

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Département de Génie Civil et Hydraulique



Mémoire De Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Etude et Contrôle des Bâtiments et Routes

Thème

**ETUDE DE L'INFLUENCE DE PEBD SUR LE MODULE
DES BÉTON BITUMINEUX À BASE SABLE DE DUNES**

Présenté par :

❖ HAFIDOU Zahra

Soutenu publiquement le : 30 / 06 / 2019

Devant le jury :

BENTATA Aissa

MAA

UKMO

Président

BOUAKA Wafaa

DOCTORENTE

UKMO

Examinatrice

KEBAILI Nabil

MCB

UKMO

Encadreur

KHENGAOUI Safia

INGENIEUR

DTP

Co-encadreur

Année universitaire : 2018 / 2019

Remerciements

Avant tout nous tenons à remercier DIEU tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage, la patience et la chance d'étude et les moyens afin de pouvoir accomplir ce travail et de suivre le chemin de la science.

Je remercie vivement Dr **KEBALI Nabil** qui m'encadre, de ses encouragements incessants et de tous les efforts qu'il a fait pour mener à bien ce travail. Pour ses précieux conseils concernant notre travail.

On tient à remercier vivement Monsieur **BENTATA Aïssa** qui nous a fait un grand honneur de présider notre jury de mémoire.

On tient à exprimer nos vifs remerciements à M^{elle} **BOUAKA Wafaa** qui nous a fait l'honneur d'être l'examinatrice de notre travail.

Je remercie M^{elle} **KHENGAOUI Safia** (DTP, Ouargla) qui ne cesse d'encourager et de nous aider en cour de mon travail et pour ses informations

Je tiens à remercier l'ensemble du personnel du laboratoire des Travaux Publics du Sud, LTPS-Ouargla, surtout Mr. **BOUCHERBA Med** de m'avoir facilité la réalisation d'une bonne partie de mes recherches dans un excellent cadre professionnel, je leur suis profondément reconnaissant pour leur aide continue et soutien sans limite.

Merci à toute l'équipe du laboratoire LNHC Unité d'Ouargla, spécialement M^{elle} **DAAS Djihadé** pour leurs soutiens, leurs aides et tout le temps que vous nous avez consacré.

Merci au directeur d'UTPS, et tous les enseignants et les techniciens au Département Génie Civil de l'université **KASDI MERBAH OUARGLA**

Je remercie en fin, tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de ce modeste travail.



Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à A mon
Père **Noureddine**, qui a été mon ombre
durant toutes les années des études
Et celle qui m'a donné la vie, le symbole
de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon*

*bonheur et ma réussite, à ma mère
Fatima*

*A Mes sœurs **Amína, Soumia, María***

*A mon fiancé **Abdelhamid**
et à ma belle-famille **Benzid***

A tous mes proches

A tous mes ami(e)s.

HAFIDOU ZAHRA

الملخص :

تمثل المخلفات البلاستيكية مصدر مهدد للبيئة لكثافتها و انتشارها و صعوبة تحللها بمرور الزمن. تهدف هذه الدراسة لإعادة تدوير هذه المخلفات من خلال تثمينها و استعمالها في انجاز طبقة السير مع استغلال للمواد المحلية (رمل الكثبان) من اجل دراسة خصائصها الميكانيكية. وتعتمد الطريقة المتبعة باستبدال نسبة من رمل المحجرة 0/3 بنسبة من رمل الكثبان و تعديل الزفت بالبولي أنثيلين منخفض الكثافة PEBD لتحديد التركيبة المثلى والحصول على أفضل النتائج عن طريق تجربة مارشال و تجربة الشد الغير مباشر من اجل قياس الصلادة و مقارنتها بنتائج الخرسانة الزفتية العادية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الإسفلتية، رمل الكثبان، تثمين، زفت، طبقة السير، بوليمير، صلابة.

Résumé :

Le déchet plastique représente une source de menace environnementale en raison de sa propagation et la difficulté de sa décomposition dans le temps. Cette étude vise à recycler et valoriser ces déchets pour les utiliser dans la couche de roulement avec l'exploitation de matériaux locaux (sable de dunes) et d'étudier leurs caractéristiques mécaniques.

La méthode adoptée consiste à remplacer un pourcentage de sable de carrière 0/3 par un pourcentage de sable de dunes et de modifier le bitume avec le PEBD pour déterminer la composition optimale. Cependant au résultat à partir de l'essai Marshall et l'essai traction indirect pour calculer le module de rigidité et les comparer avec les résultats d'enrobé bitumineux ordinaire.

Mots clés: Béton bitumineux, Sable de dunes, Valorisation, Bitume, Couche de roulement, Polymère, Rigidité.

Abstract.

Plastic waste is a source that is threatened to the environment for its density, dispersion, and difficulty to decompose over time. The aim of this study is to recycle these wastes by valuing them and using them in the completion of the traffic layer with the exploitation of the local materials (Sand dunes) in order to study their mechanical properties .The method is based on replacing the percentage of sand 3/0% of the sand dunes and adjustment of asphalt PEBD to determine the optimal structure and get the best results through the experience of Marshall and the experience of indirect tension In order to measure the rigidity And compared to the results of ordinary asphalt concrete

Keyword: Asphalt concrete, Sand dunes, Valorization, bitumen, tread, Polymer, Stiffness

Liste des Tableaux

Tab. I.1: Fuseau de référence d'un BBME 0/14.....	19
Tab. III.1: Dimensions des bandes de chargement.....	22
Tab.IV.1: Provenance des granulats utilisés.....	24
Tab. IV.2 : Masse volumique absolue des granulats utilisés.....	24
Tab. IV.3 : Résultats des essais MDE et LA.....	24
Tab. IV.4 : Analyses granulométriques des granulats.....	25
Tab. IV.5 : Résultats d'aplatissement des graviers.....	26
Tab. IV.6 : Equivalent de sable des différents sables.....	27
Tab. IV.7 : Teneur en fines des différents sables.....	27
Tab. IV.8 : Caractéristiques de bitume utilisé.....	28
Tab. IV.9 : Résultats de l'essai de bleu méthylène.....	28
Tab. IV.10 : Différentes caractéristiques de la poudrette utilisée.....	29
Tab. IV.11: Fuseaux de béton bitumineux semi-grenu 0/14 [CTTP, 2004].....	33
Tab. IV.12: Fuseaux de béton bitumineux ordinaire.....	33
Tab. IV.13: Fuseaux de béton bitumineux à base sable de dunes.....	34
Tab. IV.14: Calcul de la teneur en liant de BB.....	36
Tab. IV.15: Calcul de la teneur en liant de BBSD.....	36
Tab. VI.1 : Densité apparente et absolue des mélanges.....	44
Tab. VI.2: Pourcentages des vides V_v pour les différents mélanges.....	44
Tab. VI.3: Compacité pour chaque mélange.....	45
Tab. VI.4: Résultats des essais Marshall pour BB ordinaire.....	46
Tab. VI.5: Résultats des essais Marshall pour BBSD.....	47
Tab. VI.6: Caractéristiques de bitume modifié.....	49
Tab. VI.7: Stabilité, Fluage et quotient des mélanges en fonction de la teneur en PEBD.....	50
Tab. VI.8: Modules des BB.....	52
Tab. VI.9: Modules des BBSD.....	53
Tab. VI.10: Modules de BBSD modifié par le PEBD.....	53
Tab. VI.11 Caractéristiques mécaniques de l'enrobé modifié.....	55

Liste des Figures

Fig. I.1: Exemple de courbe de mélange avec fuseau de référence.....	09
Fig. II.1: Polymérisation de l'éthylène.....	12
Fig. II.2: Les trois formes des PE.....	12
Fig. II.3: Structure typique du copolymère PEBD.....	13
Fig. II.4: Recyclage du plastique.....	15
Fig. III.1: Méthodes de module de rigidité.....	17
Fig. III.2: Principe de l'essai de traction indirect.....	19
Fig. III.3: Forme de l'impulsion de chargement.....	20
Fig. IV.1: Courbes granulométriques des différentes fractions granulaires.....	25
Fig. IV.2: Principe d'essai d'équivalent de sable.....	27
Fig. IV.3: Procédure de l'essai bleu méthylène.....	28
Fig. IV.4: Représentation schématique du dispositif expérimental de Differential Scanning Calorimetry.....	30
Fig. IV.5: Schéma de travail.....	32
Fig. IV.6: Courbe granulométrique du béton bitumineux.....	33
Fig. IV.7: Compositions granulaires du mélange.....	34
Fig. IV.8: Courbe granulométrique du mélange BBSD.....	34
Fig. IV.9: Composition optimale des granulats du mélange BBSD.....	35
Fig. VI.1: Variation des vides en fonction des teneurs en bitume (BB ordinaire).....	45
Fig. VI.2: Variation des vides en fonction des teneurs en bitume (BBSD).....	45
Fig. VI.3: Variation de la compacité en fonction des teneurs en bitume (BB ordinaire).....	46
Fig. VI.4: Variation de la compacité en fonction des teneurs en bitume (BBSD).....	46
Fig. VI.5: Variation de stabilité Marshall en fonction des teneurs en liant (BB ordinaire).....	47
Fig. VI.6: Variation de stabilité Marshall en fonction des teneurs en liant (BBSD).....	47
Fig. VI.7: Variation de fluage en fonction des teneurs en liant (BB ordinaire).....	48
Fig. VI.8: Variation de fluage en fonction des teneurs en liant (BBSD).....	48
Fig. VI.9: Variation de la pénétrabilité du bitume modifié selon la teneur en PEBD... ..	49
Fig. VI.10: Variation de la température de ramollissement selon la teneur en PEBD... ..	50
Fig. VI.11: La stabilité Marshall en fonction les pourcentages de PEBD.....	51
Fig. VI.12: Le fluage en fonction les pourcentages de PEBD.....	51
Fig. VI.13: Variation de la compacité en fonction de la teneur en PEBD.....	51
Fig. VI.14: Module de rigidité en fonction de la teneur en liant (BB ordinaire).....	52
Fig. VI.15: Module de rigidité en fonction de la teneur en liant (BBSD).....	53
Fig. VI.16: Module de rigidité en fonction de la teneur en liant (BBSD modifié par le PEBD).....	54
Fig. VI.17: Variation de la teneur en PEBD en fonction du pourcentage des vides.....	56
Fig. VI.18: Variation de la compacité en fonction de la teneur en PEBD.....	56
Fig. VI.19: Variation de la stabilité en fonction de la teneur en PEBD.....	57
Fig. VI.20: Variation du fluage en fonction de la teneur en PEBD.....	57
Fig. VI.21: Variation du module de rigidité en fonction de la teneur en PEBD.....	58

Liste des Photos

Photo. I.1: Essai de Pénétrabilité.....	05
Photo. I.2: Point de ramollissement TBA.....	05
Photo. II.1: Poudrettes de PEBD Noble.....	13
Photo. II.2: Des produits en PEBD.....	14
Photo. II.3: PEBD recyclé.....	15
Photo. III.1: Essai de traction indirect.....	18
Photo. III.2: Équipement d'essai.....	19
Photo. IV.1: Classes de graviers utilisés.....	22
Photo. IV.2: Bitume pur de classe 40/50.....	22
Photo. IV.3: Sable de dunes.....	23
Photo. IV.4: Tamis pour analyses granulométriques.....	24
Photo. IV.5: Principe de l'essai d'aplatissement.....	26
Photo. IV.6: Équivalent de sable.....	27
Photo. IV.7: Préparation des échantillons.....	28
Photo. IV.8: Plastique avant et après recyclage.....	29
Photo. IV.9: Equipment de Differential Scanning Calorimetry.....	30
Photo. IV.10: Recipients d'analyse.....	30
Photo. V.1: Opération de malaxage.....	37
Photo. V.2: Modification de bitume par le PEBD.....	39
Photo. V.3: Opération de compactage.....	39
Photo. V.4: Opération de démoulage.....	40
Photo. V.5: Principe d'essai Marshall.....	41
Photo. V.6: Traction Indirecte NAT.....	41
Photo. V.7: Mesure de dimensions des éprouvettes avec Pied à coulisse.....	42

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENROBES BITUMINEUX	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Composition des matériaux bitumineux.....	3
I.2.1 Liants hydrocarbonés.....	3
I.3 Les types de bitume.....	4
I.4 Les caractéristiques des bitumes.....	4
I.4.1 Classement des bitumes.....	4
I.4.2 Essais de caractérisation des bitumes.....	4
I.5 Composants minéraux.....	5
I.5.1 Définition.....	5
I.5.2 Caractéristiques intrinsèques des granulats.....	6
I.6 Formulation des enrobés.....	6
I.6.1 Paramètres influençant sur le choix d'une formulation.....	7
I.6.2 Influence des caractéristiques des composants d'un mélange hydrocarbonés.....	7
I.7 Etapes de formulation d'un enrobe bitumineux.....	8
I.7.1 Détermination du mélange minéral.....	8
I.7.2 Teneur en liant optimale bitumineux.....	9
I.8 Essais sur enrobés bitumineux.....	9
I.8.1 Essais non homogènes des enrobés.....	10
I.8.2 Essais homogènes sur les enrobés bitumineux.....	11
I.9 Conclusion.....	11
CHAPITRE II : APERCU SUR LES MATERIAUX EN POLYETHYLENES	
II.1 Généralités sur les polyéthylènes.....	12
II.1.2 Polyéthylène base densité (PEBD).....	13
II.2 Les caractéristiques de PEBD.....	13
II.3 L'utilisation de PEBD.....	13
II.4 Quelques repères historiques.....	14
II.5 Le Recyclage.....	15
II.6 Bitumes modifiés par des polymères.....	15
II.6.1 Polymères destinés aux bitumes.....	15
II.6.2 l'influence des polymères pour bitumes.....	16
II.7 Conclusion.....	16
CHAPITRE III : NOTION SUR L'ESSAI DE MODULE DE RIGIDITE	
III.1 Introduction.....	17
III.2 Essais de rigidité normalisés [EN 12697-26, 2012].....	18
III.3 Essai de Traction indirect IT-CY.....	19
III.3.1 Principe.....	19
III.3.2 Appareillage.....	19
III.4 Mode d'opérateur.....	20
III.4.1 Condition de stockage.....	20
III.5 Mesure de rigidité.....	21
III.6 Conclusion.....	21
CHAPITRE IV : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISEE ET FORMULATION	
IV.1 Introduction.....	22
IV.2 Provenance des matériaux.....	22
IV.2.1 Les granulats.....	22
IV.2.2 Le bitume.....	22
IV.2.3 La chaux.....	22
IV.2.4 Le sable de dune.....	23
IV.3 Identification des constituants.....	23

IV.3.1	Caractéristiques intrinsèques des granulats.....	23
IV.3.1.1	La Masses volumiques absolue.....	23
IV.3.1.2	Résistance à la fragmentation et à l'usure.....	24
IV.3.1.3	Analyse granulométrique.....	24
IV.3.1.4	Coefficient d'aplatissement.....	26
IV.3.1.5	Equivalent de sable.....	26
IV.3.1.6	Teneur en fines.....	27
IV.3.1.7	Essai de Blue méthylène.....	27
IV.4	Caractéristique du bitume.....	28
IV.5	Caractéristiques de Polyéthylène base à densité	29
IV.5.1	La calorimétrie à balayage différentielle DSC	30
IV.6	Etude de Formulation	31
IV.6.1	Courbe granulométrique du mélange.....	33
IV.6.2	Détermination des teneurs en liants	35
IV.7	Conclusion.....	36
CHAPITRE V : ESSAIS REALISES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX		
V.1	Introduction.....	37
V.2	Préparation des mélanges.....	37
V.3	Malaxage.....	37
V.4	Préparation le bitume modifier	38
V.4.1	Appareillage.....	38
V.4.2	Mode opératoire.....	38
V.5	Confection des éprouvettes pour les essais réalisés.....	39
V.6	Essais de performance mécanique	40
V.6.1	L'essai Stabilité de Marshall.....	40
V.6.1.1	Principe.....	40
V.6.1.2	Procédure d'essai.....	40
V.6.2	L'essai Module de Rigidité.....	41
V.6.2.1	Calcul du module de rigidité.....	42
V.6.3	Détermination de la densité apparente (méthode géométrique).....	42
V.6.3.1	Masse volumique apparente.....	42
V.6.3.2	Formule de calcul.....	42
V.6.4	Détermination le pourcentage des vides et la compacité.....	43
V.7	Conclusion.....	43
CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS		
VI.1	Introduction.....	44
VI.2	Essai Marshall.....	44
VI.2.1	Pourcentage des vides.....	44
VI.2.2	La compacité.....	45
VI.2.3	Stabilité Marshall et le Fluage.....	46
VI.3	Influence de la PEBD sur les performances de BBSD.....	48
VI.3.1	Influence de la PEBD sur le Bitume.....	48
VI.3.2	Influence de la PEBD sur les stabilités Marshall et le Fluage.....	50
VI.3.3	Evolution de la compacité.....	51
VI.4	Synthèse générale	51
VI.5	L'essai Module de Rigidité.....	52
VI.6	Synthèse générale	54
VI.7	Comparaison entre les enrobés bitumineux.....	55
VI.8	Synthèse globale.....	58
CONCLUSION ET RECOMMANDATION.....		
ANNEXES		
Annexe A : Résultats les caractéristiques des matériaux .		
Annexe B : Etude de formulation .		
Annexe C : Résultats de la partie expérimental.		
Annexe D : Spécifications et normes.		

Liste des symboles

BB : Béton Bitumineux

BBSD : Béton Bitumineux à base de sable de dune

BBSG : Béton Bitumineux semi-grenu

SD : Sable de dunes

PEBD : Polyéthylène basse densité

PE : Polyéthylène

PEHD : Polyéthylène haute densité

C: Compacité

S : Sable grossier

G: Gravier

K : Module de richesse

Σ : Surface spécifique

TL: Teneur en liant

M : Masse des éprouvettes

D : Diamètre

MVR : Masse Volumique Réel

MVA : Masse Volumique Apparente

V_v : Pourcentage de vide

PCG : Presse Cisaillement Giratoire

LTPS : Laboratoire des Travaux Publics du Sud

γ_{app} : Densité apparente de l'éprouvette.

ES : Equivalent de sable (%).

CTTP : Organisme national de contrôle technique des travaux publics

TBA : Température bille anneau.

NAT: Nottingham Asphalt Tester.

LA : Los Angeles.

MDE : Micro Deval.

INTRODUCTION GENERALE

D'une manière générale, le réseau routier d'un pays constitue l'un des patrimoines qui revêt une importance capitale dans son développement. En effet, la route assure le lien entre les zones d'économie complémentaire, de production, d'importation, d'exportation et de consommation au sein des états mais aussi entre les états. Aussi, elle assure des liaisons humaines et sociales d'une importance inestimable car elle permet l'établissement d'échanges culturels, sociaux, politiques et administratifs qui s'avère aussi être un des éléments promoteur à tout développement.

L'amélioration des caractéristiques des chaussées routières souples s'avère indispensable devant la croissance du trafic et le tonnage de plus en plus important des véhicules. Cette amélioration s'est développée, entre autre, par l'introduction de nouvelles techniques et procédés de modification des enrobés bitumineux ; ceci constitue un axe de recherche très étudié à travers le monde ces dernières années.

L'utilisation et l'amélioration des performances du bitume font donc l'objet de nombreuses recherches.

La présente recherche entre dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux en l'occurrence les sables de dune et à modifier le bitume de base par ajout de poudrettes plastiques. Les poudrettes utilisées dans l'expérimentation sont des polyéthylènes à basse densité (PEBD).

Pour ce faire, le présent travail est divisé en deux grandes parties:

Première partie :

Étude bibliographique

La première partie comporte trois chapitres :

- Le premier chapitre nous permet de présenter des Généralités sur les liants, les granulats et les produits bitumineux ;
- La deuxième chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les matériaux en Polyéthylène, bitume polymère et la poudrette de polyéthylène ;
- La troisième chapitre présente des notions sur l'essai à réaliser en l'occurrence le module de rigidité.

Deuxième partie :

Étude expérimentale

- Le quatrième chapitre présente les caractéristiques des matériaux entrant dans la formulation de l'enrobé étudié ;
- Le cinquième chapitre présente les essais réalisés et dispositifs expérimentaux adoptés ;
- Le sixième et dernier chapitre présente les résultats obtenus et interprétations.

Partie bibliographique

Chapitre I

GÉNÉRALITÉS SUR LES ENROBÉS

BITUMINEUX

I.1 Introduction

L'enrobe bitumineux est un mélange dans une proportion choisie de granulats et de liant hydrocarboné. Dans ce mélange, le liant hydrocarboné est principalement responsable de la cohésion tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l'ensemble.

I.2 Composition des matériaux bitumineux

I.2.1 Liants hydrocarbonés :

I.2.1.1 Définition:

Les liants hydrocarbonés sont des substances constituées essentiellement d'assemblages d'atomes de carbone et d'hydrogène qui, au contact de particules solides telles que les granulats par exemple, développent des forces d'adhésion et de cohésion assurant de la sorte une certaine rigidité, des résistances à la déformation en traction, compression et cisaillement.

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés:

-**Asphalte:** roche calcaire imprégnée de bitume. Expression qui désigne le revêtement des routes.

- **Goudron:** Produit provenant de la distillation de diverses substances: charbon, bois, tourbe. Il est moins soluble que le bitume.

- **Bitume:** composé de carbone et d'hydrogène, d'où le nom d'hydrocarbure. Il peut être d'origine naturel ou provenir de la distillation du pétrole.

De nos jours en construction de route le bitume est utilisé comme liant à la réalisation des enrobés ou le béton bitumineux ou les grave bitume. Il entre aussi dans la fabrication d'enduits superficiels sous forme d'émulsion ou bien fluidifié par un solvant.

I.2.1.2 Fabrication du bitume

Concernant les principaux modes de fabrication des bitumes, citons la distillation en raffinerie des pétroles bruts lourds contenant suffisamment de fractions lourdes pour produire du bitume. La première étape de ce processus consiste en une distillation atmosphère qui permet de séparer les fractions légères du pétrole (essences, kérosène, gaz) des fractions lourdes, ces dernières étant ensuite distillées sous vide pour produire fuels, huiles et bitume. Autre distillation faite par NAFTAL, citons encore les procédés de soufflage et de désalphaltage en Espagne et destinés pour être fournis à l'Algérie (SOPRETA).

-Le premier procédé consiste à oxyder les résidus sous vide par soufflage d'air chaud à 250°C

-Le deuxième procédé est utilisé pour des résidus sous vide ayant une teneur en fractions lubrifiantes trop importante et consiste à traverser les résidus sous vide par un courant ascendant de solvant : la différence de solubilité des fractions bitumineuses vis-à-vis du solvant employé permet alors d'obtenir le bitume souhaité dans ce dernier cas, le bitume présente une faible pénétrabilité [1].

I.3 Les types de bitume

- Les bitumes cut-back;
- Les bitumes purs;
- Les bitumes oxydés;
- Les émulsions;
- Les bitumes modifiés.

I.4 Les caractéristiques des bitumes

Les propriétés physique d'un bitume sont déterminées par des essais qui les caractérisent, on parle ainsi de caractérisation. Ces essais de caractérisation sont menés sur des échantillons représentatifs des produits qui sont eux même prélevés selon des méthodes normalisées.

Nous rappelons qu'actuellement en Algérie, le bitume est généralement caractérisé par deux essais qui sont insuffisants (pénétrabilité et la température bille anneaux). Pour mieux caractérisé le bitume, une gamme d'essais est recommandée.

I.4.1 Classement des bitumes

Les bitumes sont classifiés selon un essai de qualification. Les bitumes purs et les bitumes routiers durs sont classés à l'aide de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille, les bitumes industriels durs et les bitumes oxydés avec l'essai de point de ramollissement bille et anneau, les bitumes fluidifiés et les bitumes fluxés selon leur pseudo viscosité mesurée au viscosimètre.

I.4.2 Essais de caractérisation des bitumes

Le liant bitumineux doit vérifier par un ensemble des essais, est comme suit :

- Pénétrabilité ;
- Point de ramollissement (température bille – anneau) ;
- Essai RTFOT ;
- La ductilité.

Permet ces essais nous mentionnons deux essai et ils sont comme suit :

I.4.2.1 Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T66-004)

Cet essai, permet d'apprécier la consistance d'un bitume, par mesure de l'enfoncement à une température de 25°C d'une aiguille normalisée chargée à 100g dans un échantillon de bitume durant un intervalle de temps de 5sec. La pénétrabilité est alors la distance parcourue par l'aiguille, exprimée au 1/10 de millimètres mesurée par un pénétromètre [2].

Cet essai permet également la mesure de la susceptibilité du bitume (indice de pénétrabilité) à partir de mesures de la pénétrabilité à différentes températures [2].



Photo. I.1:Essai de Pénétrabilité.

I.4.2.2 Point de ramollissement bille et anneau (NFT66-008)

Cet essai détermine la température à laquelle un produit bitumineux atteint un certain degré de ramollissement dans les conditions normalisées. Le bitume est liquéfié par chauffage et versé dans deux anneaux en laiton de dimensions normalisées, puis refroidi à la température ambiante. Une bille d'acier est placée au centre de l'échantillon puis l'ensemble est chauffé progressivement à raison de 5°C par minute [2].

La température correspondant à l'instant où la bille d'acier touche la plaque inférieure est le point de ramollissement bille et anneau (TBA) du bitume considéré. La TBA ainsi obtenue caractérise la susceptibilité thermique du matériau; plus la température bille-anneau est faible, plus est susceptible le bitume. Les résultats des deux essais empiriques précédents (Pénétrabilité à 25°C et Température Bille Anneau) permettent l'identification et le classement du bitume relatif [2].



Photo. I.2:Point de ramollissement TBA

I.5 Composants minéraux

I.5.1 Définition : selon la norme P18-540, ensemble de grains de dimensions comprises entre 0 mm et 125 mm.

Les granulats sont dits [3] :

- naturels lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique ;
- artificiels lorsqu'ils proviennent de la transformation à la fois thermique et mécanique de roches ou de minerais recyclés lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrages ou lorsqu'ils sont réutilisés ;

Ils sont désignés par d/D dans lequel d et D représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions du produit, Ces dimensions correspondent à la grosseur des grains déterminée par l'analyse granulométrique on distingue :

- **Filler** : $0/D$ ou $D < 2$ mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm ;
- **Sablons** : $0/D$ ou $D \leq 1$ mm avec au moins 70% de passant à 0.063 mm ;
- **Sable** : $0/D$ ou $1 < D \leq 6.3$ mm ;
- **Graves** : $0/D$ ou $D > 6.3$ mm ;
- **Gravillons** : d/D ou $d > 1$ et $D \leq 125$ mm ;
- **Ballasts** : d/D ou $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

I.5.2 Caractéristiques intrinsèques des granulats

Il s'agit des caractéristiques régies par la qualité propre de la roche mère. Elles concernent la dureté, la résistance à l'usure par frottement.

Les essais les plus fréquents utilisés pour déterminer ces caractéristiques sont [4] :

- **Résistance à la fragmentation (chocs) :**

Elle est mesurée par le coefficient de "Los Angeles". Cette mesure est destinée à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action du trafic.

- **Résistance à l'attrition et à l'usure:**

L'essai utilisé est le Micro Deval à sec ou en présence d'eau. Cette mesure ayant pour but de chiffrer l'usure qui se produit d'une part entre les gravillons entre eux dans une assise et d'autre part entre le pneumatique et le granulat à la surface des revêtements. Comme l'usure est très influencée par la présence d'eau, l'essai le plus représentatif est le Micro Deval en présence d'eau.

I.6 Formulation des enrobes

Formuler un enrobé hydrocarboné, est de déterminer le meilleur mélange de granulats de diverses dimensions et d'un liant (le bitume) permettant d'atteindre des performances visées :

Imperméabilité, rugosité, résistance mécanique (à l'orniérage et la fatigue). Donc l'objectif de formulation est de déterminer un mélange de différentes classes granulaires qui constitue un squelette granulaire ayant un pourcentage de vides ni trop faible ni trop élevé.

Un faible pourcentage de vide empêche l'introduction d'une quantité du liant suffisante pour enrober l'ensemble des grains sans saturer le mélange, et un pourcentage de vides élevé favorise le développement des déformations permanentes par post-compaction.

I.6.1 Paramètres influençant sur le choix d'une formulation :

Les principaux caractères à prendre en compte lors du choix d'une formule d'enrobés sont les suivants [5] et [6] :

- Le choix de l'enrobe dépend de la fonction que doit remplir : couche de base, de liaison, de surface, etc.
- Le trafic ;
- Le type de structure: chaussée souple ou semi-rigide ;
- L'épaisseur d'enrobé adéquate de résister aux différentes sollicitations ;
- La qualité des matériaux utilisés ;
- Les conditions climatiques.

I.6.2 Influence des caractéristiques des composants d'un mélange hydrocarboné

Les propriétés des enrobés hydrocarbonés peuvent dépendre selon les caractéristiques de différentes compositions que sont les granulats, les fines, le liant [4].

- **Influence des granulats:**

Il y a plusieurs types de béton bitumineux. Cependant, il est possible de formuler un concept d'un agrégat selon les performances désirées. Le choix d'un agrégat idéal à granulométrie voulue rempli les conditions suivantes: l'agrégat sera dur et résistant, constitué des particules angulaires ayant une porosité modérément faible, et les surfaces seront propres, rugueuses et hydrophobes.

- **Influence des fines :**

Le rôle principal des fines est de remplir les vides du squelette granulaire conduisant ainsi à une augmentation de la compacité et à une meilleur imperméabilité de l'enrobé.

Les fines (ou filler) agissent par leur dosage sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé notamment sur la rigidité et la résistance à l'orniérage à haute température [4].

- **Influence du bitume:**

Le bitume doit être de bonne qualité et conforme aux spécifications. L'influence du bitume dans les enrobés intervient par sa dureté et par son dosage.

- Effet de la dureté du bitume, L'utilisation de bitume plus dur, sans que le seuil de sa fragilité à basse température soit dépassé, se traduit par une augmentation importante de la rigidité de l'enrobé, la résistance à la fatigue et à l'orniérage
- Effet de la teneur en bitume, la majoration de la teneur en bitume provoque la chute de la compacité par augmentation de l'effet de lubrification des granulats et par le remplissage des vides [4].

I.7 Etapes de formulation d'un enrobé bitumineux

Une étude de formulation d'un enrobé comporte les étapes suivantes:

- Les classes granulaires ;
- La teneur en bitume ;
- Les caractéristiques d'un enrobé.

I.7.1 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 [7] :

- 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'enrobé 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 Dmax)
- 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 (Figure I.3).

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 [7].

La courbe granulométrique du mélange minéral calculée devra ensuite être tracée dans un graphique et être comparée au fuseau de spécifications [7].

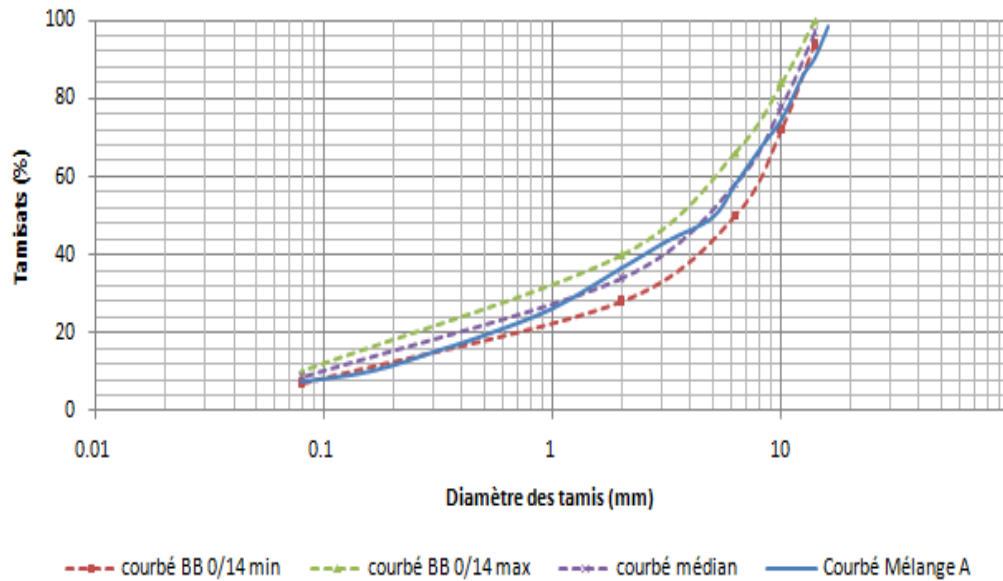


Fig. I.1: Un exemple d'une courbe de mélange inscrite le fuseau de référence.

I.7.2 Teneur en liant optimale

La teneur en liant à retenir est définie à partir d'une étude de laboratoire qui consiste à choisir à partir d'un granulat simple ou composé entrant dans le fuseau recommandé. Elle sera fonction de la surface spécifique des granulats selon la formule [7] suivante :

$$\text{Teneur en liant} = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

- **K** : module de richesse pouvant prendre les valeurs suivantes :
 - 2 à 2,6 pour les graves bitumes
 - 3,3 à 3,9 pour un béton bitumineux
- **α** : coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats.

$$\alpha = 2,65 / \text{masse volumique des granulats}$$
- **Σ** : Surface spécifique du granulat.

La surface spécifique du granulat est calculée par la formule [7].

$$100 \cdot \Sigma = 0,25 \cdot G + 2,3 \cdot S + 12 \cdot s + 135 \cdot f \text{ en m}^2/\text{kg}$$

Avec :

- **G** : pourcentage des éléments supérieurs à 6,3 mm ;
- **S** : pourcentage des éléments compris entre 6,3 mm et 0,250 mm ;
- **s** : pourcentage des éléments compris entre 0,250 mm et 0,063 mm ;
- **F** : pourcentage des éléments inférieurs à 0,063 mm.

I.8 Essais sur enrobés bitumineux

I.8.1 ESSAIS NON HOMOGENES DES ENROBÉS

Les essais non homogènes les plus couramment réalisés dans les laboratoires algériens réalisés sur les enrobés bitumineux pour fins d'études et de formulation sont;

- Essai Marshall (norme EN 12697-34)
- Essai Duriez (norme EN 12697-12)
- Essai de compactage à la PCG (norme NF EN 12697-31)

A cet effet nous présenterons dans ce qui suit, une brève description de ces essais et leur principe d'essai [2].

I.8.1.1 Essai Marshall

L'essai Marshall est largement utilisé dans les laboratoires algériens et étrangers, il permet de déterminer sur éprouvettes confectionnées, les caractéristiques suivantes :

- la stabilité Marshall qui est la résistance maximale à l'écrasement entre mâchoires à la température de 60° C, à vitesse constante,
- le fluage Marshall qui est le raccourcissement (1/10 mm) du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture.
- la compacité Marshall à partir du pourcentage en vides.

Les éprouvettes compactées par impacts, sont immergées dans un bain d'eau à 60°C pendant 40 min, puis comprimées à vitesse constante 51mm/min en compression diamétrale empêchée au moyen de mémoire hémicycles [8].

I.8.1.2 Essai Duriez

L'essai de compression simple Duriez a pour but de déterminer à 18°C, pour un compactage donné, la tenue à l'eau d'un enrobé bitumineux à chaud à partir des résistances à la compression avec ou sans immersion des éprouvettes confectionnées par compactage statique à double effet. La masse volumique apparente est déterminée sur un nombre d'éprouvettes pour calculer la teneur en vides [8].

I.8.1.3 Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG)

Le compactage des mélanges bitumineux est une opération importante en technologie routière, car elle assure la durabilité du revêtement et influence ses caractéristiques mécaniques et sa résistance aux agents physiques extérieurs. Au laboratoire, cependant, les méthodes de compactage les plus usuelles et les plus simples ne sont que de médiocres simulations de ce qui se passe en chantier [9].

L'enrobé est compacté à une température constante dans un moule cylindrique tournant sur lui-même en créant un effet de pétrissage. On observe l'augmentation de compacité (diminution de pourcentage de vide) en fonction du nombre de giration, simulant l'effet de compacteur à pneus sur chantier [10].

I.8.2 ESSAIS HOMOGENES DES ENROBÉS BITUMINEUX

I.8.2.1 Essais de fatigue

Cet essai est conçu à partir de l'hypothèse de rupture par fatigue sous des sollicitations répétées à la base des couches d'enrobés. Pour cela, l'éprouvette d'enrobé est soumise à la flexion à température constante. L'éprouvette étant encastrée à une base, on applique à l'extrémité libre des déplacements alternatifs sinusoïdaux d'amplitude constante et enregistre la force ou le déplacement correspondant. Le mode de fatigue peut être ;

- fatigue à amplitude de contrainte constante ;
- fatigue à amplitude de déformation constante.

La durée de vie est définie conventionnellement par le nombre de cycles qu'il faut appliquer jusqu'à ce que la force nécessaire au déplacement d'amplitude constante soit divisée par deux [2].

I.8.2.2 Essai d'orniérage :

Le but c'est de caractériser la résistance à l'orniérage des enrobés hydrocarbonés dans des conditions comparables aux sollicitations sur route [10].

Principe de l'essai est mesure de la profondeur de l'ornière (sans le bourrelet) en fonction du nombre de cycles (aller et retour) en pourcentage de l'épaisseur de la dalle [10].

I.8.2.3 Essai de module :

Cet essai est destiné à la caractérisation du comportement mécanique de l'enrobé. Il permet en particulier de déterminer un module de rigidité en traction indirecte [2].

Les essais de module des enrobés bitumineux, entrant dans le cadre de cette étude, sont réalisés au moyen du testeur d'asphalte appelé (NAT) ou le Nottingham Asphalt Tester.

Dans ce qui suit, on donne un aperçu sommaire de cet appareil, se trouvant au niveau du laboratoire LTP-Sud Ghardaïa et CTTTP d'Alger, (on notera que plus de détails sur cet appareil ainsi que sur son mode de réalisation et d'exploitation seront données dans le chapitre troisième).

I.9 Conclusion

Les matériaux de qualité l'un des facteurs les plus importants qui assurent la durabilité des routes, qui est principalement liés aux caractéristiques de chaque matériau et qui nécessite l'approbation aux normes, et pour déterminer les propriétés et les caractéristiques d'un matériau il faut faire quelques expériences par type de matériau, que ce soit en laboratoire ou sur le terrain et ensuite faire la comparaison des résultats obtenus pour déterminer la qualité de la construction.

Chapitre II

APERCU SUR LES MATÉRIAUX EN POLYETHYLENES

II.1 Introduction

Les polyéthylènes sont des polymères (macromolécules) qui font partie de la famille des polyoléfines. Ils sont issus de la polymérisation de l'éthylène gazeux :

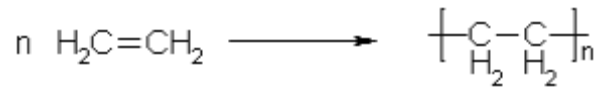


Fig. II.1: la polymérisation de l'éthylène gazeux.

Les PE (polyéthylènes) font partie des thermoplastiques parmi toutes les matières plastiques. C'est-à-dire qu'ils ont des propriétés qui leur confèrent une malléabilité à chaud et une thermo plasticité réversible [11].

Mais ils sont de natures différentes selon les modes de polymérisation [11]:

- à partir d'une méthode à haute pression, on obtient un polymère très ramifié appelé le polyéthylène basse-densité PEBD.

- à l'inverse on utilise un procédé à basse pression pour obtenir le polyéthylène haute densité PEHD (linéaire donc plus compact que le précédent d'où son nom).

Il existe par ailleurs un autre type de PE, le PEMD (moyenne densité), mais c'est en réalité un intermédiaire entre les 2 formes et n'a pas de caractéristique particulière ou intéressante qui mérite d'être développée. Il semble juste convenable de voir la répartition entre ces différentes formes sur le document suivant [11] :

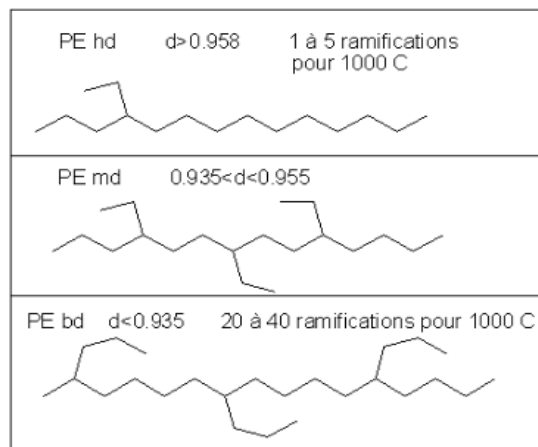


Fig. II.2: Les trois formes des PE.

D'un point de vue industriel, les PE utilisés sont surtout des homopolymères de l'éthylène (avec un seul motif unitaire).

De même pour ce qui est de sa caractérisation, le PE doit répondre à 2 exigences :

- être apte à subir des conditions industrielles qui le fait passer de granules à l'objet fini (film, bouteille)
- conférer à l'objet fini les propriétés nécessaires à son usage : transparence pour un film, stabilité dimensionnelle pour une pièce injectée, absence de "neck-in" pour une enduction [11].

II.1.2 polyéthylène basse densité (PEBD)

Le polyéthylène basse densité (PEBD) est un thermoplastique semi-cristallin, sa structure est donnée en (Fig. II.3). Le PEBD se présente sous la forme d'un solide translucide, opaque sous de fortes épaisseurs, souple et flexible. IL a une densité qui varie entre 0,915 et 0,935 g/cm³ [11].



Photo. II.1: Poudrettes de PEBD Noble

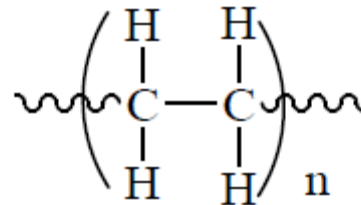


Fig. II.3: Structure typique du copolymère de PEBD

II.2 Les caractéristiques de PEBD

Le PEBD est un polymère non polaire qui se caractérise par de bonnes propriétés mécaniques, notamment un allongement à la rupture dépassant les 500%, un point de fusion qui se situe entre 105 et 120°C, une faible perméabilité à la vapeur, une bonne résistance à la fissuration et une facilité de mise en œuvre.

Le polyéthylène basse densité est obtenu à partir de l'éthylène gazeux, en utilisant généralement le procédé de polymérisation en masse. La polymérisation se fait par ouverture de la double liaison sous l'action combinée de la pression et de la chaleur en présence d'un catalyseur (oxygène).

II.3 Utilisation de PEBD

Le polyéthylène basse densité (PEBD) est considéré comme étant le premier polymère commercialisé en Algérie, parce que la résine est produite localement à des prix relativement bas. Ceci fait du PEBD un polymère accessible aux utilisateurs [12].

Le PEBD est largement utilisé sous forme de films, en particulier dans la production des sacs pour produits alimentaires et autres tels que la mousse d'emballage, la couverture de serres agricoles, les films de paillage et d'ensilage et l'emballage technique et alimentaire de manière générale [12].



Photo. II.2:Des Produits en PEBD

La littérature rapporte qu'après utilisation, environ 50% des déchets de films de PEBD sont déposés dans des décharges sauvages, causant de sérieux et visibles problèmes de pollution, 30% de déchets sont brûlés de manière incontrôlable et seulement 20% de la quantité totale des déchets de films sont recyclés. L'intérêt porté aux matériaux recyclés à partir de plastiques post-consommés utilisés en agriculture et dans le domaine de l'emballage, gagne une attention croissante de la part de beaucoup de laboratoire de recherche dans le monde [12].

II.4 Quelques repères historiques

Le PE est le polymère thermoplastique d'oléfine le plus anciennement préparé industriellement. Il était admis avant 1933 que l'éthylène n'était pas polymérisable ; cependant, avant cette date, les chimistes d'I.G.FARBEN avaient pu obtenir des oligomères (huile, cire) et bien plus tôt, en 1890, BAMBERGER et TSCHIRNER du polyéthylène linéaire à partir du diazométhane dissout dans de l'éther [11].

❖ PEBD :

- 1932 : lancement d'un programme de recherche sur les réactions de chimie organique effectuées à 3000 bars par le Hollandais MICHEL ;
- 1933 : FAWCETT et GIBSON observent traces de cire blanche sur parois réacteur grâce à l'association : éthylène+benzaldéhyde+1400bars+170°C ;
- 1935 : ils obtiennent 8 grammes de PE dans un réacteur de 80ml grâce à une pollution à l'oxygène ;
- 1939 : ICI met en service une usine de 100t/an ;
- 1944 : Le procédé d'ICI fait l'objet d'une variante, la polymérisation est réalisée par BASF dans un réacteur tubulaire (4000 bars) ;
- 1946 : 24 usines fonctionnent déjà aux USA et en Grande-Bretagne.

II.5 Le Recyclage

Le recyclage et le réemploi permettent d'économiser une grande quantité d'énergie primaire, notamment du pétrole, la principale matière première de la plupart des matières plastiques [3].

Le principe du cycle selon lequel la matière est constamment réutilisée, n'est pas une découverte récente. La nature l'applique déjà depuis des milliards d'années, et avec succès.

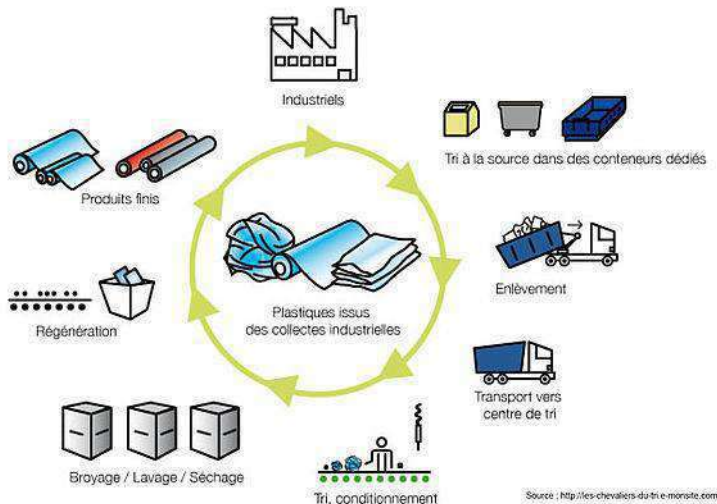


Photo. II.3:PEBD recyclé

Fig. II.4:Recyclage de plastique

II.6 Bitumes modifiés par des polymères

Les bitumes modifiés sont des liants bitumineux dont les propriétés ont été modifiées par l'emploi d'un agent chimique, qui, introduit dans le bitume de base, en modifie la structure chimique et les propriétés physiques et mécaniques. Les bitumes modifiés sont codifiés dans la norme NF EN 14023, celle-ci présente une description et un classement en fonction des performances [2].

II.6.1 Polymères destinés aux bitumes

Des polymères ont été utilisés avec succès dans la fabrication des liants bitumineux depuis des années, ceux-ci demeurent encore aujourd'hui le type d'adjuvants bitumineux les plus populaires. Les polymères sont préparés avant emploi dans une unité spécialisée. Les agents chimiques, généralement ajoutés, comprennent le caoutchouc naturel, les polymères synthétiques, le soufre et certains composés organométalliques [2].

II.6.2 L'influence des polymères sur le bitume

D'après Lewandowski (1994), le but d'ajouter des polymères au bitume peut se résumer en cinq points [2] :

- Augmenter la résistance aux déformations permanentes survenant à haute température,
- Augmenter la flexibilité à basse température ;
- Améliorer la résistance à la fatigue ;
- Augmenter la limite d'élasticité ;
- Réduire la sensibilité thermique.

La concentration de polymères dans le bitume est fonction de:

- la nature chimique du polymère ;
- les propriétés physiques du polymère ;
- la nature des interactions entre le polymère et le bitume.

Conclusion

Les polymères sont des ajouts largement utilisés dans le domaine routier grâce à leur efficacité et leur avantage qu'ils fournissent aux enrobés bitumineux.

Le polymère est un domaine vraiment très vaste ; A travers ce chapitre, nous avons essayé de cerner les grands ensembles traitant les polymères tels que leur types et composition chimique.

Chapitre III

NOTION SUR LE MODULE DE RIGIDITÉ

III.1 Introduction

Ce chapitre s'intéresse à la « rigidité » des enrobés bitumineux, une caractéristique exprimée par leur « module de rigidité », et aux méthodes de détermination du module de rigidité. Parmi ces méthodes, une ont été choisies pour estimer le module de rigidité du béton bitumineux, c'est la méthode traction indirecte ou compression diamétrale.

La rigidité des enrobés bitumineux dépend de plusieurs facteurs comme : la vitesse de chargement, la température, le type de bitume, la teneur en humidité du bitume, l'état de contrainte, les agrégats, les fines, la présence d'eau dans le mélange, les vides, l'âge du mélange, les éventuels aditifs ou produit ajoutés au mélange. A une température donnée et sous un chargement lent, le béton bitumineux se déforme lentement et les déformations sont de type permanent.

III.2 Essais de rigidité normalisés [EN 12697-26, 2012]

Accepte plusieurs méthodes de détermination du module de rigidité des enrobés bitumineux, schématisés dans la figure III.1. Il s'agit de l'essai de flexion en deux points sur éprouvettes trapézoïdales (2PB-TR) ou prismatiques (2PB-PR), l'essai de flexion en trois points sur éprouvettes prismatiques (3PB-PR), l'essai de flexion en quatre points sur éprouvettes prismatiques (4PB-PR), l'essai de traction indirecte sur éprouvettes cylindriques (IT-CY), l'essai de traction-compression directe sur éprouvettes cylindriques (DTC-CY) et l'essai de traction directe sur éprouvettes cylindriques (DT-CY) ou prismatiques (DT-PR). Parmi ces essais, l'essai de flexion en deux points 2PB-TR, l'essai de traction directe DT-CY et l'essai de traction indirecte IT-CY sont les plus fréquemment employés en Algérie.

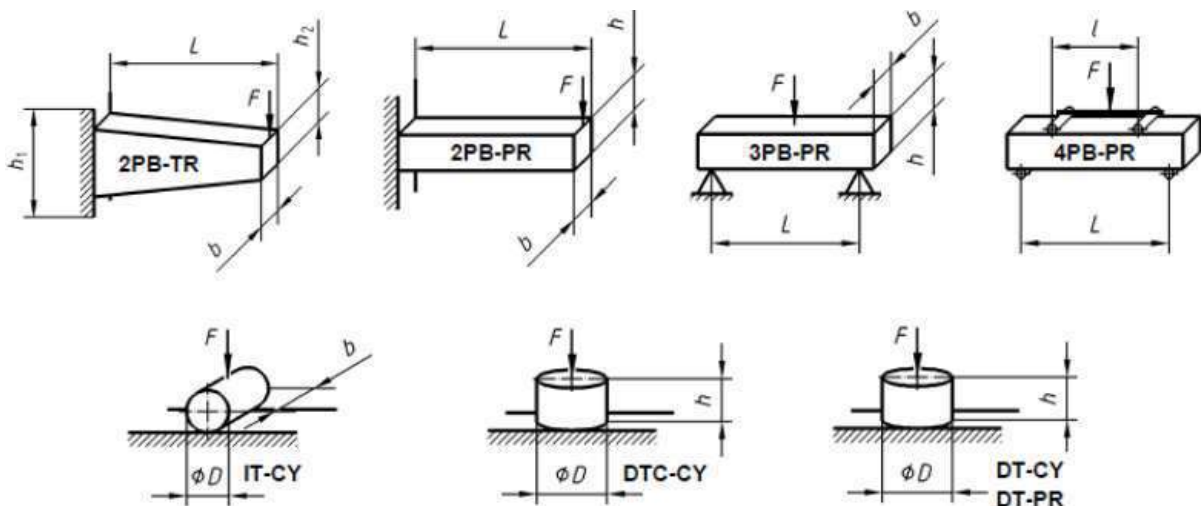


Fig. III.1: Plusieurs méthodes de module de rigidité

III.3 Essai de Traction indirect IT-CY

III.3.1 Principe :

L'essai de rigidité en compression diamétrale ou traction indirecte (IT-CY) consiste en l'application d'une charge le long du diamètre vertical d'une éprouvette cylindrique et la mesure de la déformation diamétrale horizontale transitoire de l'éprouvette pendant l'application de la charge.

La mesure de la déformation est faite à l'aide d'un capteur de déformation de type LVDT, placé autour de l'éprouvette et fixé à l'aide de deux bandes de chargement en acier. Le principe de l'essai est schématisé dans la (figure III.3).

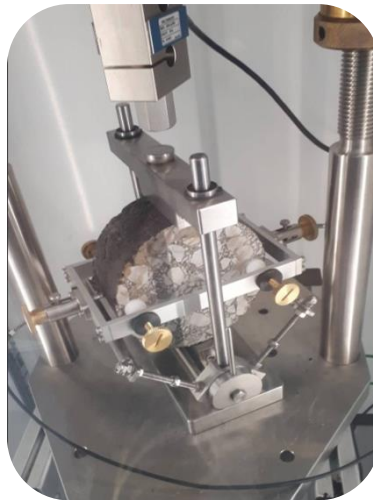


Photo. III.1: Essai traction indirect.

III.3.2 Appareillage :

- **Thermomètre ou capteurs de résistance en platine** : d'une étendue de mesure adaptée capables de mesurer à ± 0.1 °C la température de l'éprouvette et des conditions de stockage et d'essai.
- **Règle en acier** : avec des graduations de 1mm.
- **Pieds à coulisse externes** : capables de mesurer ± 0.1 mm.
- **Plaque de verre ou d'acier** : Avec un état de la surface supérieure de la plaque ne dévient pas en planéité d'une tolérance supérieure à 0.05 mm sur la largeur de la plaque.
- **Support** : capable de maintenir un cylindre du matériau d'essai lors du découpage des éprouvettes.
- **Scie** : capable de couper et d'ajuster des éprouvettes aux dimensions requise.
- **Cadre de chargement en acier**
- **Deux Bandes de chargement** : supérieur et inférieur en acier inoxydable. La face en contact avec l'éprouvette doit être concave et occuper la hauteur entière de l'éprouvette. Les bords des bandes de chargement doivent être arrondis pour éviter de marquer l'éprouvette pendant les essais. Un moyen pour centre la platine inférieure par rapport à l'axe de charge du cadre de chargement en acier doit être fournie. La platine supérieur doit entrer en contact avec le système de chargement par une rotule (voir annexe D).



Photo. III.2: Equipement d'essai

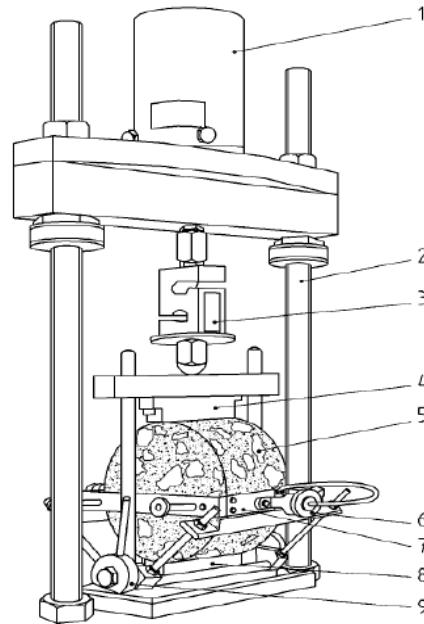


Fig. III.2: Principe de l'essai.

- | | |
|---|--|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Vérin de chargement 2. Cadre de chargement en acier 3. Peson 4. Platine de chargement supérieur 5. Epreuve soumise à essai | <ol style="list-style-type: none"> 6. Réglage LVDT 7. Châssis de montage LVDT 8. Platine de chargement inférieur 9. Châssis d'alignement |
|---|--|

Tab. III.1: Dimensions des bandes de chargement.

Diamètre d'éprouvette nominal (mm)	Largeur bande de chargement (mm)	Profondeur nominale de la concavité (mm)
80	10 ± 1	0.3 ± 0.05
100	12 ± 1	0.4 ± 0.05
120	15 ± 1	0.5 ± 0.05
150	19 ± 1	0.6 ± 0.05
200	25 ± 1	0.8 ± 0.05

III.4 Mode d'opérateur

Les éprouvettes cylindriques doivent avoir une épaisseur comprise entre 30 mm et 75 mm et un diamètre nominal 80 mm, 100mm, 120 mm, 150 mm ou 200mm. Les deux dimensions doivent être choisies par rapport à la dimension maximale nominale du mélange.

A l'aide d'un marqueur adapté, dessinez un diamètre sur l'une des faces plates de l'éprouvette. Un second diamètre doit être dessiné à $(90 \pm 10)^\circ$ du premier. Les deux diamètres doivent être repérés de manière adaptée.

Un nombre minimum de 10 impulsions de chargement répétées est appliqué avec des périodes de repos à l'aide du vérin de chargement. La norme européenne [EN 12697-26, 2012] prévoit un temps de montée en charge ou un temps nécessaire à l'application de la charge pour passer de zéro à la valeur maximale de $124 \text{ ms} \pm 4 \text{ ms}$.

La charge appliquée doit être mesurée, à l'aide d'un peson avec une exactitude de 2 %. La période de répétition des impulsions (Fig. III.4) doit être de $(3,0 \pm 0,1)$ s.

1. Valeur crête de la charge ;
2. Période de répétition d'impulsions ;
3. Temps de montée.

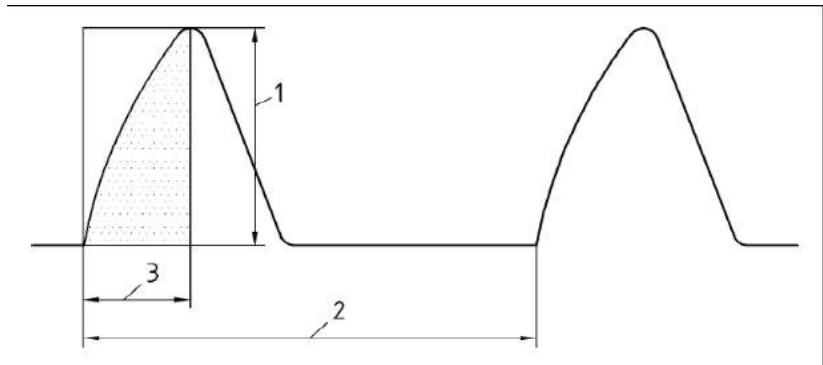


Fig. III.3: Forme de l'impulsion de chargement

III.4.1 Condition de stockage

Si la période de stockage est inférieure à 4 jours, la température de stockage ne doit pas dépasser 25 °C. Pour un stockage supérieur à 4 jours, la température ne doit pas dépasser 15 °C. Les températures et les durées de stockage doivent être consignées. Les éprouvettes doivent être stockées sur une face plate et ne doivent pas être empilées (voir annexe D).

III.5 Mesure de rigidité

Si nécessaire, les appareils de mesure de déformations doivent être réglés approximativement dans la partie centrale de leurs étendues de fonctionnement. Cinq impulsions de chargement supplémentaires doivent être appliquées à l'éprouvette et, pour chaque application d'impulsion de chargement, la variation de la déformation diamétrale horizontale et de la charge appliquée dans le temps doit être mesurée et consignée, et le facteur de surface de charge déterminé (voir annexe D).

III.5.1 Mesure de la déformation

L'éprouvette doit être démontée de l'appareillage d'essai, tournée de (90 ± 10) ° autour de son axe horizontal et remontée.

- Si la valeur moyenne du module de rigidité de cet essai est entre +10% et -20% de la valeur moyenne enregistrée pour le premier essai, la moyenne pour les deux essais doit être calculée et notée en tant que module de rigidité de l'éprouvette.
- Si la différence entre les deux valeurs est supérieure à celle spécifiée ci-dessus, les résultats doivent être rejetés.

A la fin de l'essai, aucun essai supplémentaire sur l'éprouvette de cette norme ne doit être effectué pendant 24 h (voir annexe D (C.4.3.4.4)).

III.6 Conclusion

L'étude de module de rigidité, nous permet d'évaluer l'ensemble des performances d'un enrobé bitumineux pour nous permettre de se prononcer sur la qualité d'enrobé et sa durabilité et pour calculer le dimensionnement le corps de chaussé.

Partie Expérimentale

Chapitre IV

CARACTERISATION DES MATÉRIAUX UTILISÉS ET FORMULATION

IV. 1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de présenter les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude.

Donc dans ce chapitre, nous allons exposer les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition d'un béton bitumineux.

Puis, nous présentons les mélanges choisis dans cette étude par l'étude de formulation et la détermination des différents pourcentages de la teneur en liant supposés (Sachant que les essais réalisés dans cette étude sont faites au niveau du laboratoire LTPS-Ghardaïa).

IV.2 Provenance des matériaux

IV.2.1 Les granulats

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

Les origines des fractions granulaires 0/3, 3/8, 8/15 le sont données dans le tableau (IV.1).

Tab. IV.1: Provenance des granulats utilisés.

Matériau	Carrières
Sable 0/3	Hassi Messaoud (Ben Brahim)
Gravier 3/8	Hassi Messaoud (Ben Brahim)
Gravier 8/15	Hassi Messaoud (Ben Brahim)



Photo. IV.1: Les classes de graviers utilisés.

IV.2.2 Le bitume

Le bitume utilisé dans cette étude est un bitume pur de classe 40/50 provenant des fondoirs de la centrale d'enrobage du groupe Total à Ouargla.



Photo. IV.2: Bitume pur de classe 40/50.

IV.2.3 La chaux

La chaux utilisée dans cette étude c'est la chaux hydratée d'Ouargla.

IV.2.4 Le sable de dune

D'après KHANGAOUI S. (2013) le sable de dunes est le résultat d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz.

Le Sahara, couvre environ le tiers du continent africain. Ces chiffres montrent bien l'intérêt que l'on doit apporter à la construction routière dans le Sahara, qui reste fort démunie en infrastructures, et aussi l'importance que l'on doit accorder au sable dans toute investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux.

L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. A l'époque déjà, les ingénieurs avaient recours à l'utilisation du sable mélangé à un liant hydrocarboné en particulier pour les couches de roulement. Beaucoup d'études et des réalisations ont été faites.

Pour notre étude nous avons utilisé le sable de dunes de la région de SIDI KHOULED wilaya d'Ouargla.



Photo. IV.3: Sable de dunes

IV.3 Identification des constituants

IV.3.1 Caractéristiques intrinsèques des granulats

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

IV.3.1.1 la Masse volumique absolue selon (NFP 18-301)

La masse par unité du volume de la matière qui constitue le sable, sans tenir compte des vides qui peuvent prendre place entre les grains.

La formule qui permet de calculer ce paramètre est :

$$\gamma_s = \frac{M}{V_s}$$

Tels que:

γ_s : La masse volumique absolue (t/m³, g/cm³,...)

M : La masse de l'échantillon (g)

V_s : Le volume absolu de l'échantillon (cm³)

Les résultats se résument dans le tableau suivant pour les différents granulats:

Tab. IV.2: Masse volumique absolue des granulats utilisés.

Type de granulat	$\gamma_s(\text{g/cm}^3)$
Sable 0/3	2.66
Gravier 3/8	2.66
Gravier 8/15	2.66
Sable de dunes	2.60

Le résultat obtenu est confirmé à la norme.

IV.3.1.2 Résistance à la fragmentation et à l'usure :

Elles sont mesurées par le coefficient de "Los Angeles" et le coefficient Micro Deval, les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant:

Tab.IV.3: Résultats des essais MDE et LA.

Essais	Référence	Gravier 3/8	Gravier 8/15	Spécification
LA %	EN 1097-1	23.62	22.21	≤ 25
MDE %	EN 1097-2	24	23.2	≤ 20

Résultats d'essai de Micro Deval n'est pas conforme aux spécifications mais il reste une assez acceptable, et pour l'essai de Los Angeles le résultat est conforme.

IV.3.1.3 Analyse granulométrique selon (NF EN 933-1)

Cet essai a pour objectif de déterminer la répartition des grains suivant leurs dimensions ou grosseurs pour les granulats supérieurs au diamètre 0,08 mm. Les résultats de l'analyse granulométrique sont donnés sous forme d'une courbe dite courbe granulométrique (Fig. IV.1).

Le tableau (IV.4) ci-dessous présente la distribution granulométrique pour les trois fractions granulaires plus le sable de dune :



Photo. IV.4: Tamis d'analyse granulométrique.

Tab. IV.4:Analyse granulométrique des granulats utilisés.

Tamis	Fractions			
	Sable dune	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
40	100	100	100	100
31,5	100	100	100	100
25	100	100	100	100
20	100	100	100	100
16	100	100	100	99,81
14	100	100	100	88,05
12,5	100	100	100	64,57
10	100	100	100	31,42
8	100	100	99,00	9,84
6,3	100	100	85,71	1,57
5	100	99	57,23	1,44
4	100	98	34,13	1,33
3,15	100	97	16,65	1,25
2	100	84	2,00	1,13
1	100	61	1,45	1,02
0,63	100	50	1,24	0,99
0,315	97,09	40	1,07	0,95
0,25	90,34	36,0	1,03	0,95
0,16	53,77	30,0	0,98	0,94
0,08	1,25	17,0	0,94	0,93

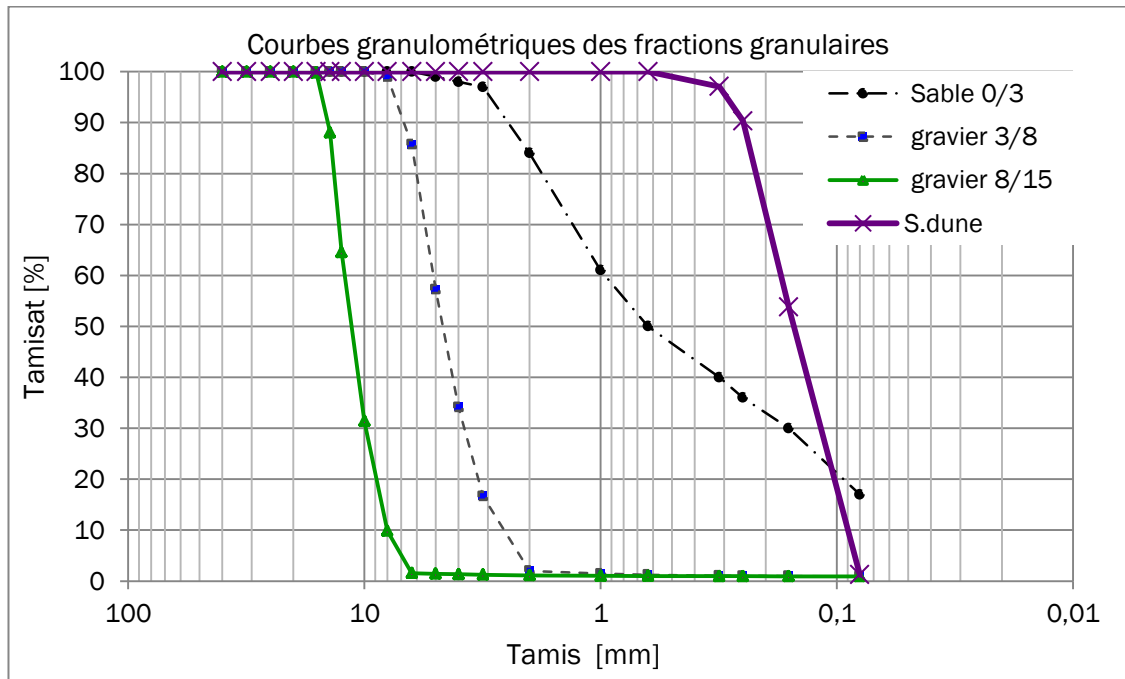


Fig. IV.1:Courbes granulométriques des fractions granulaires utilisées.

IV.3.1.4 Coefficient d'aplatissement selon (FN EN 933-3)

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons bitumineux est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement des granulats. Ce coefficient permet de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats.



Photo. IV.5: Principe de l'essai d'aplatissement.

Tab. IV.5: Résultats d'aplatissement des graviers.

Classe des graviers	3/8	8/15	Spécifications FN EN 933-3
Coefficient d'aplatissement %	11,1	3,6	≤ 20

Résultats d'essai d'aplatissement sont conformes aux spécifications.

IV.3.1.5 Equivalent de sable selon (norme NF EN 933-8) et 10 % des fines selon (NF P 18-597)

Cet essai qui s'effectue sur la fraction de sol, est réalisé pour déterminer le degré de pollution d'un sol ou d'un sable. 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 + éléments fine (floculant).
- hauteur h2 : sable propre seulement.

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

$$ES = 100. h2 / h1$$

Pour l'essai de l'équivalente de sable à 10% des fines sur le sable 0/3 nous avons eu le résultat d'après LTPS.

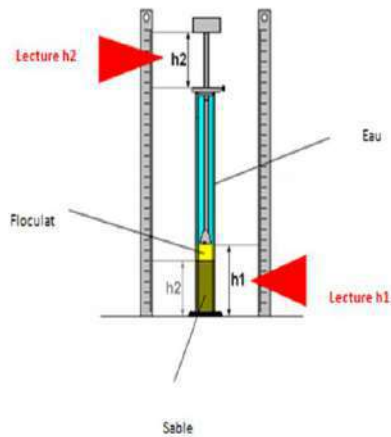


Fig. IV.2: Principe de l'essai d'équivalent de sable.



Photo. IV.6: Équivalent de sable.

Tab. IV.6:Équivalente de sable des sables.

Equivalent de sable [%]	Résultats	Référence	Spécifications
Sable 0/3	63,88%	NF P 18-597	≥ 45%
Sable de dune	90,47%	NF EN 933-8	≥ 45%

IV.3.1.6 Teneur en fines selon (EN 933-1)

Permet de déterminer la quantité de fine présente dans l'échantillon. Elle se fait par un rapport de poids sur une quantité donnée à la quantité de fine passant au tamis de 0.08 mm. elle se traduit par un pourcentage.

Tab. IV.7: Teneur en fines des sables.

Classes des gravies	3/8	8/15	Spécification (XP P18-545)
Teneur en fines f (%)	0.94	0.93	< 1

IV.3.1.7 Essai de Bleu de méthylène selon (NF EN 933-9)

L'essai au bleu de méthylène permet la détermination de l'activité et de la quantité de la fraction argileuse d'un échantillon.

Le dosage s'effectue en ajoutant successivement des quantités de solution de "bleu" et en contrôlant l'adsorption au fur et à mesure Une goutte de suspension est prélevée et est déposée sur un filtre. L'essai consiste à déterminer l'adsorption maximale obtenue lorsque la tâche est entourée d'une auréole bleu-clair persistante.

(MBF) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kilogramme de la fraction granulaire testée.

$$MBF = \frac{V}{M} \times 10$$



Fig. IV.3: Procédure de l'essai bleu méthylène.

Tab. IV.8: Résultats de l'essai de bleu de méthylène.

Sable	SD	0/3	Spécification NF EN 933-9
Bleu de Méthylène MBF	0.9	1.86	<10

IV.4 Caractéristique du bitume

Le bitume utilisé dans notre étude est un bitume pure de classe 40/50 provient de l'unité de groupe TOTAL de Ouargla.

Après les essais d'identification qui ont été réalisés sur ce bitume au niveau de la salle des produits bitumineux de LTP Sud Ghardaïa. Les résultats obtenus sont mentionnés dans le tableau suivant.



Photo. IV.7: Préparation des échantillons.

Tab. IV.9: Caractéristiques du bitume utilisé.

Essai	Résultats	Spécifications
Pénétrabilité (1/10 mm) (NF EN 1426)	42.33	40-50
TBA (°C) (NF EN 1427)	52.9	47-60
Densité (NA 5224)	1.02	1.00-1.10

À partir des essais de caractérisation effectuée on peut dire que notre liant correspond à un bitume pur de classe 40/50.

IV.5 Caractéristiques de Polyéthylène basse à densité

Le polyéthylène à basse densité utilisée dans notre étude, PEBD coloré recyclée et broyée au niveau de l'unité de transformation du plastique sud (UTPS) situé dans la zone industrielle d'Ouargla.

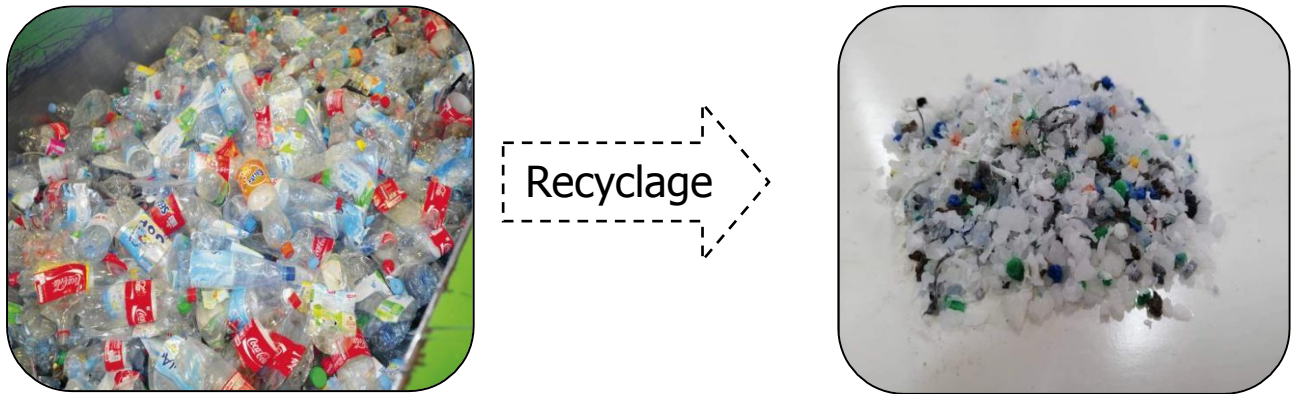


Photo. IV.8: Plastique avant et après le recyclage.

Le tableau suivant présente une fiche technique pour différences caractéristiques de PEBD :

Tab. IV.10: Différentes caractéristiques de la poudrette utilisée.

Dénomination des différentes propriétés	PEBD
Masse volumique	0.915-0.935
Structure	Branchée
Caractéristiques principales	Souplesse
Contrainte au seuil (rupture)	10-13 MPa
Module d'élasticité	1900gr/cm ²

Pour étudier le comportement thermique de la PEBD on utilise l'essai calorimétrie à balayage différentielle (DSC en anglais abréviation de Differential Scanning Calorimetry) pour déterminer la température de fusion et de cristallisation.

IV.5.1 La calorimétrie à balayage différentielle DSC :

La DSC est une technique utilisée pour étudier le comportement thermique d'un matériau. Elle permet de déterminer des transitions de phase comme:

- la température de transition vitreuse ;
- la température de fusion et de cristallisation;
- l'enthalpie de réaction.

Le principe est simple, l'appareil renferme 2 récipients, l'un comme référence et l'autre contient l'échantillon à analyser. Ces 2 récipients sont dans un four que l'on chauffe jusqu'à la température choisie, habituellement à 10°C/minute.

Ces récipients sont reliés à un thermocouple qui lit la température et la transmet à un ordinateur. Au fur et à mesure que l'on chauffe, la température du récipient contenant l'échantillon et celle du récipient de référence sera différente. L'ordinateur convertira ces 2 températures en flux de chaleur.

Ainsi, ce que nous mesurons en DSC est la quantité de chaleur supplémentaire à fournir au récipient de référence, pour atteindre la même que le récipient contenant l'échantillon. Cette analyse se fait sous atmosphère inerte pour éviter les réactions de l'échantillon avec l'oxygène de l'air.



Photo. IV.9:L'équipement de Differential Scanning Calorimetry.



Photo. IV.10:Les 2 récipients d'analyse.

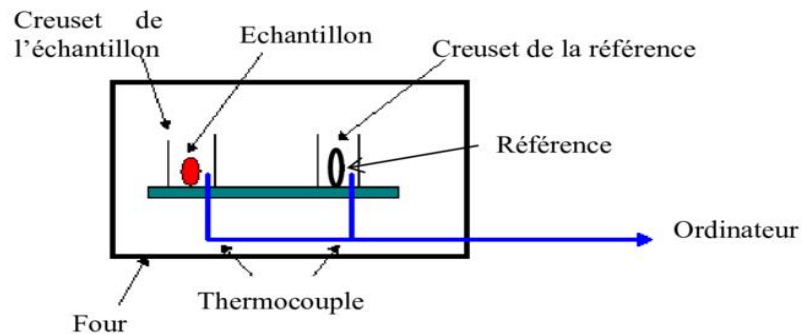


Fig. IV.4:Représentation schématique du dispositif expérimental de Differential Scanning Calorimetry.

• **Résultats :**

Après cette analyse on trouve que le PEBD fusionné à la température de 120°C.

IV.6 Etude de Formulation

Pour ce projet nous avons choisi d'étudier un béton bitumineux semi grenu (BBSG) de classe 0/14, dans notre étude nous avons fait trois formulations : la première formulation nous avons utilisé le sable concassé 0/3 gravier 3/8 et 8/15. Le mélange granulométrique utilisé permet d'obtenir un mélange d'enrobé type béton bitumineux (témoin).

La deuxième formulation nous avons utilisé le sable de dune, sable concassé 0/3, gravier 3/8 et 8/15. Le mélange granulométrique utilisé permet d'obtenir un mélange d'enrobé type béton bitumineux à base de sable de dune.

La troisième composition nous avons utilisé dans le mélange d'enrobé à base de sable de dune un bitume modifié par la poudre de PEBD avec différents pourcentages.

L'organigramme suivant présente la méthodologie de travail :

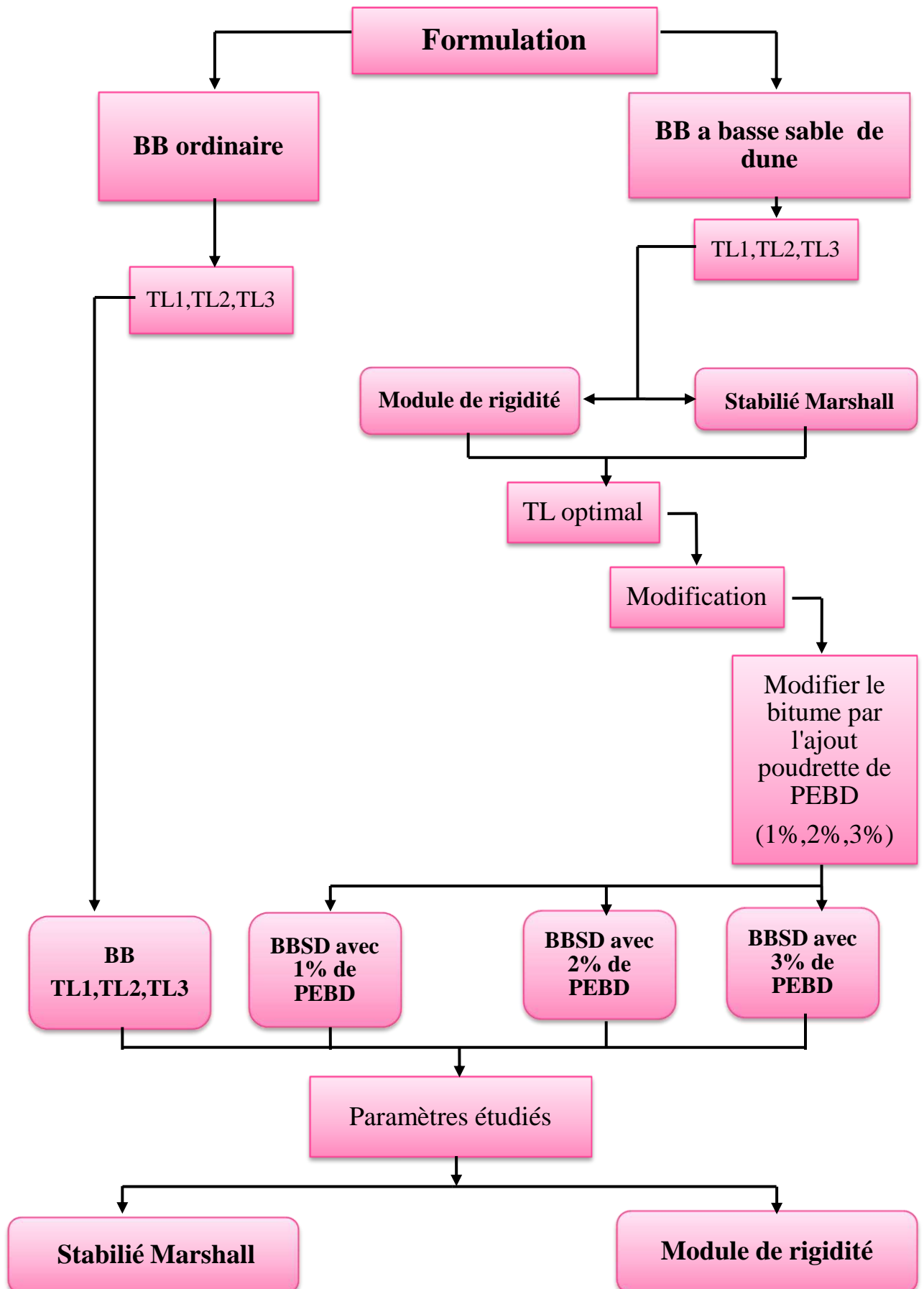


Fig. IV.5: Schéma de travail

IV.6.1 Courbe granulométrique du mélange :

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

Le tableau ci-dessous présente la granulométrie d'un béton bitumineux 0/14, à partir des valeurs du fuseau maximal et minimal.

Tab. IV.11: Fuseaux de béton bitumineux semi-grenu 0/14 [CTTP, 2004]

Tamis (mm)	Tamisât min – Tamisât max (%)
14	94-100
10	72-84
6.3	50-66
4	40-54
2	28-40
0.08	7-10

Pour la première formulation on a obtenu la courbe granulométrique de mélange (Figure IV.15) et la composition optimale des granulats (Figure IV.16)

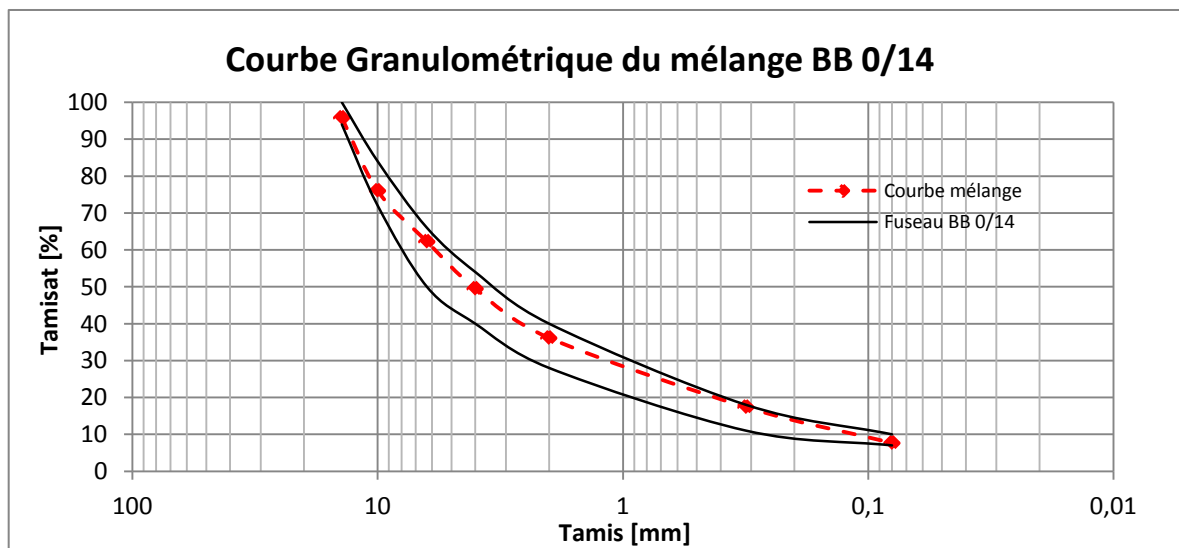


Fig. IV.6: Courbe granulométrique de mélange BB ordinaire.

Tab. IV.12: Fuseaux de béton bitumineux ordinaire.

Tamis	14	10	6,3	4	2	0.315	0.08
Tamisât	96	76	62	49	36	17	8
Fuseau	100-94	84-72	66-50	54-45	40-28	18-11	10-7

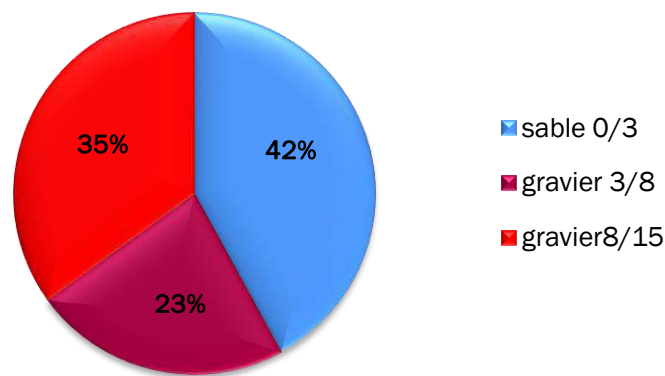


Fig. IV.7:Composition granulaire du mélange.

La courbe granulométrique du mélange issue de cette formule s’insère parfaitement dans le fuseau spécifique au béton bitumineux semi grenu 0/14 exigé par les recommandations algériennes pour l’utilisation des bitumes et les enrobés bitumineux de Février 2004.

Pour la deuxième formulation d’enrobé a base sable de dune on a obtenu la courbe granulométrique de mélange (Figure IV.8) et la (Figure IV.9)

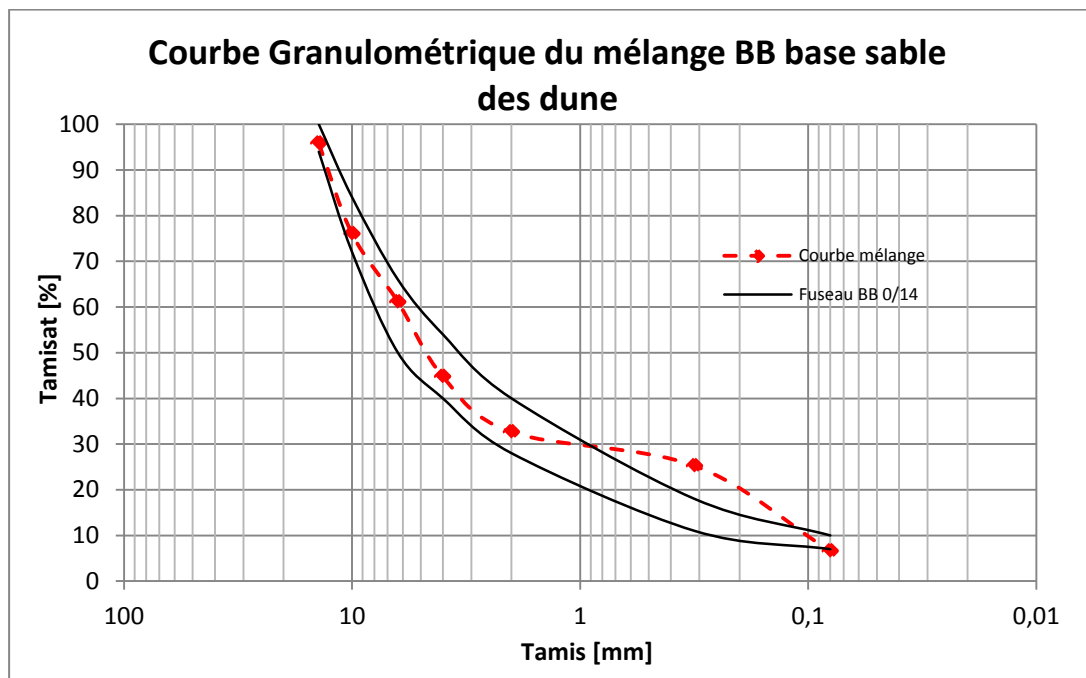


Fig. IV.8:Courbe granulométrique de mélange BBSD.

Tab. IV.13: Fuseaux de béton bitumineux à base sable de dunes.

Tamais	14	10	6,3	4	2	0.315	0.08
Tamaisât	96	76	61	45	33	25	7
Fuseau	100-94	84-72	66-50	54-45	40-28	18-11	10-7

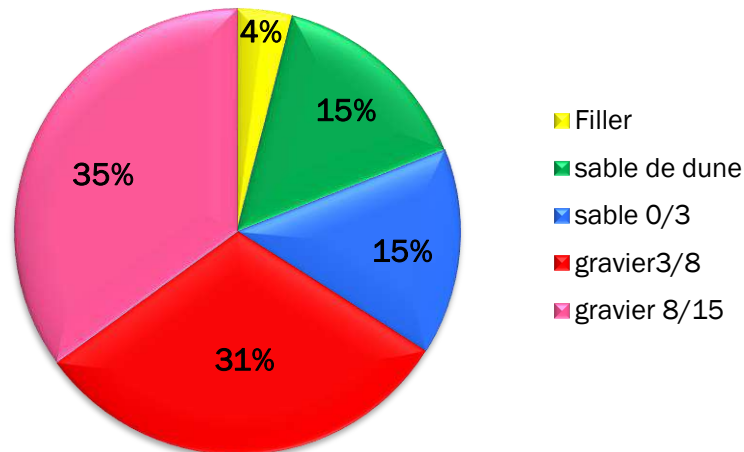


Fig. IV.9:Composition optimale des granulats du mélange BBSD.

Nous observons une discontinuité dans la distribution entre le tamis 1 et le tamis 0.315 et une augmentation des granules entre le tamis 0.315 et le tamis 0.08, C'est dû à que le sable de dunes est caractérisé par une granulométrie serré, pour cette raison nous observons que sur la figure ci-dessus (Fig. IV.8) 7 % de la courbe de sable de dunes est située en dehors du fuseau recommandé.

IV.6.2 Détermination des teneurs en liants :

Pour déterminer cette teneur en liant optimale, on introduit la notion de surface spécifique des granulats notée Σ et exprimée en m^2/kg , puis on calcule le coefficient correcteur α et enfin nous pouvons calculer la teneur en liant par le choix de module de richesse qui est déterminé dans la fourchette 3,3 à 3,9 pour le béton bitumineux.

❖ La première formulation BB ordinaire :

- Calcul la Surface Spécifique des Agrégats Σ :

$$\Sigma = (0.25G + 2.3S + 12s + 135f)/100 = (0.25 (37.74) + 2.3 (44.89) + 12 (9.7) + 135 (7.68))/100$$

$$\Rightarrow \Sigma = 12.66 \text{ m}^2/\text{kg}$$

- Calcul de Coefficient Correcteur α :

$$\alpha = 2,65 / MVR_g \quad \text{avec} \quad MVR_g = 100 \div \left[\frac{42}{2.69} + \frac{23}{2.64} + \frac{35}{2.64} \right] = 2.66$$

$$\Rightarrow \alpha = 0.995$$

- Calcul le Teneur en liant :

On a préparé trois mélanges avec des modules de richesse différente, le tableau (Tab IV.14) présente la valeur de module de richesse et la teneur en liant on obtient.

Tab. IV.14:Calcul de la teneur en liant du béton bitumineux.

$TL = \alpha \cdot K \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$	TL ₁	TL ₂	TL ₃
Module de richesse	3.45	3.55	3.65
Teneur en liant (%)	5.71	5.88	6.04

❖ La deuxième formulation béton bitumineux à base sable de dune :

On résume toutes les étapes précédentes dans le tableau ci-dessous.

Tab. IV.15:Calcul de la teneur en liant de Béton Bitumineux à base sable de dunes.

$TL = \alpha \cdot K \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$	TL ₁	TL ₂	TL ₃
Module de richesse	3.55	3.65	3.75
Coefficient correcteur	1.004		
Surface Spécifique (m2/kg)	12.01		
Teneur en liant (%)	5.86	6.03	6.2

❖ La troisième composition BBSD modifié par le PEBD :

Après avoir déterminé la teneur en liant optimale, on modifie le bitume par le polyéthylène basse densité avec trois pourcentages, Il s'agit de 1,2 et 3%.

IV.7 Conclusion

Les matériaux de qualité l'un des facteurs les plus importants qui assurent la durabilité des routes, qui est principalement liés aux caractéristiques de chaque matériau et qui nécessite l'approbation aux normes, et pour déterminer les propriétés et les caractéristiques d'un matériau il faut faire quelques expériences par type de matériau, que ce soit en laboratoire ou sur le terrain et ensuite faire la comparaison des résultats obtenus pour déterminer la qualité de la construction.

Chapitre V

ESSAIS REALISÉS ET DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX

V.1 Introduction

Pendant ce chapitre nous allons exposer l'étape expérimentale par la réalisation des deux essais mécaniques l'essai Marshall et l'essai module.

Ces essais ont pour but de juger la validité de notre choix des mélanges sélectionnés précédemment et ceci par la détermination des performances mécaniques de chaque mélange.

V.2 Préparation des mélanges

- Prélever les granulats selon la norme P18-553 «préparation d'un échantillon pour essai».
- Sécher les granulats dans une étuve à une température comprise entre 90 et 110°C.
- Une quantité de liant correspondant aux besoins de l'essai est prélevée.
- Le récipient rempli et fermé, placé en étuve, dans notre étude la température de référence de bitume 40/50 était entre 160°C.

V.3 Malaxage :

- Placer le mélange granulaire et le bitume dans l'étuve à la température 160 C pendant 2 h ;
- Verser dans la cuve de malaxage les échantillons de granulats pesés, avec le bitume ;
- Malaxer les constituants dans la cuve ;
- Continuer le malaxage jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène, les granulats étant complètement enrobés de liant. S'assurer que le mélange est visuellement homogène.
- Terminer le malaxage en restant dans la durée maximale de 3min.



Photo. V.1:Opération de malaxage.

V.4 Préparation le bitume modifier

La modification du bitume s'opère par la mise en contact du bitume et du polymère à une température supérieure à la température de fusion du polymère, avec un malaxage approprié pour provoquer un mélange intime des différentes phases.

La vitesse de malaxage et la température sont des paramètres essentiels à contrôler soigneusement pour obtenir une bonne dispersion tout en minimisant le temps de malaxage. Celui-ci peut varier d'une heure à 12 heures et plus, suivant le malaxeur utilisé (à petite vitesse ou à grande vitesse).

Dans notre recherche, nous avons utilisé les pourcentages 1, 2 et 3 % en masse à partir la teneur en liant optimal dans le BBSD.

V. 4.1 Appareillage

L'appareillage utilisé comprend :

- Un agitateur à hélice avec une vitesse de rotation maximale de 2000 tr/min ;
- Une étuve ;
- Un récipient avec couvercle dans lequel s'effectue la modification.

V. 4.2 Mode opératoire :

- La modification du bitume (40/50) s'effectue par l'ajout de PEBD sous forme coupés en petits copeaux.
- Les mélanges ont été élaborés selon la procédure suivante: le bitume est chauffé dans un récipient métallique dans une étuve à une température de $160 \pm 5^\circ\text{C}$.
- Les copeaux de polymère à la dose choisie sont rajoutés à la fois.
- Le mélange est agité à une vitesse constante d'environ 1000tr/min pendant deux heures.
- Durant toute la manipulation, la température doit être vérifiée. L'agitateur est mis à l'arrêt, puis soulevé avec le couvercle pour le transfert du mélange.
- Le déversement du mélange bitume/PEBD est alors effectué rapidement dans les granulats chaud appropriés pour continuer la préparation d'enrobé bitumineux.



Photo. V.2 : Modification du bitume par le PEBD.

V.5 Confection des éprouvettes pour les essais réalisés

Dans un récipient métallique pouvant contenir environ 2000cm^3 , la quantité de l'enrobé est 1200g de gâchée reconstituée à partir des classes granulaires dont les pourcentages varient en fonction de l'enrobé désiré sont versés. Pour une composition donnée du granulat, l'étude a porté sur 3 teneurs en bitume différentes.

Le mélange est porté à 160°C avant d'être versé dans le moule Marshall puis compacté à raison de 50 coups de marteau de la dame sur chacune des deux faces de l'éprouvette; un disque de papier filtre est placé sur la surface de l'enrobé avant compactage.



Photo. V.3: Opération de compactage.

La durée de compactage (damage et manutention) ne doit pas excéder 4 minutes, afin d'éviter tout risque de refroidissement.

Le moule est conservé 5 h au moins à température ambiante (15 à 25 C) après leur compactage.

Après 5 heures à température ambiante, l'éprouvette est démoulée en exerçant une légère pression sur le piston extracteur placé au contact de l'enrobé.



Photo. V.4:Opération de démoulage.

V. 6 Essais de performance mécanique

Les matériaux utilisés doivent être soumis à des essais mécaniques pour étudier leur comportement sous différentes sollicitations, parmi eux l'essai Marshall et l'essai module de rigidité.

V. 6.1 l'essai Stabilité de Marshall :

V. 6.1.1 Principe :

Des éprouvettes Marshall sont compactées selon l'EN 12697-30. La stabilité Marshall, le fluage, et le quotient sont ensuite déterminés sur ces éprouvettes en utilisant des procédures définies. L'essai de Marshall un essai de compression, cette compression est appliquée sur l'éprouvette après 40 min d'immersion dans un bain d'eau à 60°C, et à la vitesse de 50mm/mn \pm 0,1mm/mn.

V. 6.1.2 Procédure d'essai :

- On immerge les éprouvettes dans le bain thermostatique réglé à 60°C \pm 0,5°C une durée de 40 mn (\pm 1mn).
- Pendant ce temps, on installe également le dispositif contrôleur de cadence réglé pour une vitesse 50mm/mn \pm 0,1mm/mn.
- L'éprouvette est placée dans les mâchoires d'écrasement. l'ensemble est porte entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. Ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute.
- La rupture se produit au moment de l'arrêt de l'appareil puis on note les chiffres qu'indiquent l'écran de l'appareil (stabilité et fluage).

- Les mêmes étapes sont faites pour toutes les éprouvettes réalisées dans cette étude.

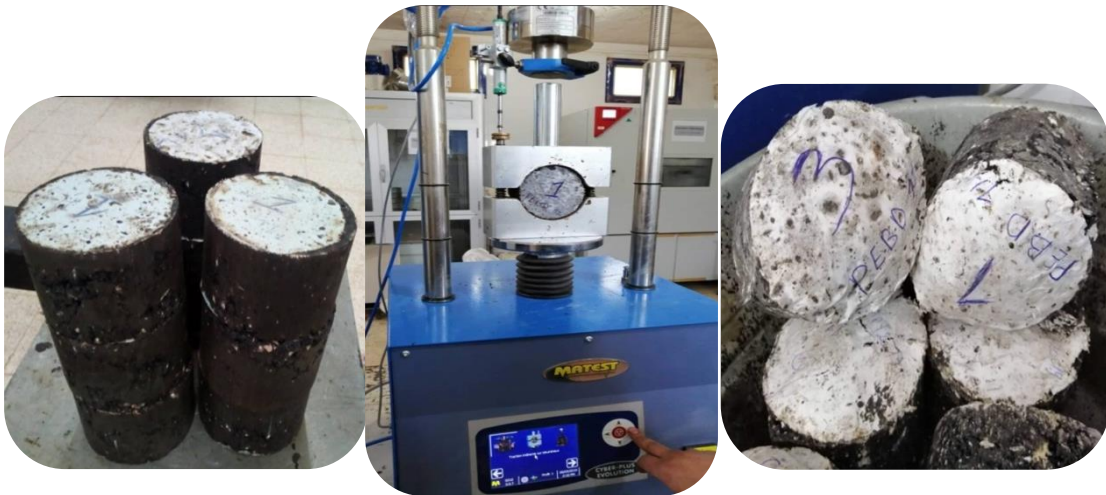


Photo. V.5: Principe de l'essai Marshall.

V. 6.2 L'essai Module de Rigidité

Le module de rigidité des enrobés bitumineux est déterminé par le Nottingham Asphalt Tester qui permet un essai de traction indirecte. Cet appareil utilise des échantillons cylindriques prélevés de la chaussée par carottage, ou bien préparés en laboratoire. Ces échantillons sont soumis de façon répétée à une charge verticale de compression, provoquant une déformation horizontale d'où est déduit le module de rigidité.

Les éprouvettes cylindriques de diamètre de 100 mm et hauteur moyenne de 67 mm ont été testées en compression diamétrale dans conditions d'essai (15°C, 124 ms) afin de trouver le module de rigidité moyen d'enrobé. La méthode d'opérateur d'essai mentionné précédemment (chapitre III).

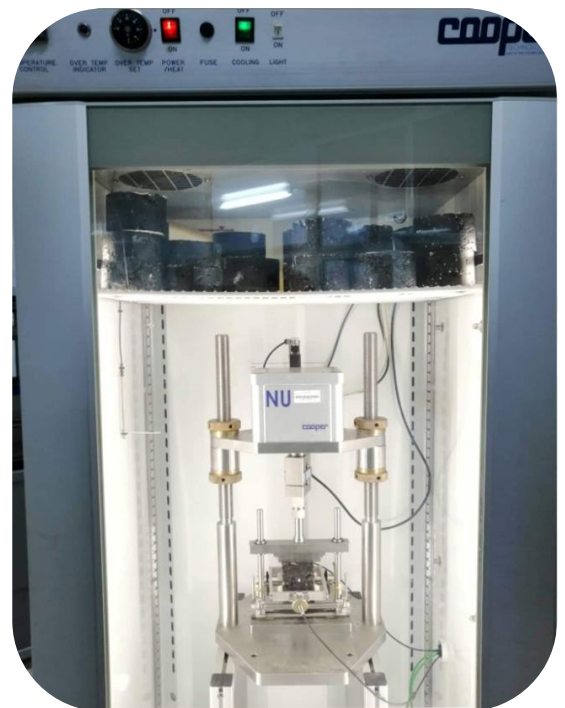


Photo V.6: Traction Indirect NAT

V. 6.2.1 Calcul du module de rigidité :

A l'aide des mesures des 5 impulsions de chargement, le module de rigidité mesuré doit être déterminé pour chaque impulsion de chargement à l'aide de la formule suivante :

$$S_m = \frac{F \times (v + 0.27)}{(z \times h)}$$

Où

S_m : est le module de rigidité mesuré, exprimé en mégapascals (MPa) ;

F : est la valeur crête de la charge verticale appliquée exprimée en Newtons(N) ;

z : est l'amplitude de déformation horizontale obtenue pendant le cycle de chargement, exprimée en millimètre (mm) ;

h : est l'épaisseur moyenne de l'éprouvette, exprimée en millimètres (mm) ;

v : est le coefficient de poisson.

V.6.3 Détermination de la densité apparente (méthode géométrique) :

V.6.3.1 Masse volumique apparente :

Masse par unité de volume, incluant les vides d'air, d'un corps d'éprouve a une température d'essai connue. Le volume du corps d'éprouve s'obtient par mesurage des dimensions. Pour le mesurage des dimensions de l'éprouvette nous avons besoin du Pied à coulisse (Photo. V.7).



Photo. V.7: Mesure des dimensions avec le pied à coulisse.

V.6.3.2 Formule de calcul

Calculer la masse volumique apparente géométrique d'une éprouvette cylindrique (ρ) au kg/m³ le plus proche comme suit :

$$\rho = \frac{m}{r^2 \times \pi \times h}$$

ρ : La masse volumique (kg/m³) ;

r: Le rayon de la base d'éprouvette (mm) ;

h: La hauteur d'éprouvette (mm) ;

m: La masse d'éprouvette (Kg).

$$MVA = \frac{\rho}{\rho_{\text{eau}}} \times 10^6$$

V.6.4 Détermination le pourcentage des vides et la compacité:

- **Pourcentage des vides**

$$V\% = 100 \left[1 - \frac{MVA}{MVR} \right]$$

- **Compacité d'une éprouvette**

$$C\% = 100 - V\%$$

V.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de présenter les principales étapes expérimentales pour connaître les propriétés mécaniques de tous les mélanges proposés dans cette étude et comment déterminer les différents paramètres de chaque essai soit essai Marshall ou essai de module.

Les résultats obtenus à partir des essais effectués sur les différents échantillons, sont très intéressants, ceux-ci seront exposés dans le chapitre qui suit avec leurs interprétations.

Chapitre VI

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

VI.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus suite aux essais Marshall et module effectués.

VI.2 Essai Marshall

L'essai Marshall permet de déterminer pour une température et une énergie de compactage données le «pourcentage des vides», la «compacité», la «stabilité» et le «fluage» dits Marshall d'un mélange hydrocarboné à chaud.

Le tableau ci-dessous présente la variation de la densité apparente et absolue en fonction des différents dosages du bitume selon chaque mélange :

Tab.VI.1:Densité apparente et réelle selon chaque mélange

Enrobé bitumineux ordinaire			
Mélange TL %	5,71	5,88	6,04
La densité apparente (g/cm ³)	2,338	2,334	2,331
La densité réelle (g/cm ³)	2,448	2,443	2,437
Enrobé bitumineux à base sable de dunes			
Mélange TL %	5,86	6,03	6,20
La densité apparente (g/cm ³)	2,347	2,339	2,333
La densité réelle (g/cm ³)	2,515	2,509	2,503

❖ Remarque :

Nous remarquons dans ce tableau que la densité apparente et la densité réelle dans les mélanges de BB et BBSD, est un peu prés constants malgré les différents teneurs en bitume dans les deux cas.

VI.2.1 Pourcentage des vides

La détermination des différents types de pourcentages des vides en fonction des teneurs de bitumes se fait par les formules citées dans le chapitre précédent.

Le tableau suivant présente les différents pourcentages des vides :

Tab. VI.2: Pourcentages des vides V_v pour les déférents mélanges.

Enrobé bitumineux ordinaire			
Mélange TL %	5,71	5,88	6,04
Pourcentage des vides V _v %	4,496	4,445	4,367
Enrobé bitumineux a basse sable de dunes			
Mélange TL %	5,86	6,03	6,20
Pourcentage des vides V _v %	6,68	6,78	6,81

On présente la variation des différents pourcentages des vides V_v pour les différents mélanges par les figures suivantes :

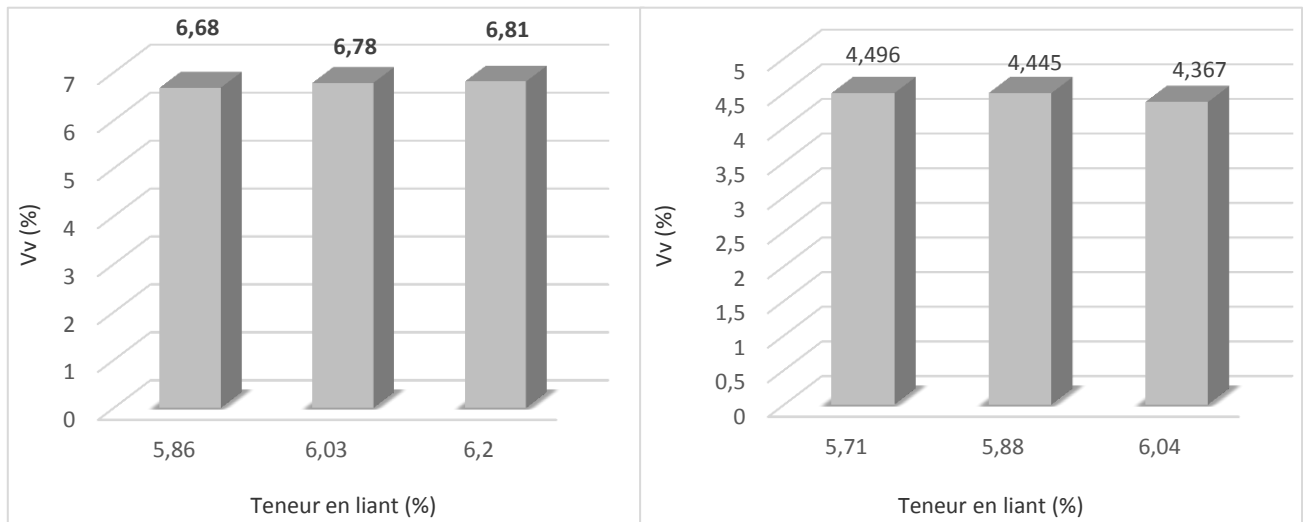


Fig. VI.2: Variation des vides en fonction des teneurs en bitume selon chaque mélange (BBSD).

Fig. VI.1: Variation des vides en fonction des teneurs en bitume selon chaque mélange (BB ordinaire).

Les figures ci-dessus montrent les variations de pourcentage des vides entre les bétons bitumineux ordinaires et les bétons bitumineux à base de sable de dune. On remarque qu'elles sont, à peu près, constants malgré les différents teneurs en bitume dans les deux cas.

Pour les pourcentages des vides dans les BB à base de sable de dune il n'a pas beaucoup augmenté par rapport aux BB ordinaires, en raison de la présence d'un pourcentage de sable 0/3 et la chaux pour compenser les fillers ce qui manque le sable de dune.

VI.2.2 La compacité

Le tableau suivant présente la variation de la compacité des éprouvettes en fonction de la variation la teneur en liant selon chaque mélange :

Tab. VI.3: La compacité pour chaque mélange

Enrobé bitumineux ordinaire			
Mélange TL %	5,71	5,88	6,04
La compacité %	95,504	95,555	95,633
Enrobé bitumineux a base sable des dunes			
Mélange TL %	5,86	6,03	6,20
La compacité %	93,32	93,22	93,19

Les figures ci-dessous présentent la variation de la compacité en fonction des dosages de bitume selon chaque mélange :

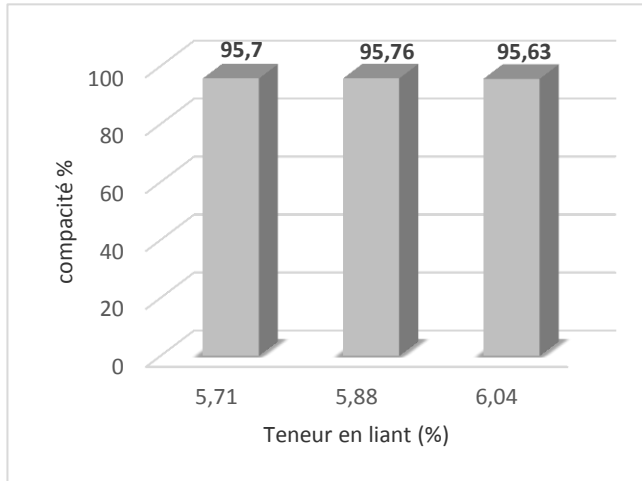


Fig. VI.3: Variation de la compacité en fonction des teneurs en bitume selon chaque mélange (BB ordinaire).

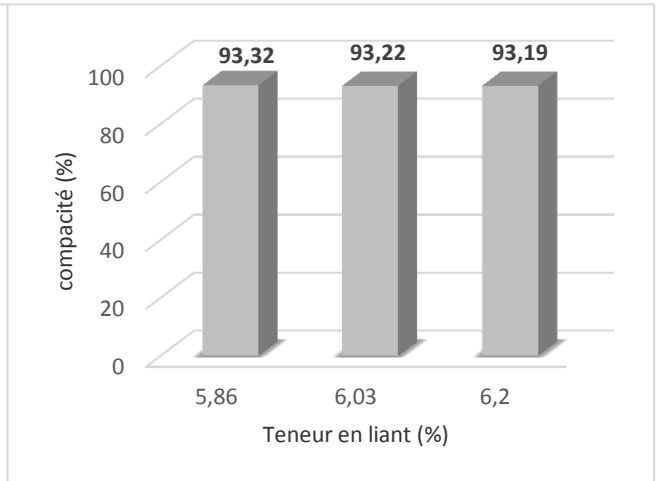


Fig. VI.4: Variation de la compacité en fonction des teneurs en bitume selon chaque mélange (BBSD).

Les figures (VI.3/ VI.4) ci-dessus montre que la compacité diminue avec l'augmentation des dosages de bitume.

VI.2.3 Stabilité Marshall et le Fluage

Les tableaux ci-dessous présentent la stabilité Marshall, le fluage et le quotient pour chaque composition en fonction de la variation la teneur en liant :

Tab VI.4: Résultats des essais Marshall pour BB ordinaire.

Enrobé bitumineux ordinaire				spécification
Teneur en liant %	5,71	5,88	6,04	-
Stabilité de Marshall KN	15.146	14.95	16.52	≥ 10.5
Fluage mm	3.843	3.704	3.792	< 4
Quotient de Marshall	3.941	4.036	4.356	-

Tab VI.5: Résultats des essais Marshall pour BBSD.

Enrobé bitumineux a base sable de dune				Spécifications
Teneur en liant %	5,86	6,03	6,20	-
Stabilité de Marshall KN	7.488	7.702	8.362	≥ 10.5
Fluage mm	5.137	5.216	4.741	< 4
Quotient de Marshall	1.457	1.476	1.763	-

Les figures ci-dessous présentent la variation de la stabilité de Marshall et le fluage en fonction de la variation de dosage du bitume pour chaque mélange :

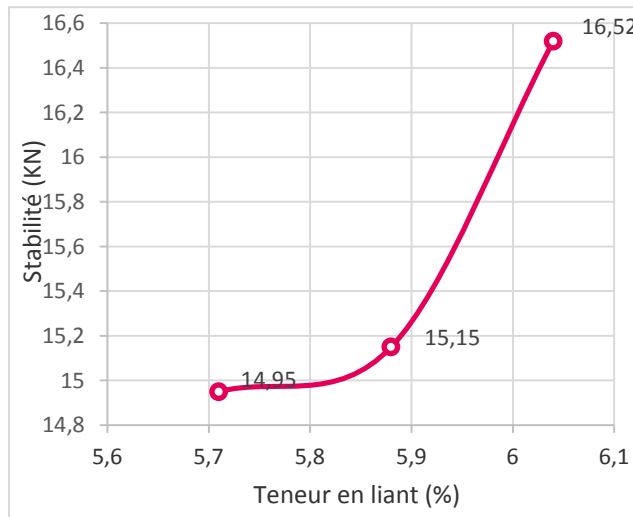


Fig. VI.5: Variation de stabilité Marshall en fonction des teneurs en liant % de (BB ordinaire)

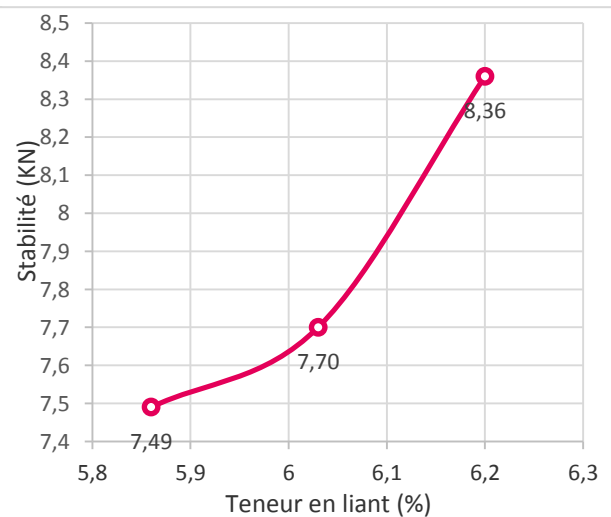


Fig. VI.6: Variation de stabilité Marshall en fonction des teneurs en liant % de (BBSD).

À travers les figures ci-dessus, on remarque que les résultats des stabilités Marshall trouvées pour les BBSD sont faibles en comparaison avec les BB ordinaires selon les normes française qui préconisent des stabilités supérieures à 10.50 KN (pour un enrobé semi grenue 0/14).

Ces résultats trouvés montrent que les sables de dune sont poreux, contient pas mal des petits vides. Le mélange béton bitumineux à base sable de dune une distribution non uniforme (voir la courbe granulométrie Fig. IV.8). Les résultats remarqués dénotent l'insuffisance de stabilité. Ces insuffisances ont pour origine essentiellement les caractéristiques intrinsèques de sable de dune étudié. Ces caractéristiques sont :

- **La granulométrie serrée** : défavorise le réarrangement des grains lors du compactage.
- **Teneur en fine faible** : défavorise la granulométrie d'une part et la rigidification du mélange d'autre part.

Les figures ci-dessous présentent la variation du fluage Marshall en fonction de la variation du dosage en bitume pour chaque mélange.

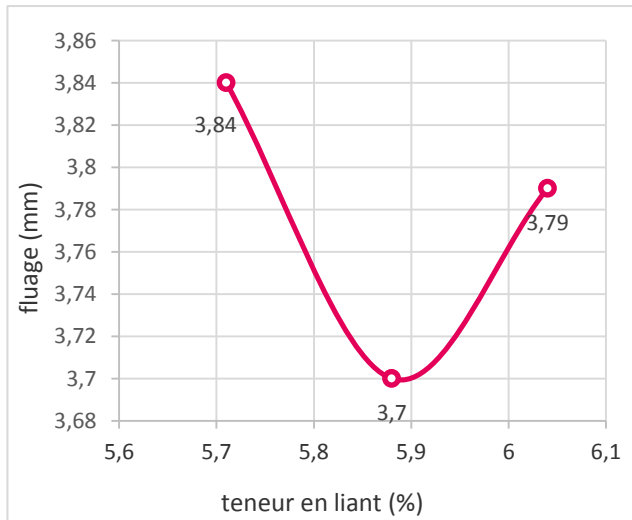


Fig. VI.7: Variation de Fluage en fonction des teneurs en liant % de (BB ordinaire).

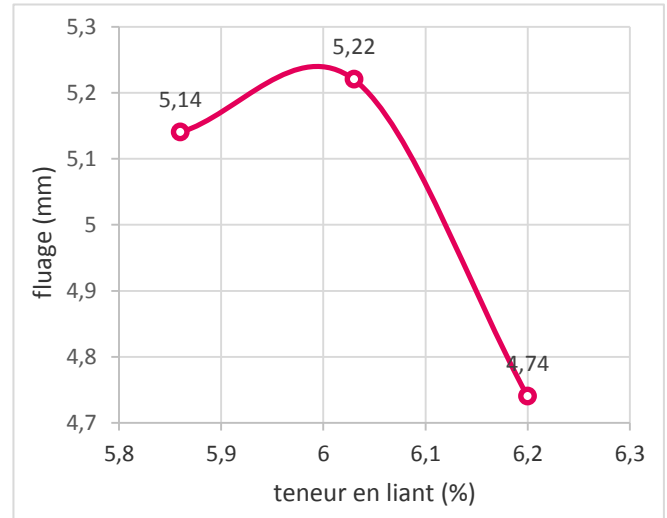


Fig. VI.8: Variation de Fluage en fonction des teneurs en liant % de (BBSD).

On remarque dans les figures ci-dessus, que les résultats du fluage des BB à base de sable de dune sont faibles en comparaison avec les BB ordinaires.

On remarque aussi un accroissement de valeur de fluage accompagné d'une augmentation de bitume puis il diminue en la valeur suivante.

On peut expliquer cette diminution, à notre avis, que le bitume joue un rôle important dans la rigidification du squelette granulaire de sable de dunes. Comme nous savons, généralement, que le sable naturel contient pas mal de vides donc le bitume va remplir ces vides.

VI.3 Influence de la PEBD sur les performances de BBSD

L'étude de formulation de béton bitumineux à base de dune, nous a dévoilés que le pourcentage optimal du bitume est de 6,2%, elle donne une stabilité maximale de 8.326 KN et un fluage minimal de 4.71 mm.

D'après ces résultats, on peut compter sur cette teneur en liant **TL= 6.2%** pour préparer le troisième mélange l'enrobé bitumineux modifier a base sable de dune.

VI.3.1 Influence de la PEBD sur le Bitume

La détermination des caractéristiques du bitume, à savoir la pénétrabilité à 25°C et la température de ramollissement bille et anneau, se fait de la même manière que pour les bitumes purs ordinaires. Cependant il y'a lieu de prendre une attention pour les bitumes à fortes teneurs en polymère pour lesquels on enregistre des fluctuations notables des résultats

liées à l'instabilité du mélange. D'autre essai en relation avec point d'éclair n'ont pas être menés à terme pour des considérations purement techniques.

L'essai de pénétrabilité à l'aiguille et l'essai de ramollissement bille et anneau (TBA) sont les deux principaux essais réalisés pour caractériser le comportement des bitumes seuls et avec ajouts de déchets PEBD.

Le tableau VI.6 regroupe les différents résultats obtenus au moyen des deux essais relatifs aux bitume modifié au moyen de la Polyéthylène base densité.

Tab. VI.6:Caractéristiques du bitume modifié.

Les essais	Pourcentage PEBD %	Bitume
Pénétrabilité (0,1 mm)	0	42.33
	1	26.46
	2	12.45
	3	14.50
Température de ramollissement (°C)	0	52.9
	1	55
	2	66
	3	66

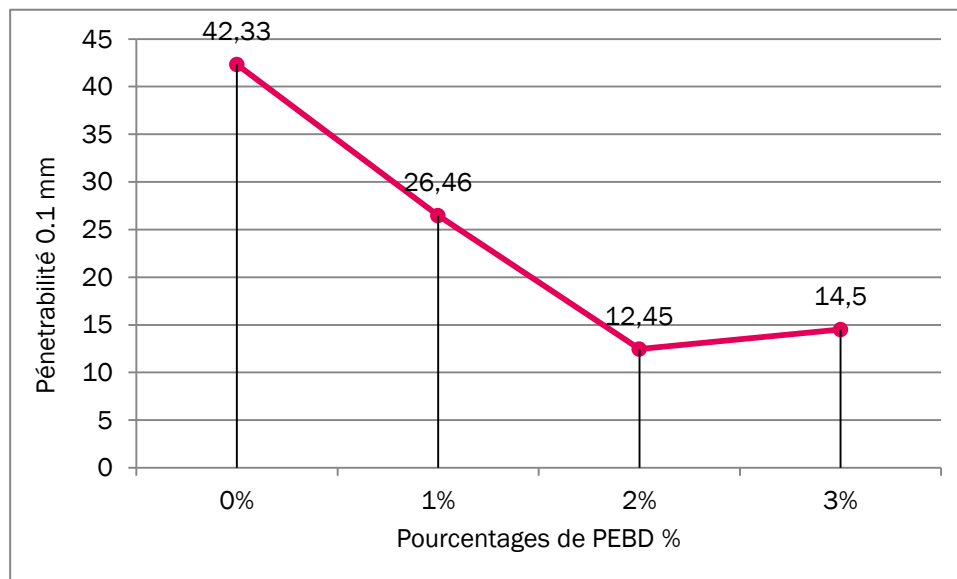


Fig. VI.9: Variation de la pénétrabilité du bitume modifié (PEBD).

D'après la figure VI.9 donnant la variation de la pénétrabilité du bitume modifié selon différentes pourcentages de la PEBD, on remarque que :

- Une diminution notable de la pénétrabilité lorsque le pourcentage de PEBD augmente, ce qui montre que la pénétrabilité et le PEBD sont inversement proportionnelles.
- Entre 2 et 3% de PEBD, la pénétrabilité en hausse de nouveau d'environ 3%.
- Plus le pourcentage de PEBD est élevé le bitume devient dur.

D'après l'analyse de la figure VI.10 ci-dessous, qui représente la variation de la température de ramollissement (TBA) en fonction du pourcentage ajouté de PEBD, on peut émettre les remarques suivantes :

- La température de ramollissement (TBA) et PEBD sont relativement proportionnelles, l'ajout de poudre entraîne une augmentation en TBA pour le bitume.
- Une quasi-constance de TBA est enregistrée dans l'intervalle de PEBD [2-3%].
- La teneur en PEBD située 3% semble être la valeur optimale pour la TBA.

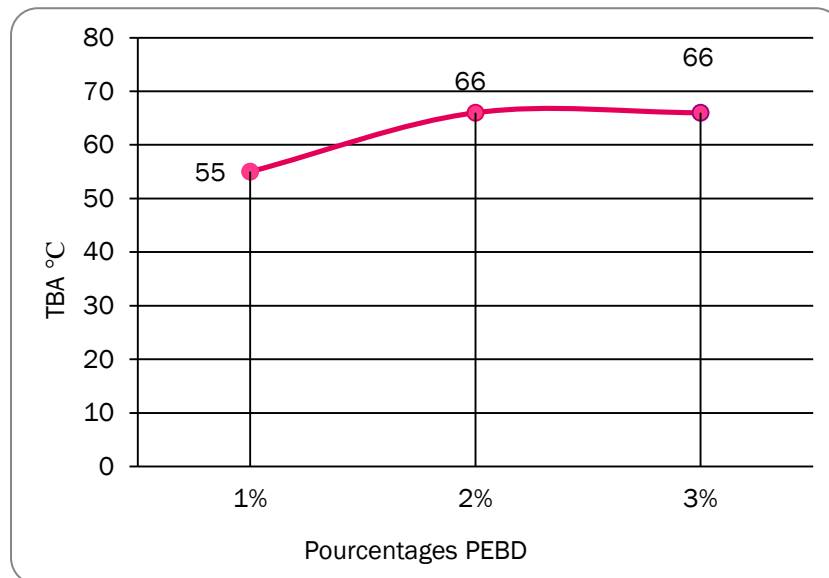


Fig. VI.10: Variation de la température de ramollissement selon la teneur en PEBD.

VI.3.2 Influence de la PEBD sur les stabilités Marshall et le fluage

Le tableau ci-dessous présente la stabilité Marshall, le fluage et le quotient pour chaque mélange en fonction de la variation des pourcentages de PEBD :

Tab. VI.7: Stabilité Marshall, fluage et quotient en fonction de la variation de la teneur en PEBD.

Enrobé bitumineux a base sable de dune modifier par le PEBD				spécification
Teneur en liant (%)	6.2	6.2	6.2	-
Pourcentages de PEBD (%)	1.0	2.0	3.0	-
Stabilité de Marshall (KN)	17.074	12.930	13.632	≥ 10.5
Fluage (mm)	3.402	3.958	3.402	< 4
Quotient de Marshall	4.434	3.266	4.007	-

Selon (Fig VI.11) ci-dessous, il apparait clairement que les bétons bitumineux à base sable de dune modifiée par le PEBD présentent de meilleures stabilités comparativement au BBSD de référence (0%).

De manière générale la stabilité augmente en 1% de PEBD de la valeur moyenne 17.074 KN puis elle diminue entre 1et 2% augmente une autre fois à partir 3 % de poudrette.

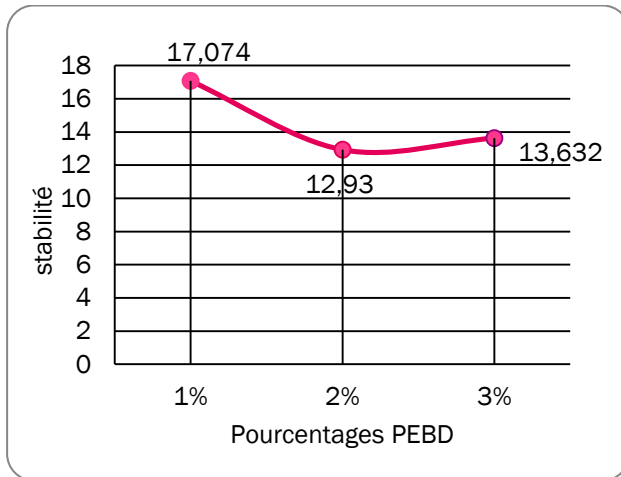


Fig. VI.11:La stabilité Marshall en fonction les pourcentages de PEBD.

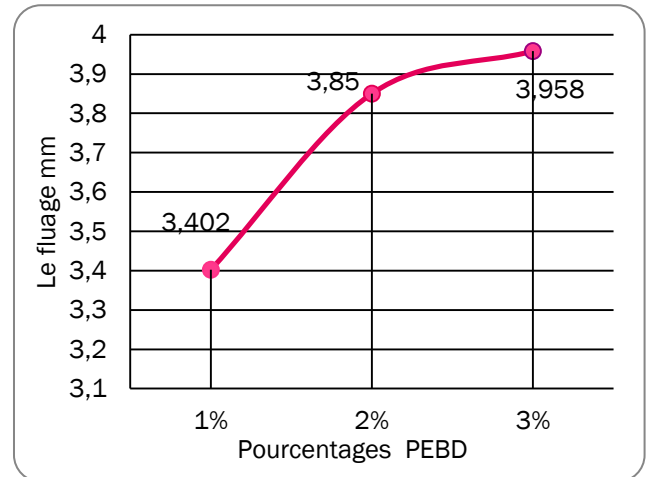


Fig. VI.12:Le fluage en fonction les pourcentages de PEBD.

La figure VI.12 ci-dessus montre que le fluage minimal est celui du mélange de 1%.

- le fluage témoin de BBSD TL = 6.2% est faible que le fluage relatif aux différentes teneurs en poudrettes.

VI.3.3 Evolution de la compacité

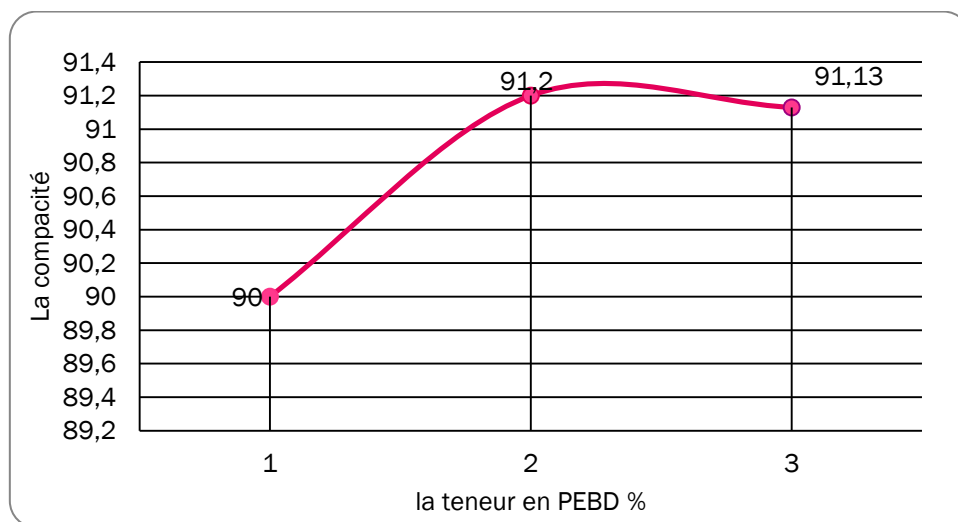


Fig. VI.13: Variation de la compacité en fonction de la teneur en PEBD.

Le diagramme ci-dessus montre que la compacité croît avec la teneur en déchets jusqu'à 2% ou elle atteint la valeur 91,2% et diminue pour des teneurs supérieures à 2% tout en restant supérieure à la compacité de référence.

VI.4 Synthèse générale

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

L'apport de déchets plastiques PEBD dans l'enrobé bitumineux selon la modification de bitume a une grande influence sur ses caractéristiques mécaniques.

La teneur en déchets plastiques 1% pour la confection de l'enrobé modifié par présente de meilleurs résultats par rapport au mélange témoin avec:

- Une augmentation de la stabilité de près de 3.36 %.
- Une diminution de la compacité de l'ordre de 3%.
- Une augmentation du fluage de près de 11.48%.

Les résultats obtenus dans ce cadre montrent l'intérêt que peut revêtir l'incorporation de PEBD dans les mélanges hydrocarbonés à base sable de dune puisqu'elle permet d'augmenter la résistance mécanique sans affecter de manière importante les autres caractéristiques à savoir le fluage et la compacité.

VI.5 L'essai Module de Rigidité

Les résultats de l'essai sont présentés dans les tableaux suivant:

Tab. VI.8: Résultats de module de BB.

Enrobé bitumineux ordinaire			
Module de richesse	3.45	3.55	3.65
Teneur en liant %	5.71	5.88	6.04
Module de rigidité MPa	14060	14420	14845

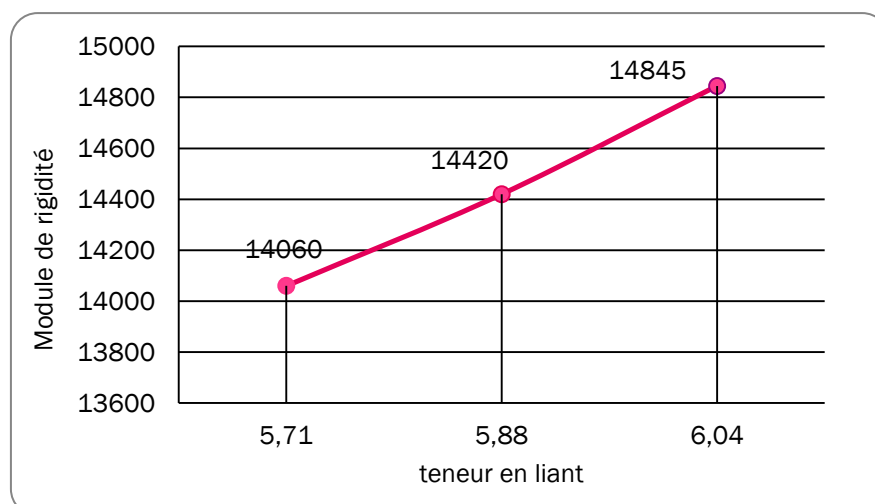


Fig. VI.14: Le module de rigidité en fonction de teneur en liant (BB ordinaire).

On voit sur la figure VI.14 ci-dessus que le module de rigidité augmente avec l'augmentation des teneurs en bitume, c'est-à-dire que le bitume va remplir ces vides, et il donne au béton bitumineux un plus de rigidité.

Tab. VI.9: Résultat de module de BBSD.

Enrobé bitumineux à base sable de dune			
Module de richesse	3.55	3.65	3.75
Teneur en liant %	5,86	6,03	6,20
Module de rigidité Mpa	7682	7702	8362

On remarque sur la figure VI.15 que le module de rigidité dans ce mélange est faible par rapport le 1er mélange, la différence atteint supérieur à 42%. On peut expliquer ça que le bitume absorbé par le sable de dunes.

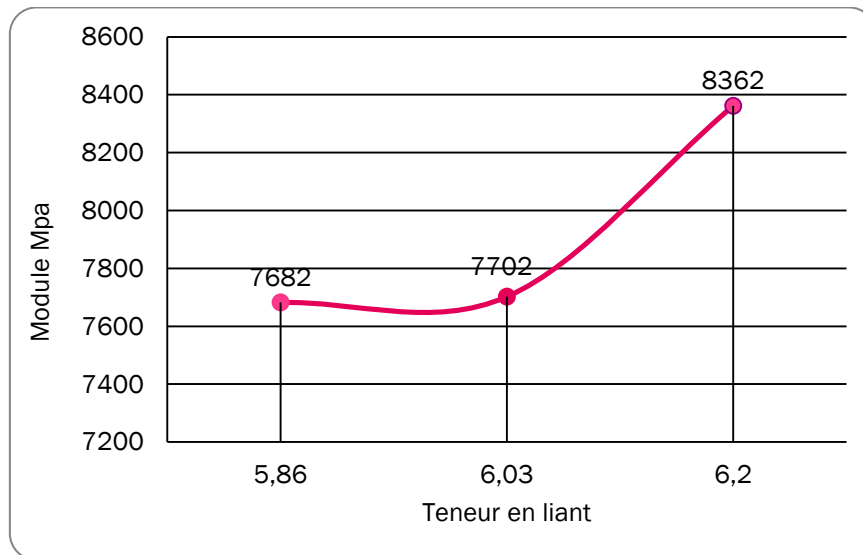


Fig. VI.15: Module de rigidité en fonction de la teneur en liant (BBSD).

Tab. VI.10: Résultats du module de BBSD modifié par le PEBD.

Enrobé bitumineux a base sable de dune modifier par le PEBD			
Teneur en liant %	6.2	6.2	6.2
Les Pourcentages de PEBD %	1	2	3
Module de rigidité Mpa	11661	11507	11346

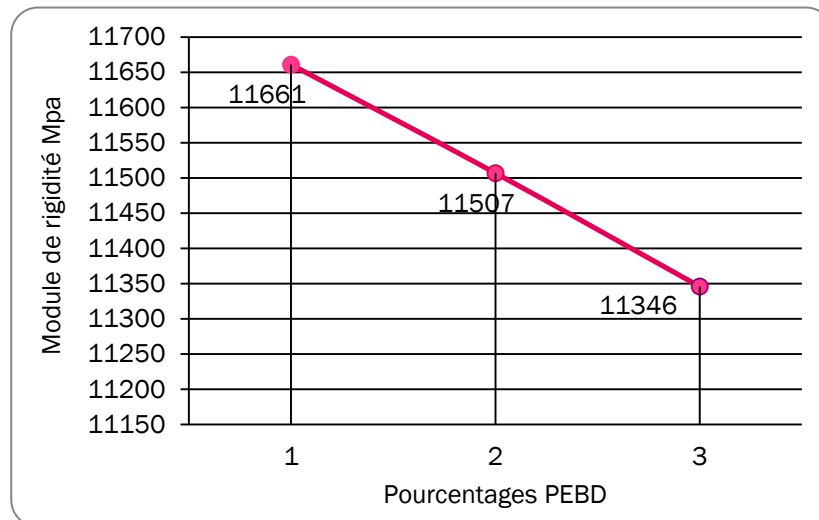


Fig. VI.16: Le module de rigidité en fonction de teneur en liant (BBSD modifié par le PEBD).

Le graphe présente les résultats des essais de NAT (pour le calcul de module de rigidité avec traction indirecte) sur les enrobés bitumineux avec différents pourcentages de PEBD.

Les résultats expérimentaux obtenus sur les enrobés bitumineux testés montrent que le module de rigidité diminue avec l'augmentation de pourcentage de PEBD.

- Lorsqu'on modifie et on ajoute le PEBD au bitume, les caractéristiques changent et nous obtenons un autre type de bitume, nous ne pouvons pas déterminer leur caractéristiques que sur de nombreuses expériences et recherches approfondies.
- Par comparaison aux résultats du mélange BBSD et le mélange de BBSD modifier par le polyéthylène basse densité, on remarque qu'il y a une amélioration de la valeur de module de rigidité supérieur à 40%.

VI.6 Synthèse générale

Sur le plan comportement de l'enrobé et surtout l'étude de le module, l'apport des poudrettes de PEBD dans la modification du bitume a une grande influence sur les caractéristiques de l'enrobé bitumineux a base sable de dune et le BB ordinaire qui se résument en :

- L'étude expérimentale du comportement mécanique des enrobés en laboratoire a montré que le module de rigidité de l'enrobé augmente avec la teneur en liant quel que soit le type de mélange.
- Les pourcentages des vides pour le BB à base de sable de dune sont élevés à cause des propriétés physiques de sable comme nous savons que les sable naturel sont poreux donc absorbent beaucoup du bitume. Ce qui influé le module à la diminution.
- Le bitume modifié par le PEBD fait une amélioration en le module de rigidité dans mélange BBSD.

- L'enrobé bitumineux a base sable de dune modifier par le PEBD ce que nous avons fait, le module de rigidité optimal est égal à 11661 MPa alors le module est conforme aux spécifications (enrobé à module élevé).

VI.7 Comparaison entre les enrobés bitumineux

Les caractéristiques de l'enrobé modifié obtenue sont comparé avec les caractéristique de BBSG et BBSD optimal dans le tableau suivant :

Tab. VI.11: Synthèse des caractéristiques mécaniques de l'enrobé modifié.

Mélange	BBSG	BBSD	BBSD	BBSD	BBSD
Teneur en PEBD (%)	0	0	1	2	3
Teneur en liant	6,04	6,20	6,20	6,20	6,20
Densité apparente	2,331	2,333	2,340	2,354	2,36
Pourcentage des vides (%)	4,37	6,81	10	8.8	8.87
Compacité (%)	95,63	93,19	90	91.2	91.13
Stabilité (KN)	16,52	8,36	17.074	12.930	13.632
Fluage (mm)	3,79	4,74	3.402	3.958	3.402
Module de rigidité(MPA)	14321	8362	11661	11507	11346
Quotient Marshall	4,36	1,76	5.018	3.266	4.007

La figure.VI.17 montre que le pourcentage des vides augmente avec l'augmentation de teneur en PEBD et il est resté plus élevé que BBSG.

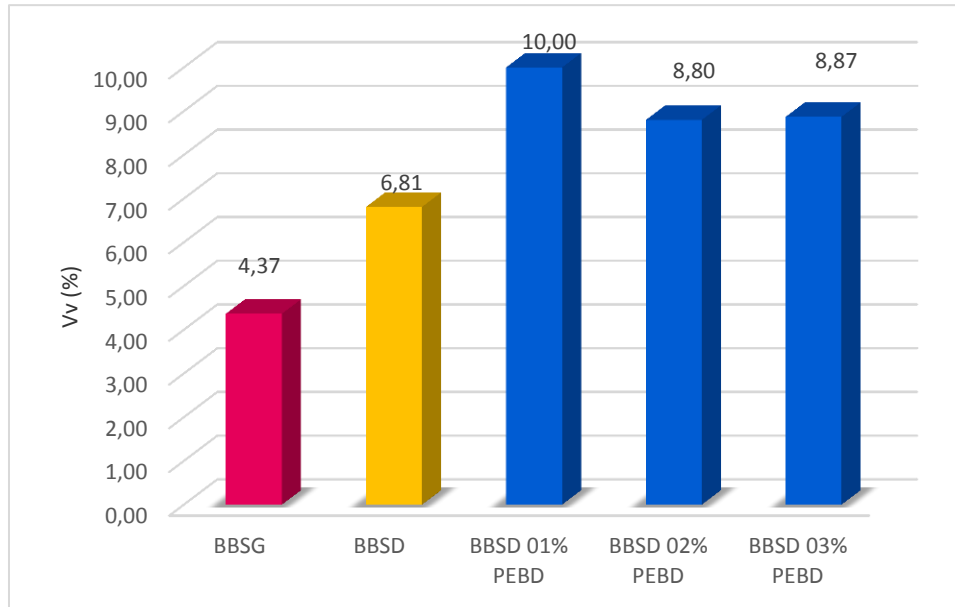


Fig. VI.17: Variation du pourcentage de Vv en fonction de la teneur en PEBD.

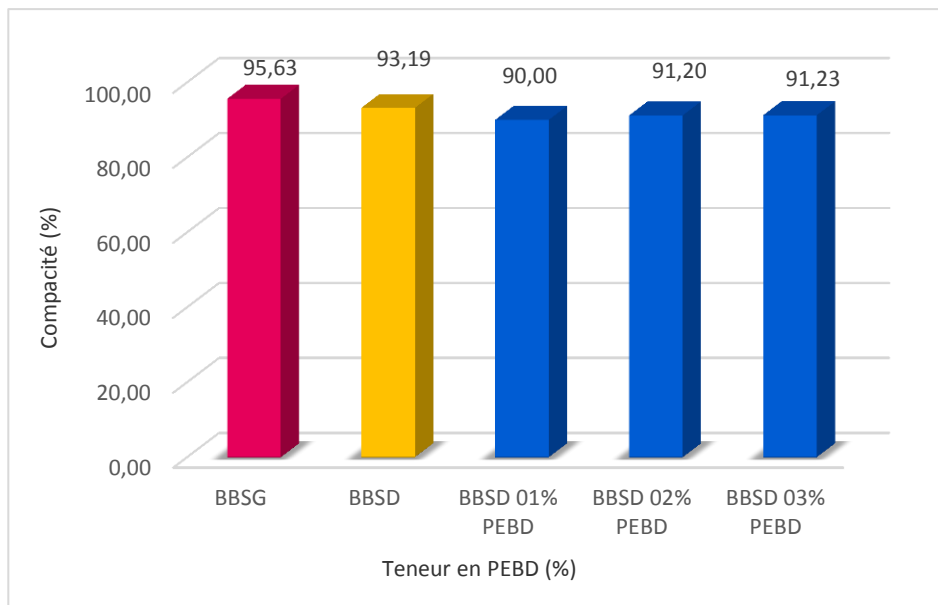


Fig. VI.18: Variation de la compacité en fonction de la teneur en PEBD.

La figure ci-dessus présentée que la compacité diminue avec la teneur en PEBD.

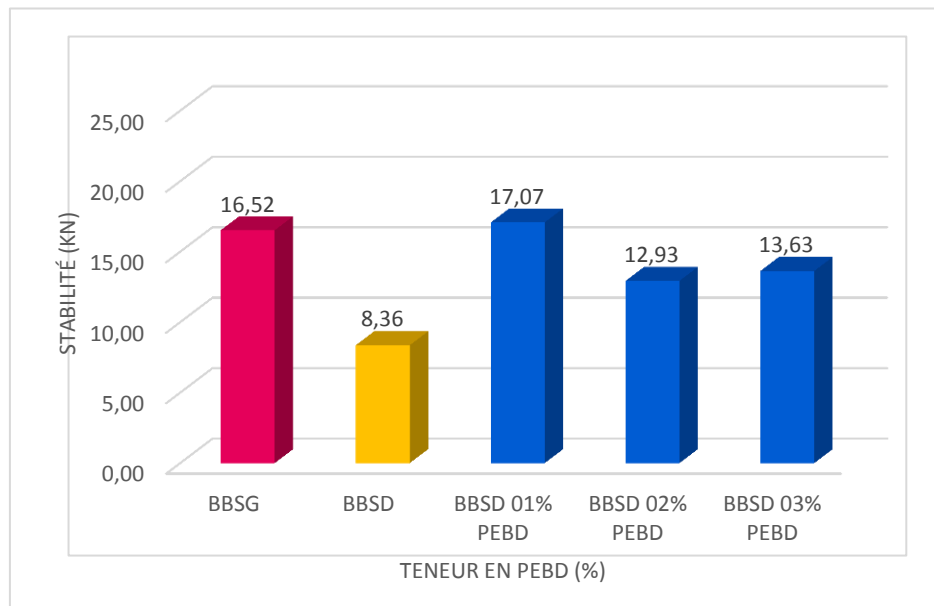


Fig. VI.19 : Variation de Stabilité en fonction de la teneur en PEBD.

La figure VI.19 montre que le BB à base sable de dune modifiée avec 1% à une meilleure stabilité que le BB semi-grenus, et on remarque que la stabilité diminue après 1%, tout reste supérieur que la valeur de spécification.

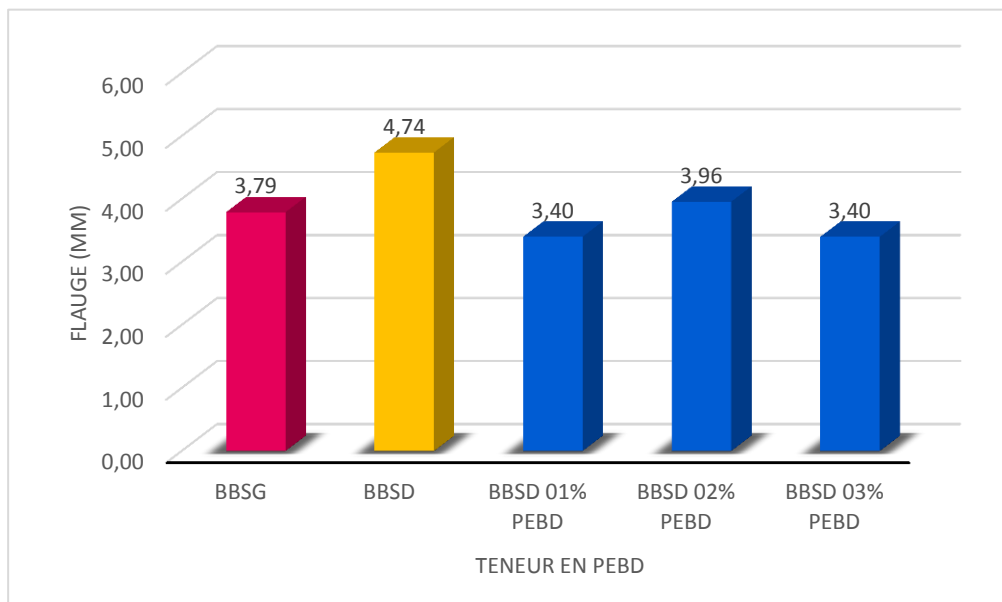


Fig. VI.20: Variation du fluage en fonction de la teneur en PEBD.

On remarque que le fluage presque reste le même dans les 3 teneurs en liant, mais le fluage minimal est celui du teneur en PEBD 1%

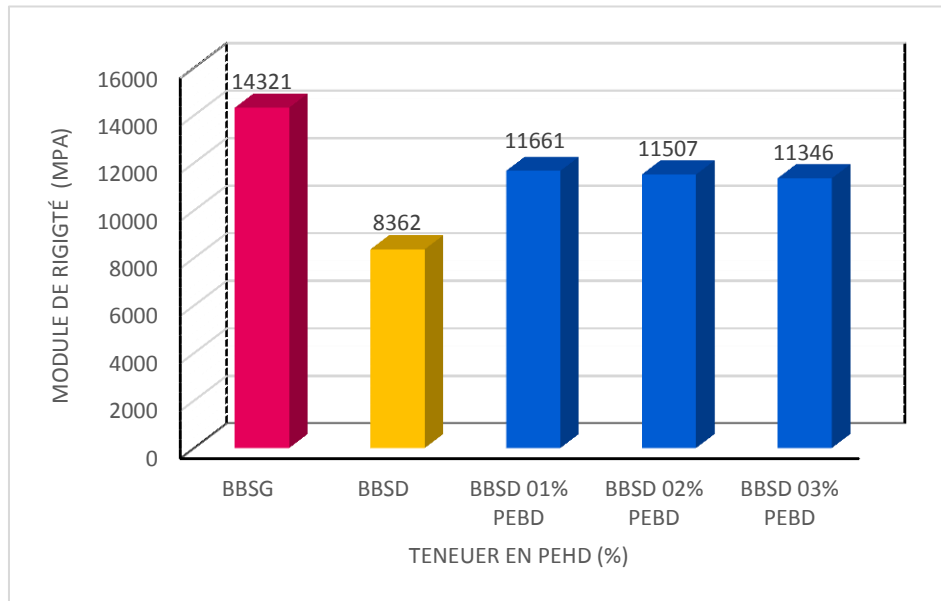


Fig. VI.21: Variation du module de rigidité en fonction de la teneur en PEBD.

On remarque que le module de rigidité du BB à base de sable de dunes modifié par 1% de PEBD est le plus rigide et diminue avec l'augmentation de la teneur en PEBD, mais il reste le BBSG plus élevé que le BB modifié par 1% de PEBD.

VI.8 SYNTHÈSE GLOBALE

D'après les résultats obtenus on constate que BB à base de sable de dune modifié est le plus résistant et rigide que le BBSD et moins résistant et rigide que le BB semi-grenus 0/14.

La modification du bitume par plastique recyclé utilisé dans les enrobés bitumineux a une bonne influence sur ses caractéristiques mécaniques.

La teneur en PEBD 1% présente une meilleure performance par rapport au mélange BBSD avec :

- ✓ Une augmentation de stabilité par 104% ;
- ✓ Une augmentation du module de rigidité par 60% ;
- ✓ Une diminution du fluage par 10 %.

Les pourcentages des vides pour le BB à base de sable de dunes modifié sont élevés par rapport au BB semi-grenus à cause des propriétés physiques de sable comme nous savons que les sables de dunes sont poreux donc l'absorption du bitume est élevée.

Conclusion et recommandations

Dans le cadre de la valorisation des matériaux locaux et le recyclage des déchets, ce travail vient de contribuer à l'étude des caractéristiques mécaniques d'un mélange constitué de béton bitumineux à base de sable de dunes seul et puis traiter aux déchets plastiques recyclés dans l'objectif de l'utiliser en couche de roulement.

Nous avons résolu ainsi un problème économique, on utilisant les matériaux locaux, parce que le coût du transport des agrégats nécessaires à la réalisation des projets routiers intervient de manière très significative dans la construction du prix de revient final des ouvrages.

Les essais et analyses ont permis de quantifier la variation survenue au niveau des propriétés des bitumes de base et des enrobés classiques.

Les essais et analyses ont permis de quantifier la variation survenue au niveau des propriétés des bitumes de base et des enrobés classiques. La comparaison entre l'enrobé bitumineux (témoins), l'enrobé bitumineux à base sable de dune et l'enrobé bitumineux à base de sable de dune modifiés à la poudrette de PEBD d'une part et entre le bitume pur (témoins) et le bitume modifié, selon différentes teneurs, a montré l'influence de cette dernière sur les caractéristiques intrinsèques des produits dans la plage de variation des teneurs en poudrettes qui s'étale entre 0% (bitume pur) à 3% (valeur extrême).

À la lumière des résultats obtenus suite aux essais réalisés dans le but d'étudier l'influence des poudrettes de déchets plastiques sur les enrobés bitumineux à base de sable de dune où les essais normalisés sont effectués dans des conditions bien définies de températures et de sollicitations. Cette recherche montre la variabilité des résultats obtenus nous qui a permis de conclure que:

- Les performances mécaniques d'enrobé à base de sable de dunes uniquement s'avèrent très faibles en égard aux spécifications pour enrobé ordinaire, ceci est montré par l'essai de stabilité Marshall ainsi que l'essai de module de rigidité.
- Le bitume modifié par les polymères de 1,2 et 3% de SD présente des caractéristiques plus élevés que le bitume a base SD non modifié, cette amélioration s'exprime par la stabilité de Marshall et le module de rigidité .

INFLUENCE DE LA POUDRETTE SUR LES BITUMES :

Les essais d'identification menés sur les bitumes incorporés de PEBD ont montré l'amélioration sensible du comportement rhéologique notamment à travers l'augmentation de la température de ramollissement bille et anneau et la diminution du point de pénétrabilité à l'aiguille.

La température de ramollissement des bitumes est proportionnelle à la teneur de PEBD ; l'augmentation en poudrette entraîne, en général, une augmentation en ramollissement.

A la lumière des avantages précédents, on peut avancer que les polymères testés présentent une influence positive importante sur les performances physico-mécaniques des bétons bitumineux et ce malgré que ces polymères ne sont que des matières plastiques recyclés.

Recommandations :

Notre étude qui traite la substitution d'une partie (pourcentage) du sable concassé par le sable de dune dans la composition du béton bitumineux et modifier par le PEBD, qui a donné des résistances mécaniques satisfaisantes a abouti sur les recommandations suivantes :

- L'exploiter le volume immense du sable locale pour améliorer les performances de notre réseau routier notamment dans le sud algérien.
- La correction de la granulométrie de sable de dunes s'avère nécessaire, dans le but d'une utilisation de sable de dunes dans les enrobés bitumineux.
- Enfin étudier différentes propriétés de bitume modifié avec différentes essais comme RTFOT, point d'éclair...etc.

Cette présente étude ouvrira d'autres voies pour l'étude et l'amélioration avant la généralisation de ces composites en couches de roulement, qui d'après nos prédictions, devraient se révéler économiquement très compétitif dans un proche avenir.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : **DJELAILI HAYAT et BEKRI AMINA**, 2006. "CARACTERISATION DES MATERIAUX ROUTIERS " Mémoire de Master, CUAT Ain Tmouchente.
- [2] : **KEBAÏLI Nabil**, 2017. "L'ASPHALTE CAOUTCHOUC VALORISATION DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC EN DOMAINE ROUTIER " Thèse de Doctorat, UKMO Ouargla.
- [3] : **KOUIDRI Djamila et TELILI Mebarka**, 2017. " INFLUENCE DES DECHETS PLASTIQUES SUR LES PERFORMANCES DES BETONS BITUMINEUX A BASE DE SABLE DE DUNES" Mémoire de Master, UKMO Ouargla.
- [4] : **KHENGAOUI Safia**,2013. "VALORISATION DU SABLE DE DUNES EN COUCHE DE ROULEMENT SABLE – BITUME " Mémoire de Master, UKMO Ouargla.
- [5] : **G.JEUFFROY, R.SAUTEREY**, 1985. " Couches de roulement ", Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, France.
- [6] : [www.google.com/enrobés bitumineux/PDF](http://www.google.com/enrobés_bitumineux/PDF) « les enrobés bitumineux», les éditions le griffon d'argile, mise à jour 2002.PP117
- [7] : **BOUAZZA et MELLAKH**, 2018. " ENROBE A MODULE ELEVEE : FORMULATION ET UTILISATION CA DE FORMULATION A 4 NIVEAUX ", Mémoire de Master, UKMO Ouargla.
- [8] : **BAZZINE Rabia**,2013. "INFLUENCE DE L'AJOUT DE LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC SUR LA STABILITE DES ENROBES BITUMINEUX", Mémoire de Master, UKMO Ouargla.
- [9] : **Jean-Luc DELORME, Chantal de la ROCHE, Louise WENDLING**, 2007. " Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés ", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- [10] : **CST COLAS**, 2006. " Commission Scientifique et Technique", Paris, France.
- [11] : <http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb/teach/PEhd/index.html>, site consulté le 15/02/2019.
- [12] : **IGGUI Kahina**, 2010. "Modification de Bitumes par des Matériaux Polymères Dégradés à Base de Polyéthylène Basse Densité (PEBD) et de Copolymères d'Ethylène et d'Acétate de Vinyle (EVA) ", Mémoire de Master, Univ Bejaia.

Annexes

