

Ordre..... /F.S.S.A/UAMOB/2021

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil

Mémoire de fin d'étude

Présenté par

Mr :Gachi Azeddine

Melle : Rahmani Amel

En vue de l'obtention du diplôme de **Master 2en:**

Filière : Génie Civil

Option: Matériaux en Génie Civil

Thème :

**Formulation et caractérisation d'un enrobé
bitumineux modifié par l'ajout des déchets**

Plastiques.

Devant le jury composé de :

Mr. Kennouch	Docteur	UAMOB	Président
Mr. Hami. B	Docteur	UAMOB	Encadreur
Mr. Mesboua	Docteur	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2020/2021

Remerciements

*Je tiens tout d'abord à remercier le bon Dieu tout puissant
de m'avoir aidé à réaliser ce modeste travail.*

*Je remercie très chaleureusement mon encadreur Monsieur **HAMMI BRAHIM**, Maître
de conférence classe B, à université AKLI MOHAND OULHADJ – Bouira, qui n'a
ménagé aucun effort pour que ce mémoire puisse voir le jour. Je lui exprime ma gratitude
de m'avoir dirigé, encouragé et surtout aidé afin de réaliser ce travail.*

Je remercie également les membres du jury, qui ont bien voulu examiner ce travail.

*Je remercie tous les enseignants de mon cursus universitaire
qui ont contribué à ma formation.*

*Enfin, il me serait difficile d'omettre de remercier tous ceux qui ont contribué de près ou
de loin à ce travail, qu'ils trouvent dans ses quelques lignes l'expression de mes sincères
remerciements.*

Dédicaces

A mes chers parents.

A mes frères Fares, Rayan, Akram, Hossam, Ihab

A mes sœurs Marieme Noussou.

A toute ma famille.

A Mon binome Azeddine

A tous mes ami: Sabrina, Iman, Amin, Sami, yousef, Rachalle, Razan et Amir

Résumé

Le trafic est de plus en plus contraignant et agressif ainsi que les températures durablement élevées sont à l'origine des déformations des couches supérieures de la chaussée, ces contraintes imposent la valorisation de nouveaux matériaux pour pallier aux insuffisances des enrobés ordinaires.

L'objectif du présent travail est d'étudier l'influence du déchet plastique sur les caractéristiques des enrobés bitumineux.

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

Cette étude a montré que l'ajout des déchets plastiques aux enrobés bitumineux améliore leur performance mécanique, tels que : l'augmentation de la stabilité, la compacité et le quotient Marshall et la diminution du fluage Marshall.

Mot clés : Bitume, Enrobée bitumineux, déchet plastique, performances mécaniques, stabilité Marshall.

ملخص

إن حركة النقل التي صارت أكثر كثافة و تركيزا بالإضافة إلى الارتفاعات الكبيرة في درجة الحرارة تعد الأسباب هذه العوامل قادت إلى استغلال مواد جديدة لتغطية القصور ، الرئيسية للتشوهات التي تحصل في الطبقات العليا للطرق المسجل على مستوى التركيبة الزفتية العادية.

إضافة إلى هذه الفوائد الجيوتقنية لفتات البلاستيك في ميدان صناعة الطرق فان ذلك يؤثر إيجابا على البيئة والمحيط الحياتي للإنسان عن طريق التقليل من نسبة تواجد هذه المواد البلاستيكية الملوثة للبيئة.

يهدف هذا العمل لدراسة تأثير إضافة فتات البلاستيك على خصائص الخرسانة الزفتية. أثبتت الدراسة أن إضافة فتات البلاستيك للخرسانة الزفتية يؤدي الى تحسين النجاعة الميكانيكية وذلك عن طريق زيادة في استقرار الخرسانة الزفتية, زيادة في نسبة الرش ومعامل مارشال و انخفاض تمبيع مارشال.

الكلمات الاستدلالية: الزفت، الخرسانة الزفتية، فتات البلاستيك ، الخصائص الميكانيكية، ثبات مارشال

ABSTRACT

Traffic has been more intensive and a lot concentrated also the major rising of temperature which considered as the main causes of road aggravation; these constraints require the valuation of new items to recover the shortage existing on the ordinary asphalt.

The objective of this work is to study the influence of plastic waste has on the modified asphalt.

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

This study proved that the addition of plastic waste to asphalt improves their mechanical performance, such as increased stability, compactness and Marshall Quotient and Reduced creep Marshall.

Keywords: Asphalt, Asphaltic concrete, waste plastic, mechanical performance, stability Marshall

SOMMAIRE

Introduction générale	1
-----------------------------	---

Partie I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : Généralité sur les enrobés bitumineux

I .1. Introduction	3
I .2. Définition des enrobés bitumineux	3
I .2.1. Bitumes	3
I .2.1.1. Généralités sur le bitume	3
I .2.1.2 Structure physico-chimiques des bitumes	3
I .2.1.3 Les grandes catégories de bitumes	4
a- Bitumes purs	4
b- Bitumes spéciaux : non normalisés	4
c- Bitumes industriels ou oxydés	4
d- Bitumes fluidifiés	4
e- Bitumes fluxés	4
I .2.2. Granulats	5
I .2.2.1. Rôle des granulats dans l'enrobé	5
I .2.2.2. Classification des granulats	5
I .3. Caractéristique des matériaux	6
I .4. Méthodologies des études de formulation des enrobés bitumineux algérienne	6
I .4.1. Détermination du mélange minéral	7
I .4.2 Détermination de la teneur en bitume	8
I .5. Essai sur les enrobés bitumineux	9
I .5.1. Essai Marshall	9
I .5.2. Essai Duriez	9
I .5.3. Essai d'orniérage	10
I .5.3. Essai de fatigue	11
I .6. Classification des enrobés bitumineux	12
I .6.1. Les enrobés à froid	12
I .6.2. Les enrobés à chaud	12
I .7. Qualités exigées des enrobés bitumineux	14

I .7.1. La stabilité.....	14
I .7.2. La flexibilité.....	14
I .7. 3. Insensibilité à l'eau.....	14
I .7. 4. La durabilité.....	14
I .8. La durée de vie de l'enrobé.....	15
I .9. Fabrication des enrobés bitumineux.....	15
I .10. Transport et mise en œuvre.....	15
I .11. Sollicitation dans les chaussées.....	15
I .11.1. Les sollicitations mécaniques (effet de trafic).....	16
I .11. 2. Les sollicitations climatiques (effet de la température).....	16
I .11.3. Les phénomènes chimiques	16
I .12. Conclusion.....	17
CHAPITRE II : Les polymères	
II.1. Définition.....	19
II.2. Provenance.....	19
II.3. Structure physico-chimiques.....	20
II.3.1. Structure primaire.....	20
II.3.2. Structure bi ou tridimensionnelle.....	20
II.4. Utilisation.....	21
II.5. Types des polymères.....	21
a- Polymères naturels.....	21
b-Polymères artificiels (régénérés).....	21
b-Polymères synthétiques.....	22
II.6. Les propriétés des polymères.....	22
II.6.1. Thermoplastique.....	22
II.6.2. Thermodurcissables.....	22
II.6.3. Elastomères.....	22
II.7. Comportement thermique.....	23
II.8. La modification des enrobes par des polymères	24

II.9. Procédés de modifications.....	25
II.9.1. L'enrobé modifié par la méthode sèche.....	25
II.9.2. L'enrobé modifié par la méthode humide (bitume modifié).....	25
II.10. Recherche bibliographique sur les enrobés modifié.....	25
II.10.1. Etude réalisé par Kouidri Djamila et Telili Mebarka.....	25
II.10.1.1. Matériaux utilisés.....	25
II.10.1.1.1. Le bitume	25
II.10.1.1.2. Les granulats	26
II.10.1.1.3. Poudrette plastique utilisée	26
II.10.1.2. Les essais sur les matériaux.	26
II.10.1. 2.1. Le bitume	26
II.10.1.2.2. Les granulats	26
II.10.1.2.3. Les enrobés.	26
II.10.1.3. Résultats des essais et interprétations	26
II.10.1.3.1. Le bitume	26
II.10.1.3.1.1. Interprétations des résultats	27
II.10.1.3. 2. Les granulats	27
II.10.1.3.2.1. Interprétations des résultats	27
II.10.1.3.2. Poudrette plastique	27
II.10.1.4. Dispositive expérimental	28
II.10.1.5. Résultats et interprétations	28
II.10.1.5.1. Essai Marshall	28
II.10.1.5.1.1. Interprétations des résultats (mode A).	28
II.10.1.5.1.2. Interprétations des résultats (mode B).	29
II.10.1.5.2. Essai Duriez	29

II.10.1.6. Conclusion général	30
---	----

Partie I : ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE I : Matériaux et caractérisations

III.1. Introduction.....	32
III.2. Les matériaux utilisés.....	32
III.2.1. Les granulats.....	32
III.2.1.1. Origine des granulats.....	32
III.2.2. Le bitume.....	33
III.2.3. L'additif (le déchet plastique).....	33
III.2.3.1. Matière plastique.....	33
III.3. Les essais sur les matériaux	33
III.3.1. Les essais réalisés sur les granulats.....	34
III.3.1.1. Analyse granulométrique.....	34
III.3.1.2. Essai équivalent de sable à 10% de fines.....	35
III.3.1.3. Essai de propreté superficielle.....	35
III.3.1.4. Les essais de résistance à l'usure et au choc.....	36
III.3.1.4.1. Mesure de coefficient Micro Deval	36
III.3.1.4.2. Mesure coefficient Los Angeles.....	37
III.3.1.5. Coefficient d'aplatissement.....	38
III.3.1.6. Densité réel.....	39
III.3.2. Les essais sur le bitume.....	39
III.3.2.1. Essai de pénétrabilité à l'aiguille.....	39
III.3.2.2. Essai de ramollissement	40
III.3.2.3. Essai de ductilité à 25°C.....	40
III.3.3. Les essais sur l'additif (déchet plastique).....	40

III.3.3.1.La densité.....	40
III.4.Résultats des essais sur les granulats	41
III.4.1.Analyse granulométrique	41
III.4.1.1. Interprétation des résultats	42
III.4.2. Essai d'équivalent de sable à 10% de fines.....	42
III.4.2.1. Interprétation des résultats	42
III.4.3. Essai de propreté superficielle	42
III.4.3.1. Interprétation des résultats	43
III.4.4. Essai Micro Deval	43
III.4.5. Essai Los Angeles	43
III.4.5.1. Interprétation des résultats	44
III.4.6. Coefficient d'aplatissement	44
III.4.7. Les résultats des essais	44
III.4.7.1. Interprétation des résultats	44
III.5. Résultats des essais sur le bitume	45
III.5.1. Interprétation des résultats.....	45

CHAPITRE VI : Formulation de l'enrobé et l'enrobé modifié

IV.1-Introduction.....	47
IV.2- Détermination de la courbe granulométrique du mélange	47
IV.3- Détermination des teneurs en bitume.....	49
IV.4- Détermination de la teneur en liant en fonction du module de richesse.....	50
IV.5- Choix de la formule optimale	50
IV.5.1- Essais de Marshall.....	50
IV.6- Résultats et interprétation	55
IV.7-L'enrobé modifié.....	56
IV.7.1- Modification par la méthode sèche	56
IV.8-Confections des éprouvettes bitumineuses.....	56

IV.8.1- L'essai Marshall.....	56
IV.8.1.1-La stabilité Marshall.....	57
IV.8.1.2-Interprétation des résultats.....	57
IV.8.1.3-Le fluage.....	58
IV.8.1.4-Interprétation des résultats.....	58
IV.8.1.5-Le quotient Marshall.....	58
IV.8.1.6-Interprétation des résultats.....	59
IV.9-Conclusion de la partie expérimentale.....	59
Conclusion générale.....	60



LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Fuseau de référence du BB 0/14 semi grenu	7
Tableau II.1 : Résultats des caractérisations du bitume.....	26
Tableau II.2 : Résultats des caractérisations des granulats.....	27
Tableau II.3 : Caractéristiques physiques de la poudrette utilisée.....	27
Tableau II.4 : Les résultats d’essai Marshall pour le Mode A.....	28
Tableau II.5 : Les résultats d’essai Marshall pour le Mode B.....	29
Tableau II.6 : Les résultats d’essai Duriez pour le Mode A.....	30
Tableau II.7 : Les résultats d’essai Duriez pour le Mode B.....	30
Tableau III.1 : Origine des granulats.....	32
Tableau III.2 : Résultats de l’analyse granulométrique.....	41
Tableau III.3 : Résultats d’équivalent de sable.....	42
Tableau III.4: Résultats de l’essai de propreté.....	42
Tableau III.5 : Résultats de l’essai Micro Deval.....	43
Tableau III.6: Les critères de l’essai Micro Deval.....	43
Tableau III.7: Résultats de l’essai Los Angeles.....	43
Tableau III.8: Les critères de l’essai Los Angeles.....	43
Tableau III.9: Résultats de Coefficient d’aplatissement.....	44
Tableau III-10: Résultats des caractérisations des granulats.....	44
Tableau III.11: Résultats des caractérisations du bitume.....	45
Tableau IV.1 : Fuseau de référence du BB 0/14 semi grenu.....	47
Tableau IV. 2 : Les pourcentages pondéraux du mélange.....	48
Tableau IV. 3 : Résultats des calculs.....	50
Tableau IV.4 : Teneurs en bitume retenues.....	50
Tableau IV.5: Résultats de l’essai MARSHALL.....	55
Tableau IV.6: Résultats de l’essai MARSHALL en fonction de la teneur en déchet.....	57

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Simulateur de trafic avec une roue en acier.....	10
Figure I.2: Essai de fatigue.....	10
Figure I.3 : Exemple de droit de fatigue [déformation - nombre de cycles à rupture].....	11
Figure II.1: Schéma d'une macromolécule ramifiée.....	20
Figure II.2: Schéma d'une macromolécule réticulée.....	21
Figure II.3: Diagramme de déformations des polymères	24
Figure III.1: Matériel de l'essai granulométrique.....	34
Figure III.2: Schéma d'essai d'équivalent de sable.....	35
Figure III.3: Appareil Micro Deval.....	36
Figure III.4: Appareil Los Angeles.....	38
Figure III.5: Schéma des boulets varie.....	38
Figure III.6: Dispositif de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille.....	39
Figure III.7: Appareil digital de ramollissement (Bille et anneau).....	40
Figure III.8: Courbes granulométriques des fractions granulaires.....	42
Figure IV.1: Pourcentage granulaire du mélange.....	48
Figure IV. 2: Courbe granulométrique du mélange 0/14.....	49
Figure IV.3: Deux mâchoires semi-cylindriques.....	51
Figure IV.4: Etuve de chauffage.....	51
Figure IV.5: Enrobé après malaxage.....	52
Figure IV.6: Remplissage des moules Marshall.....	52
Figure IV.7 : Dame Marshall.....	53
Figure IV.8 : Eprouvettes démoulées.....	53
Figure IV.9 : Bain-marie.....	54
Figure IV.10 : Ecrasement des éprouvettes.....	54
Figure IV.11 : Variation de la stabilité en fonction de la teneur en déchet.....	57
Figure IV.12 : Variation du fluage en fonction de la teneur en déchet.....	58
Figure IV.13 : Variation du quotient Marshall en fonction de la teneur en déchet.....	59

NOMENCLATURE

CTTP	Contrôle Technique des Travaux Public
C	Compacité (%)
SM	Stabilité Marshall (KN)
FM	Fluage (mm)
QM	Quotient Marshall
K	Module de Richesse
Σ	Surface spécifique des granulats
α	Coefficient correcteur
Mv	Masse volumique du granulat
MvRg	Masse volumique réel des granulats
G	La proportion pondérale des granulats supérieurs à 6.3 mm (%)
S	La proportion pondérale des granulats compris entre 6.3 et 0.315 mm (%)
s	La proportion pondérale des granulats compris entre 0.315 et 0.08 mm (%)
f	La proportion pondérale des granulats inférieurs à 0.08 mm (%)
BB	Bétons bitumineux
GB	Graves bitumineux
K	Module de richesse
BBME	Bétons bitumineux à module élevé
EME	Enrobé à module élevé
E	Module de rigidité
PE	Caoutchouc synthétique
PPRO	Polypropylène
NR	Caoutchouc naturel
IR	Poly isoprène
SBR	Copolymère butadiène-styrène
CR	Polychloroprene

NBR	Copolymère acrylonitrile-butadiène
TPE	Elastomères thermoplastique
Tg	Température de transition vitreuse
MDE	Coefficient de Micro deval
LA	Coefficient de Los Angeles
CA	Coefficient d'aplatissement
Mi	Somme des masses des classes granulaires di/Di
mi	Masse passant à travers le tamis à fente d'écartement
ES	Equivalent de sable
PCG	Presse à compactage giratoire
TBA	Température à bille anneau

Introduction general

Les structures de chaussées routières sont soumises, en service à des sollicitations très complexes. La circulation automobile et le climat ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées. Dans certains pays tels que le Canada, les pays nordiques et même l'Algérie, les chaussées subissent de grandes amplitudes thermiques et sont donc soumises au phénomène de fissuration thermique

Ces dernières années ce phénomène s'est en plus aggravé par l'intensification des charges supportées par les structures de chaussées, cette intensification étant due en particulier à l'accroissement du trafic poids lourd.

Les enjeux économiques sont importants, tant au niveau du dimensionnement (couche de plus en plus minces, mise au point de produit innovants, etc) que de l'entretien de la chaussée (investissement plus durable dans le temps). Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les études menées sur les matériaux de chaussées, en particulier les bitumes et les enrobés bitumineux. Une meilleure connaissance des propriétés thermomécaniques des matériaux bitumineux utilisés en construction routière permettra à terme de formuler des enrobés suffisamment performants pour résister de manière pérenne aux contraintes appliquées.

Dans ce contexte, s'est imposé la nécessité d'établir de nouvelles méthodes d'essais et des procédures plus rationnelles pour le choix des matériaux et des formules d'enrobés bitumineux.

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

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

- La première partie est entièrement consacrée à une synthèse bibliographique.
- La deuxième partie, présente les matériaux d'étude et les méthodes expérimentales.

Partie I:

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

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

- ✓ Des notions générales sur les bitumes, les granulats et les enrobés.
- ✓ Des notions générales sur les polymères.
- ✓ Les procédé de modification de l'enrobé bitumineux.

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

GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX

I.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons définir les enrobés bitumineux .Tout d'abord nous présentons brièvement quelques généralités sur l'enrobé bitumineux et ses composants (bitume et granulat) avec les caractéristiques appropriés de chacun d'eux. Ensuite nous étudions la formulation de l'enrobé en considérant les paramètres suivant : la teneur du bitume, la dureté du bitume et la grosseur des granulats ... qui ont des influences sur la compacité, la mise en œuvre et la durabilité ..., ainsi que les principaux essais de caractérisation selon les normes pour obtenir un enrobé selon le choix désiré. [1]

I.2. Définition des enrobés bitumineux

L'enrobé bitumineux est un matériau composite constitué d'un mélange d'une liant hydrocarboné (bitume, en général 5% à 7% en masse et éventuellement des additifs) et de granulats (gravier, sables, fines) ; Le bitume procure la cohésion de l'ensemble et il est responsable du caractère visqueux et les granulats assurent la structure rigide de l'enrobé.

Chacun de ces deux constituants est défini par ses caractéristiques rhéologiques et mécaniques.

La connaissance de ces caractéristiques permet d'obtenir la bonne tenue du mélange bitumineux.

[1]

I.2.1. Bitumes**I.2.1.1 Généralité sur le bitume**

Le bitume est un matériau très visqueux, ou solide à température ambiante, caractérisé par sa couleur noire. Il a une structure complexe composé principalement par des molécules d'hydrocarbures ou de dérivés d'hydrocarbures.

Le bitume a la fonction d'une colle dans l'enrobé bitumineux et vise à maintenir les granulats entre eux.

I.2.1.2 Structure physico- chimiques des bitumes

Les bitumes sont des mélanges complexes de composés hydrocarbonés constitués de:

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

Il est de pratique de regrouper les différents constituants au sein des grandes familles chimiques. Ce sont les asphaltènes, résines, saturés et aromatiques.

I.2.1.3 Les grandes catégories de bitume

a- Bitumes purs

Issus après distillation directe (atmosphérique et sous vide) ou par soufflage. Le soufflage (parfois renforcé par le chlorure ferrique ou acide phosphorique, etc.) il conduit à des bitumes ayant des points de ramollissement plus élevés que ceux obtenus par distillation. Il déshydrogénése le résidu, conduit à une oxydation et polycondensation, forme de nouveaux asphaltènes à partir des phases maltènes.

Les grades habituels contiennent « 8 à 15% d'asphaltènes » (produit par distillation) et ceux obtenus par soufflage « 15 à 20% d'asphaltènes » pour les routiers (semi soufflé) et de 20 à 30% d'asphaltènes pour les bitumes industriels (oxydé).

b- Bitumes spéciaux : non normalisés

- **Bitumes très durs** : Ils sont de grade 5/10,10/20, 15/25, 25/35, ils sont généralement employés en couche de base ou de liaison. Ils permettent d'éviter les déformations par fluage.
- **Bitumes multigrades** : ont un très large intervalle de température d'emploi que les bitumes purs normalisés, présentent un indice de pénétrabilité élevé (0 à 2) et une résistance importante aux déformations de type orniérage.
- **Bitumes pigmentables** : Ce sont des bitumes pauvres en asphaltènes, qui ne peuvent être obtenus qu'à partir des bruts légers. Ils sont employés le plus souvent en enrobé à chaud.

c- Bitumes industriels ou oxydés

Obtenus par soufflage, dont le point de ramollissement peut atteindre 100°C à 115°C et la pénétrabilité très faible (inférieur à 10) .La teneur en asphaltènes est en général supérieur à 20%.

d- Bitumes fluidifiés

Constitué par ajout d'une coupe pétrolière fluide de type kérosène à un bitume mou. On obtient différents grades classés selon leur pseudo viscosité à 25°C (Cut- back), ces classes sont : 0/1, 150/250, 400/600etc.

e- Bitumes fluxés

Le fluxant est une huile de houille ou une huile de pétrole, on l'obtient en fonction du pseudo viscosité à 25°C.

I.2.2 Granulats

Les granulats utilisés dans les enrobés peuvent être divisés en deux grandes catégories : les granulats naturels en provenance de carrières, sablières et gravières et les granulats d'autres origines tels que des granulats recyclés, des sous-produits d'origine industriels ou des granulats fabriqués pour un usage spécifique. [2]

I.2.2.1 Rôles des granulats dans l'enrobé

Les granulats utilisés dans les enrobés en couche de roulement jouent un rôle de première importance dans le phénomène d'adhérence pneus-chaussé. Sous l'effet de la circulation, les granulats en surface tendent à se polir plus ou moins rapidement selon leur nature et leur composition minéralogique.

A court ou à moyen terme, selon la densité du trafic, la chaussée peut devenir glissante. Cet aspect fait l'objet de recherches en laboratoire et sur la route dans le but de déterminer les textures de surface et les compositions minéralogiques des matériaux granulaires afin d'obtenir des mélanges bitumineux rugueux qui répondent aux conditions exigées.

Ainsi les caractéristiques de surface et de forme des granulats influençant le lien bitume-granat, la maniabilité et la performance des enrobés bitumineux ; Certains phénomènes d'orniérage ou de désenrobages peuvent s'expliquer par l'interaction entre le bitume et les granulats ou d'après la forme des granulats.

Les granulats utilisés dans la confection des enrobés bitumineux doivent donc répondre à des critères de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage.[3]

I.2.2.2 Classification des granulats

Les granulats sont classifiés en différentes classes granulaires selon la taille des éléments. Une classe granulaire (d/D) est répertoriée par la taille du plus petit grain « d » et du plus gros grain « D » ; la taille est exprimée en millimètre. Il est admis qu'une fraction granulaire peut comporter jusqu'à 15% de matériaux excédentaires supérieurs.

On peut distinguer les classes granulaires suivantes :

- Les fines 0/D avec $D \leq 0,080$ mm
- Les sables 0/D avec $D \leq 6,6$ mm
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm
- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm
- Les graves 0/D avec $6,3\text{mm} < D \leq 80$ 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.

I.3. Caractéristiques des matériaux

Avant d'entamer le calcul d'une étude de formulation une mesure des différentes caractéristiques des composants (physique, mécanique et fabrication) est nécessaires au but de garantir la conformité par rapport aux spécifications des normes en vigueur.

Pour les premières compositions de liant bitumineux, il doit vérifier par un ensemble des essais, pour un bitume pur, on doit vérifier :

- Pénétrabilité à l'aiguille (NA 5192)[4]
- Point de ramollissement (température bille – anneau) (NA 2617)[5]
- Ductilité à 25°C (NA 5223)[6]

Et concernant le deuxième composant, squelette granulaire, on doit vérifier :

- Analyses granulométriques (NA 2607)[7]
- Masses Volumiques absolues(NA255)[8]
- Essai d'équivalent de sable à 10% des fines (NF P 18-598)[9]
- Essai Micro-Deval en présence d'eau (NA 5129)[10]
- Essai de Los Angeles(NA5130)[11]
- Essai d'Aplatissement(NA 5125)[12]
- Propriété superficielle(NF P18-591)[13]

Sur la base de ces essais et résultats, on peut entamer dans le calcul de la formulation ce qui compose deux étapes, détermination du mélange minéral, et calcul de teneur en liant.

I.4. Méthodologies des études de formulations des enrobés bitumineux algériens

La formulation en Algérie est basée sur la vérification des caractéristiques des composants ainsi que sur les essais Duriez et Marshall en fonction des matériaux granulaires. On choisit une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

I.4.1 Détermination du mélange minéral

A partir des courbes granulométriques moyennes des différentes classes granulaires choisies pour la réalisation de l'étude de formulation, on compose un mélange minéral dont la courbe granulométrique est inscrite dans les limites du fuseau défini par les spécifications.

La méthode consiste à:

- Tracer sur le même graphique les courbes granulométriques moyennes des classes granulaires choisies pour la composition du mélange granulaire, le fuseau granulométrique relatif au mélange minéral de l'enrobe étudié et la courbe médiane de ce fuseau.
- Tracer la droite joignant le point correspondant à 5% de passants sur la courbe de la première gravette, au point correspondant à 95 % de passants sur la courbe de la deuxième gravette (ordre décroissant des D max).
- Le point d'intersection de cette droite avec la courbe médiane du fuseau détermine le pourcentage pondéral de la première gravette dans le mélange minéral.

Les opérations 2 et 3 sont répétées pour l'obtention des proportions des autres classes granulaires.

A partir des courbes moyennes des classes granulaires, on calculera la courbe du mélange minéral 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 courbe granulométrique du mélange minéral calculée devra ensuite être tracée dans un graphique et être comparée au fuseau de spécifications.

La composition granulométrique du mélange devra être, selon le type d'enrobe, à l'intérieur des fourchettes données dans le tableau suivant :

Tableau I.1:Fuseau de référence du BB 0/14 semi grenu

Tamis (mm)	Pourcentages des passants (%)	
	Min	Max
14	94	100
10	72	84
6.3	50	66
4	40	54
2	28	40
0.063	7	10

I.4.2 Détermination de la teneur en bitume (TL)

On note que la teneur en bitume (TL) correspond à la masse de liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage. Duriez a établi une formule pour déterminer la teneur en bitume des enrobés en fonction de la surface spécifique du mélange: $TL = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$

K : module de richesse pouvant prendre les valeurs suivants :

- 2 à 2.6 pour les graves bitumes
- 3.45 à 3.9 pour un béton bitumineux

α : coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats

= 2.65/masse volumique des granulats

Σ : surface spécifique conventionnelle

La surface spécifique d'un granulats représente la surface totale des particules par rapport à son volume. Elle est exprimée en m² de granulats. Cette façon d'exprimer la surface spécifique permet de faire la comparaison entre les différents granulats. Elle est exprimée ensuite en m²/kg, laquelle est essentiellement comparable entre les matériaux possédant une même densité.[14]

$\Sigma = (0.25 G + 2.3 S + 12s + 135f)/100$ en m²/kg.

G : proportion pondérale des éléments supérieurs à **6.3 mm**.

S : proportion pondérale des éléments compris entre **0.315 mm et 6.3 mm**.

s: proportion pondérale des éléments compris entre **0.08 mm et 0.315 mm**.

f : proportion pondérale des éléments inférieure à **0.08 mm**.

Dans certains cas, on utilise la formule simplifiée suivante :

$\Sigma = 2.5 G + 1.3f$ [m²/kg]

La surface spécifique est influencée par :

A) La Grosseur Maximale.

B) La Granulométrie.

C) La Forme du Granulat.

A) Grosseur maximale des granulats: la surface spécifique est inversement proportionnelle à la dimension maximale des granulats.

B) Granulométrie des granulats: pour un granulats de même grosseur maximale, La surface spécifique sera proportionnelle aux pourcentages passants ou à la finesse du granulats.

C) Forme des granulats: la surface spécifique d'une particule cubique est 2 fois plus grand que celle d'une particule sphérique (Field, 1978). ce sont les particules plates et allongées qui ont la

plus grande surface spécifique .cependant, Field (1978) précise que la méthode des surfaces spécifiques, qui utilise des facteurs prédéterminés pour chacun des tamis n'est pas toujours réaliste car elle utilise les mêmes facteurs peu importe la forme du granulat. Cela constitue une source d'imprécision. [14]

I .5.Essais sur les enrobés bitumineux

Les formulations de bétons bitumineux sont déterminées au moyen d'essais dans le laboratoire permettant d'évaluer le comportement des matériaux au compactage (Presse à compactage Giratoire PCG), d'apprécier leurs caractéristiques mécaniques (essais de fatigue, essais MARSHALL, essais DURIEZ) et d'estimer leurs risques de déformations permanentes (Essais à l'orniérage). [15]

I .5.1. Essai Marshall (NA 5227)[16]

L'essai Marshall est toujours très utilisée au niveau international, pour la détermination direct de la stabilité (force maximale appliquée) et du fluage Marshall (valeur de déformation en 1/10 mm correspondant à la stabilité), deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage. [17]

I .5.2. Essai Duriez (NA5226)[18]

La méthode d'essai Duriez, essai de compression simple, a pour but de déterminer, à température spécifique pour un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir des résistances à la compression avec ou sans immersion des éprouvette.

I .5.3. Essai d'orniérage (NA16300)[19]

Cet essai est très important pour les routes fréquentées et avec un pourcentage de poids lourds assez élevé, il permettra de simuler au laboratoire la résistance de l'enrobé à l'orniérage [20].

L'orniérage est très populaire, car c'est une méthode qui est plus représentative que les autres méthodes de laboratoire lors de l'évaluation de la résistance à la déformation permanente et les résultats ont montré une excellente corrélation avec la déformation de chaussée en service.

Mode d'essai: on détermine la profondeur de l'ornière au passage répété d'un pneumatique, selon l'épaisseur de l'enrobé .On confectionne une plaque de 5 ou 10 cm qu'on lui fait subir une énergie de compactage normalisée à 60°C, plusieurs cycles sont appliqués 1000, 3000, 10 000, 30 000, 100 000, le résultat (profondeur d'ornière) est comparé à la norme. [20]

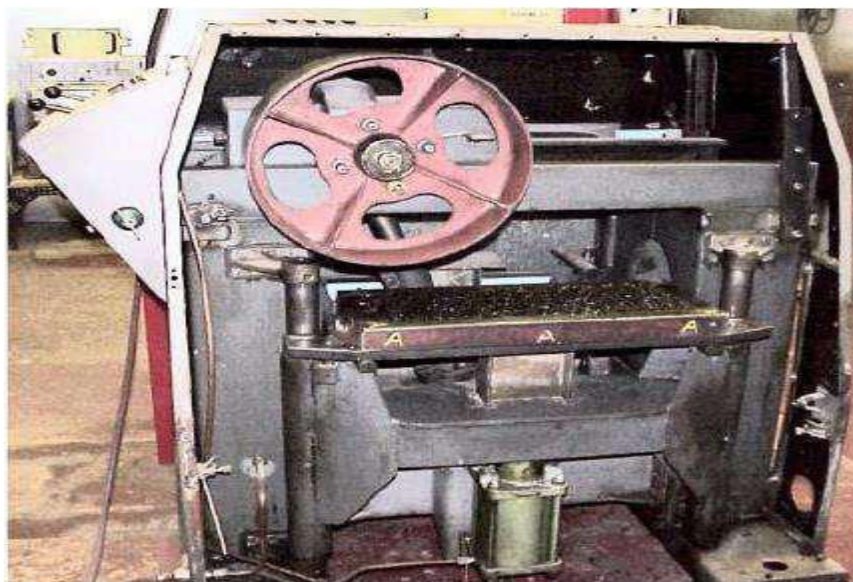


Figure I.1: Simulateur de trafic avec une roue en acier

I.5.4. Essai de Fatigue (NA 16304)[21]

Cet essai permet d'étudier le comportement des enrobés bitumineux vis-à-vis de la fissuration, il est pratiqué sur des éprouvettes de forme trapézoïdales (Figure 2).

L'éprouvette est encastrée à la base, sollicités en tête en flexion sinusoidale par déplacement imposé d'amplitude constante choisie afin de caractériser la rupture à un million de cycle.

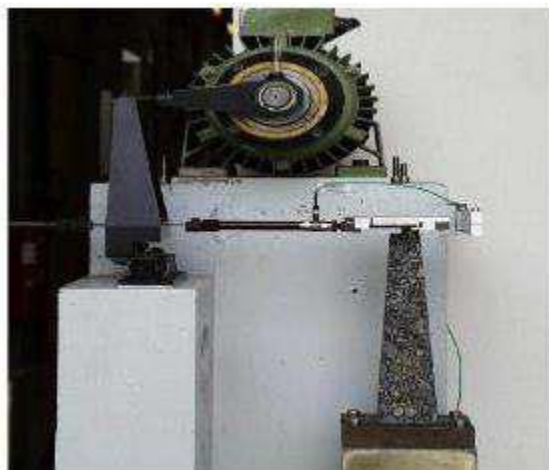


Figure I.2: Essai de fatigue

L'essai est pratiqué à 10°C et à une fréquence de 25 Hz. Il est à noter que la répétitivité des cycles de flexion alternée entraîne un endommagement de l'éprouvette (des fissures sont localisées).

Les résultats obtenus sont reportés sur un diagramme (déformation - nombre de cycles à rupture)
[Figure 3] [20]

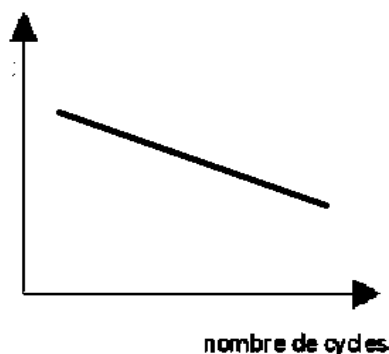


Figure I.3 : Exemple de droit de fatigue [déformation - nombre de cycles à rupture]

I.6. Classification des enrobés bitumineux

I.6.1. Les enrobés à froid

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

I.6.2. Les enrobés à chaud

Ces enrobés à chaud sont obtenus à partir des granulats passés dans un tambour sécheur (pour le chauffage et déshydratation). Dans ce cas le liant utilisé est un bitume pur ou un bitume fluidifié très visqueux.

On présente quelque type des enrobés à chaud et leurs utilisations.

a- Béton bitumineux (BB)

Le béton bitumineux (BB) est un mélange à granularité continue se composant de gravillons, de sable, de filler et de liant bitumineux.

Les classes granulaires des bétons bitumineux retenus dans le présent cahier des charges sont les suivantes : BB0/8, BB0/12, BB0/14.[22]

Leur domaine d'utilisation diriger vers :

- Ce type de matériau est bien adapté aux couches de surface des chaussées à forts trafics en raison des bonnes caractéristiques mécaniques. Il est aussi bien utilisé pour les chaussées neuves qu'en renforcement.

- Selon le type, il convient pour couche de roulement ou couche de liaison entre des routes, autoroutes et aérodromes .Il est fabriqué, mis en œuvre et compacté à chaud.[23]

b- Grave bitume (GB)

La grave – bitume (GB) est un mélange à granularité continue 0/20 se composant de granulat, de sable, de filler et de liant bitumineux.

Elle est appropriée pour couche de base des routes, autoroutes et aérodromes. Elle est fabriqué, mise en œuvre et compacté à chaud et assure la portance de la chaussée et la répartition des charges du trafic transmis par les couches de surface. Elle sert aussi à établir le profil souhaité de la chaussée respectivement comme couche de reprofilage.[22]

c-Béton bitumineux à module élevé (BBME)

Les BBME sont obtenus à partir d'un mélange de bitume pur ou modifié, de granulats fabriqués dans une centrale d'enrobage. Ils se caractérisent par un module de rigidité « E » plus élevé que les enrobés classiques et par une bonne tenue à l'orniérage. [23]

C'enrobé est destiné aux couches de roulement des routes nationales et régionales empruntées par un trafic moyen et dense.

Les BBME permettent une meilleure résistance à l'orniérage. Ils s'appliquent sur des épaisseurs de 5 à 7 cm pour les BBME 0/10 et 6 à 9 cm pour lesBBME 0/14.[23]

d- Enrobe à module élevé (EME)

Ce mélange est destiné aux couches de liaison soumises à un trafic lourd (principalement pour diminuer l'orniérage) ; Ce sont des enrobes préparés à partir d'un mélange de liant hydrocarboné, de granulats et/ou d'additifs minéraux ou organiques, dosés, chauffés et malaxés dans une installation appelée centrale d'enrobage. Ils sont destinés à la réalisation des assises dans le cadre de travaux neufs ou de renforcement de chaussées.

Ils se caractérisent par un module de rigidité élevé atteignant 17000MPa et une plus grande résistance à la fatigue que les enrobés classiques. [24]

On distingue deux classes de performance classe 1 et classe 2. Les granularités utilisées sont0/10, 0/14 et 0/20.[24]

Chaque type d'EME comprend deux classes granulaires qui diffèrent entre elles notamment par leur teneur en liant et la dureté. On distingue [24]

- **EME Classe 1:**correspond à des graves bitumes à module élevé obtenues par l'emploi d'un bitume dur, aux dosages voisins de ceux des graves bitumes (GB).

- **EME Classe 2:** correspond à un enrobé à module élevé comportant, de plus, un très bon comportement en fatigue, du fait du dosage élevé en bitume dur, généralement parlant de l'EME.

Les types des enrobés mentionnés au-dessus les plus connus et utilisés en Algérie, restent entre autres types des enrobés tels que drainant, aéronautique...etc.

I.7. Qualités exigées des enrobés bitumineux

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

I.7.1. La stabilité

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

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

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

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

I.7.2. La flexibilité :

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

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

I.7.3. Insensibilité à l'eau :

L'insensibilité à l'eau dépend de deux facteurs :

- ✓ L'adhésivité du liant aux granulats.
- ✓ L'absence d'éléments argileux.

I.7.4. La durabilité :

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

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

- ✓ La résistance aux efforts tangentiels et au poinçonnement.
- ✓ Une bonne rugosité.
- ✓ L'imperméabilité à l'eau.

I.8. La durée de vie de l'enrobé

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

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

I.9. Fabrication des enrobés bitumineux

La fabrication de l'enrobé s'effectue aux alentours de 160°C à 180°C selon la classe du bitume dans des centrales d'enrobage.

Ces centrales appelées aussi postes sont composées de plusieurs parties :

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

I.10. Transport et mise en œuvre

Les enrobés sont déposés par les camions d'approvisionnement, conservant l'enrobé à la température d'application idéale en fonction de la classe du bitume dans les trémies de stockage puis nivelés, et pré compactés par la table.

Le compactage final est ensuite assuré par des compacteurs deux billes, en pratiquement un nombre de passage défini en fonction de la porosité et de la rugosité de surface à atteindre.

I.11. Sollicitation dans les chaussées

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

- ✓ Les sollicitations du trafic.
- ✓ Les sollicitations climatiques.

- ✓ Les sollicitations chimiques.

I .11.1. Les sollicitations mécaniques (effet de trafic)

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

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

Les tractions répétées à la base des couches sous l'effet du passage des véhicules créent des « micros » dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Ce phénomène est la « fatigue » qui s'observe pour de nombreux matériaux.

Les effets du trafic ont été abondamment étudiés de par le monde et les publications relatives y sont abondantes.

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

I .11.2. Les sollicitations climatiques (effet de la température)

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

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

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

I .11.2. Les phénomènes chimiques

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

I.12. Conclusion

Comme nous avons vu précédemment les enrobés bitumineux sont constitués de deux éléments principaux : le bitume et les granulats.

La liaison entre ces deux composants est très complexe et pour formuler un enrobé convenable plusieurs critères sont à prendre en considération telle que le trafic, les conditions climatiques et les matériaux existants...etc.

Le mélange bitume-agrégat obtenu doit avoir:

- 1-** suffisamment de bitume pour donner un pavage durable
- 2-** une stabilité suffisante pour satisfaire les exigences de trafic
- 3-** suffisamment de vides pour pallier aux phénomènes d'expansion liés aux propriétés spécifiques du bitume (dilatation thermique)
- 4-** une maniabilité suffisante pour permettre une mise en place efficace du mélange.

LES POLYMERES

Chapitre II : LES POLYMERES**II.1-Définition :**

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

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

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

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

II.2- Provenance :

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

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

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

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

✓ La polyaddition :

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

✓ Polycondensation :

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

II.3-Structure physico- chimique

II.3.1-Structure primaire

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

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

La macromolécule ramifiée est présentée par la figure 1.

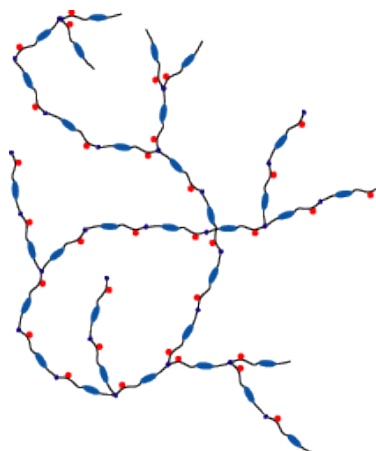


Figure II.1:Schéma d'une macromolécule ramifiée

II.3.2-Structure bi ou tridimensionnelle

Il existe parfois des liaisons covalentes vers d'autres morceaux de chaînes polymères, les molécules sont alors dites branchées ou ramifiées.

Lorsque de nombreuses chaînes (ou chainons) ont été réunies par un certain nombre de liaisons covalentes, elles forment alors un réseau réticulé.

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

La macromolécule réticulée est présentée par la figure 2.

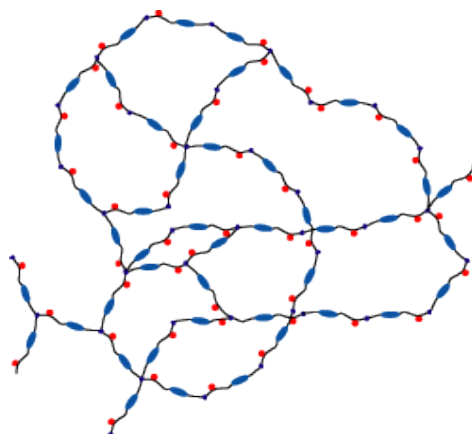


Figure II.2:Schéma d'une macromolécule réticulée

II.4-Utilisation:

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

- ✓ Le renforcement, la séparation et le drainage.
- ✓ Les revêtements et les équipements routiers.
- ✓ La protection des ouvrages par peinture ou revêtement plastique.
- ✓ Les appareils d'appui.
- ✓ L'emballage.
- ✓ Le cosmétique.
- ✓ Les revêtements de surface.
- ✓ Les peintures et vernis.
- ✓ Les films, fibres textiles et matériaux composites.
- ✓ Les pneumatiques.

II.5- Types des Polymères:

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

a- Polymères naturels:

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

b- Polymères artificiels (régénérés):

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

c- Polymères synthétiques:

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

II.6 - Les propriétés des polymères :**II.6.1 - Thermoplastique :**

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

II.6.2 - Thermodurcissables :

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

II.6.3- Elastomères :

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

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

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

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

Les élastomères sont classés en trois familles principales :

- ✓ Elastomères à usages généraux tels que :
 - Le caoutchouc naturel (NR).
 - Le poly isoprène (IR).
 - Le copolymère butadiène-styrène (SBR).
- ✓ Elastomères à usages plus spécifiques tels que :
 - Le polychloroprène (CR).
 - Le copolymère acrylonitrile-butadiène(NBR).
- ✓ Elastomères thermoplastique (TPE) :

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

II.7 - Comportement thermique

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

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

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

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

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

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

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

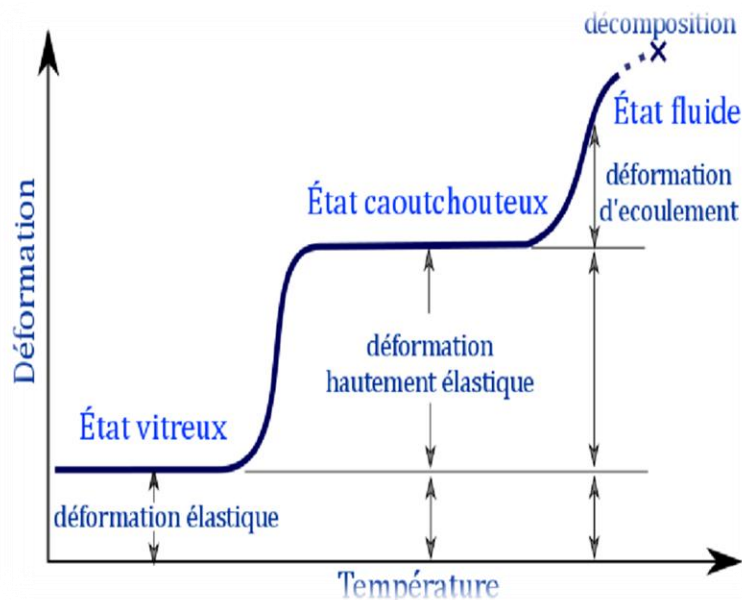


Figure II.3:Diagramme de déformations des polymères

II.8 - La modification des enrobés par des polymères :

Plusieurs études ont montrées que la modification des enrobés par des Polymères ou par déchet Polymériques offre une solution pour corriger le problème de l'ornièrage et de minimiser les désordres de la chaussée sur des formules d'enrobés.

Les Polymères sont utilisé pour la modification des liants bitumineux et ceci depuis plus de 40 ans afin d'améliorer la maniabilité du liant pendant la construction et sa résistance aux déformations de services.

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

II.9 - Procédés de modifications :

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

- ✓ La modification du liant par l'ajout de polymères, pneus recyclés, produits chimiques et autres.
- ✓ La modification de l'enrobé en centrale par l'ajout l'additif de type polymère, poudre de pneus recyclés, etc...

II.9.1 - L'enrobé modifié par la méthode sèche :

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

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

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

II.9.2 - L'enrobé modifié par la méthode humide (bitume modifié):

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

II.10 - Recherche bibliographique sur les enrobés modifiés

II.10.1 - Etude réalisée par Kouidri Djamilia et Telili Mebarka

En 2017, une étude est réalisée par **Kouidri Djamilia** et **Telili Mebarka**, sur le thème :

« **Influence des déchets plastiques sur les performances des bétons bitumineux à base de sable de dunes** », le but de ce travail est d'étudier la possibilité de l'utilisation des matières plastiques recyclées pour valoriser les caractéristiques des bétons bitumineux qu'au lieu les polymères.

II.10.1.1 - Matériaux utilisés

II.10.1.1.1 - Le bitume

Le liant hydrocarboné utilisé dans ce travail provient des fondoirs de la centrale d'enrobage de

société Total sise à Ouargla type 40 /50.

II.10.1.1.2 - Les granulats

Le sable 0/3 utilisé c'est le sable de dunes de la région de **HASSI MESSAOUD**.

Graviers 3/8 et 8/15 provenant de la carrière d'**Ain Touta willaya de Batna**.

II.10.1.1.3. Poudrette plastique utilisée

Le polyéthylène utilisé dans ce projet c'est un polyéthylène base densité (PEBD).

II.10.1.2 - Les essais sur les matériaux

II.10.1.2.1 -Le bitume

- Pénétrabilité 25°C.
- Ramollissement bille.
- Densité relative.

II.10.1.2.2 -Les granulats

- Analyse granulométrique.
- Essai d'équivalent de sable.
- Essai de propreté superficielle.
- La masse volumique.
- Essai Los Angeles.
- Essai Micro Deval.

II.10.1.2.3 -Les enrobés

- Essai Marshall.
- Essai Duriez.

II.10.1.3 - Résultats des essais et interprétations

II.10.1.3.1 -Le bitume

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bitume de base sont résumées dans le tableau 1.

Tableau II.1: Résultats des caractérisations du bitume

Essai	Résultat	Spécifications
Pénétrabilité 25°C	41	40 à 50
Ramollissement	49	47 à 60
Densité relative	1.006	1.00 à 1.10

II.10.1.3.1.1 -Interprétations des résultats

D'après les résultats on peut dire que notre liant est un bitume pur de classe 40/50.

II.10.1.3.2 -Les granulats

Les résultats des essais de caractérisations des granulats sont résumés dans le tableau 2.

Tableau II.2: Résultats des caractérisations des granulats

Essai	0/3	3/8	8/15	Spécification
Propreté superficielle (%)	-	0.95	0.73	$\leq 2\%$
Equivalent de sable	94.16%	-	-	≥ 45
Aplatissement	-	17.41	14.92	$\leq 20\%$
Masse volumique absolue (g/cm ³)	1.68	1.53	1.59	
Masse volumique apparente (g/cm ³)	2.60	2.68	2.67	-
M D E	-	21.5	19.5	$\leq 20\%$
L A	-	24.15	24	$\leq 25\%$

II.10.1.3.2.1 -Interprétations des résultats

Les résultats obtenus montrent que les granulats analysés à des caractéristiques répondent aux normes, et peuvent être utilisés dans la confection d'un béton bitumineux.

II.10.1.3.3 -Poudrette plastique utilisée

Le polyéthylène utilisé présente les caractéristiques physiques résumées dans le tableau 3.

Tableau II.3: Caractéristiques physiques de la poudrette utilisée

Caractéristiques physiques	Résultat
Allongement à la rupture	900
Allongement à la rupture transversale	1100
Allongement à la traction longitudinale	225 kg/cm ³
Résistance à la transversale	140 kg/cm

Dart test	400 grs
Module d'élasticité	1900 gr/cm ²
Grade (mellt, flow, index)	0.35 à 0.45
Rétractabilité à chaud longitudinale	75%
Rétractabilité à chaud transversale	25%

II.10.1.4 - Dispositive experimental

Après avoir déterminé la teneur en liant optimale, on a procédé à la confection des éprouvettes d'enrobés bitumineux modifiés à la poudrette plastique.

Le but est d'effectuer une étude comparative entre les caractéristiques mécaniques (Marshall) des produits bitumineux obtenus à partir de deux modes modification qui sont :

- **Mode A** : compensation du sable de dunes à la place du sable 0/3 avec des pourcentages de teneur en liant déterminés.
- **Mode B** : compensation de la poudrette plastique à la place du sable de dunes suivant des pourcentages déterminés avec la teneur en liant optimale obtenu dans le Mode A.

II.10.1.5 - Résultats et interprétation

II.10.1.5 .1- Essai Marshall

- **Mode A** : Les résultats d'essai Marshall pour le Mode A sont résumés dans le tableau 4.

Tableau II.4: Les résultats d'essai Marshall pour le Mode A

BB	Bitume	Vv (%)	Compacité (%)	Stabilité (kN)	Fluage (mm)
BB ordinaire	5.92	3.68	97	13.26	3.4
BB de SD	5.36	18.70	81	9.335	1.4

II.10.1.5.1.1 - Interprétations des résultats

L'étude de formulation de béton bitumineux ordinaire à la méthode Marshall nous a dévoilé que le pourcentage optimale du bitume est de 5.92, elle donne une stabilité maximale de 13.26 KN et un fluage de 3.4 mm et une compacité de 97%.

La deuxième étude de formulation de béton bitumineux à base de sable de dune par la méthode Marshall nous a dévoilés que le pourcentage optimale du bitume est de 5.36, elle donne une stabilité maximale de 9.335 KN et un fluage de 1.4 mm et une compacité relativement faible 81%.

Le présent résultat de modification nous montre qu'une substitution de sable concassé par du sable de dune fait diminuer la stabilité du mélange et la compacité, mais par contre augmente la résistance au fluage (le fluage est diminué en valeur).

Le pourcentage de vide pour BB à base de sable de dune est élevé en comparaison avec le BB ordinaire à cause des propriétés physiques de sable comme nous savons que les sables naturel sont poreux donc ces sables absorbent beaucoup de bitume.

- **Mode B** : Les résultats d'essai Marshall pour le Mode B sont résumés dans le tableau 5.

Tableau II.5: Les résultats d'essai Marshall pour le Mode B

BB	DPL (%)	Bitume	Vv (%)	Compacité (%)	Stabilité (kN)	Fluage (mm)
BB de SD	0	5.36	18.70	81	9.335	1.4
BB modifié	5	5.36	7.92	92.08	17.34	3.661

II.10.1.5.1.2 - Interprétations des résultats

D'après les résultats obtenus on voit clairement que le BB modifié par le mode B de modification est plus performant que le BB à base de SD et le BB ordinaire.

La teneur en déchets plastique 5% pour la confection de l'enrobé modifié par le mode B présente de meilleurs résultats par rapport au mélange témoins avec :

- Une augmentation de la stabilité.
- Une augmentation de la compacité.
- Une augmentation du fluage.

II.10.1.5 .2- Essai Duriez

- **Mode A** : L'essai Duriez est réalisé sur les éprouvettes qui contiennent un dosage de bitume optimum correspondant à la meilleure stabilité Marshall.

Les résultats d'essai Duriez pour mode A sont résumés dans le tableau 6.

Tableau II.6: Les résultats d'essai Duriez pour le Mode A

Type de BB	Bitume (%)	W (%)				r (kg/cm ²)	R (kg/cm ²)	r/R
		P :1	P :2	P :4	P :5			
BB ordinaire	5.92	P :1	P :2	P :4	P :5	118.32	134.64	0.878
		1.01	1.02	1.33	1.66			
BB de sable de dune	5.36	P :1	P :2	P :4	P :5	63.35	64.33	0.98
		1.01	1.02	2.37	2.65			

- **Mode B :** L'essai Duriez est réalisé sur les éprouvettes qui contiennent un dosage de bitume et pourcentage des déchets optimum correspondant à la meilleure stabilité Marshall.

Les résultats d'essai Duriez pour mode A sont résumés dans le tableau 7.

Tableau II. 7: Les résultats d'essai Duriez pour le Mode B

Type de BB	Bitume (%)	W (%)				r (kg/cm ²)	R (kg/cm ²)	r/R
		P :1	P :2	P :4	P :5			
BB modifié	5.36	P :1	P :2	P :4	P :5	68.780	85.467	0.80
		1.01	1.02	2.076	1.43			
BB de sable de dune	5.36	P :1	P :2	P :4	P :5	63.35	64.33	0.98
		1.01	1.02	2.37	2.65			

II.10.1.6 – Conclusion général

Les enrobés modifiés selon les deux modes ont des bonnes, fluage mais le mode B qui donne des meilleurs résultats pour la stabilité Marshall, et le pourcentage de vide aussi que la compacité car le déchet additif joue un rôle de fillers dans le squelette granulaire en s'infiltrant dans les vides entre les granulats, alors le mode B est le plus efficace.

Donc il est possible d'améliorer certains performances mécaniques des enrobés par l'ajout des déchets plastiques.

Partie II :

ETUDE EXPERIMENTALE

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

- ✓ Les essais de caractérisations sur granulats et bitume.
- ✓ L'élaboration de formulation de l'enrobé.
- ✓ Confection des éprouvettes bitumineuses.
- ✓ Le procédé de modification de l'enrobé par l'ajout de déchet plastique.
- ✓ Essais mécanique sur l'enrobé modifié (Marshall 30min).

MATERIAUX ET CARACTERISATIONS

III.1. Introduction

Dans cette partie, nous exposons les différentes étapes que nous avons suivies pour réaliser le travail expérimental. Les essais sur les granulats et le bitume ont été réalisés selon les normes. La formulation de l'enrobé a été effectuée selon les normes et Pour cela, le plan de travail que nous avons élaboré est partagé en cinq étapes :

1er étape : Analyse des composants (granulats, bitume et l'additif).

2eme étape : Interprétation des résultats.

3eme étape : Elaboration de formulation de l'enrobé et de l'enrobé modifié.

4eme étape : Confection des éprouvettes bitumineuses et essai Marshall.

5eme étape : Résultats d'essai Marshall, comparaison entre les résultats de l'enrobé et l'enrobé modifié et conclusion.

III.2. Les matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la confection de l'enrobé sont :

- Les granulats.
- Le bitume.
- L'additif (déchet plastique).

III.2.1. Les granulats

Dans cette étude trois classes granulaires 0/3,3/8,8/15 ont été utilisées .Elle nous ont été fournis par l'entreprise des travaux publics **BOUDJELEL MOHAMED** de **MEDEA**.

III.2.1.1. Origine des granulats

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des enrobés bitumineux (0/14) destinées aux couches de roulement.

Tableau III.1:Origine des granulats

Matériau	Carrière
Sable 0/3	Kaf-Laassel– Médéa
Gravier 3/8	
Gravier 8/15	

III.2.2. Le bitume

Les bitumes purs utilisés dans notre étude expérimentale proviennent de la raffinerie de l'unité de production NAFTAL, il s'agit d'un bitume pur de grade (40/60) souvent utilisé en Algérie en enrobés pour la confection des couches de roulement.

III.2. 3. L'additif (le déchet plastique)

III.2.3.1. Matière plastique :

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

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

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

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

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

La préparation du déchet plastique est faite au laboratoire route de l'ingénieur **MAKHLOUFMOUSSA**.

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

III.3. Les essais sur les matériaux

Les essais ils ont fait au niveau de laboratoire route de l'ingénieur **MAKHLOUF MOUSSA**.

III.3.1. Les essais réalisés sur les granulats

Un programme d'essais conformément aux normes en vigueur qui sont :

- ✓ Analyse granulométrique (NA 2607).[7]
- ✓ Equivalent de sable (NFP 18-598).[9]
- ✓ Propreté superficielle (NFP 18-591).[13]
- ✓ Essai Micro Deval (NA 5129).[10]
- ✓ Essai Los – Angeles (NA 5130).[11]
- ✓ Essai coefficient d'aplatissement (NA 256).[12]
- ✓ La densité (NA 255).[8]

III.3.1.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique sert à déterminer la grosseur et le pourcentage en poids de différentes formes de granulats, et la classe granulaire d'un granulat.

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

On trace la courbe granulométrique sur un graphique comportant en ordonnée le pourcentage des tamisât sous les tamis dont les mailles D sont indiquées en abscisse selon une graduation logarithmique.



Figure III.1: Matériel de l'essai granulométrique

III.3.1.2. Essai d'équivalent de sable à 10% de fines

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable effectué sur une fraction 0/3 mm du matériau à étudier.

On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants :

Hauteur h1 : sable propre+ élément fine (floculat).

Hauteur h2 : sable propre seulement.

$$ES(\%)=100*\frac{h2}{h1}$$

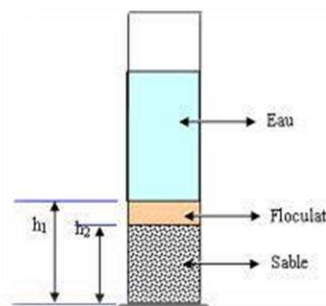


Figure III.2:Schéma d'essai d'équivalent de sable

III.3.1.3. Essai de propreté superficielle

But de l'essai

La propreté superficielle désigne :

- d'une part, la teneur en fines argileuses ou autres particules adhérentes à la surface des grains, ce qui se vérifie sur le chantier par les traces qu'elles laissent lorsqu'on frotte les granulats entre les mains.
- d'autre part, les impuretés susceptibles de nuire à la qualité du béton, parmi lesquelles on peut citer les scories, le charbon, les particules de bois, les feuilles mortes, les fragments de racine.

III.3.1.4 Les essais de résistance à l'usure et au choc

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

III.3.1.4.1. Mesure du coefficient Micro Deval

Par frottement, le pneu des véhicules tendent à user les granulats ce qui tend à produire des éléments fins. Pour étudier ce phénomène en laboratoire, on se sert de « l'essai Micro Deval ». Cet essai est représentatif de la résistance à l'usure par frottement.

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

Après 12000 rotations en 2 heures, le pourcentage d'éléments fins passant au tamis de 1.6mm représente le coefficient Micro Deval (MDE).

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

M : masse initial avant essai (500g)

m : masse des granulats après essai, lavage au tamis 1.6mm et séchage.



Figure III.3:Appareil Micro Deval

III.3.1.4.2. Mesure du coefficient Los Angeles

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

Pour étudier ce phénomène en laboratoire, on se sert de l'essai « **Los Angeles** ».

But de l'essai :

Ce mode opératoire est permis de mesurer les résistances combinées à la fragmentation par chocs par frottements réciproques des éléments d'un granulat. Il s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des assises de chaussée, y compris les couches de roulement.

Le matériau évolue pendant l'essai, d'une part par suite du choc des boulets sur le granulat (rupture fragile des éléments), d'autre part par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine de 70cm de diamètre et de 50cm de longueur en rotation et sur les boulets.

Procédure de l'essai :

L'essai consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six granularités-types, de la classe granulaire 4/6,3 mm – 6,3/10 mm – 10/14 mm – 10/25 mm – 16/31,5 mm et 25/50 mm, se rapprochant au mieux de la granularité du matériau tel qu'il sera mis en œuvre.

Le poids de la charge de boulets varie en fonction du type de granularité.

Après l'essai les matériaux sont criblés au tamis 1.6mm.

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

$$LA = 100 * \frac{M-m}{M}$$

M : masse initial des granulats avant essai (5000g)

m : masse des granulats après essai, lavage au tamis 1.6mm et séchage.



Figure III.4:Appareil Los Angeles

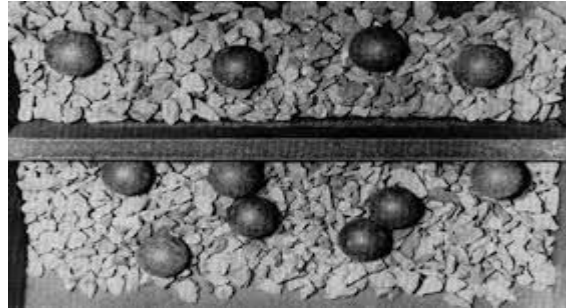


Figure III.5:Schéma des boulets varie

III.3.1.5.Coefficient d'aplatissement

But de l'essai :

La mesure du coefficient d'aplatissement (CA) caractérise la forme des granulats.

Le CA s'obtient en faisant une double analyse granulométrique par voie sèche, en utilisant successivement, et pour le même échantillon de granulats :

- Une série de tamis normalisés à mailles carrées.
- Une série de tamis (grille) à fente parallèles de largeurs normalisées.

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

Procédure de l'essai :

L'essai consiste en un double tamisage :

- 1-Peser et éliminer tous les grains de la fraction inférieure à 4mm et supérieure à 80mm.
- 2-Peser et retenir séparément tous les grains de fraction d_i/D_i comprise entre 4 mm et 80 mm.
- 3-Tamisier chaque classe granulaire d/D à l'aide d'une grille à fentes parallèles d'écartement $E= D/2$.
- 4-Peser les passants à travers chaque fente.

Pour une classe granulaire d_i/D_i donnée, on peut définir un coefficient d'aplatissement partiel comme suit : **$CA_i = 100m_i/M_i$**

Avec :

$M_i = \sum R_i$: Somme des masses des classes granulaires d_i/D_i .

m_i : masse passant à travers le tamis à fente d'écartement $E= D/2$.

III.3.1.6. Densité réel

La densité réel des agrégats et ordinairement déterminée pour deux raisons :

- Pour permettre le calcul des vides dans le béton bitumineux à l'état compacté.
- Pour ajuster les quantités de fractions constituantes de l'agrégat dans le béton

Bitumineux, lorsque la densité relative de ces fractions constituantes varient sensiblement.

III.3.2. Les essais sur le bitume

Les essais suivants ont été réalisés sur le bitume :

- ✓ Pénétrabilité (NA 5192).[4]
- ✓ Point de ramollissement (température bille anneau) (NA 2617).[5]
- ✓ Ductilité à 25°C (NA 5223).[6]

III.3.2.1. Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NA 5192)

Cet essai permet de connaître la dureté du bitume sur la base de la pénétrabilité dans un échantillon de bitume évalué au dixième de millimètre d'une aiguille normalisée supportant une masse de 100 g durant 5 secondes à une température de 25 °C.



Figure III.6: Dispositif de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille

Plus le bitume est dur plus la pénétrabilité est faible, cet essai explique le nom commercial du bitume et donne sa classification.

III.3.2.2. Essai de ramollissement (NA 2617)

Cet essai consiste à mesurer le point de ramollissement ; un anneau de cuivre rempli de bitume sur lequel est placée une bille en acier, est immergé dans de l'eau, on élève la température de 5 °C par minute, la température de ramollissement est celle où la bille entraîne le bitume se trouvant dans l'anneau au fond du récipient (ou sur une profondeur fixe). Cet essai renseigne sur la consistance du bitume.



Figure III.7:Appareil digital de ramollissement (Bille et anneau)

III.3.2.3. Essai de ductilité à 25°C (NA 5223)

Cet essai consiste à mesurer l'allongement, à l'instant précis de sa rupture d'une éprouvette de forme déterminée, étirée à une vitesse de 50mm/min, et à une température de 25°C. La mesure de la ductilité du liant permet de s'assurer du non fragilité de ce dernier.

III.3.3. Les essais sur l'additif (le déchet plastique)

III.3.3.1. La densité

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

III.4. Résultats des essais sur les granulats

III.4.1. Analyse granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés dans le tableau 2.

Tableau III.2: Résultats de l'analyse granulométrique

Tamis en (mm)	Tamis en %		
	0/3	3/8	8/15
20	100	100	100
16	100	100	78.60
12.5	100	100	44.93
10	100	100	17.87
8	100	95.80	4.33
6.3	100	71.70	0.4
5	99.20	38.70	0.07
4	93.40	19.3	0.00
2	61.40	1.70	0.00
1	39.60	0.6	0.00
0.5	31.5	0.00	0.00
0.4	25.20	0.00	0.00
0.315	19.84	0.00	0.00
0.2	17.80	0.00	0.00
0.1	15.00	0.00	0.00
0.08	14.80	0.00	0.00

Ce qui nous permettons de tracer les courbes de chaque fraction granulaire comme indiqué sur la figure 8.

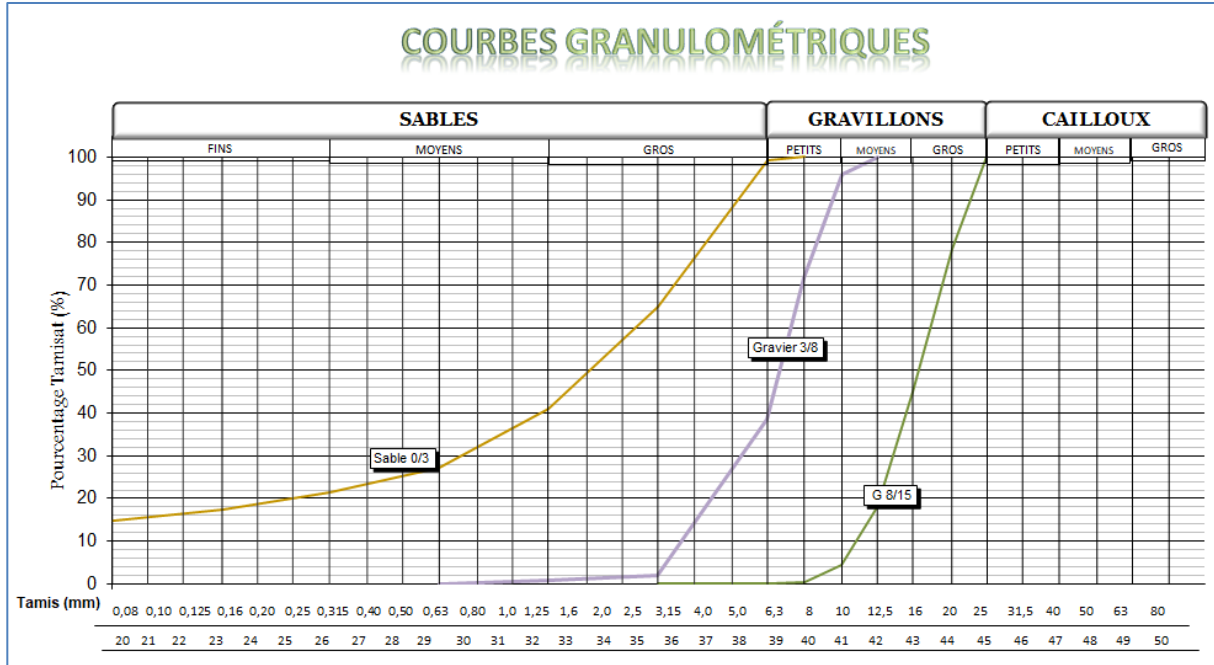


Figure III.8: Courbes granulométriques des fractions granulaires

III.4.1.1. Interprétation des résultats

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

III.4.2. Essai d'équivalent de sable à 10% de fines

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau III.3: Résultats de l'essai d'équivalent de sable

Sable	0/3	Spécification
ES (%)	60.63%	≥45%
Teneur en fines (%)	16.80%	>15%

III.4.2.1. Interprétation des résultats

Le sable 0/3 est propre pour son utilisation.

III.4.3. Essai de propreté superficielle

Les résultats d'essai de propreté sont illustres dans le tableau 4

Tableau III.4: Résultats de l'essai de propreté

Echantillon	3/8	8/15	Spécification
Propreté (%)	1.93	1.07	≤ 2%

III.4.3.1. Interprétation des résultats

La propreté superficielle des granulats est acceptable.

III.4.4.Essai Micro Deval

Les résultats de l'essai Micro Deval en présence d'eau sont mentionnés sur le tableau 5.

Tableau III.5:Résultats de l'essai Micro Deval

Echantillon	Micro Deval	Qualité
3/8	18	Bon
8/15	16	Bon

Les critères de qualité concernant l'attrition sont donnés dans le tableau 6.

Tableau III.6:Les critères de l'essai Micro Deval

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

III.4.5.Essai Los Angeles

Les résultats de l'essai de résistance aux chocs « LA » sont mentionnés sur le tableau 7.

Tableau III.7:Résultats de l'essai Los Angeles

Echantillon	Los Angeles	Qualité
3/8	23	Bon
8/15	21	Bon

Concernant la dureté, les critères de qualités sont donnés dans le tableau 8.

Tableau III.8:Les critères de l'essai Los Angeles

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

III.4.5.1. Interprétation des résultats

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

III.4.6. Coefficient d'aplatissement

Les résultats des essais d'aplatissement sont illustrés dans le tableau 9.

Tableau III.9: Résultats de Coefficient d'aplatissement

Echantillon	Provenance	Coefficient (A%)	Spécification
3/8	Kaf-Laassel - Médéa	17.41	≤ 20%
8/15	Kaf-Laassel - Médéa	14.92	≤ 20%

III.4.7. Les résultats des essais

Les résultats des essais de caractérisations des granulats sont récapitulés dans le tableau 10.

Tableau III.10: Résultats des caractérisations des granulats

Essai	Référence	0/3	3/8	8/15	Spécification	Qualité
Propreté superficielle (%)	NFP18-591	-	1.93	1.07	≤ 2%	Propre
Equivalent de sable à 10% de fin (%)	NFP18-598	60.63%	-	-	≥ 45	Sable propre
Aplatissement	NA 5125	-	17.41	14.92	≤ 20%	Conforme
Densité	NA 255	2.67	2.678	2.684	-	-
M D E	NA 5129	-	18	16	≤ 20%	Conforme
L A	NA 5130	-	23	21	≤ 25%	Conforme

III.4.7.1. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que les granulats analysés à des caractéristiques répondent aux normes, et peuvent être utilisés dans la confection d'un béton bitumineux semi grenu.

III.5. Résultats des essais sur le bitume

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bitume de base sont résumées dans le tableau 11.

Tableau III.11: Résultats des caractérisations du bitume

Caractéristique	Norme	Résultat	Recommandations
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	NA 5192	43	40 à 60
T.B.A (°C)	NA 2617	52	48 à 56
Ductilité à 25°C (cm)	NA 5223	Sup100	Sup60

III.5.1. Interprétation des résultats

Les résultats obtenus montrent que le bitume analysé a des caractéristiques répondant aux normes.

FORMULATION DE L'ENBROBE ET L'ENROBE MODIFIE

IV.1-Introduction

Les mélanges hydrocarbonés sont des mélanges de granulats et de liants hydrocarbonés (bitume) dosé dans des proportions convenables :

- Les granulats sont responsables de la résistance de l'enrobé.
- Le bitume a pour but d'assurer la liaison entre ces derniers. Il confère aussi au mélange ses propriétés viscoélastiques.

Beaucoup d'interrogations se posent à cet égard, quel est le choix de la granulométrie, la forme des agrégats et dans quelles proportions faut-il les combiner pour pouvoir répondre à l'usage auquel ils sont destinés ?

De nombreuses recherches ont été menées dans ce sens dans le nombreux pays, qui a bien révélé l'importance de certains paramètres exerçant une influence sur les propriétés de la composition des mélanges hydrocarbonés ainsi que leurs propriétés mécaniques.

Dans ce travail on a établi :

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

Les fuseaux limites tels que définis par les spécifications sont donnés sur le tableau 1

Tableau IV.1:Fuseau de référence du BB 0/14 semi grenu

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

IV.2- Détermination de la courbe granulométrique du mélange

L'objectif visé est de maîtriser la disposition granulaire du squelette minéral et choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

À partir des courbes moyennes des classes granulaires, on calculera la courbe du mélange minéral, 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, le tableau suivant présente la composition granulaire proposée dans ce projet d'étude.

Tableau IV.2: Les pourcentages pondéraux du mélange

Fractions	Provenance	Pourcentage
0/3	Kaf-Laassel - Médéa	40%
3/8		30%
8/15		30%

POURCENTAGE DES DIFFERENTES FRACTIONS GRANULAIRES DANS LA COMPOSITION DE BB

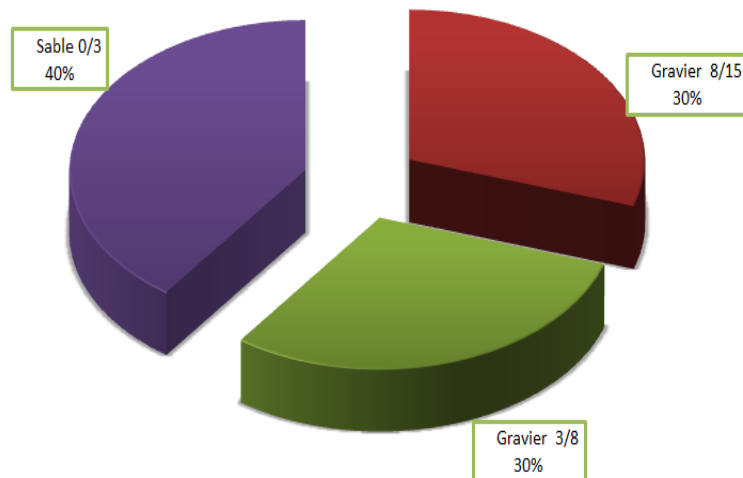


Figure IV.1: Pourcentage granulaire du mélange

De ces pourcentages pondéraux des granulats nous avons tracé la courbe du mélange de BB, qui est représenté sur la figure 2.

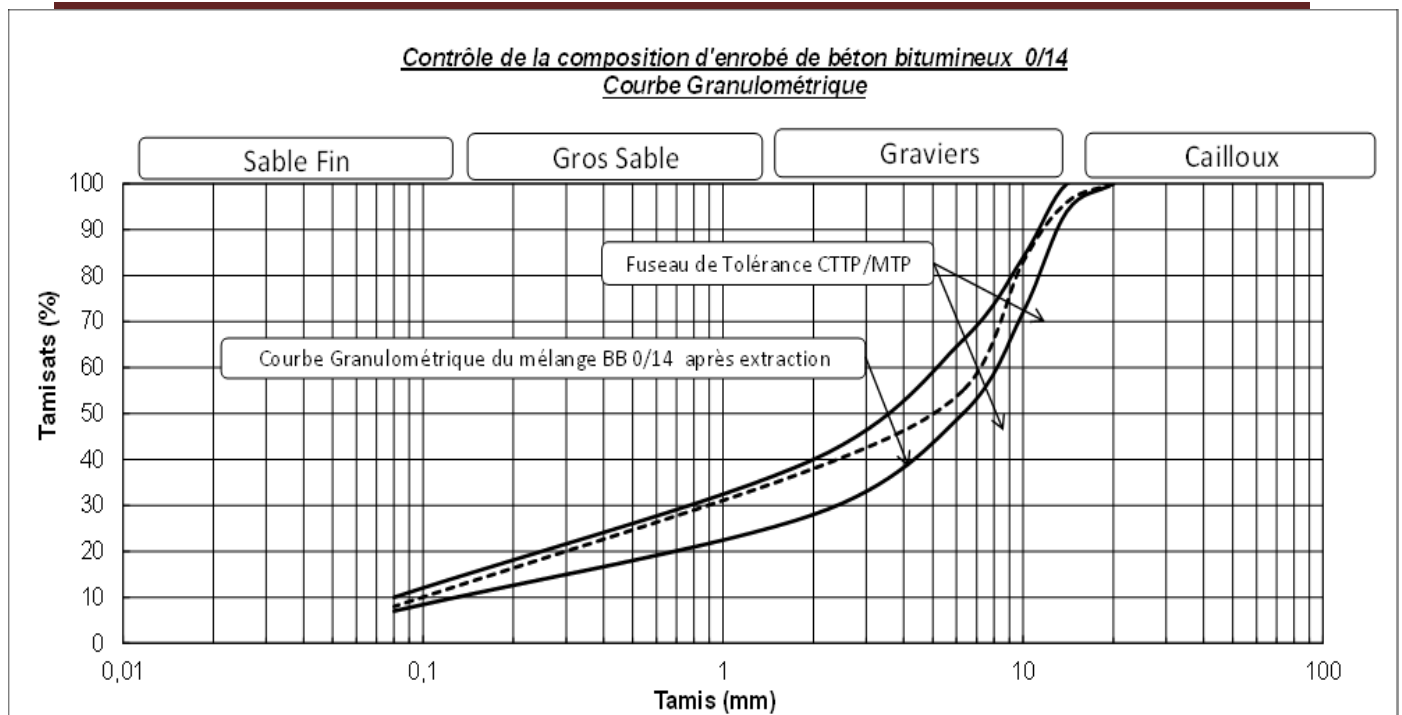


Figure IV.2: Courbe granulométrique du mélange 0/14

IV.3- Détermination des teneurs en bitume

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats notée Σ et exprimée en m^2/kg , c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères.

$$TL = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec

$$\alpha = 2,65 / MvRg$$

K : module de richesse.

α : coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats

« $MvRg$ ».

Σ : surface spécifique conventionnelle (m^2/kg).

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

G : proportion pondérale des éléments supérieurs à 6.3 mm → **G = 45%**.

S : proportion pondérale des éléments compris entre 0.315 mm et 6.3 mm → **S = 34.9%**.

s : proportion pondérale des éléments compris entre 0.08 mm et 0.315 mm → **s = 12.1%**.

f : proportion pondérale des éléments inférieure à 0.08 mm → **f = 8%**.

On obtient une valeur de la surface spécifique $\Sigma=13,16\text{m}^2/\text{kg}$

Coefficient correcteur α :

Le coefficient de correction α destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats si cette masse volumique est égale à 2,65 g/cm, $\alpha = 1$.

Dans notre cas $M_v=2.66$ alors $\alpha = 0.996$.

Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 3:Résultats des calculs

MvRg	Σ	$\sqrt[5]{\Sigma}$	α
2.66	13.16	1.6745	0.996

IV.4- Détermination de la teneur en liant en fonction du module de richesse

Le module de richesse k qui caractérise l'épaisseur moyenne de fin autour des granulats peut prendre les valeurs comprises entre 3,45 et 3,9 dans le cas d'un béton bitumineux.

Tableau IV. 4:Teneurs en bitume retenues

La formule de teneur en liant : $TL=K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$			
Module de richesse	3.45	3.60	3.75
Coefficient correcteur	0.996		
Surface spécifique (m ² /kg)	11.78		
Teneur en liant (%)	5.75	6.00	6.25

IV.5- Choix de la formule optimale

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

IV.5.1- Essais de Marshall

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 (50 coups de marteau appliqués en 55 secondes environ sur chaque face de l'éprouvette).

La « stabilité » Marshall (SM) : est la charge maximale atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette, exprimé en kilo newton.

Le « fluage » Marshall (FM) : est l'affaissement de cette même éprouvette jusqu'à sa rupture par compression, exprimé en millimètre.

Le quotient Marshall « QM » : est un indicateur pour la résistance aux déformations, permanentes, contraintes de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux.

Cet essai s'applique à tous les enrobés à chaud ne comportant pas de granulats de dimensions supérieures à 20mm.

a)- Principe de l'essai

L'essai consiste à compacter des éprouvettes par damage selon un processus déterminé, puis les soumettre à un essai de compression (diamètre) suivant une génératrice dans des conditions définies.

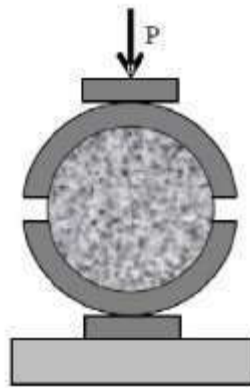


Figure IV. 3: Deux mâchoires semi-cylindriques

b)- Mode opératoire

- Mettre à l'étuve le mélange retenu d'un poids total dépendant du nombre de moule ainsi que le bitume et les moules Marshall à une température spécifiée pendant 2 heures (Figure 4).



Figure IV.4: Etuve de chauffage

- Sortir de l'étuve la cuve contenant le mélange granulaire et la poser sur la plaque chauffante ainsi que le bitume.
- Peser la quantité de bitume relative à chaque mélange.
- Malaxer le mélange granulaire pour homogénéiser pendant 30 secondes.
- Peser et verser la quantité du liant préconisée en actionnant le malaxeur pendant 2 à 5 minutes.



Figure IV.5:Enrobé après malaxage

- Remplir le moule d'enrobé à raison de 1200g à 1g près



Figure IV.6:Remplissage des moules Marshall

- Compacter à la dame électrique à 50 coups par face.



Figure IV.7 : Dame Marshall

- Laisser refroidir le moule sous jet d'eau pendant 15 minutes.

- Démouler les éprouvettes et les laisser refroidir pendant 5 heures à une température ambiante.



Figure IV.8 : Epreuves démoulées

- Mesurer les dimensions des éprouvettes au 0.1mm près en 5 zones différentes (en hauteur).
- Préparer le bain-marie à $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.



Figure IV.9 :Bain-marie

- Immerger les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement dans l'eau à 60°C pendant 40 minutes, échelonné à 5 minutes par éprouvette.
- Sortir l'éprouvette du bain et la placer sur les mâchoires d'écrasement, l'ensemble est porté entre les plateaux de la presse réglée à une vitesse de 0.86mm/s.



Figure IV.10 : Ecrasement des éprouvettes

- Procéder à l'écrasement et lire la valeur en KN correspond à la charge maximale d'écrasement.
- Mesurer la valeur de l'affaissement de l'éprouvette selon son diamètre vertical au moment de la rupture (fluage en 1/10) mm à l'aide du pied à coulisses.

IV.6- Résultats et interprétation

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau IV. 5: Résultats de l'essai MARSHALL

Les formules	A	B	C	
Gravillon 8/15(%)		30		
Gravions 3/8 (%)		30		
Sable 0/3 (%)		40		
Module de richesse K	3.45	3.60	3.75	
Teneur en liant (%)	5.75	6.00	6.25	
Densité réelle	2.464	2.462	2.459	
Densité apparente	2.38	2.415	2.41	
Essai Marshall				Spécifications
Vides(%)	4	2	2	3 - 7
Stabilité (KN)	11.49	9.865	9.0095	> 10,5
Fluage (mm)	3.643	3.833	4.31	2 - 4
Quotient Marshall (kN/mm)	3.15	2.57	2.09	

D'après les résultats des essais effectués dans notre expérimentation au niveau de laboratoire du **Makhlouf Moussa**, nous remarquons que :

Les compacités des éprouvettes ne sont pas acceptables, à l'exception de la formule « A » où le pourcentage de vide est acceptable.

Les stabilités de MARSHALL ne sont pas conformes aux spécifications à l'exception de la formule « A » où la stabilité est acceptable.

La résistance au fluage de la formule « A » conforme à la spécification.

- La formule « A » présente des bonnes performances en termes de compacité, stabilité et fluage.

IV.7-L'enrobé modifié

La modification de l'enrobé a été faite par un déchet plastique à différentes teneurs à savoir 0.2, 0.4, 0.6, et 0.9%, nous avons pour cela utilisé la méthode sèche.

IV.7.1- Modification par la méthode sèche

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

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

IV.8-Confections des éprouvettes bitumineuses

Les fabrications des éprouvettes bitumineuses types Marshall ont été faites au laboratoire de l'ingénieur routier **MAKHLOUF MOUSSA**.

Le procédé a été conduit sur des éprouvettes cylindriques de hauteur 63.50mm et de diamètre 101.60mm, compactées à 50 coups par face, selon les conditions suivantes :

- ✓ L'ajoute du modifiant (déchet plastique) a été fait au poste d'enrobé par la méthode sèche.
- ✓ La masse de chaque éprouvette est d'environ 1200g.
- ✓ Compactage des éprouvettes à 50 coups par face.
- ✓ Démoulage des éprouvettes après l'opération de refroidissement sous un jet circulaire d'eau froide.

IV.8.1- L'essai Marshall

Effectué à la vitesse de 50 mm/min après avoir conservé les éprouvettes dans un bain marie porté à la température de 60°C pendant au moins 30 min, deux (02) éprouvettes ont été testées dans chaque cas.

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

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

Les résultats de l'essai Marshall pour chaque teneur en déchet plastique sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau IV.6: Résultats de l'essai MARSHALL en fonction de la teneur en déchet

Teneur en (%)	0	0.2	0.4	0.6	0.9
Stabilité (KN)	11.49	11.035	12.475	13.315	12.94
Fluage (mm)	3.643	3.02	2.77	4.7	4.765
Quotient (KN/mm)	3.15	3.65	4.50	2.83	2.71

IV.8.1.1-La stabilité Marshall

La figure IV.11 représente la variation de stabilité Marshall en fonction de la teneur en déchet plastique.

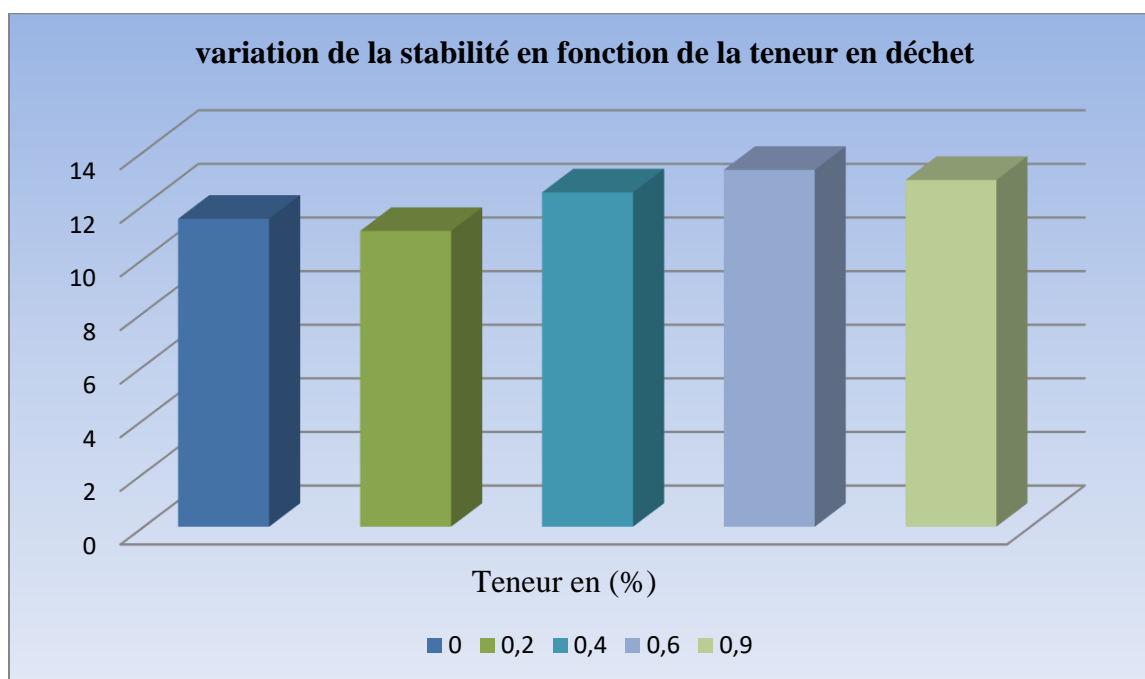


Figure IV.11: variation de la stabilité en fonction de la teneur en déchet plastique

IV.8.1.2-Interprétation des résultats

La stabilité Marshall sauf pour **0.2%** de déchet plastique, augmente et est supérieure à celle de l'enrobé témoin pour toutes les autres teneurs en déchet.

IV.8.1.3-Le fluage

La figure IV. 12représente la variation de fluage en fonction de la teneur en déchet plastique

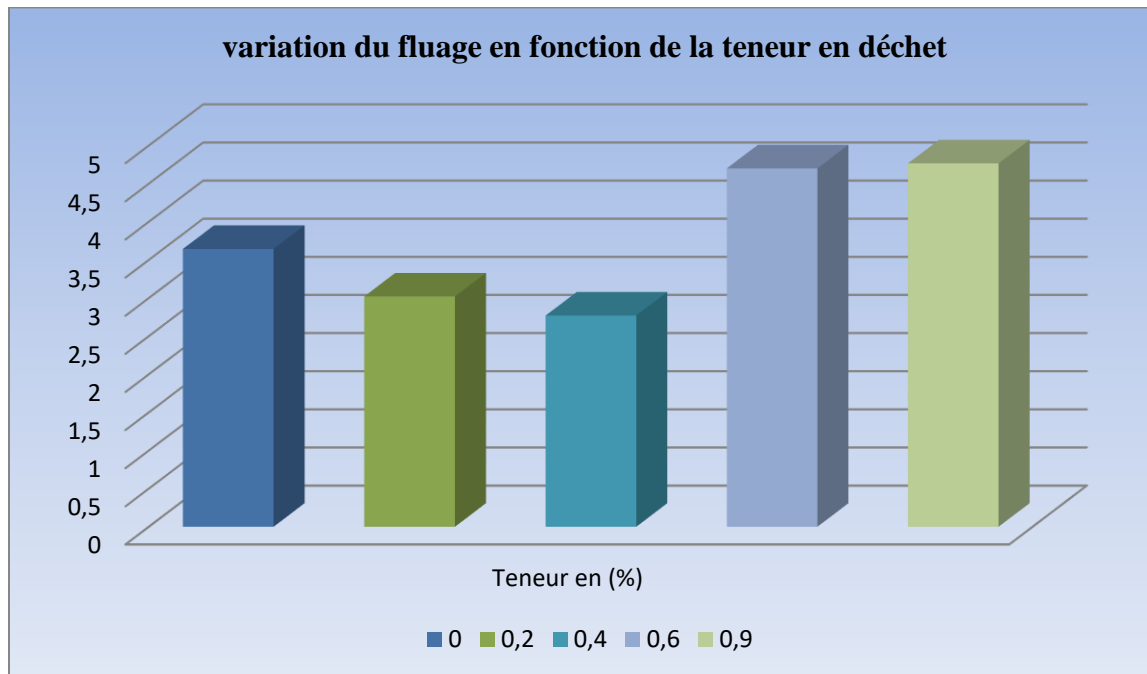


Figure IV.12: variation du fluage en fonction de la teneur en déchet plastique

IV.8.1.4-Interprétation des résultats

Le fluage Marshall diminue jusqu'à **0.4%** de déchet et reste dans la fourchette 2-4 mm.

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

IV.8.1.5-Le quotient Marshall

La figure IV.13représente la variation de quotient en fonction de la teneur en déchet plastique

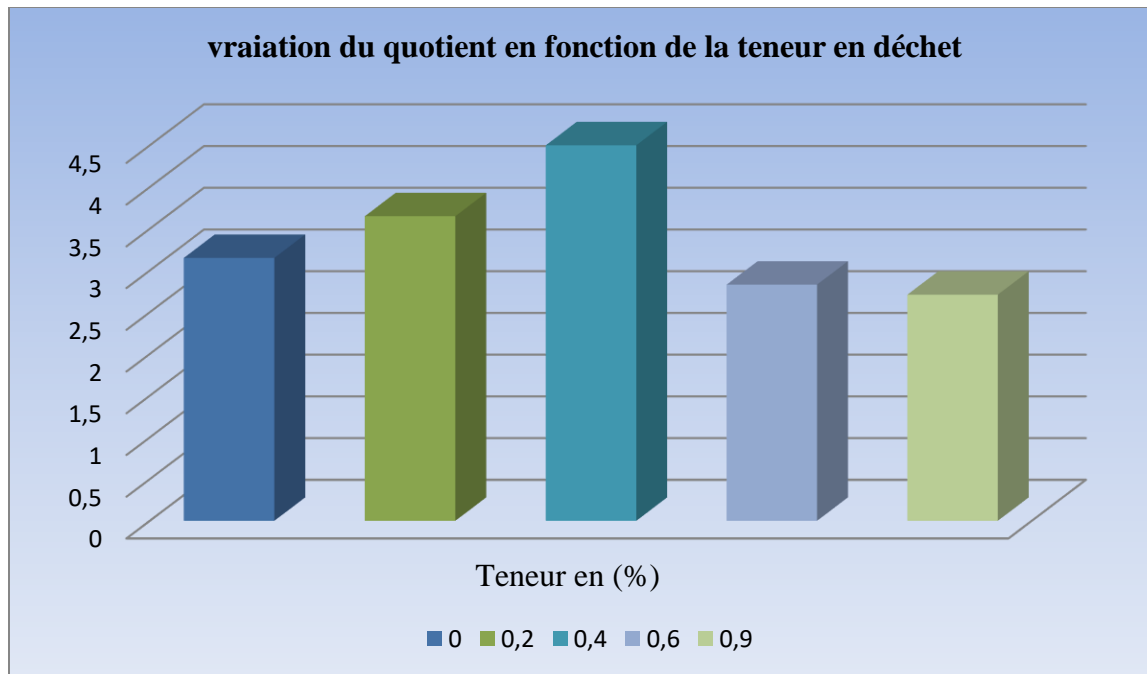


Figure IV.13: variation du quotient Marshall en fonction de la teneur en déchet plastique

IV.8.1.6-Interprétation des résultats

Pour les teneurs allant de **0.6%** à **0.9%** de déchet, le fluage était supérieur à 4mm, les enrobés sont à rejeter.

Entre **0%** et **0.4%** le quotient augmente jusqu'à atteindre un maximum à **0.4%** de déchet, la valeur du **QM** à **0.4%** est de **4.5**.

IV.9-Conclusion de la partie expérimentale

D'après les résultats nous concluons ce qui suit :

- Le polymère joue un rôle de fillers dans le squelette granulaire en s'infiltrant dans les vides entre les granulats, elle contribue donc à une amélioration des performances mécaniques.
- L'utilisation de déchet plastique à **0.4%** de teneur, peut améliorer certaines performances mécaniques (augmentation de la stabilité et quotient Marshall et diminution du fluage) pour l'essai Marshall par rapport aux autres enrobés bitumineux et qui affecte sur la durabilité des structures bitumineuses.

CONCLUSION GENERALE

La recherche d'une plus grande durabilité des enrobés bitumineux est la motrice principale des travaux de recherches et développement menés depuis une quarantaine d'années pour améliorer les propriétés des enrobés bitumineux.

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

- La qualité des matériaux de construction.
- La formulation qui permet un ajout de bitume suffisant.
- Un bon dimensionnement de corps de chaussée.

Mais toutes ces précautions n'ont pas réglé le problème des dégradations (l'orniérage par exemple), et pour cela deux procédés ont été explorés :

- La modification de la structure des bitumes à l'aide des polymères.
- L'ajout d'additifs aux enrobés.

Dans notre étude nous sommes intéressés au procédé 2 (l'ajout d'additif aux enrobés).

La modification de l'enrobé bitumineux est effectuée avec un déchet plastique rougeâtre destiné à l'agro-alimentaire, ce sont des sacs d'emballage.

Ce travail a été mené au laboratoire de l'ingénieur **MAKHLOUFMOUSSA**, il est scindé en deux parties à savoir :

Partie I : Une étude bibliographique comportait sur

- généralité sur le bitume, les granulats et les enrobés.
- généralité sur les polymères.
- les procédés de modification de l'enrobé bitumineux.

Partie II : Une étude expérimentale comportait sur

- analyse des composants (granulats et bitume).
- interprétation des résultats.
- élaboration de formulation de l'enrobé et l'enrobé modifié.
- confection des éprouvettes bitumineuses.
- résultats d'essai Marshall, comparaison entre les résultats et conclusion.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail a porté sur l'étude de l'influence de l'ajout des déchets plastiques sur les caractéristiques des bétons bitumineux ,cette étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Il est possible d'améliorer certains performances mécaniques des enrobés par l'ajout des déchets plastiques à un dosage et des longueurs bien précises.
- Cette amélioration se traduit par : une augmentation de la stabilité et le quotient Marshall et une diminution de fluage Marshall.
- En plus de l'amélioration des caractéristiques des enrobés bitumineux qui se répercutera sur la durabilité des structures bitumineuses, l'environnement sera ainsi préservé de la pollution.

Références bibliographiques

- [1] **KHENGAOUI.S ; 2013** : « Valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable – Bitume », UKM Ouargla, Algérie.
- [02] **Bitume Québec ; 2008** : « Etude du comportement mécanique des chaussées souples application à la prévision de l'orniérage », communication au 17ème Congrès Français de Mécanique.
- [3] **KETAB R .B et J.M.FLEUREAU ; 2002**, « Conception et Réalisation des Chaussées en Milieu Désertique (Design and Réalisation of Pavements in Désert Environnement) », Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Nancy. France.
- [04] **NA 5192**, Norme Algérienne. Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille.26 Juillet 2005.
- [05] **NA 2617**, Norme Algérienne. Détermination de la température de ramollissement.29 Novembre 2005.
- [06] **NA 5223**, Norme Algérienne. Détermination de la ductilité des produits bitumineux. 31 Mars 1993.
- [07] **NA 2607**, Norme Algérienne. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats- Partie 1 : Détermination de la granularité – Analyse. 08 Octobre 2009.
- [08] **NA 255**, Norme Algérienne. Détermination de la masse volumique réelle.26 Novembre 2005.
- [09] **NF P 18-598**, Norme française. Détermination d'équivalent de sable. Octobre 1991.
- [10] **NA 5129**, Norme Algérienne. Détermination de la résistance à l'usure .22 Mars 2009.
- [11] **NA 5130**, Norme Algérienne. Détermination de la résistance à la fragmentation.23 Février 2009.
- [12] **NA 5125**, Norme Algérienne. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats- Détermination de la forme des granulats – Coefficient d'aplatissement.02 Mai 2009.
- [13] **NF P18-591**, Norme française. Détermination de la propreté superficielle. Avril 1979.
- [14] **LAMOTHE S.** « enrobe grenu : influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roule sur le couple d'ouvrabilité d'orniérage », Mémoire présenté à l'école de technologie supérieur de l'université de Québec, 2004.
- [15] **SIDIBÉ, B.** « étude de l'utilisation des granulats de type silex en géotechnique routière (notamment en couches de base et revêtement des couches de chaussées » projet de fin d'étude de l'école polytechnique de tries, université CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR, juillet 1995.
- [16] **NA 5227**, Norme Algérienne. Mélanges bitumineux- Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud- Essai Marshall .10 Mars 2007.
- [17] **DONGMO, B.** « caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineux » Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées des Lyon, 264 p, 2005.
- [18] **NA 5226**, Norme Algérienne. Essais relatifs aux chaussées- Déformation permanentes des Mélanges hydrocarbonés – Essai d'orniérage.28 Juin2005.
- [19] **NA 16300**, Norme Algérienne. Essais relatifs aux chaussées- Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés – Essai duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud.11 Novembre2006.

- [20] **ZEMMIRI, A.** Anouar Abdelaziz « Comparaison des formulations d'enrobés 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 112 p ,2008.
- [21] **NA 16304**, Norme Algérienne. Essais relatifs aux chaussées- Détermination de la tenue fatigue des mélanges hydrocarbonés– Essai de fatigue par flexion à amplitude de flèche constante.28 Juin2005.
- [22] **CDC-ENR05 ; 2005**, « CAHIER DES CHARGES 'ENROBES A CHAUD », Le Ministre des Travaux Publics, Algérie.
- [23] **CTTP ; 2004**, Guide technique de travaux publics « Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud », fascicule2 (La formulation), CTTP, Février 2004.
- [24] **DJABRI. A et HAMMANA. A ; 2016**, « CARACTERISATION DES ENROBES BITUMINEUX RECYCLES » Université de Tébessa, Algérie.

