alimentaire) sur le comportement mecanique des enrobes bitumineux modifies. Mémoire de magistère, FGC/USTHB, 2012.

[29] MAGRAMANE. D, Amélioration des performances des enrobés bitumineux par la modification a base des polymères. École nationale supérieure des travaux publics E.N.S.T.P.2009.

[30] Anurage V. Tiwari,Y. Enrobés bitumineux modifié par le déchet plastique a voie sèche. Journal of civil engineering

[31] Belltrech youcef. Effets de l'ajout de fibres de palmier dattier sur les propriétés physiques, rhéologiques et thermiques du bitume. Construction and Building Materials 239 (2020) 117808.

[32] C. BALEY .Renforcement des polymères par des fibres végétales: journée scientifique et technique Amac (Revue des composites et matériaux avancés. Vol. 16. N° 1/2006).

[33] A. Bessadok And S. Roudesli, Alfa Fibers For Unsaturated Polyester Composites Reinforcement: Effects Of Chemical Treatments On Mechanical And Permeation Properties, Composites: Part A 40 (2009) 184–195.

Les normes

(NF EN 12697-26) Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 26: Module.

(NF EN 12697-31) Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud. Partie 31 : Confection d'éprouvettes à la presse à compactage giratoire.

(NF P 98-250-1) préparation des mélanges hydrocarbonés.

(EN 12697-12) Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud.

Partie 12 : Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses .Méthode B en compression.

(NF P 98-251-1) Essais relatifs aux chaussées « Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés.

Partie 1 : Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud» Septembre2002.

(EN 12697-34) Mélanges bitumineux – Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud – Partie 34 : Essai Marshall.

(NF P 18-560) Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats –Partie 1 : détermination de la granularité – Analyse granulométrique par tamisage.

(NF P 18 – 561) Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats –

Partie 3 : détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement.

(NF P 18-597) La présente norme expérimentale a pour objet de définir une caractéristique des sables intitulée "équivalent de sable a 10 % de fines" et de fixer la méthode permettant de déterminer cette caractéristique.

(NF P 18-573) Essais pour déterminer les propriétés mécaniques et physiques des granulats

Partie 2 : détermination de la résistance à la fragmentation (Los Angeles).

(NF P 18 – 555) Normalisation française détermine La masse volumique absolue (ρs) est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat. Au Normalisation française. Granulats. Mesures des masses volumiques, coefficient d'adsorption et teneur en eau des sables.

(NF EN 933 – 9) (NF P 18 - 592) Norme française. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats: Qualification des fines - Essai au bleu de méthylène et la Normalisation française. Granulats. Essai au bleu de méthylène : Méthode à la tâche.

(NF P 18 – 572) Essais pour déterminer les propriétés mécaniques et physiques des granulats

Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval).

(NF T 66 – 007) Produits noirs - Détermination de la densité relative des produits bitumineux – Méthode du pycnomètre.

(NF EN 1426) Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille.

(NF EN 1427) Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement Méthode Bille et Anneau.

(NF EN 13303) Bitumes et liants bitumineux - Détermination de la perte de masse au chauffage des bitumes industriels.