

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Kasdi Merbah – Ouargla
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Civil et Hydraulique



جامعة قاصدي مرباح – ورقلة
كلية العلوم التطبيقية
قسم الهندسة المدنية والري

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

Master en Travaux Publics

Option : Voies et Ouvrages D'arts

Optimisation des performances mécaniques des moules bitumineux pour couche de roulement

Présenté par

BRAHMI Rania Nada

SADAMOU Rania

Soutenue publiquement le : 01/06/2025

Devant le jury composé de :

KHELLOU Abderrezak	MCA	Président	Université de Ouargla
TALBI Med Abdellah	Doctorant	Examineur	Université de Ouargla
KEBAILI Nabil	MCA	Encadreur	Université de Ouargla
BENZID Abdelhamid	Docteur	Co-Encadreur	Betta Concept

Dédicaces

Je dédie le fruit de mes efforts à ceux qui m'ont soutenue par leur bienveillance et leur générosité, mes chers parents, qu'Allah prolonge leurs vies dans la santé et le bien-être.

À tous ceux avec qui j'ai partagé un foyer et qui furent un excellent soutien. Mes chers frères, je les mentionne par leur nom.

À mes compagnons de route qui nous ont quittés et dont les mots ont résonné dans nos oreilles.

À ceux qui m'ont enseigné une lettre durant mon parcours scolaire et n'ont pas ménagé leurs efforts et leur savoir. Mes meilleurs professeurs, je les nomme.

À mon âme qui a misé sur la réussite, qui a fait preuve de patience et de persévérance, car le chemin est encore long. Et à tous ceux dont mon cœur s'est élargi pour eux et qui ont illuminé cette page sans être mentionnés. Je vous dédie mon humble travail, en reconnaissance de votre bienveillance et en appréciation de vos efforts.

BRAHIMI Rania Nada



Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents : Ma tendre mère, source d'amour infini, et mon père bien-aimé, pilier de ma force, Ainsi qu'à ma seconde mère, qui a toujours été un véritable soutien,

Pour leur patience, leur amour et leur appui inconditionnel. À mes frères et sœurs, qui ont toujours été une source d'encouragement et d'affection.

À mon cher fiancé, pour son soutien constant et sa présence réconfortante tout au long de ce parcours.

À ma grande famille, et à tous ceux qui lui sont liés, de près ou de loin.

Et à moi-même, pour les efforts, la persévérance et la patience investis dans l'accomplissement de ce travail.

SADAMOU Rania



Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu et avant tout ALLAH le tout puissant, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir notre travail dans les meilleures conditions.

Nous tenons à remercier notre encadreur Mr. KEBAILI Nabil et Coencadreur Mr. BENZID Abdelhamid.

Nous remercions vivement et infiniment toute l'équipe de LTPS Ouargla.

On tient à remercier vivement Mr. KHELLOU Abderrzak qui nous a fait un grand honneur de présider notre jury de mémoire.

On tient à exprimer nos vifs remerciements à Dr TALBI Abdellah qui nous a fait l'honneur d'être l'examineur de notre travail.

Nos remerciements s'adressent également à Mr. KCHIRED Ali, chef du laboratoire, ainsi qu'à tous les collègues et camarades qui nous ont accompagnés et soutenus tout au long de notre travail au sein du laboratoire.

Enfin, nos pensées à tous ceux qui nous ont aidé pour la réalisation de ce modeste travail.

تهدف هذه الدراسة إلى البحث في إمكانية استخدام مادة البولي إيثيلين تيرفتالات المعاد تدويره لتحسين خصائص الخرسانة البيتومينية بدلاً من استخدام المواد التقليدية، مما يفتح آفاقاً جديدة في مجال تثمين النفايات البلاستيكية واستعمالها في مجالات مفيدة. يركز العمل التجريبي على مقارنة الخواص الميكانيكية والفيزيائية للخرسانة اسفلتية العادية والمعدلة بإضافة نسب مختلفة من البولي إيثيلين تيرفتالات، وذلك بهدف تقييم مدى تأثير هذه المادة على أداء الخرسانة الاسفلتية وقد شملت التجارب اختبارات متنوعة على عينات تم إعدادها لهذا الغرض. أظهرت نتائج الدراسة تحسناً ملحوظاً في الخصائص الميكانيكية عند نسبة معينة من الإضافة، وخصوصاً عند نسبة 0.5% من البولي إيثيلين تيرفتالات، حيث سجلت العينات المعدلة أداءً أفضل من الخرسانة غير المعدلة، خصوصاً فيما يتعلق بالثبات ومقاومة التشوه. الكلمات المفتاحية: البولي إيثيلين تيرفتالات، تدوير البلاستيك، خرسانة اسفلتية، اسفلت معدل، خصائص ميكانيكية

Abstract

The purpose of this work is to study the use of recycled PET plastic to improve the properties of bituminous concrete, instead of conventional materials. This allows for the valorization of plastic waste and its utilization in useful applications.

The experimental study consists of comparing the properties of normal and modified bituminous concrete with different doses of PET, to observe its effect on the material's behavior. Several tests were carried out on prepared samples.

The results showed an improvement in mechanical properties, especially with the addition of 0.5% PET. The modified concrete demonstrated better performance, particularly in terms of stability and resistance to deformation.

Keywords: PET, plastic recycling, bituminous concrete, modified bitumen, mechanical properties.

Résumé

Ce travail a pour but d'étudier l'utilisation du plastique recyclé de type PET pour améliorer les propriétés du béton bitumineux, au lieu du matériau normal. Cela permet de valoriser les déchets plastiques et de les utiliser dans des domaines utiles. L'étude expérimentale consiste à comparer les propriétés du béton bitumineux normal et modifié avec différentes quantités de PET, pour voir son effet sur le comportement du matériau. Plusieurs essais ont été réalisés sur des échantillons préparés.

Les résultats ont montré une amélioration des propriétés mécaniques, surtout avec un ajout de 0,5 % de PET. Le béton modifié a montré de meilleures performances, notamment en termes de stabilité et de résistance à la déformation.

Mots-clés : PET, recyclage plastique, béton bitumineux, bitume modifié, propriétés mécaniques.

Sommaire

Remerciements	IV
Résumé	V
Liste des Tableaux	IX
Liste des Figures	X
Liste des Photos	XI
List des Symboles et Abréviations	XII
Introduction générale	1
Part I	3
CHAPITRE I	4
LES ENROBES BITUMINEUX	4
Chapitre 1 : Les enrobés bitumineux	5
1.1. Introduction	5
1.2. Définitions	5
1.3. DIFFÉRENTS TYPES D'ENROBÉS BITUMINEUX :	6
1.4. LES PROPRIETES ESSENTIELLES DES ENROBES	6
1.5. COMPOSITION DES ENROBES BITUMINEUX	7
1.5.1. Liants hydrocarbonés :	7
Essai de pénétrabilité à l'aiguille	8
1.6. Granulats :	8
1.6.1. Rôles des granulats dans l'enrobe :	9
1.6.2. Classification des granulats :	9
1.6.3. Le sable	10
1.7. Etude de formulation	11
1.7.1. Composition granulométrique	11
1.7.2. Teneur en liant	11
1.7.3. Le pourcentage des vides	12
.8.1 Conclusion	12
Chapitre 2 : Essais sur les enrobes bitumineux	14
2.1. Introduction	14
2.2. Niveau de formulation des enrobes bitumineux	14
2.3. ESSAIS SUR LES ENROBÉS BITUMINEUX	15
2.3.1. Essai Marshall	15

2.3.2. Essai Duriez (essai de compression simple)	18
2.3.3. Essai de cisaillement à la presse de giration « PCG »	22
2.3.4. Essai d'orniérage	25
2.4. Conclusion	29
Partie II	30
Chapitre 3: Matériaux et procédures d'essais	31
3.1. Introduction	31
3.2. ESSAIS D 'IDENTIFICATION DES AGREGATS	31
3.2.1. Analyse granulométriques	32
3.2.2. Essai d'Aplatissemen	34
3.2.3. Essai de propreté	34
3.2.4. La masse volumique absolue	34
3.2.5. Essai d'équivalent de sable à 10% des fines	35
3.2.6. Essai Los-Angeles	36
3.2.7. Essai Micro-Deval	37
3.2.8. Liant hydrocarboné	38
3.3. CARACTERISTIQUES DU POLYETHYLENE UTILISE	39
3.3.1. Interdictions	39
3.4. Conclusion	41
Chapitre 4: Résultats et interprétation	42
4.1. Introduction	42
4.2. Préparation de l'enrobé bitumineux	42
4.3. EXPERIENCES EN LABORATOIRE ET RESULTATS DES ESSAIS	42
4.3.1. Essai de presse à cisaillement giratoire (PCG)	43
4.3.2. Résultat d'essai PCG	48
4.3.3. . Essai de la tenue à l'eau	50
4.3.4. Essai d'orniérage	52
4.3.5. Essai Marshall	53
4.4. Conclusion	56
Conclusion générale	57
Référencé	60

Liste des Tableaux

Tableau 3.2 Résultat d'aplatissement des graviers.	34
Tableau 3.3 Résultat de l'essai la masse volumique absolue	35
Tableau 3.4 Résultats de l'essai équivalent de sable	36
Tableau 3.5 Résultat de l'essai Los-angles	37
Tableau 3.6 Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant	38
Tableau 3.8 Pourcentage des constituants de BBSG 0/14	38
Tableau 3.9 Granulométrie du BBSG0/14	39
Tableau 3.10 fuseau de spécification du BBSG0/14	40
Tableau 3.11 Calcule de teneur en liant de BBSG	41
Tableau 4.1 Caractéristiques de l'essai PCG	47
Tableau 4.2 Résultat d'essai duriez	51
Tableau 4.3 Caractéristiques des plaques fabriquées	56

Liste des Figures

Figure 1 Enrobés bitumineux	5
Figure 2 Types d'enrobés bitumineux [6]	6
Figure 3 le bitume	7
Figure 4 liants hydrocarbonés	8
Figure 6 Les granulats	9
Figure 7 Classement des granulats selon les dimensions.	10
Figure 8 Représenter le sable de granulats classe 0/3	10
Figure 9 niveaux de l'épreuve de formulation	14
Figure 10 Moule marshale	16
Figure 17 Principe d'essai la tenue à l'eau	19
Figure 19 Principe de compactage à la PCG	22
Figure 20 Pourcentage des vides en fonction de nombre de girations des enrobés bitumineux	24
Figure 21 Appareillage de l'essai d'orniérage	25
Figure 22 Principe de l'essai d'orniérage	26
Figure 23 Lustration des différents types d'orniérage : [M Meunier, 2012]	27
Figure 24 Série de tamis de l'analyse granulométrique	32
Figure 25 Courbe granulométrique du sable	33
Figure 26 Courbe granulométrique de gravier 3/8	33
Figure 27 Courbe granulométrique du gravier 8/15	33
Figure 28 Composition granulaire de BBSG 0/14	39
Figure 29 Courbe granulométrique du mélange BBSG 0/14	40
Figure 30 Mélange d'un enrobé bitumineux à chaud bitumineux	43
Figure 31 Eprouvette compacté après essai de PCG	48

Liste des Photos

Photo 3.1 Essai Los-Angeles	37
Photo 3.2 Essai micro-Deval	37
Photo 4.1 Mélange d'un enrobé bitumineux a chaud bitumineux	43
Photo 4.2 Etape de préparation du mélange bitumineux	44
Photo 4.3 Eprouvette compacté après essai de PCG	48
Photo 4.4 Evaluation de la composition granulaire proposée	51
Photo 4.5 Plaque sur l'appareil d'orniérage	53

Liste des Symboles et Abréviations

Symbole	Désignation
BBSG	Béton Bitumineux Semi-Grenus
D	Diamètre minimal des granulats (mm)
D	Diamètre maximal des granulats (mm)
TL	Teneur en liant (%)
V _v	Pourcentage de vides dans le mélange compacité (%)
MDE	Coefficient Micro-Deval
LA	Coefficient Los Angeles
ES	Équivalent de sable (%)
M.V.A	Masse Volumique Apparente (g/cm ³)
M.V.R	Masse Volumique Réelle (g/cm ³)
K	Module de richesse
PET	Polyéthylène Téréphtalate
TBA	Température bille-anneau (°C)
PCG	Presse de Compactage Giratoire
Ps	Masse volumique absolue des granulats (g/cm ³)
C	Compacité (%)

Introduction Générale

Dans la plupart des pays, le réseau routier représente un patrimoine essentiel appartenant à l'État. Chaque jour, plusieurs kilomètres de routes, de rues, d'autoroutes et même de pistes d'aéroports sont construits afin de faciliter les échanges, de promouvoir la mobilité et de dynamiser les régions. Les administrations routières ont la responsabilité de gérer, d'exploiter, de maintenir et de renouveler ce réseau en optimisant les ressources humaines et financières disponibles.

Cependant, les ingénieurs routiers sont confrontés à plusieurs défis, notamment l'amélioration des performances des matériaux utilisés dans les couches de chaussée, en particulier les enrobés bitumineux, face aux charges croissantes du trafic et aux conditions climatiques variables. Parmi les solutions proposées, l'amélioration des propriétés mécaniques des enrobés bitumineux par modification du liant est de plus en plus étudiée.

La présente recherche s'inscrit dans cette logique et vise à améliorer les performances du bitume par l'ajout des déchets de plastique recyclé de type PET (polyéthylène téréphtalate). Ce matériau est issu de déchets plastiques ménagers, collectés puis transformés en poudre à travers un procédé de recyclage mécanique. Les essais expérimentaux ont été réalisés avec différentes teneurs de PET ajouté au bitume, afin d'évaluer l'impact de cette modification sur les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux

Les essais ont été réalisés au niveau du Laboratoire des Travaux Publics du Sud (LTPS-Ouargla) et ont porté sur plusieurs types d'essais permettant d'évaluer les caractéristiques mécaniques et physiques des enrobés bitumineux.

La problématique principale peut être formulée comme suit :

Dans quelle mesure l'ajout de poudre de PET recyclé au bitume permet-il d'améliorer les performances des enrobés bitumineux ? Et quelle est la teneur optimale pour

obtenir un matériau performant ? Pour répondre à cette problématique, cette étude intitulée :

« Amélioration des propriétés des enrobés bitumineux par ajout de poudre de plastique (PET) recyclé » a été conduite selon une démarche expérimentale rigoureuse permettant d'identifier la formule la plus performante. Ce travail a été structuré en deux grandes parties :

➤ Partie bibliographique

1. CHAPITRE I : les enrobés bitumineux
2. CHAPITRE II : Essais sur les enrobés bitumineux

➤ Partie expérimentale

1. CHAPITRE III : Matériaux et procédures d'essais
2. CHAPITRE IV : Résultats et interprétations

CHAPITRE I
LES ENROBÉS BITUMINEUX

Chapitre I: Les enrobés bitumineux

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons définir ce que sont les enrobés bitumineux. Nous commencerons par présenter quelques généralités sur les enrobés bitumineux ainsi que sur leurs composants principaux, à savoir le bitume et les granulats, en mettant en avant les caractéristiques spécifiques de chacun. Par la suite, nous aborderons la formulation des enrobés en prenant en compte plusieurs paramètres essentiels tels que la teneur en bitume, la dureté de celui-ci, ainsi que la taille des granulats. Ces facteurs influencent directement la compacité, la mise en œuvre et la durabilité de l'enrobé. Enfin, nous présenterons les principaux essais de caractérisation réalisés conformément aux normes en vigueur, permettant d'élaborer un enrobé répondant aux exigences souhaitées.

1.2 Définitions

Un enrobé est un matériau constitué d'un mélange de granulats et de fines (Figure 1.1) enrobés d'un liant hydrocarboné. Il est principalement utilisé pour la construction des chaussées. Il existe plusieurs types d'enrobés, différenciés par leur granulométrie, la nature et la quantité du liant utilisé, le procédé de fabrication, ainsi que, dans certains cas, par l'ajout d'additifs.[1]



Figure 1.1 Enrobé bitumineux

1.3 DIFFÉRENTS TYPES D'ENROBÉS BITUMINEUX:

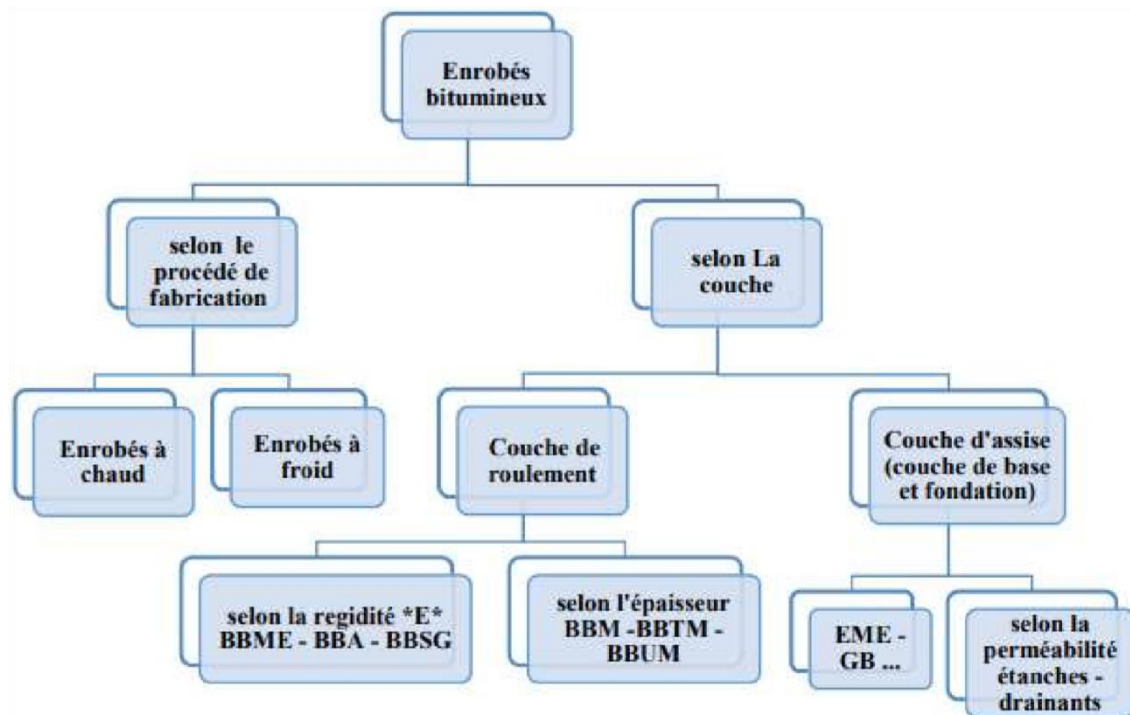


Figure 1.2 Types d'enrobés bitumineux [6]

- BBME : Béton Bitumineux Module Elève
- □BBA : Béton Bitumineux Aéronautique
- □BBSG : Béton Bitumineux Semi Grenu
- □BBM : Béton Bitumineux Mince
- □BBTM : Béton Bitumineux Très Ultra Mince
- * BBUM : Béton Bitumineux Ultra Mince
- * EME : Enrobé a Module Elève
- * GB : Grave Bitume.

1.4 LES PROPRIETES ESSENTIELLES DES ENROBES

Les enrobés bitumineux doivent être capables de supporter l'augmentation de l'intensité du trafic, tout en résistant aux agressions climatiques telles que le froid, la chaleur, la pluie, ainsi qu'à d'autres facteurs susceptibles de provoquer des déformations ou des dégradations de la couche de roulement. [3]

Ainsi, les enrobés doivent répondre aux exigences suivantes :

- Supporter les charges dues au trafic ;
- Être confortables et sécuritaires ;
- Protège les différentes couches de corps de chaussée.

Les propriétés mécaniques essentielles des enrobes seront alors :

- Résistance à l'orniérage ;

- Résistance à la fissuration par fatigue ;
- Résistance au ressuage ;
- Maniabilité
- Résistance à l'arrachement (la perte de granulats).
- Résistance au vieillissement (oxydation) ;
- Sensibilité à l'eau ;

1.5 COMPOSITION DES ENROBES BITUMINEUX

Les enrobés bitumineux à deux composants principaux pour formuler, le liant hydrocarboné et les granulats. [4]

1.5.1 Liants hydrocarbonés

Le liant hydrocarboné est une matière visqueuse constituée principalement d'atomes de carbone et d'hydrogène. Il permet de souder les granulats entre eux pour former un ensemble cohérent. Ce liant est aussi appelé « liant noir » par opposition au liant hydraulique utilisé pour le béton de ciment. [5]

a) Types de liants hydrocarbonés :

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

b) Propriété

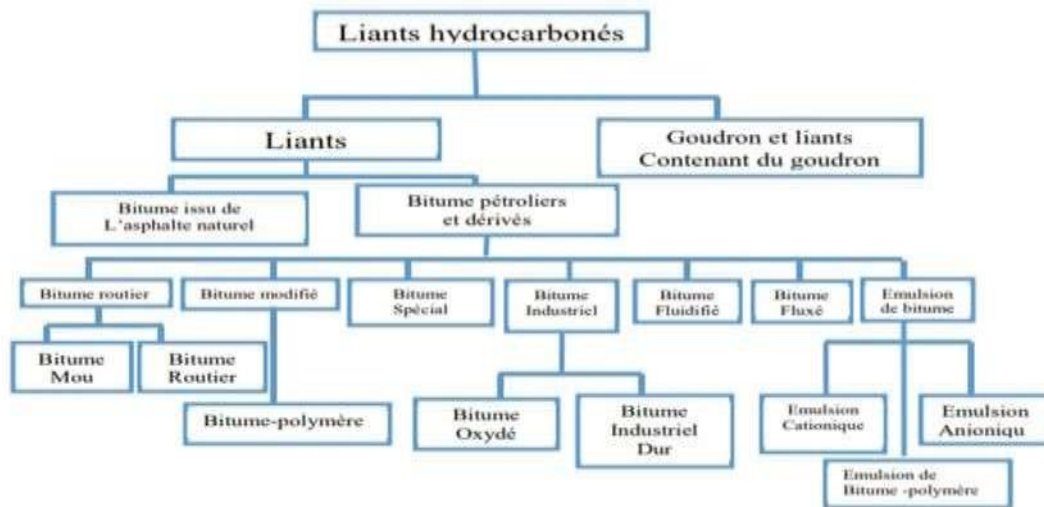
Le bitume est un matériau de première importance en raison de ses qualités physiques et chimiques remarquables. [6]

- Il présente une excellente adhérence à la majorité des matériaux usuels, ce qui en fait un liant efficace dans les enrobés.
- Il possède d'excellentes propriétés d'isolant électrique.

c) Classification des liants hydrocarbonés

d) ➤ Selon leur structure :

- Goudron de houille



- Bitume pur « naturel »
- Bitume fluidifié,
- Émulsion de bitume □ Bitume modifié □ Bitumes spéciaux. ➤ Selon leur usage :
- Bitume routier
- Bitume industriel

Figure 1.3 Liants hydrocarbonés

1.5.2 Essais de caractérisation des bitumes

Le bitume selon sa classification doit répondre aux conditions de stockage et de dépotage Selon les normes usuelles de température [6]

- ❖ **Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426)**
- ❖ **Essai de Point de ramollissement (bille et anneau) (NF EN 1427)**
- ❖ **Essai de la densité (NF T66-007)**

1.6 Granulats :

Les granulats utilisés dans les enrobés peuvent être divisés en deux grandes catégories : les Granulats naturels en provenance de carrières, sablières et gravières et les granulats d'autres Origines tels que des granulats recyclés, des sous-produits d'origine industrielle ou des Granulats fabriqués pour un usage spécifique. [10]



Figure 1.4 Les granulats [10]

1.6.1 Rôles des granulats dans l'enrobé

Les granulats utilisés dans les enrobés en couche de roulement jouent un rôle de première importance dans le phénomène d'adhérence pneus chaussée. Sous l'effet de la circulation, les granulats en surface tendent à se polir plus ou moins rapidement selon leur nature et leur composition minéralogique. Accourt ou à moyen terme, selon la densité du trafic, la chaussée peut devenir glissante. Cet aspect fait l'objet de recherches en laboratoire et sur la route dans le but de déterminer les textures de surface et les compositions minéralogiques des matériaux granulaires afin d'obtenir des mélanges bitumineux rugueux qui répondent aux conditions exigées.

Ainsi les caractéristiques de surface et de forme des granulats influençant le lien bitume Les granulats utilisés dans la confection des enrobés bitumineux doivent donc répondre à des critères de qualité et à des caractéristiques propres à chaque usage. [11]

1.6.2 Classification des granulats

Les granulats sont classifiés en différentes classes granulaires selon la taille des éléments, une classe granulaire (d/D) est répertoriée par la taille du plus petit grain « d » et du plus gros grain « D » ; la taille est exprimée en millimètre. Il est admis qu'une fraction granulaire peut comporter jusqu' à 15% de matériaux excédentaires supérieurs. On peut distinguer les classes. [12]

- Les fines 0/D avec $D \leq 0,08$ mm,
- Les sables 0/D avec $D \leq 6,3$ mm,
- Les gravillons d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 31,5$ mm,

- Les cailloux d/D avec $d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm,
- Les graves d/D avec $d \geq 6,3$ mm et $D \leq 80$ mm,

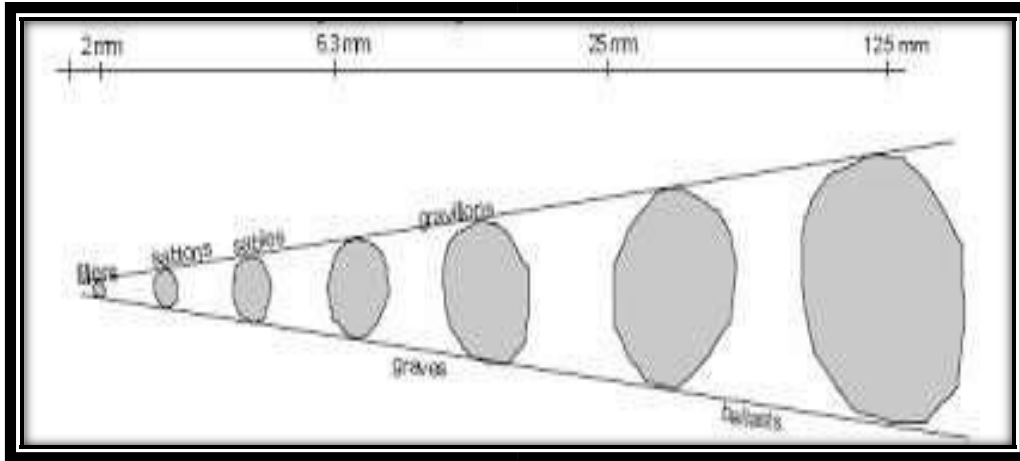


Figure 1.5 Classement du granulat selon les dimensions [5]

1.6.3 Le sable

Un enrobé à base de sable, naturel ou artificiel, formulé en centrale avec du bitume dur ou du bitume cut-back, destiné à être utilisé principalement en couche de roulement des chaussées à faible trafic. Toutes sortes de sables fins, moyens ou grossiers, d'origine calcaire ou siliceuse, peuvent être employées. Toutefois, des exigences de propreté (Équivalent de sable ES < 40 %) et de performances mécaniques peuvent conduire à écarter certains types de sables. [13]



Figure 1.6 Représentation du sable de granulats classe 0/3

1.7 Etude de formulation

Formuler un enrobe 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 étal 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. [14]

1.7.1 Composition granulométrique

Les enrobés bitumineux doivent répondre à certaines règles de composition granulométrique que l'on résume sous forme de fuseaux à l'intérieur desquels la courbe granulométrique du mélange considéré peut se déplacer. [2]

L'étude de la composition granulométrique de l'enrobé comporte deux étapes :

- La forme de la courbe (continuité)
- Son état de compactage (nature et intensité du compactage).

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

Tableau 1.1 granulométrique du mélange[15]

Tamis (mm)	BB 0/14	GB 0/20
20	-	85-100
14	94-100	-
10	72-84	65-75
6.3	50-66	45-60
2	20-40	25-40
0.08	7-10	6-9

1.7.2 Teneur en liant

Par définition, on appelle teneur en liant la masse de liant sur la masse des granulats secs, exprimée en pourcentage. Les teneurs en liant sur lesquelles porte l'étude de formulation sont donnée par la formule suivante : [15]

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

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film bitume autour des granulats. (Les valeurs du K sont données entre 3.45 à 3.9).

α : coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats «MVR g ».

$$\alpha = 2.65 / \text{MVR}_g$$

Σ : surface spécifique conventionnelles ont donnée par la formule suivante :

$$\Sigma : 0.25G + 2.3S + 12S + 135f \text{ On } m^2/Kg$$

G : éléments supérieurs à 6.3 mm

S : éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm

S : éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm F

: éléments inférieurs à 0.08 mm

1.7.3. Le pourcentage des vides

Le pourcentage de vides se calcule à partir de la masse volumique réelle (MVR) et la masse volumique apparente de l'enrober sont par la formule suivant : [15]

$$\% \text{ de vide} = 100 - (\text{MVA} / \text{MVR}) \quad \longrightarrow \quad \text{COMPACITÉ} = 100 - \% \text{ de vides}$$

La masse volumique réelle (MVR), correspond à la masse volumique qu'aurait l'enrobé sans vides, sont donnée par la formule suivante :

$$\text{MVR} = 100 / (\text{Pb} / \text{DP}) + (\text{Pa1} / \rho_{e1}) + (\text{Pa2} / \rho_{e2}) + (\text{Pa3} / \rho_{e3})$$

DP : densité de bitume

ρ_{e1} , ρ_{e2} , ρ_{e3} , etc. les masses volumiques des agrégats 1, 2, 3 etc.

Pb : le pourcentage en poids de bitume.

Pa1, Pa2, Pa3, les pourcentages des agrégats.

La masse volumique apparente (MVA) se mesure sur une éprouvette fabriquée en la boratoire. Elle est égale au rapport de la masse de l'échantillon sur son volume déterminé par pesée hydrostatique ou par mesure géométrique.

1.8 Conclusion

L'enrobé bitumineux est compose de sables, gravillons et le bitume. Pour formuler un enrobé convenable

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

Le mélange bitume-agrégat obtenu doit avoir :

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

Chapitre II :Essais sur les enrobes bitumineux

2.1 Introduction

Les différents matériaux utilisés en construction routière, doivent être soumis à des essais mécaniques, pour étudier leur comportement sous différentes sollicitations. Dans ce chapitre, sont présentés les différents essais réalisés après formulation.

Les essais Marshall, les essais Duriez normal. Essai de cisaillement à la presse de giration (PCG) et l'orniérage.

2.2 Niveau de formulation des enrobés bitumineux

Il existe plusieurs niveaux d'application des méthodes de formulation en fonction de la nature des études. Ainsi, en fonction qu'on ait à faire une vérification de formule déjà appliquée, à adapter une formule à un cas de changement d'au moins un des constituants ou dans le cas d'une formule nouvelle, on aura quatre (04) niveaux ou « stratégies » de formulation détaillée. [17].

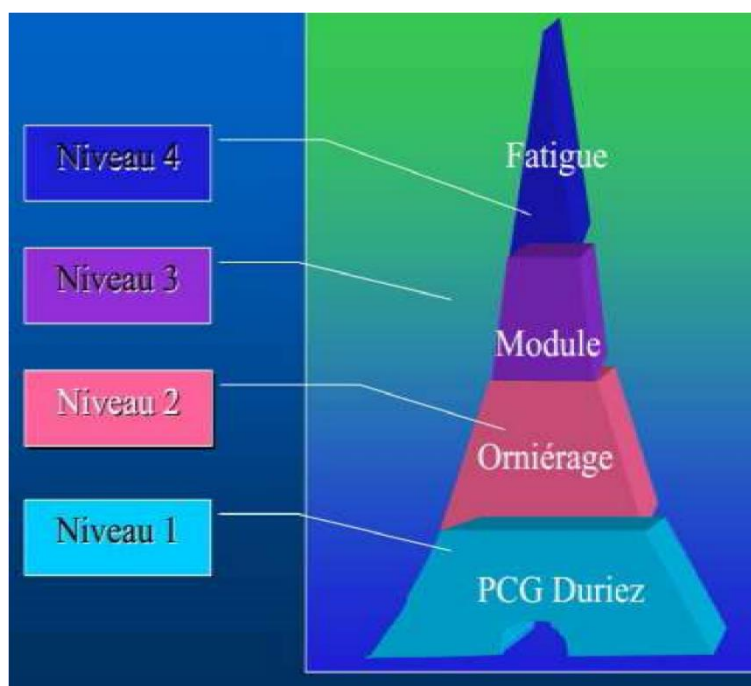


Figure 2.1 Niveaux de l'épreuve de formulation

- **Niveau 1** : Ce niveau permet d'estimer le comportement des matériaux « essai Duriez - essai Presse à Cisaillement Giratoire ». [18]

- **Niveau 2** : Ce niveau comporte les essais du niveau 1 auxquels s'ajoute l'essai de résistance à l'orniérage [18]

- **Niveau 3** : Ce niveau comporte les essais des niveaux précédents auxquels s'ajoute un essai l'orniérage. [18]

Ce niveau comporte les essais des niveaux précédents auxquels s'ajoute un essai de module. Cet essai de module est spécifié dans le cas de chantiers importants et lorsque la couche intervient dans le fonctionnement structurel de la chaussée. [18]

- **Niveau 4** : Ce niveau comporte tous les essais cités précédemment ainsi qu'un essai de détermination de la résistance à la fatigue. Le recours à cet essai intervient généralement pour des chantiers importants, notamment sur le réseau autoroutier. [18]

2.3 ESSAIS SUR LES ENROBÉS BITUMINEUX

Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux bitumineux peuvent être déduites de l'analyse des résultats d'essais de laboratoire. Ces essais, normalisés lorsqu'ils servent au dimensionnement, sont effectués dans des conditions bien définies de température et de sollicitations. Ils sont réalisés sur des éprouvettes confectionnées au laboratoire ou prélevées sur place. Le niveau d'étude de formulation dépend en général du type d'enrobé, du niveau de sollicitation de la chaussée et de l'importance du chantier. [4]

2.3.1. Essai Marshall NF P 98-251-2

L'objet

Ces essais et déterminations sont effectués, d'une part, en vue de l'étude préalable de - recherche de la meilleure composition à adopter pour la confection d'un enrobé ou d'un béton ; - hydrocarboné, d'autre part, en vue du contrôle de la constante du produit en cours de fabrication. Ainsi que pour le contrôle de la constante du produit en cours de fabrication.

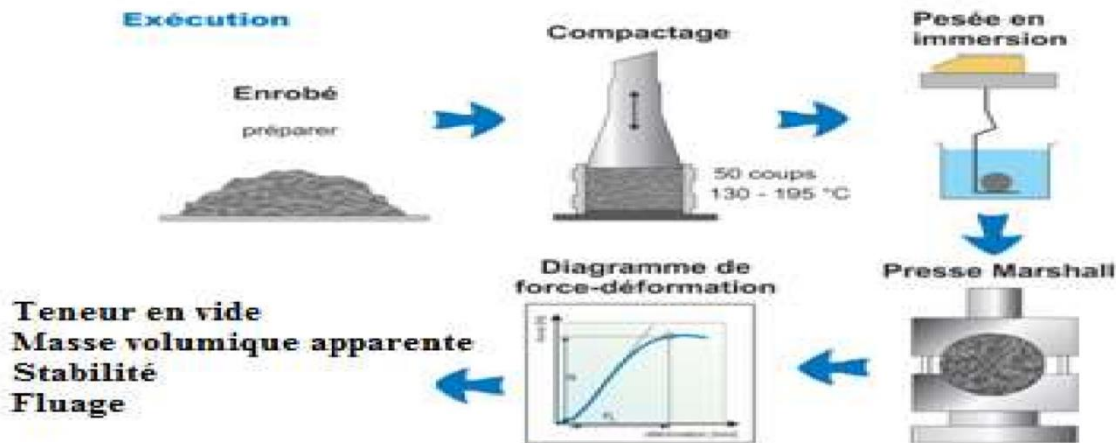
[17]

Principe et définition :

L'essai de stabilité Marshall est un essai de composition exercée suivant la génératrice d'une Éprouvette cylindrique semi-frettée. Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après une immersion de 30 minutes dans l'eau à 60°C, à la vitesse de 0,846 mm/s. On appelle «

stabilité » le pourcentage de la charge maximale atteinte par l'éprouvette lors de la rupture.
Marshall » la charge en kilogrammes atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette.

En même temps que l'on applique l'effort de compression, on mesure la déformation à l'aide d'un Cet appareil est composé d'un manchon de guidage et d'un indicateur de fluage.



On appelle « déformation Marshall » la diminution du diamètre vertical qui est atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette. Cette déformation est exprimée en 1/10 de mm Cette déformation est exprimée en 1/10 de mm On mesure également les dimensions. Du poids de l'éprouvette après confection, on détermine la densité apparente, puis, en connaissant la densité du liant, on calcule le pourcentage de vides occupé par le liant. Du liant et des agrégats, on calcule le pourcentage de vides occupés par le liant.

La proportion des vides occupés par le liant est appelée pourcentage volumique des vides Des agrégats. Comblé par le liant [18].

Figure 2.2 Principe de l'essai Marshall

a) APPAREILLAGE

- Au moins trois moules de compactage comportant chacun une base, un corps de moule et une [20]
- une hausse : la base et de la hausse aux deux extrémités du corps du moule ; Le diamètre intérieur du moule doit être de 101,6 mm \pm 0,1 mm [20]



Figure 2.3 Moule Marshall

- Deux pistons extracteurs de diamètre légèrement inférieur au diamètre intérieur du moule. [20]
- Une dame de compactage comportant un marteau pesant $4\,536\text{ g} \pm 5\text{g}$. Ce marteau coulisse librement sur une tige de guidage et tombe en chute libre de $457\text{ mm} \pm 5\text{ mm}$ sur la base de la dame. [20]
- Un bloc support de moule en chêne de dimensions suivantes : largeur 300 mm, longueur 300 mm, hauteur 450 mm Ce bloc est muni de deux boulons servant au calage du moule. [20]
- Au moins trois mâchoires d'écrasement, chacune étant composée de deux demimâchoires ayant un rayon de courbure intérieur compris entre 50,9 mm et 51 mm [20]
- Un dispositif de mesure de fluage à 0,1 mm près Une presse à avancement moyen à vide, réglée à la valeur de $0,85\text{ mm/s} \pm 0,1\text{ mm/s}$, équipée d'un dispositif permettant de mesurer l'effort au cours de la compression, est également requise. [20]
- Un bain thermostatique pouvant contenir au moins trois éprouvettes et trois mâchoires d'écrasement. [20]
- Une plaque chauffante électrique ; [20]
- Un malaxeur pour le mélange granulaire avec ajout de bitume. [20]

b) Remplissage des moules.

Pour chaque moule, il est nécessaire de peser un mélange de 1200g. Les moules sont ensuite remis dans l'étuve pour une durée de 2h. **c) Compactage des éprouvettes**

- Un des moules contenant le mélange hydrocarboné est fixé sur le socle en bois.
- L'éprouvette n° 1 est immédiatement compactée, les autres moules étant placés dans

L'éprouvette n° 1 est immédiatement compactée, les autres moules étant placés dans une étuve à la température de référence. [20]

- La dame étant maintenue perpendiculairement au moule, le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame en 55s sur les deux faces de l'éprouvette [20].
- L'éprouvette n° 2 est compacté 5 min après l'éprouvette n° 1 et ainsi de suite. [20]
- Les moules seront ensuite laissés à l'air libre pendant 24h jusqu'à total refroidissement. [20]

d) Démoulage des éprouvettes

Les éprouvettes sont démoulées après 24h de refroidissement. Cela est effectué grâce à l'appareil servant pour l'essai Marshal **e) Vérification des éprouvettes :**

Après démoulage, les éprouvettes numérotées sont pesées « mi ». Les dimensions de l'éprouvette sont mesurées, en six zones différentes pour la hauteur et trois pour le diamètre. La masse volumique apparente MVA est calculée à partir des mesures géométriques. Si la MVA d'une éprouvette s'éloigne de la masse volumique apparente moyenne des éprouvettes de $\pm 2\%$, la série est rejetée. Pour chaque éprouvette la moyenne des six mesures de hauteur doit être comprise entre 62,5 et 65mm, avec une tolérance pour chaque mesure de $\pm 1,5\text{mm}$ par rapport à la moyenne, sinon la série est rejetée. [18] **f) Application de la compression**

Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à 60°C pendant 30min.

La mâchoire de l'appareil Marshall est mise en place sur la presse et une éprouvette y est placée. La lecture du fluage et de la stabilité Marshall sont relevées sur les 2 cadrant de

L'appareil et reportée afin de faire les calculs nécessaires. [5] **g)**

Expression des résultats

- La stabilité Marshall est exprimée en déca newtons « daN » et représente la moyenne des résultats d'au moins trois éprouvettes.
- Le fluage Marshall, exprimé en dixièmes de millimètre « 1/10mm », représente la moyenne des affaissements d'au moins trois éprouvettes.
- Le pourcentage de vides, soit V en pourcentage est donné par :

$$V\% = \left(100 - \frac{MVA}{MVR}\right)$$

MVA - : la masse volumique apparente.

- la masse volumique réelle.

$$MVR \text{ Enrobés} = \frac{\text{poids (granulats+bitume)}}{\text{volume (granulats+bitume)}}$$

2.3.2. Essai Duriez (essai de compression simple) (EN 12697-12)

La norme NF P 98-251-1 (septembre 2002) spécifie les essais à chargement statique sur mélanges. Hydrocarbonés. Elle décrit une méthode permettant de déterminer la résistance à l'eau d'un mélange hydrocarboné à une température donnée. Compactage donné, la résistance à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud, à partir du rapport des résistances.

En compression avec et sans immersion des éprouvettes, ainsi que leur pourcentage de vides [21]

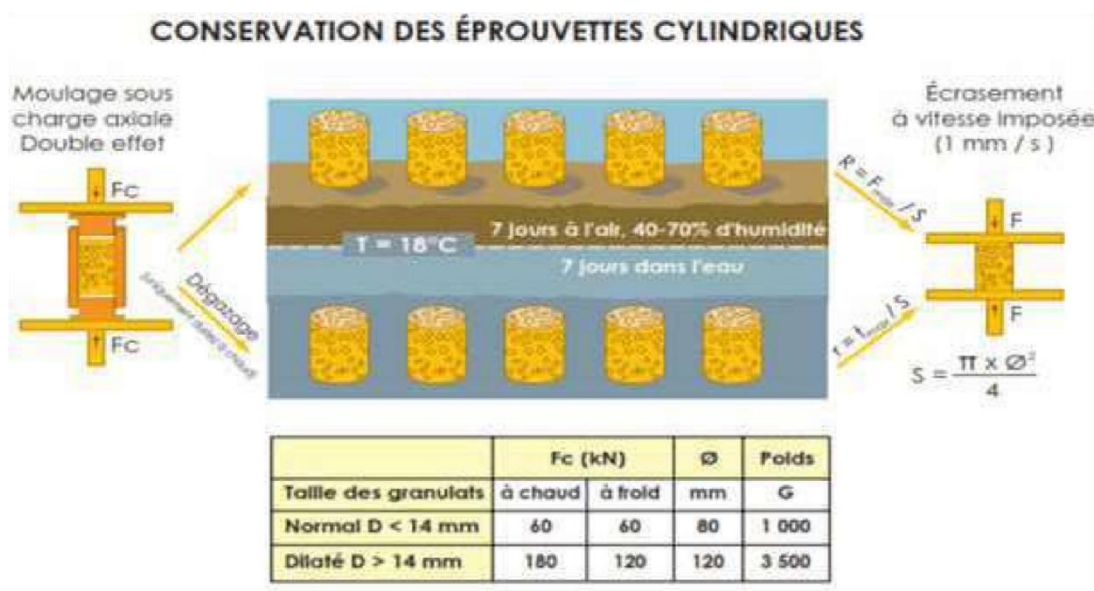


Figure 2.4 Principe d'essai la tenue à l'eau

a) Principe de l'essai

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage statique à double Effet. Deux éprouvettes sont destinées à la mesure de la masse volumique par pesée hydrostatique. Le pourcentage des vides est ensuite calculé.

Les autres éprouvettes subissent l'essai de compression après cela. Conservation à 18 °C dans des conditions définies à l'air pour certaines d'entre elles immersion pour d'autres.

D'autres subissent l'essai de compression après conservation à 18 °C dans des conditions d'air, tandis que d'autres encore subissent l'essai de compression après immersion dans l'eau.

La tenue à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances avec ou sans immersion. **b)**

Appareillage

Les appareillages du l'essai duriez compose deux parties, l'un qu'est les moules et les pistons ce derniers varie selon la granulométrie du mélange devra tester (D_{max}) (Photo 2.1). [21]

- 80 mm par $D_{max} < 14$ mm
- 120 mm par $D_{max} \geq 14$ mm



Figure 2.5 Moues et pistons

Une deuxième partie c'est la presse avec une vitesse de 1mm/s qui presse permettant le compactage à double effet (Photo II.4) [NF P 98-251-1, 2002]

c) **Préparation des éprouvettes** : Le mélange hydrocarboné doit être fabriqué selon la NF P 98-250-1. Les températures de référence de préparation des éprouvettes de mélanges à base de bitume pur sont définies comme suit

- Bitume 80/100 : 140 °C - 5 °C □
- Bitume 60/70 : 150 °C - 5 °C
- Bitume 40/50 : 160 °C - 5 °C ; □
- Bitume 20/30 : 180 °C - 5 °C.

Les granulats secs à mélanger sont maintenus à une température supérieure de 20°C à celle de référence.

d) **Le mode opératoire**

1. Mettre à l'étuve le mélange retenu d'un poids spécifié ainsi que le bitume choisi et les moules Duriez à une température spécifiée pendant minimum 2 heures [22].
2. Sortir de l'étuve la cuve contenant le mélange granulaire et la poser sur la plaque chauffante ainsi que le bitume. [22]

3. Peser la quantité de bitume relative à chaque mélange. [22]
4. Malaxer le mélange granulaire pour homogénéiser pendant 30 secondes. [22]
5. Peser et versé la quantité du liant préconisée en actionnant le malaxeur pendant 2 à 5 minutes. [22]
6. Remplir le moule d'enrobé à un poids spécifié au gramme après. [22]
7. Compacter sous presse avec une charge suivant l'essai DURIEZ demander (60 KN ou 180 KN) Pour les autres liants hydrocarbonés la température de fabrication des mélanges sont celles définies par le fournisseur. Les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes (2 heures au minimum) [22]

e) Remplissage des moules

Les prélèvements ont les masses suivantes :

- 1 000g dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D < 14$ mm
□ 3 500g dans le cas des mélanges hydrocarbonés de $D \leq 14$ mm □ Un piston est placé à la partie inférieure du moule.
- Le prélèvement est introduit en une seule fois dans le moule très légèrement enduit d'oléate de soude glycéринé.

Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve dont la température proximité est à la température de référence ; ils doivent y séjourner entre $\frac{1}{2}$ h et 2h.

f) Compactage des éprouvettes

- ✓ Un piston est placé à la partie supérieure du moule.
- ✓ Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet.
- ✓ Charge appliquée :
 - ✚ pour les mélanges hydrocarbonés de $D < 14$ mm, 60kN.
 - ✚ pour les mélanges hydrocarbonés de $D \leq 14$ mm, 180kN.
- ✓ La charge doit être atteinte entre 5 s et 60 s maximum et maintenue entre 300s et 305s.
 - ✓ Au bout de ce temps, la mise en charge est interrompue.

Les éprouvettes sont conservées couchées dans leur moule au minimum 4h jusqu'à retour à la température ambiante, puis elles sont démoulées. [22].

g) Expression des résultats tenue à l'eau

Les résultats de l'essai sont la résistance à la compression simple à une température de 18 °C, avec ou sans immersion, est le rapport de la charge maximale à la section circulaire des éprouvettes. Il est exprimé en méga pascals et représente la moyenne de quatre ou cinq mesures suivant la dimension D du mélange hydrocarboné soumis à l'essai [22]

On établit également le rapport de la résistance avec immersion (i) à la résistance sans immersion (C) ; le rapport (i/C) est exprimé avec deux chiffres

$$V\% = \left(100 - \frac{MVA}{MVR}\right)$$

Significatifs [NF P 98 – 256 -1, 2002] Un autre paramètre présente dans les résultats c'est le pourcentage d'imbibition après nombre jour, note k sa formule c'est :

Pourcentage des vides :

2.3.1 Essai de cisaillement à la presse de giration « PCG » (NF EN 126991)

Cet essai a pour objectif d'évaluer l'évolution du pourcentage de vides dans un enrobé bitumineux soumis à un compactage isotherme, obtenu par combinaison d'un cisaillement giratoire et d'une force axiale. L'essai consiste à soumettre une éprouvette d'enrobé à une série de vibrations des vibrations avec une inclinaison d'un angle au sommet de $2\alpha = 2^\circ$ et en appliquant une force de 12KN, avec des vitesses de rotation comprises entre 6 et 32 tr/min. La hauteur de l'éprouvette est mesurée à certains nombres de tours. à certains nombres de girations, afin de déterminer l'évolution de la hauteur de l'éprouvette.[20]

Le principe de cet essai est de mesurer la hauteur de l'éprouvette à certains nombres de girations afin d'en déduire l'évolution. De l'indice de vide en fonction du nombre de girations.

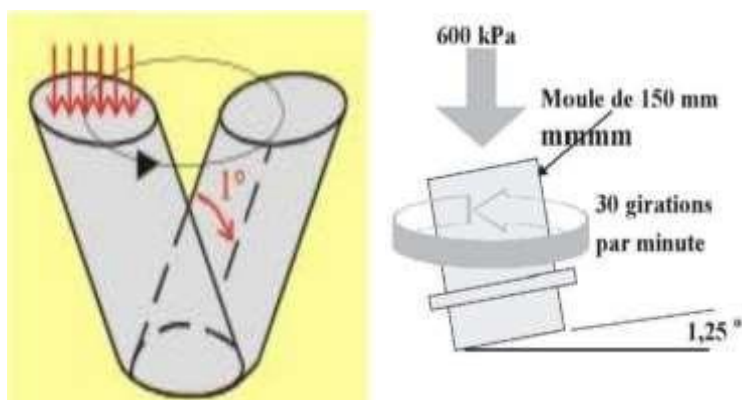


Figure 2.6 Principe de compactage Principe la PCG

2.3.2 Mode opératoire

Un mélange hydrocarboné préparé en laboratoire est placé, foisonné, puis laissé à température d'essai. (130 °C à 160 °C environ) dans un moule cylindrique de 150 mm de diamètre. On applique une pression verticale de 0,6 MPA sur le sommet de l'éprouvette. Une pression verticale de 0,6 MPA est appliquée au sommet de l'éprouvette. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un faible angle de l'ordre de 0,82°, et soumise à un mouvement circulaire. Ses différentes Des actions exercent un compactage par pétrissage. Le mouvement global permet une réorientation. Des granulats pour faciliter le compactage en cas de tractions excessives. [20]

La masse (M) du mélange à introduire dans le moule doit être déterminée à l'aide de l'expression ci-dessous : La masse volumique réelle du mélange, déterminée conformément à la norme EN 12697-5, doit être prise en compte. Norme EN 12697-5, et de la hauteur minimale de l'éprouvette compactée h min,

Correspondant à un pourcentage de vide nul :

$$M = 10^{-9} \cdot \pi \cdot D^2 / 4 \cdot h_{min} \cdot \rho_M$$

Avec :

M : la masse du mélange à introduire dans le moule, en (kg) ; D : le diamètre interne du moule, en (mm) ; hmin : la hauteur minimale de l'éprouvette compactée, correspondant à un

pourcentage de vide nul, en millimètres (mm) ; ρ_M : la masse volumique réelle du mélange, en (kg/m³).

Pour une presse à cisaillement giratoire h_{min} sera constante.

Avant de remplir le moule de la PCG qui est cylindrique et de 150 mm de diamètre, il faut que ce dernier soit placé dans l'étuve au moins 3 heures à une température de 160°C. Ensuite on met un papier filtre dans la base du moule et nous le remplissons avec l'enrober chaud. Une fois la masse nécessaire atteinte, on met un deuxième papier filtre au-dessus. Au final, on place le moule dans la PCG.

Au bout de 80 girations, ce qui ressort de l'essai est la détermination de la compacité et du pourcentage de vide.

La variation du pourcentage de vides de l'éprouvette compactée en fonction de l'énergie de compactage est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$e (\%) = (H_g - H_{min} / H_g) * 100$$

Avec :

e : pourcentage de vides pour un nombre de girations, N_g , exprimé en (%) ;
 H_g : la hauteur de l'éprouvette atteinte après un nombre de girations g en (mm)

H_{min} : la hauteur minimale de l'éprouvette compactée, correspondant à un pourcentage de vides nul en (mm).

Les résultats obtenus sont représentés sous forme de graphique dont l'ordonnée est le pourcentage de vides, en pourcentage du nombre de vides et, en abscisse, du nombre de girations. La compacité absolue pouvant être atteinte sur le chantier avec un atelier normal de compactage pour une épaisseur e (en cm) est atteinte sur le chantier avec un atelier normal de compactage pour une épaisseur e (en cm) est :

Celle obtenue à la PCG pour un nombre de girations $n = 10 e$.

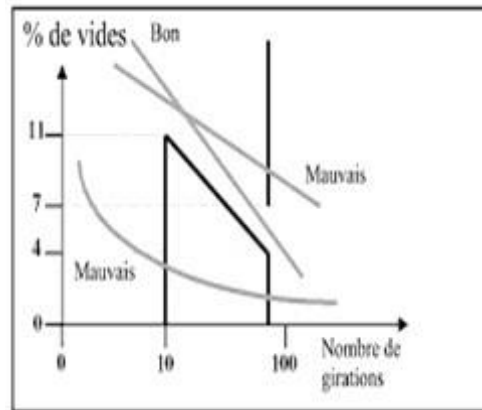


Figure 2.7 Pourcentage des vides en fonction du nombre de girations

Expression des résultats de PCG

La variation du pourcentage de vides de l'éprouvette compactée en fonction de l'énergie de compactage [NF EN 12697- 10 ; 2003] est déterminée à l'aide de la formule suivante :

$$V(n)=V_1-K \ln(n) \text{ Avec}$$

$V(n)$: est le pourcentage de vides pour un nombre de girations, ng , exprimé en pour cent(%)

V_1 : est le pourcentage de vides calculé pour une giration ;

K : est la compactibilité (pour la méthode utilisant un compacteur giratoire) ;
 n : est le nombre de girations.

2.3.4. Essai d'orniérage :

L'essai à l'ornière permet d'étudier les enrobés destinés aux chaussées soumises à un trafic intense et très élevé. Il permet d'évaluer la résistance à l'orniérage des couches de roulement et des couches de base. [24]

Il permet d'évaluer la résistance à l'orniérage des couches de roulement et des couches de base. Destinées notamment à ces types de trafic, il permet d'évaluer leur résistance à l'orniérage dans des conditions de nature. Comparables à celles rencontrées sur les chaussées. L'essai se caractérise par la détermination de :

- la profondeur d'ornière provoquée par le passage répété d'un pneumatique sur une plaque ;
- d'enrobé à 60 °C pour les couches de surface et à 50 °C pour les couches de base.



Figure 2.8 Appareillage de l'essai d'orniérage

2.3.1 Principe d'essai orniérage

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5 cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence : 1 Hz, charge : 5 kN, pression : 6 bars), dans des conditions sévères de température (60 °C) (figure26) [24]

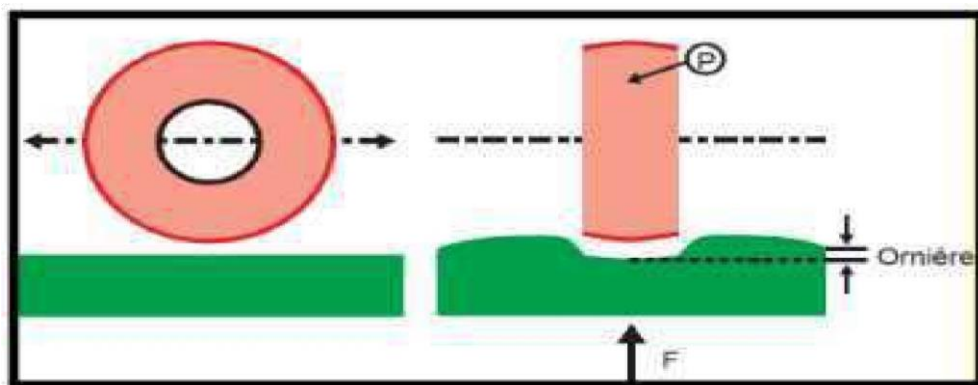
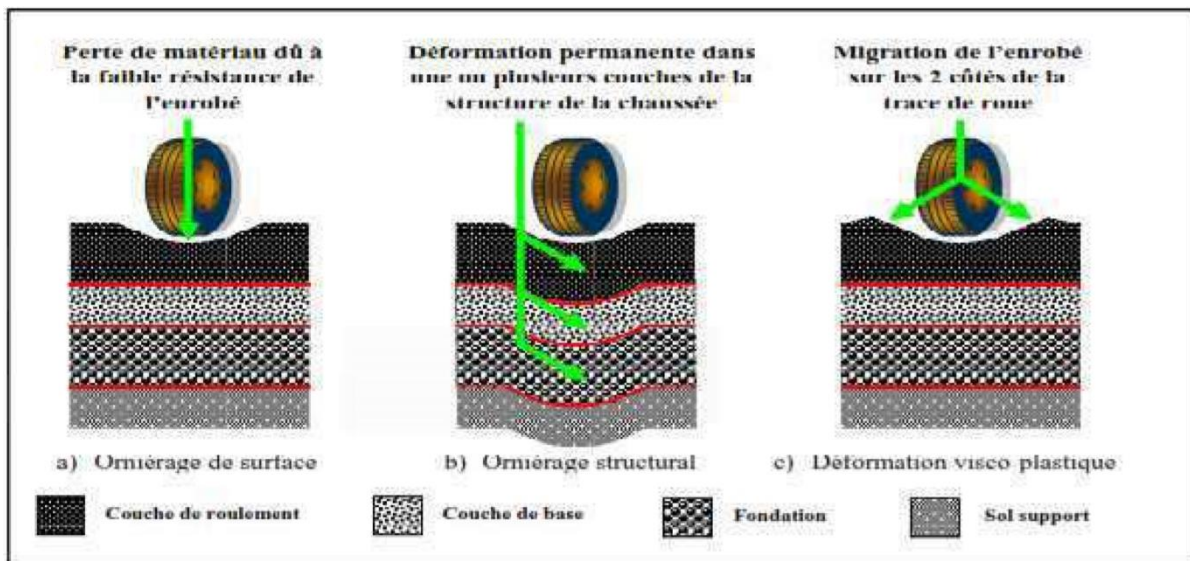


Figure 2.9 Principe de l'essai d'orniérage [25]

2.3.2 Types d'ornières

Des essais à grandes déformations sur enrobés bitumineux révèlent la présence de déformation permanente irréversible, une déformation viscoplastique d'un point de vue microstructure, la déformation viscoplastique est liée au mouvement (glissement et rotation) des granulats les uns par rapport aux autres et liés entre eux grâce au bitume.[24]

Le comportement rhéologique du bitume a une grande influence sur le mouvement relatif des granulats. A basse température, la déformation viscoplastique est de faible amplitude



ou pratiquement absente due à la rigidité du bitume. Cependant, lors d'une augmentation de la température, l'effet lubrifiant généré par le bitume devient de plus en plus important et favorise l'accroissement de la déformation viscoplastique de l'enrobé

On considère généralement trois types d'ornières

- L'ornièrage de surface, associé à des déformations ou à l'usure dans les traces de roues ;
- L'ornièrage structural, associé généralement à un affaissement des couches de fondation ou de sous fondation.
- La déformation viscoplastique, liée à la densification (compaction) et/ou au cisaillement de l'enrobé bitumineux dans les traces de roues.

Figure 2.10 Lustration des différents types d'ornièrage [24]

L'enceinte étant maintenue à une température comprise entre 15 °C et 25 °C, mettre la machine en mouvement jusqu'à ce que l'éprouvette ait subi 1 000 cycles de charge. Pour mesurer la profondeur dernière sous cette charge à des conditions ambiantes [NF EN 1269722 ; 2004].

Régler la température de l'enceinte à la température d'essai et contrôler la température de l'air à l'aide de la sonde installée sur la paroi latérale du moule. La température de l'air ne doit pas dépasser 75 °C si la température d'essai est inférieure ou égale à 60 °C, et ne doit pas dépasser de plus de 15 °C la température d'essai si celle-ci est supérieure à 60 °C. L'éprouvette doit être conditionnée à ces températures pendant 12 h à 16 h avant d'être soumise à l'essai. [NF EN 12697-22 ; 2004].

Mettre la machine en mouvement. Arrêter la machine et mesurer la profondeur d'ornièrè aux 15 emplacements prédéterminés, après que l'éprouvette a subi le nombre de cycles spécifié 1000, 3000, 10000 et 30000 et, le cas échéant, à 30, 100, 300 et 100000 cycles de charge [NF EN 12697-22 ; 2004] sans compter les cycles de conditionnement.

Maintenir la température au sein de l'éprouvette à la valeur spécifiée à $\pm 2^{\circ}\text{C}$ pendant toute la durée de l'essai. L'essai sur cette éprouvette est achevé une fois le nombre requis de cycles de charge atteint ou lorsque la profondeur d'ornièrè moyen.

2.3.5. Essai de module complexe (EN 121697 - 26)

Cet essai caractérise le comportement viscoélastique des enrobés en fonction de la fréquence et de la température. L'essai de module est effectué sur une éprouvette d'enrobé de forme trapézoïdale encastré à sa base et sur l'extrémité libre, on impose un déplacement sinusoïdale très faible d'amplitude constante créant une mise en flexion du corps d'épreuve en simulant l'effet du trafic. A partir de la force résultante, on calcule le module dans une gamme de température allant de -10 à 40° C, et pour chaque température, quatre niveaux de fréquence qui sont : 1, 3, 10 et 30 Hz. [12]

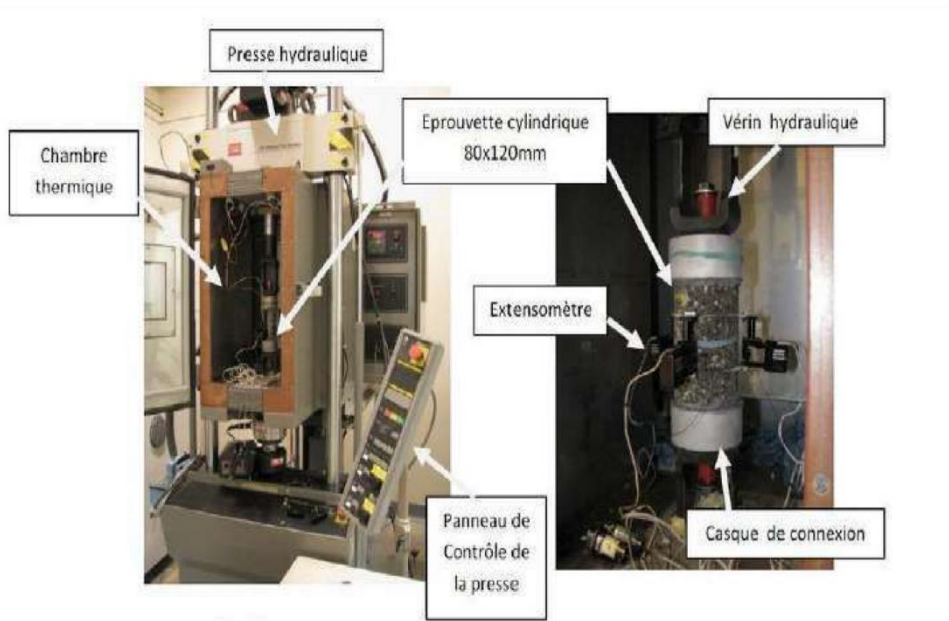


Figure 2.11 L'appareil de module complexe

2.3.6. Essai de fatigue (NF EN 12697-24 Mars 2005)

Cet essai consiste à solliciter en flexion au travers de son bord libre une éprouvette trapézoïdale d'enrobé encastré à sa base. Cette sollicitation se fait en déplacement imposé. C'est-à-dire qu'on impose un déplacement sinusoïdal d'amplitude constante à l'extrémité



de l'éprouvette et on admet que la rupture est atteinte lorsque l'effort nécessaire pour obtenir la déformation est égal à la moitié de l'effort initial. [12]

Figure 2.12 Appareillage de l'essai de fatigue

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de présenter les essais en laboratoire réalisés sur le mélange bitumineux selon les essais de Marshall, duriez, PCG et orniéage. Nous avons pu obtenir une vision globale de la performance de ces enrobés dans différentes conditions.

L'essai Marshall a permis de déterminer le pourcentage optimal de bitume en mesurant la stabilité et la fluidité, ce qui aide à évaluer la capacité du mélange à supporter les charges.

En parallèle, l'essai duriez s'est révélé essentiel pour évaluer la résistance du mélange à l'eau et au découlement, garantissant ainsi sa durabilité et sa stabilité à long terme. L'essai PCG a fourni des informations précises sur l'aptitude du mélange à la compaction, reflétant la qualité du compactage et le contrôle des vides d'air lors de la mise en œuvre. Enfin, l'essai d'orniéage nous a permis d'étudier la résistance du mélange aux déformations permanentes et à l'orniéage sous l'effet du trafic et des températures, donnant une image fidèle de la performance de la chaussée en service.

A la lumière des résultats obtenus, il est clair que l'évaluation complète d'un mélange bitumineux ne peut se baser sur un seul essai, mais nécessite un ensemble de critères complémentaires permettant de garantir une haute qualité, une performance stable et une longue durée de vie de la chaussée, tout en réduisant les coûts d'entretien futurs.

Partie II expérimentale

Chapitre III: Matériaux et procédures d'essais

3.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons définir les matériaux utilisés dans cette étude (granulats, bitume), et de déterminer leurs caractéristiques physico-mécaniques pour formuler les bétons bitumineux étudié.

3.2 ESSAIS D 'IDENTIFICATION DES AGREGATS

Les granulats représentent près de 95 % d'un enrobé bitumineux. Il est donc important de bien les caractériser afin de faire un choix optimal lors de la formulation et de la fabrication d'un enrobe performant. Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des bétons bitumineux destinés aux couches de roulement, à savoir :

- Sable de classe 0/3 de la Station de concassage situé à AIN TOUTA.
- Gravier de classe 3/8 de la Station de concassage situé à AIN TOUTA.
- Gravier de classe 8/15 de la Station de concassage situé à AIN TOUTA.
- Liant bitumine pur de classe 40/50 de l'entreprise NAFTAL.

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

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

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

- L'analyse granulométrique (NF P 18-560) ;

➤ L'essai d'aplatissement (NF P 18-561) ;

L'équivalent de sable (NF P 18-597) ;

3.2.1 Analyse granulométriques (NF P 18-560)

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamisons matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les masses des différents refus et tamis sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.



Figure 3.1 Série de tamis de l'analyse granulométrique

Tableau 3.1 Résultats de l'analyse granulométrique des agrégats

Tamis (mm)	Tamisât (%)		
	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15
25	100	100	100
20	100	100	99.70
16	100	100	93.80
14	100	100	79.60
12.5	100	100	60.30
10	100	100	20.10
8	100	97.50	4.40
6.3	100	44.00	1.50
5	99.49	9.83	/
4	96.56	1.67	/
2	72.50	0.67	/
1	56.79	/	/
0.5	38.53	/	/

0.315	30.96	/	/
0.125	22.14	/	/
0.08	15.51	/	/

Présentation des résultats par courbes granulométriques

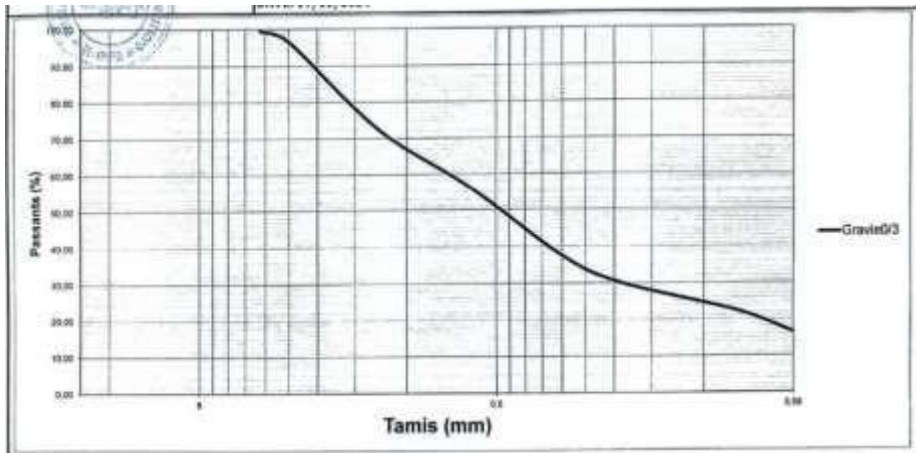


Figure 3.2 Courbe granulométrique du sable

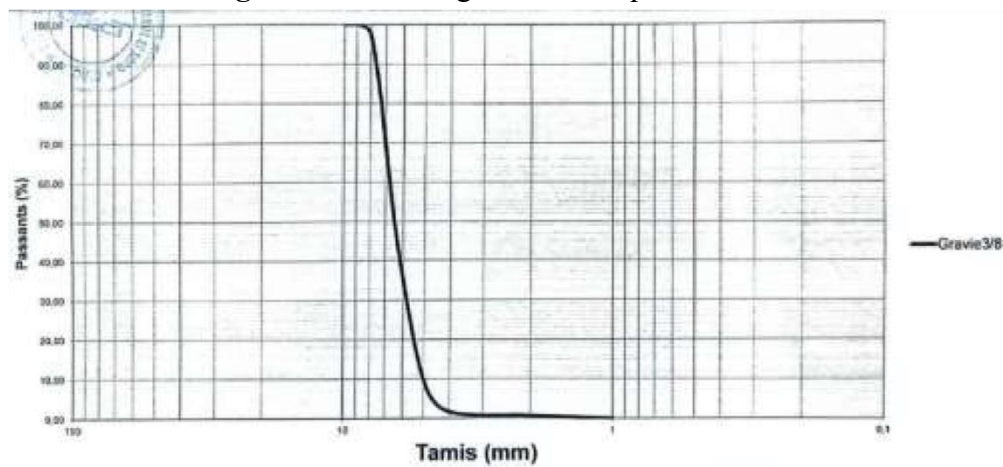


figure 3.3 Courbe granulométrique de gravier3/8

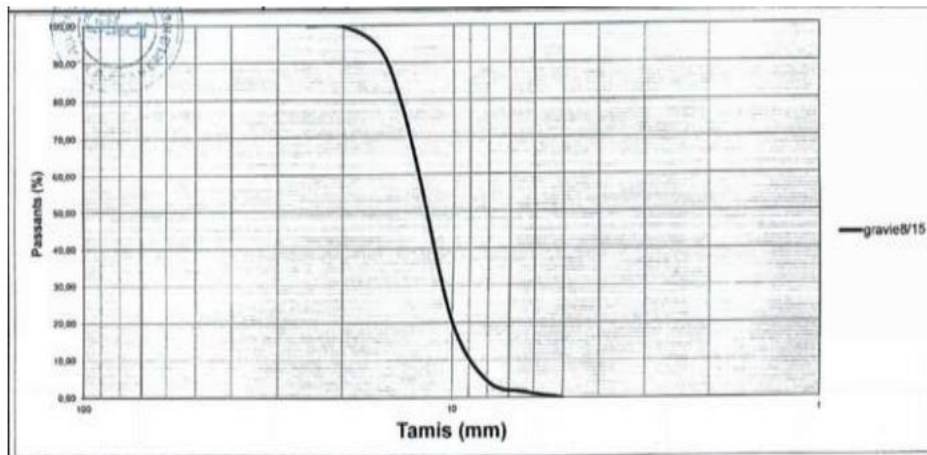


Figure 3.4 Courbe granulométrique du gravier8/15

Les courbes montrent une bonne granulométrie et sont conformes aux normes.

3.2.2 Essai d'Aplatissement (NF 18 – 561)

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons 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.



Figure 3.5 Essai de coefficient d'aplatissement

Tableau 3.2 Résultat d'aplatissement des graviers.

Classe des graviers	3/8	8/15	NF EN 933-3
Essai d'aplatissement AP (%)	13	10	≤ 20 %

3.2.3 Essai de propreté

Tableau : Résultats de propreté

Classe des graviers	3/8	8/15	NF EN 933-1
Propreté %	0.75	0.60	≤ 2 %

Pour l'essai de propreté les résultats sont conformes

3.2.4 La masse volumique absolue

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains. Les résultats sont présentés dans le tableau



Figure 3.6 Essai de masse volumique absolue

Tableau 3.3 Résultat de l'essai la masse volumique absolue

Classe des graviers	0/3	3/8	8/15
masse volumique ρ_s (g/cm ³)	2.68	2.70	2.70

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

Cet essai s'effectue sur la fraction de sable ou de granulat passant, au tamis à mailles de déterminer un coefficient d'équivalent de sable effectuée sur une fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants :

- **Hauteur h1** : sable propre + éléments fins (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

Figure 3.7 Essai d'équivalent de sable

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant :

Tableau 3.4 Résultats de l'essai équivalent de sable

Sable	0/3	NF EN 933-8
ES (%)	64	ES ≥ 45%

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

L'essai Los Angeles est utilisé pour déterminer la résistance à la fragmentation d'un Échantillon de granulat. Le coefficient Los Angeles est obtenu par le pourcentage de

L'échantillon initial passant au tamis de 1.6 mm après fragmentation dans un cylindre de la Machine los Angeles en présence des boulets d'acier par rotation 500 rotation en 15 min.

Plus le pourcentage Los Angeles (note LA) est bas, plus l'échantillon est résistant a la Fragmentation

$$LA = \frac{5000 - M}{50}$$

M : masse du refus à 1.6 mm



Photo 3.1 Essai Los-angeles

Tableau 3.5 Résultat de l'essai Los-angles

Classe de gravier	3/8	8/15	EN (1097-2)
LA%	16	15	≤ 25%

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les granulas 3/8 et 8/15 présentés des bonne résultats concernant la résistance à la fragmentation par choc

3.2.7 Essai Micro Deval (NF P 18-572)

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure par frottements entre les granulats (l'attrition) et une charge abrasive. Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite dans un broyeur, dans des conditions bien définies, à sec ou en présence d'eau. Plus le coefficient micro-Deval est élevé, le matériau est meilleur.

$$MDE = \frac{500 - M}{50}$$



Photo 3.2 Essai micro-Deval

Tableau 3.6 Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant

Classe de gravie	3/8	8/15	EN (1097-1)
MDE (%)	15	14	$\leq 20 \%$

D'après les résultats obtenus, nous remarquons que les granulas 3/8 et 8/15 présentés des bonne résultats concernant la résistance à l'usure

3.2.8 Liant hydrocarboné

Le liant hydrocarboné utilise dans cette étude provient de l'unité de l'entreprise NAFTAL. On a procédé à la détermination de la classe du liant à partir des essais de caractérisation. Il s'agit des essais de pénétrabilité a l'aiguille a 25°C (NF EN 1426) et d'essai de point de ramollissement ou comme s'appelle la température bille et anneau (NF EN 1427) et densité relative (NA 5224).

3.3 Description des différents mélanges étudiés

Dans cette étude, nous avons préparé deux formulations :

- La première formulation utilise trois classes de granulats : sable concassé 0/3, gravillon 3/8 et gravillon 8/15. Ce mélange permet d'obtenir un béton bitumineux de type ordinaire.
- La deuxième formulation (modifiée) utilise les mêmes granulats que la première, avec un bitume modifié par plastique PET à des pourcentages différents : 0,5 %, 1 % et 1,5%.

Chapitre 3 : matériaux et procédures d'essais

- Les pourcentages de poudre de PET recyclé choisis (0.5%, 1% et 1.5%) ont été sélectionnés en se basant sur des critères scientifiques et techniques.

Ils permettent :

- une amélioration des propriétés sans compromettre la fabrication,
 - un bon mélange avec le bitume sans modifier fortement la viscosité,
 - une évaluation progressive de l'effet du PET,
 - la prévention d'éventuelles dégradations (compacité, stabilité Marshall, pourcentage de vides).
- Ces taux offrent ainsi un bon compromis entre performance, faisabilité et sécurité.

3.3.1 Déterminations des mélanges étudiés :

Pour calculer le mélange propose, on adapte la formule suivante :

$$\text{Mélange proposé (\%)} = \frac{\text{tamisât (100) pourcentage des constituans\%}}{100}$$

Les tableaux présents les différents mélanges proposent :

Tableau 3.7 Pourcentage des constituants de BBSG 0/14

Fractions	Pourcentage des constituants (%)
sable 0/3	42
gravier 3/8	31
gravier 8/15	27
Total	100

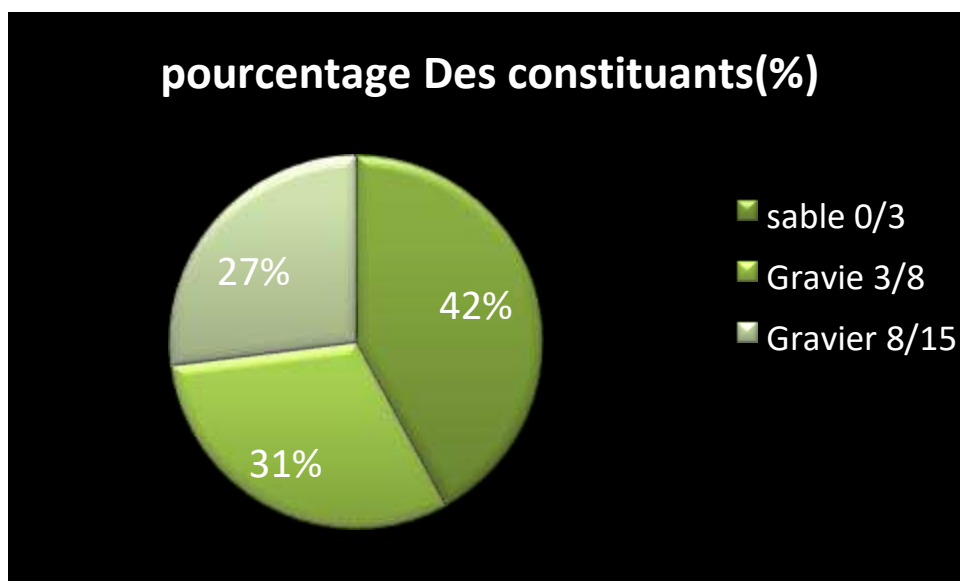


Figure 3.8 Composition granulaire de BBSG 0/14

Tableau 3.8 Granulométrie du BBSG0/14

Tamis (mm)	Fractions						Mélange proposé
	Gravier 8/15		Gravier 3/8		Sable 0/3		
31.5	100	27.00	100	31.00	100	42.00	100
25	100	27.00	100	31.00	100	42.00	100
20	99.70	26.92	100	31.00	100	42.00	99.92
16	93.80	25.33	100	31.00	100	42.00	98.33
14	79.60	21.49	100	31.00	100	42.00	94.49
12.5	60.30	16.28	100	31.00	100	42.00	89.28
10	20.10	5.43	100	31.00	100	42.00	78.43
8	4.40	1.19	97.50	30.23	100	42.00	73.41
6.3	1.50	0.41	44.00	13.64	100	42.00	56.05
5	/	/	9.83	3.05	99.49	41.79	44.83
4	/	/	1.67	0.52	96.56	40.56	41.07
2	/	/	0.67	0.21	72.50	30.45	30.66
1	/	/	/	/	56.79	23.85	23.85
0.5	/	/	/	/	38.53	16.18	16.18

0.315	/	/	/	/	30.96	12.61	12.81
0.125	/	/	/	/	22.14	9.43	9.43
	/	/	/	/	15.51	6.90	6.90

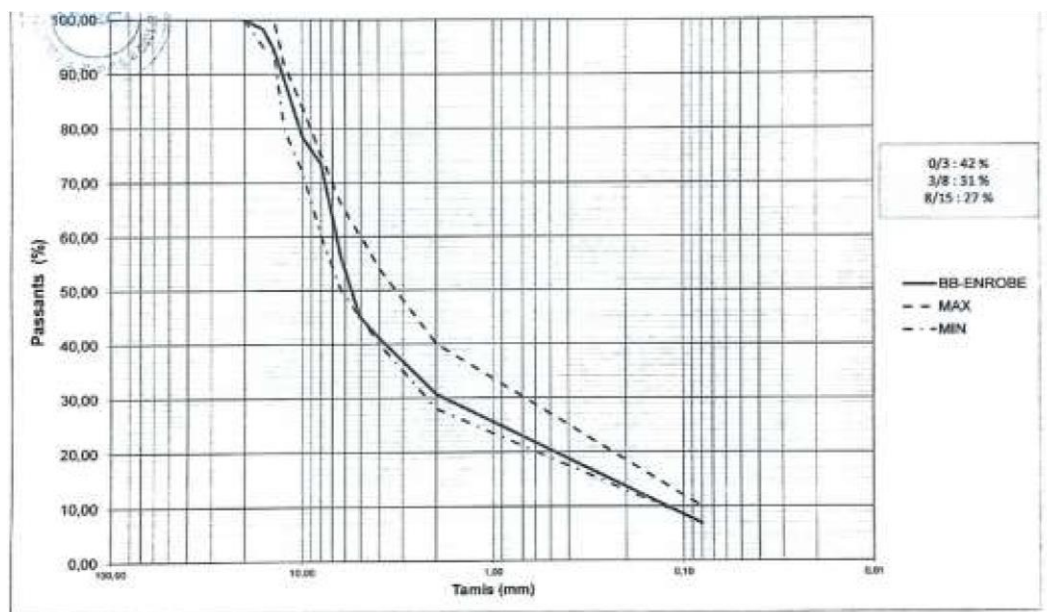


Figure 3.9 Courbe granulométrique du mélange BBSG0/14

La figure (Figure 3.9) indique que la courbe granulométrique du mélange BBSG s'inscrit dans le fuseau spécifique

Tableau 3.9 fuseau de spécification du BBSG0/14

Tamis	Tamisât	Fuseau
	Minimum	Maximum
20	100	-
14	94	100
10	72	84
6.3	50	66
4.0	40	54
2.0	28	40
0.08	7	10

Tableau 3.10 Calcul de teneur en liant de BBSG

$TL = K \times \alpha \times \sqrt[5]{\Sigma}$					
K	3.30	3.35	3.45	3.55	3.65
α	0.9845				
Σ	11.1346				
TL(%)	5.26	5.34	5.50	5.66	5.82

Fraction granulaire	0/3	3/8	8/15
----------------------------	------------	------------	-------------

Chapitre 3 : matériaux et procédures d'essais

Pourcentage du mélange	42	31	27
Teneur en liant (%)	5.34		

La teneur en bitume prise en compte pour la suite des essais sera celle correspondant à un module de richesse égal à 3.35. Elle est donc fixée à 5.34 %

3.4 Conclusion

Sur la base des essais de laboratoire effectués et des résultats de l'analyse des caractéristiques physiques et géométriques des matériaux constitutifs (sable, gravillons et bitume) présentés dans ce chapitre, il a été démontré que les matières premières utilisées présentent une bonne granulométrie et des propriétés fondamentales répondant aux exigences initiales pour la formulation des enrobés bitumineux. Ces essais, notamment l'analyse granulométrique et l'essai Marshall, ont permis d'évaluer la pertinence de chaque composant individuellement et de déterminer la composition optimale de l'enrobé qui satisfait aux critères techniques requis en termes de densité, de vides et de stabilité. Ces propriétés caractérisées des matériaux et du mélange constituent la base de l'évaluation de leurs performances futures et de leur résistance aux diverses sollicitations dans les applications d'ingénierie.

4 Résultats et interprétation

4.1 Introduction

Les essais réalisés sur des mélanges bitumineux modifiés avec du plastique PET aux pourcentages de 0,5 %, 1 % et 1,5 %, en les comparant avec le mélange non modifier. Les essais Marshall, Duriez, PGC et d'orniérage ont été utilisés pour évaluer l'effet de l'ajout sur les propriétés mécaniques. Le but est de trouver le pourcentage qui donne les meilleures performances.

Alors, est-ce qu'un de ces taux de PET va donner de meilleurs résultats que le mélange non modifié ?

4.2 Préparation de l'enrobé bitumineux

Pour la préparation de l'enrobé bitumineux, on commence par peser les masses nécessaires des différentes fractions granulaires (0/3, 3/8, 8/15) correspondant aux pourcentages prédéfinis par l'étude de formulation. On les met dans un bac, puis dans une étuve réglée à 200°C pendant 4 heures avant malaxage. Parallèlement, pour la préparation du bitume modifié, on chauffe le bitume à une température de 170°C. Concernant la préparation du mélange bitumineux destiné à la fabrication des éprouvettes d'essai, l'ensemble (granulat + bitume modifié) est placé dans le malaxeur et mélangé pendant trois minutes.

4.3 EXPERIENCES EN LABORATOIRE ET RESULTATS DES ESSAIS

Les caractéristiques mécaniques et physiques des matériaux bitumineux peuvent être déduites de l'analyse des résultats d'essais de laboratoire. Ces essais, normalisés et employés pour le dimensionnement, sont effectués dans des conditions bien définies de température et de sollicitation. Ils sont réalisés sur des éprouvettes confectionnées au laboratoire ou prélevées sur place.

Les mélanges de bétons bitumineux pour les essais sont maintenus à une température comprise entre 160°C et 170°C (figure 4.1).



Photo 4.1 Mélange d'un enrobé bitumineux à chaud Bitumineux

4.3.1 Essai Marshall

L'essai Marshall permet de déterminer la « stabilité » et le « fluage » Marshall d'une éprouvette cylindrique de hauteur 63,50 mm et de diamètre 101,60 mm, soumise à une compression exercée suivant sa génératrice et ce, pour un compactage énergétique donné (soit 50 coups sur chaque face de l'éprouvette).

Cette compression est appliquée sur les éprouvettes à une vitesse de 0,85mm/s après les avoir conservés dans un bain marie à 60°C pendant au moins 30 minutes (**Photo 4.1**). Cinq (05) éprouvettes ont été testées dans chaque cas.

Les mesures effectuées à partir de l'essai Marshall sont :

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

A l'issue de cet essai, on a mesuré la force maximale ainsi que le fluage correspondant. Avant L'essai nous avons déterminé les compacités et les volumes des vides d'air des différentes éprouvettes.

□ La compacité

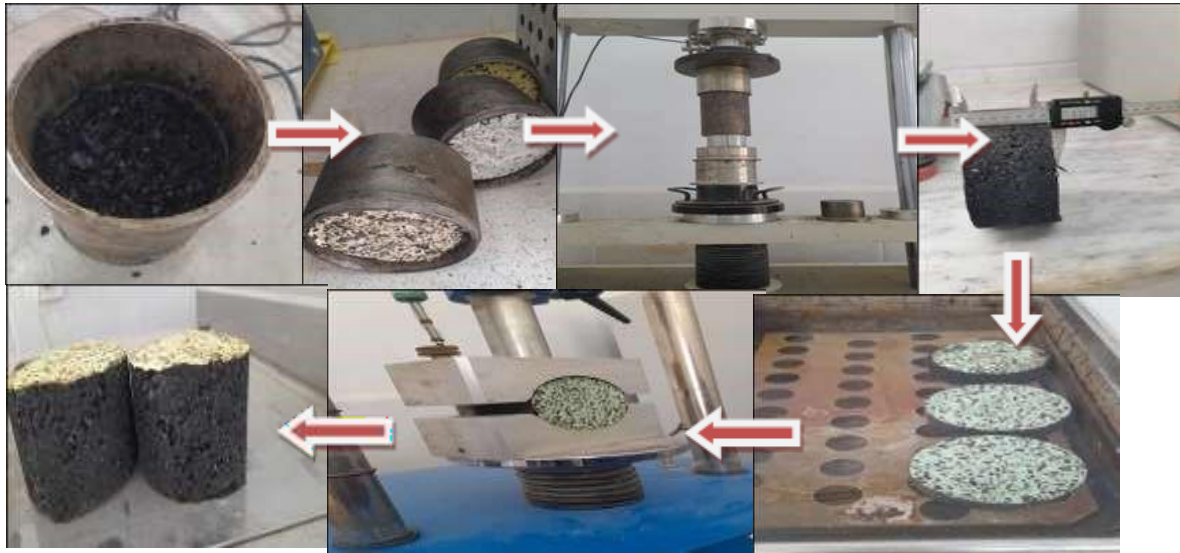


Photo 4.2 Etape de préparation du mélange bitumineux
Les compacités obtenues sont représentées sur la figure

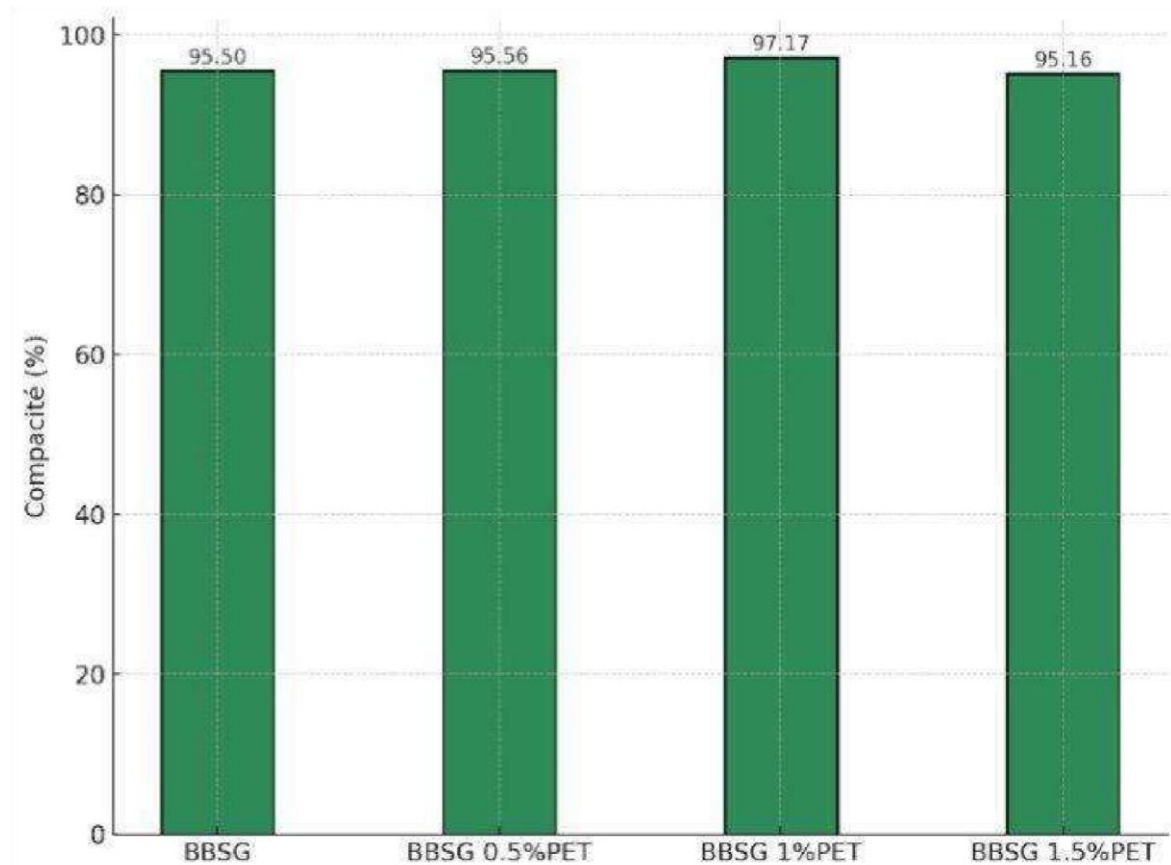


Figure 4.1 Compacité des d'efférente mélange

L'analyse de la figure 4.1 montre que :

Chapitre 4: Résultat et interprétations

Tous les mélanges modifiés ont donné des niveaux de Compacité similaires, avec une valeur maximale enregistrée à 0.5 % de PET. À 1% et 1.5 %, la densité est restée presque au même niveau, sans différences significatives.

Résultats des performances

	BBSG	BBSG+0,5 % PET	BBSG+1% PET	BBSG+1,5% PET	Spécification
Stabilité Marshall (kN)	10.887	11.686	7.54	9.728	$\geq 10,5$
Fluage (mm)	3.09	2,469	3.84	4.13	≤ 4
Quotient Marshall (KN)/mm	3.53	4.736	2.117	2.520	

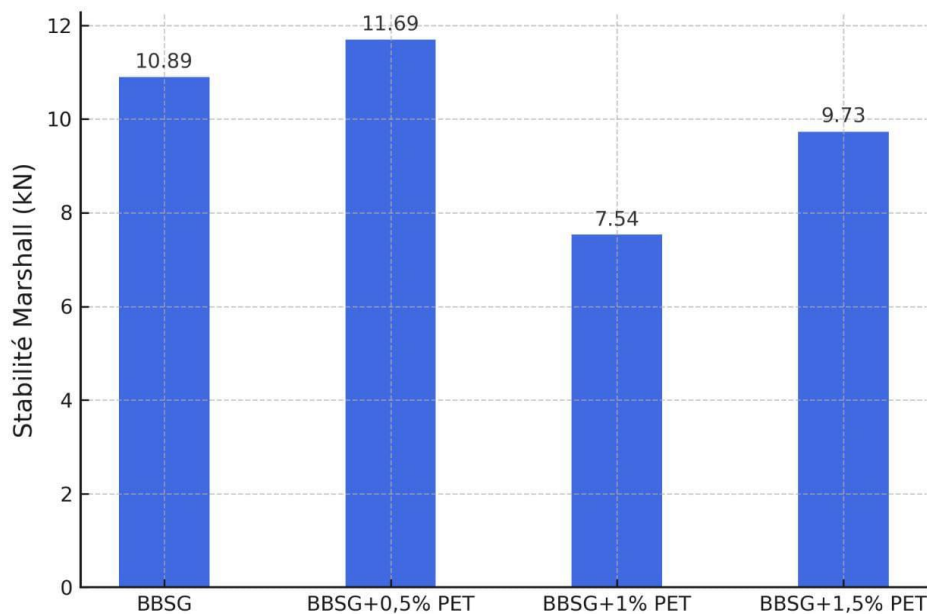


Figure 4.2 Comparaison de la stabilité Marshall pour différents pourcentages de PET

La figure 4.2 montre que :

Les résultats du test Marshall montrent que le mélange avec 0,5 % de PET a la meilleure stabilité, même supérieur que le mélange de base. Mais avec 1 % de PET, la stabilité baisse beaucoup et devient plus faible que la limite minimale (10 kN), ce qui montre que le mélange résiste moins bien à la déformation. Quand on augmente à 1,5 %, la stabilité s'améliore un peu, mais reste encore insuffisante.

Donc, on peut dire que trop de PET diminue la stabilité du mélange.

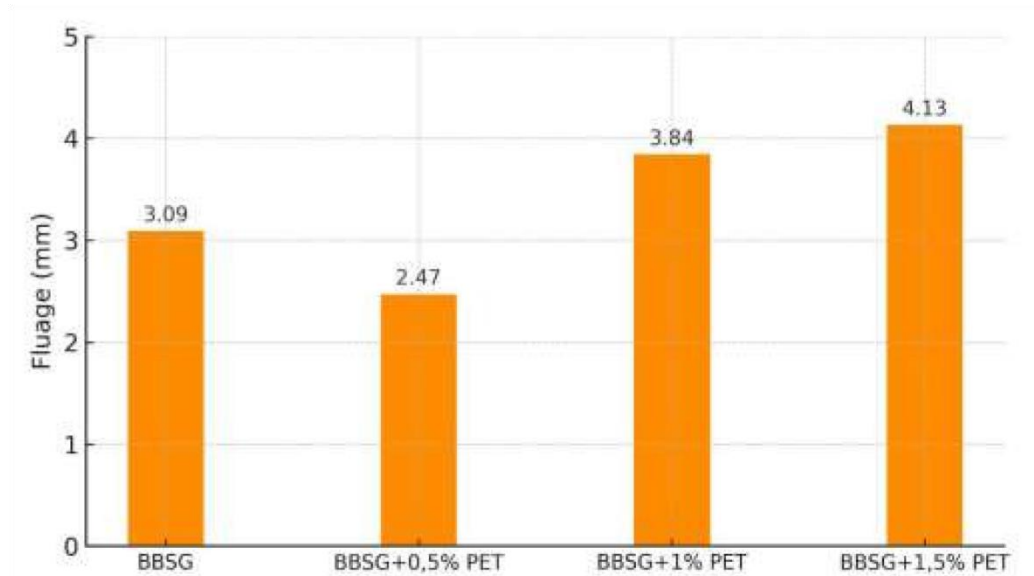


Figure 4.3 Fluage en fonction de la teneur en PET

La figure 4.3 montre que :

- On remarque que la variation du fluage en fonction de la teneur en déchet est irrégulière.
- Le meilleur fluage est ce du mélange de 0,5% ; par contre le fluage obtenu avec le mélange de 1.5% est le plus élevé il ne répond pas aux spécifications algériennes.

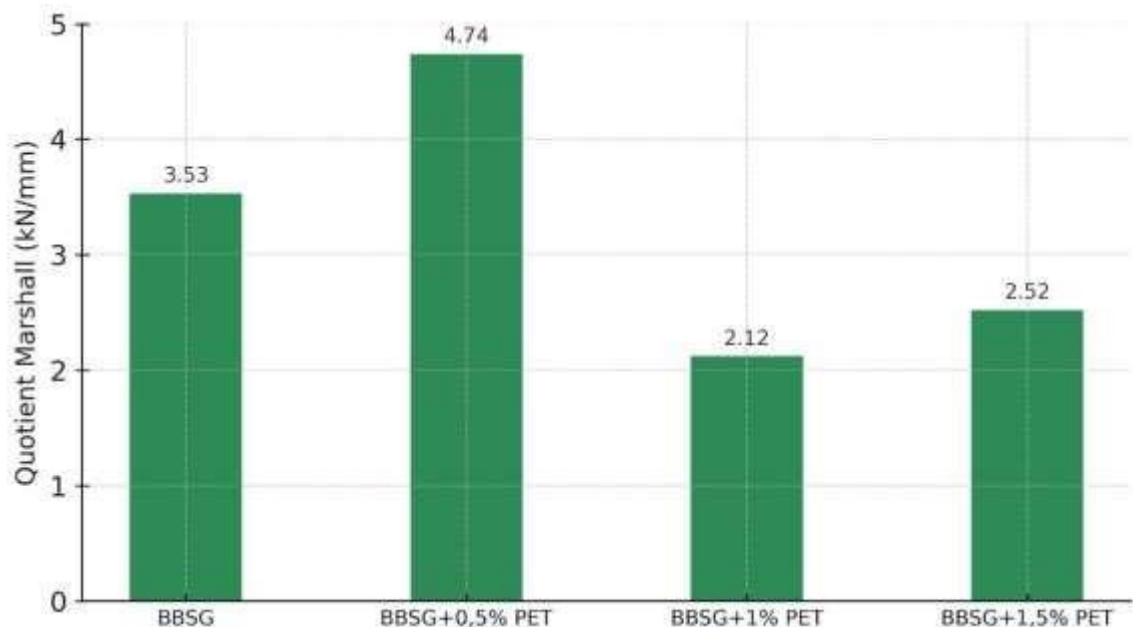


Figure 4.4 Quotient Marshall en fonction de la teneur en PET

La analyse de la figure 4.4 montre que :

Les résultats montrent que l'ajout d'un faible pourcentage de PET, comme 0,5 %, améliore la rigidité du mélange bitumineux par rapport au mélange de référence. En revanche,

augmenter le PET à 1 % et 1,5 % fait baisser le quotient Marshall, ce qui indique qu'un excès de PET a un effet négatif sur les performances mécaniques.

4.3.2 Essai de presse à cisaillement giratoire (PCG)

Pour réaliser cet essai, nous utilisons 10 kg d'agrégats et nous les mélangeons avec du bitume selon différentes concentrations. Les agrégats sont chauffés à une température 180°C, tandis que le bitume est chauffé à 160°C.

le mélange est versé dans des moules de masse déterminée. Dans ce cadre, nous adoptons une hauteur minimale de 115 mm à l'intérieur d'un moule d'un diamètre de 150 mm, ce qui correspond au critère du rapport minimal hauteur sur diamètre (h_{min}/D).

le moule est placé dans la presse, puis l'essai est lancé en appliquant 200 rotations, et les résultats obtenus sont enregistrés.

Tableau 4.1 Caractéristiques de l'essai PCG

Teneur en liant (%)	5.34
Masse volumique réel (g/cm ³) MVR	2.48
Masse de mélange pour une éprouvette (g)	5.258



Photo 4.3 Eprouvette compacté après essai de PCG

4.3.3 Résultat d'essai PCG

Le tableau 4.2 Pourcentages des vides des mélanges

	BBSG	BBSG +0.5% PET	BBSG +1%PET	BBSG +1.5%PP	Spécification
Nombre de girations	Pourcentage	de vide %			
5	16.45	12.99	18.62	18.54	
10	13.53	11.14	15.96	15.94	V ≥ 10%
15	11.69	9.75	14.29	14.34	
20	10.35	9.06	13.09	13.18	
25	9.31	8.36	12.17	12.28	
30	8.46	7.76	11.40	11.55	
40	7.14	6.79	10.23	10.44	
50	6.15	6.04	9.32	9.60	
60	5.36	5.42	8.59	8.93	
80	4.19	4.47	7.48	7.92	V : 4 à 9%
100	3.39	3.75	6.67	7.18	
120	2.78	3.18	6.60	6.60	
150	2.13	2.53	5.32	5.96	
200	1.54	1.63	4.51	5.19	

Ci-dessous sont résumés les principaux résultats de l'essai de presse cisaillement

L'évaluation de la composition granulaire proposée (figure 4.5) a été réalisée avec différents doses, et il a été constaté que cette composition est conforme aux spécifications de la norme

EN 13108 – 1 qui prend comme référence le nombre de 80 girations pour un BB de classe granulaire 0/14.

De plus, les différentes doses respectent également les spécifications européennes qui incluent le pourcentage de vide après 10 girations comme indicateur des risques de présence d'orniérages.

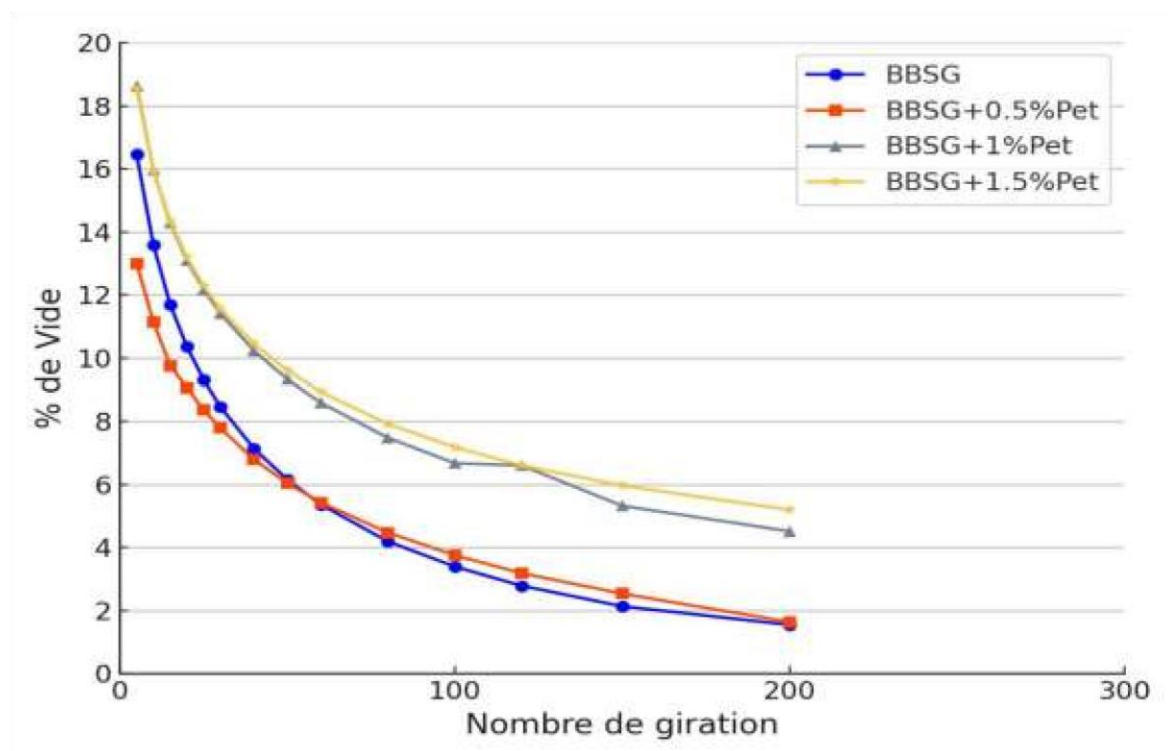


Figure 4.5 Pourcentage des vides en fonction de nombre de girations des enrobé bitumineux étudiés

Les résultats indiquent une diminution du taux que vides dans toutes les formulations à mesure que le nombre de cycles augmente.

À 10 cycles, la formulation avec 0,5 % de plastique (PET) a révélé une baisse significative du taux de vides par rapport à la formulation contenant 1 % et 1,5 % de PET ont présenté des taux de vides plus élevés.

À 80 cycles La même formulation (0,5 % PET) a maintenu de bons résultats, avec un taux de vides faible et comparable à celui de la référence. En revanche, les formulations avec 1 % et 1,5 % de PET ont affiché des valeurs considérablement supérieures.

En conclusion, la formulation optimale semble être celle avec 0,5 % de PET, car elle offre les meilleures performances en termes de taux de vide aux deux cycles (10 et 80), comparativement aux autres formulations.

Étant donné que la composition granulaire proposée avec la différente dose est conforme aux spécifications PCG, des essais mécaniques de niveau 01, incluant le test de sensibilité à l'eau, peuvent être réalisés. Si les deux doses extrême (minimal et maximal) fournissent des résultats acceptables, on peut présumer que les doses intermédiaires répondront également de manière satisfaisante.

4.3.4 . Essai de la tenue à l'eau (NF EN 12697-12)

Cet essai vise à évaluer la durabilité d'un enrobé bitumineux à chaud face à l'action de l'eau. Il est généralement quantifié par un rapport de la résistance à la compression des éprouvettes saturé en eau par rapport à celle des éprouvettes sèches

Le protocole opératoire de cet essai implique la préparation de six (6) moules cylindriques d'un diamètre de 80 mm. Les mélange d'enrobé (pour la confection de mélange 6 éprouvettes, chacun d'une masse d'environ 1kg) sont introduits dans ces moules et compactés à l'aide d'une presse hydraulique pendant 5 minutes, appliquant une force de compactage de 60 kn. Les moules sont ensuite laissés à refroidir, idéalement à température ambiante, pour une durée de 24heures.

Après démoulage, les 6 éprouvettes sont triées et réparties en deux sous lot de trois (3) éprouvettes est conservées immerger dans l'eau à une température contrôlée de 18 °C et à une humidité relative de 50 %.

A l'issue de cette période de conditionnement, toutes les éprouvettes sont soumises à un essai de compression uniaxe jusqu'à rupture. L'essai est réalisé à l'aide d'une presse hydraulique asservie par ordinateur, appliquant une vitesse de déplacement constante du piston de 60 mm/min.

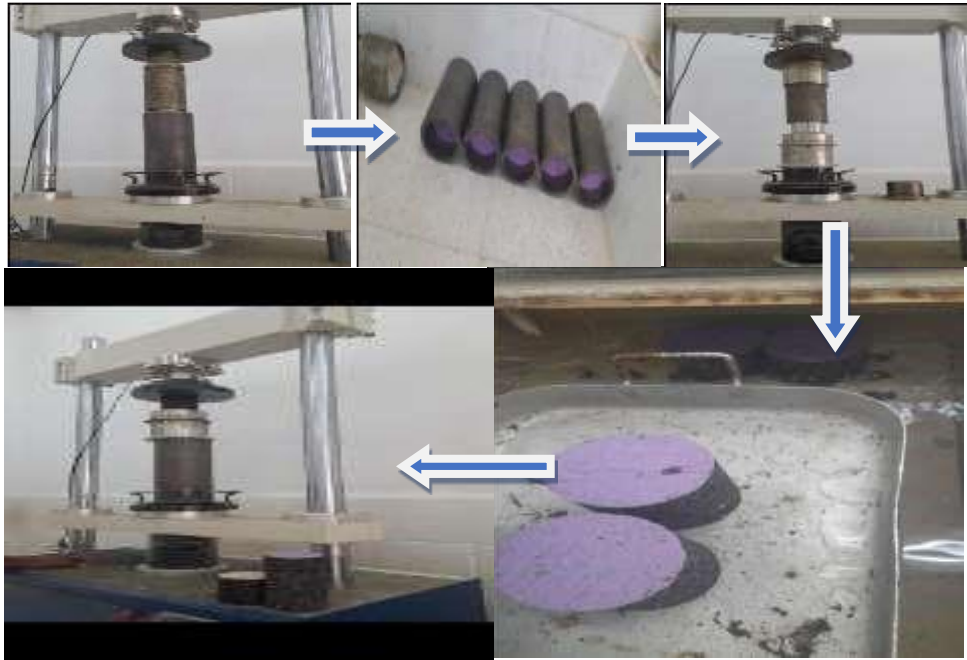


Photo 4.4 L'évaluation de la composition granulaire proposée

Après l'écrasement on obtient, la résistance des éprouvettes conservées en immersion notée (r) et la résistance d'éprouvettes conservées à l'air noté (R). Le rapport r/R est calculé, il exprime la tenue à l'eau de l'enrobé.

Le tableau ci-dessous résume les principaux résultats de l'essai « Duriez » qui sont les résistances à la compression des éprouvettes

Tableau 4.3 Résultat d'essai duriez

Le Pourcentage %	Caractéristiques	A l'eau	A l'air
BBSG	Résistance (bar)	97.755	101.87
	r/R	0,96	
BBSG+0.5%PET	Résistance (bar))	98.46	107.49
	r/R	0.92	
BBSG+1%PET	Résistance (bar))	97.46	99.87
	r/R	1.02	
BBSG+1.5%PET	Résistance (bar))	99.71	107.92
	r/R	1.08	

La figure ci-dessous illustre le rapport de résistance à l'eau pour chaque composition d'enrobé étudiée.

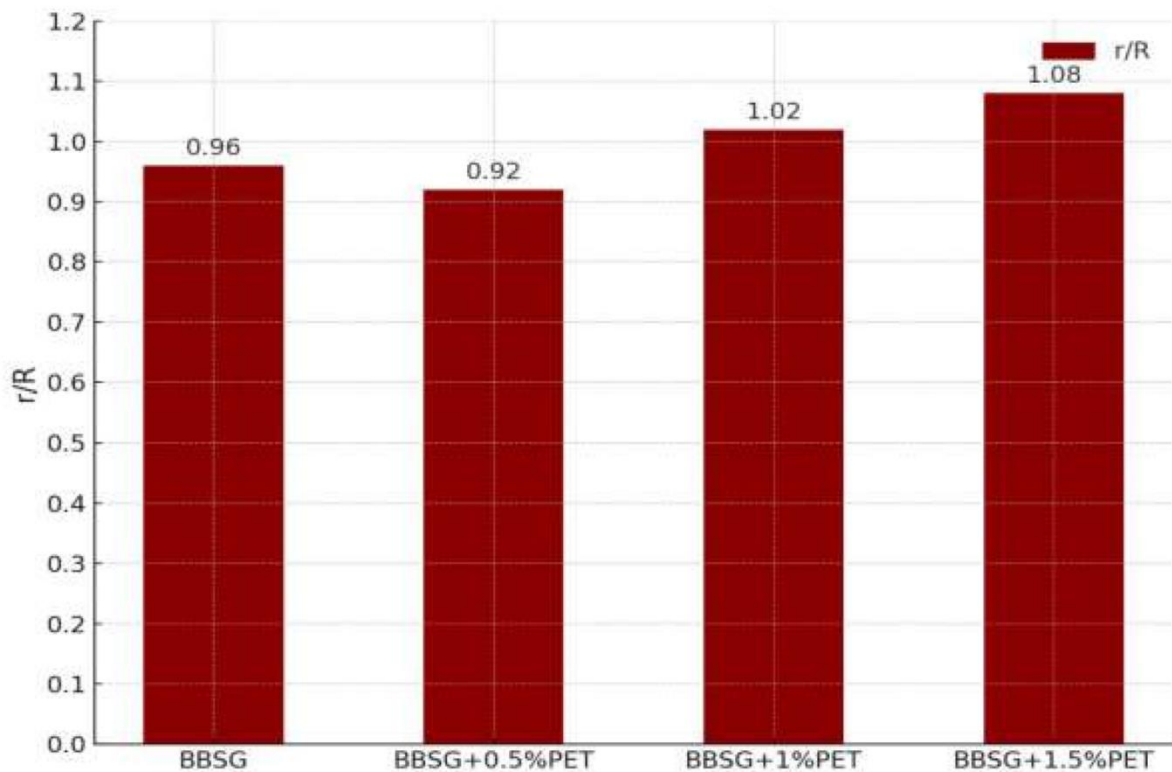


Figure 4.6 Rapport de résistance à l'eau des différents mélanges d'enrobés bitumineux

L'analyse de résultats de la résistance à l'eau des compositions d'enrobé bitumineux révèle les points suivants :

- Toutes les compositions testées respectent la norme EN 12697-12 ($r/R \geq 0.8$).
- La formulation de base (BBSG sans ajout de PET) présente une performance acceptable, affichant un rapport r/R de 0.96
- L'influence de l'incorporation de PET sur la résistance à l'eau ne se caractérise pas par une progression linéaire.
- L'ajout de 0.5% de PET a entraîné une légère diminution de la résistance avec un rapport à la base.
- Des améliorations significatives de la résistance sont observées avec 1% de PET, où le rapport r/R atteint 1.02.
- La meilleure performance en termes de résistance à l'eau est enregistrée avec 1.5% de PET, présentant un rapport r/R de 1,08 ce qui indique une excellente durabilité du mélange à cette concentration

4.3.5 Essai d'orniérage

Après avoir obtenu des résultats acceptables pour les mélanges étudiés, nous avons préparé des échantillons avec différentes proportions de plastique PET 0 % (mélange normal), 0.5%,

Chapitre 4: Résultat et interprétations

1 % et 1.5 %. Pour chaque Pourcentage, environ 22 kg de mélange ont été utilisés pour fabriquer des plaques de dimensions 50 mm × 180 mm × 100 mm.

Le compactage a été réalisé à l'aide d'une table de compactage, selon la norme EN 1269733, qui consiste à appliquer une pression avec une roue lourde sous 1 bar puis 6 bars.

Tableau 4.4 Caractéristique des plaques fabriquées

Teneur en liant	5.34
Masse volumique apparente	2.33
Masse volumique réelle	2.48
indice de vide	6.05

Le pourcentage de vide obtenus dans notre cas répondent à la spécification de la norme EN 13108 – 1 pour BBME, qui demande un taux de vide confine entre 5 et 8 % pour exercer l'essai.

On laisse la plaque pendant deux jours après compactage, puis on simule sur l'appareil d'orniérage 1000 cycles (aller-retour) de passage des véhicules lourds avec des pneus de 6 bars de pression d'air et 5 kN de charge à la température ambiante, ce qu'on appelle 1000 cycles à froid. Après termine l'application de 1000 cycles a froid, on conserve ces plaques pendant 16 heures à 60 °C à l'intérieur de l'appareil d'orniérage, et nous commençons l'application de 1000, 3000, 10 000 et 30 000 cycles



Photo 4.5 Une plaque sur la paraille d'orniérage

❖ Résultat d'essai d'orniérage

Tableau 4.5 Résultats de l'essai d'orniérage

	BBSG	BBSG+0.5%PET	BBSG+1%PET	BBSG+1.5%PET
Cycles	Orn (mm)	Orn (mm)	Orn (mm)	Orn (mm)
0	0.00	0.00	0.00	0.00
500	5.15	1.056	3.130	0.455
1000	9.00	2.064	3.135	0.972
1500	10.37	3.082	4.283	1.515
2000	10.58	4.181	5.305	2.045
2500	10.64	5.333	6.341	2.556
3000	10.62	6.548	8.785	3.057
3500	/	7.814	10.318	3.571
4000	/	9.149	10.371	4.101
4500	/	10.472	/	4.659
5000	/	11.211	/	5.261
5500	/	11.752	/	5.961
6000	/	11.803	/	6.668
6500	/	12.505	/	7.368
7000	/	/	/	8.067
7500	/	/	/	8.772
8000	/	/	/	9.520
8500	/	/	/	10.299
9000	/	/	/	11.072
9500	/	/	/	11.830
10000	/	/	/	12.597

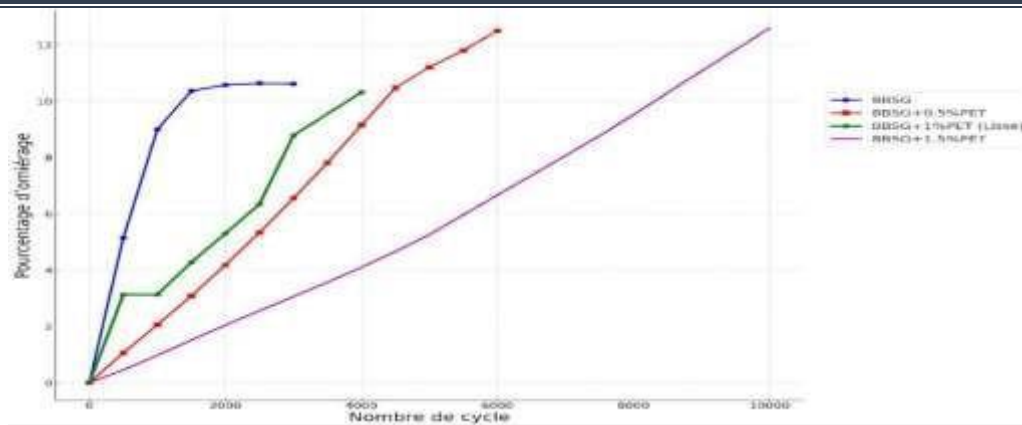


Figure 4.7 Les courbes de pourcentage d'orniérage en fonction du nombre de giration

D'après les résultats de la figure 4.7ne constante que :

On remarque que la courbe de la formule BBSG montre une grande déformation. Cela signifie que cette formule résiste mal à la fatigue.

La courbe de la formule BBSG + 0,5 % PET montre une amélioration. Elle atteint 12 mm à 6 500 cycles, donc elle résiste mieux que la formule de base.

Pour la formule BBSG + 1 % PET, la courbe commence avec une faible déformation, mais elle dépasse la limite à 4 000 cycles, ce qui montre une résistance faible sur le long terme.

La meilleure courbe est celle de BBSG + 1,5 % PET, elle reste stable et la déformation reste faible même à 10 000 cycles, ce qui prouve une bonne performance contre l'orniérage.

Synthèse globale

Dans le cadre de cette étude, quatre formulations de mélange bitumineux de type BBSG ont été évaluées : une formulation de référence (BBSG) et trois formulations modifiées par l'ajout de plastique PET recyclé aux taux de 0,5 %, 1 % et 1,5 %. Les propriétés mécaniques et physiques ont été analysées à travers plusieurs essais normalisés, notamment : l'essai Marshall (stabilité, fluage, quotient Marshall), l'essai Duriez, le taux de vides, et l'essai d'orniérage.

Les résultats ont montré que la meilleure performance a été obtenue avec l'ajout de 0,5 % de PET, où :

- ❖ La stabilité Marshall a augmenté par rapport à la formulation de référence, indiquant une meilleure cohésion.

- ❖ Le fluage a diminué et le quotient Marshall était élevé, traduisant une rigidité et une bonne résistance à la déformation.
- ❖ Le compactage a été facilité, avec une atteinte rapide du taux de vides admissible.
- ❖ La résistance à l'eau s'est améliorée selon les résultats de l'essai Duriez

En revanche, l'augmentation du taux de PET à 1 % et 1,5 % a entraîné une diminution de certaines performances mécaniques, notamment la stabilité Marshall, bien que la résistance à l'orniérage et à l'eau reste acceptable.

Ainsi, l'ajout de 0,5 % de PET peut être considéré comme le taux optimal pour améliorer les caractéristiques du mélange bitumineux sans altérer ses performances globales.

4.4 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, L'étude de l'incorporation du PET dans les mélanges bitumineux révèle des résultats complexes et non linéaires. Tandis que l'ajout de 0.5% de PET contribue positivement à l'amélioration de la stabilité Marshall, à la réduction du fluage et à l'augmentation du quotient Marshall, les pourcentages plus élevés de PET (notamment 1.5% de PET) offrent des performances supérieures en termes de résistance à l'eau et à l'orniérage, cette dernière concentration obtenant les meilleurs résultats pour ces deux aspects. Cependant, il est à noter que ces proportions plus élevées de PET peuvent également entraîner une détérioration de certaines autres propriétés mécaniques, telles que la stabilité Marshall, le fluage et le quotient Marshall. Quant à la compacité, ses valeurs restent élevées et relativement similaires pour tous les mélanges, suggérant un impact limité du PET sur le processus de compactage. En somme, la détermination de la teneur optimale en PET nécessite un équilibre précis entre l'amélioration des diverses propriétés pour atteindre les performances requises.

Conclusion Générale

Face aux enjeux environnementaux et économiques actuels, la valorisation des déchets plastiques, notamment le PET recyclé, représente une solution durable et prometteuse dans le domaine des matériaux routiers. Ce travail de recherche s'inscrit dans cette dynamique, en explorant les effets de l'incorporation du PET recyclé dans le bitume utilisé pour la fabrication des enrobés bitumineux.

Les essais menés selon des protocoles normalisés ont mis en lumière la complexité et la variété des réponses mécaniques des enrobés bitumineux modifiés. Cette étude a ainsi permis de dégager un certain nombre de conclusions significatives, présentées ci-après :

L'ajout de PET recyclé dans le bitume modifié entraîne une amélioration notable de la résistance à l'orniérage et à la déformation permanente.

Une amélioration du module de rigidité a été observée avec certains pourcentages d'ajout de PET, témoignant d'un meilleur comportement sous charge.

Le pourcentage optimal d'ajout de PET permet d'atteindre un bon compromis entre rigidité, résistance et durabilité du mélange bitumineux.

Toutefois, une teneur excessive en PET peut entraîner une baisse de la compacité et une augmentation du pourcentage de vides, ce qui peut affecter négativement les performances à long terme.

Recommandations

À l'issue de cette étude expérimentale, plusieurs recommandations peuvent être formulées: Il est conseillé de poursuivre les recherches pour déterminer le taux optimal d'ajout de PET selon les types de bitume et de granulats utilisés.

Une étude de vieillissement à long terme des enrobés modifiés au PET serait nécessaire afin d'évaluer leur durabilité dans des conditions climatiques réelles.

La mise en œuvre à l'échelle semi-industrielle ou réelle est vivement recommandée pour valider les résultats obtenus en laboratoire.

Il est préférable de bien contrôler la taille et la forme des particules de PET avant incorporation pour assurer une meilleure homogénéité du mélange.

La valorisation du PET dans les enrobés peut être intégrée dans une stratégie globale de gestion des déchets plastiques, tout en contribuant à la réduction des coûts de construction routière.

Liste des normes

NF P 18-554 : Granulats - Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux.

NF P 18-573 : Granulats - Essai Los Angeles. Décembre 1990. **NF P 18-**

572 : Granulats - Essai d'usure micro-DEVAL. Décembre 1990

NF P 18-597 : Granulats - Essai au bleu de méthylène. Décembre 1990.

NF P 18-561 : Granulats - Échantillonnage. Décembre 1990.

NF EN 12697-24 : Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 24 : Résistance à la fatigue. Mars 2005. **P 18-560** : Granulats - Définitions, classification et spécifications. Décembre 1990.

NF EN 12697-10 : Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 10 : Compactage par compacteur à plaques. Février 2003.

NF EN 12697-9 : Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud - Partie 9 : Détermination de la masse volumique de référence. Septembre 2003.

EN 12697-5: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 5: Determination of the maximum density. Février 2018.

EN 12697-12: Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. Septembre 2018.

NF P 98-251-2 : Essais relatifs aux chaussées - Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés - Partie 2 : Essai Marshall. Avril 1992.

NF EN 1427 : Bitume et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement - Méthode bille et anneau. Juillet 2015.

NF EN 1426 : Bitume et liants bitumineux - Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille. Juillet 2015.

AFNOR. (2007). NF EN 12697-31 : Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai — Partie 31 : Essai de cisaillement à la presse de giration (PCG). Paris, France: Association Française de Normalisation

Références bibliographiques

[1] ROBER, M., & LAFON, J. F. (2011/2012). ROUTES, MATERIAUX, DURABILITE DES CHAUSSEES, MASTER 2 GENIE-CIVIL, TOME I, UPS.

[2] DAAS, D. AND HACHANI, M.I. (2013) ETUDE EXPERIMENTAL D'UN BETON BITUMINEUX MODIFIE A LA POUDRETTE DE CAOUTCHOUC. MEMOIRE MASTER. UNIVERSITE D'OUARGLA.

[3] PIERRE, L. (2015.)1 -INTRODUCTION-AUX-ENROBESPLANGLOIS.PDF. INTRODUCTION AUX LES ENROBE. DISPONIBLE A : [HTTP://WWW.BITUMEQUEBEC.CA/WP-CONTENT/UPLOADS/2015/06/1-INTRODUCTIONAUX-ENROBESPLANGLOIS.PDF](http://www.bitumequebec.ca/wp-content/uploads/2015/06/1-INTRODUCTIONAUX-ENROBESPLANGLOIS.PDF)

[4]. BOUAZZA, M. S. E., & MELLAKH, A. ENROBE A MODULE ELEVEE : FORMULATION ET UTILISATION CAS DE FORMULATION A 4 NIVEAUX (DOCTORAL DISSERTATION).

[5] BELHADJ, Z. (2014) ENROBES TIEDES A BASE DE ZEOLITHE. MEMOIRE MASTER. UNIVERSITE DE OUARGLA.

[6] BENZID, A. (2019) ETUDE DE L'INFLUENCE DU PEHD SUR LE MODULE DE RIGIDITE DES BETON BITUMINEUX A BASE DE SABLE DE DUNES. MEMOIRE MASTER. UNIVERSITE DE OUARGLA.

KHENGGAOUI, S. VALORISATION DU SABLE DE DUNES EN COUCHE DE ROULEMENT - SABLE, BITUME- EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN GENIE CIVIL, UNIVERSITE KASDI MERBAH DE OUARGLA- PAGE 10, 2013

[7] KOUIDRI, D. AND TELILI, M. (2017) INFLUENCE DES DECHETS PLASTIQUES SUR LES PERFORMANCES DES BETONS BITUMINEUX A BASE DE SABLE DE DUNES. MEMOIRE MASTER. UNIVERSITAIRE DE OUARGLA.

[9]BITUME QUEBEC, (2008) : « GUIDE DE BONNE PRATIQUE : LA MISE EN ŒUVRE DES ENROBES », BITUME QUEBEC, QUEBEC, CANADA.

[10] [HTTPS://WWW.EQIOM.COM/GRANULATS/NOS-PRODUITS/GRANULATS-POUR-LESAMENAGEMENTS DECORATIFS.](https://www.eqiom.com/granulats/nos-produits/granulats-pour-lesamenagements-decoratifs)

[11] KETTAB R. BALI ET J.M. FLUREAU, (2002) : « CONCEPTION ET REALISATION DES CHAUSSEES EN MILIEU DESERTIQUE (DESIGN AND REALISATION OF PAVEMENTS IN DESERT ENVIRONNENT) », JOURNEES NATIONALES DE GEOTECHNIQUE ET DE GEOLOGIE DE L'INGENIEURE,

[12] TEMMAR, A. AND KHELIL, CH. A (2021) INFLUENCE DE LA QUALITE DE SABLE SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DE L'ENROBER BITUMINEUX, MEMOIRE MASTER, UNIVERSITE DE MEDIA.

[13] MINISTERE DES TRAVAUX PUBLIC (2004) RECOMMANDATIONS SUR L'UTILISATION DES BITUMES ET DES ENROBES BITUMINEUX A CHAUD FASCICULE 2 : L'ETUDE DE LA FORMULATION DES ENROBES BITUMINEUX A CHAUD.

[14] (EN 12697-31) MELANGES BITUMINEUX -METHODES D'ESSAI POUR MELANGE HYDROCARBONE A CHAUD-PARTIE 31 : CONFECTION D'EPROUVETTES MARSHALL

[15] A. BENSAADA, ETUDE DE L'INFLUENCE DE L'ASSOCIATION (EVA-NBR) ET (EVA-DECHET PLASTIQUE ALIMENTAIRE SUR LE VIEILLISSEMENT A COURT TERME DES BITUMES ET INFLUENCE DE L'ASSOCIATION (EVA-DECHET PLASTIQUE ALIMENTAIRE) SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES ENROBES BITUMINEUX MODIFIES. MEMOIRE DE MAGISTERE FGC/USTHB.2012

[16] HARKAT B., BENDJABALLAH M.E.H., 2010. LES ENROBES A MODULE ELEVE – TECHNIQUES INNOVANTES EN CONSTRUCTION ROUTIERE POUR ASSISE DE CHAUSSEE. PROJET DE FIN D'ETUDES, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE, DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL, ALGER, ALGERIE. ENCADRE PAR DR. M. MORSLI

[17] J.ARRAMBIDE, M.DURIEZ : « LIANTS ROUTIERS ET ENROBES, MATERIAUX DE PROTECTION ; PLATRE - AGGLOMERES - BOIS », LES MANUELS DE L'INGENIEUR ET DE TECHNICIEN DE BATIMENT ET DE TRAVAUX PUBLICS, EDITION DU MONITEUR DES TRAVAUX PUBLICS, PARIS 1959.

-
-
- [18] Sadoun, S. (2011) Étude du renforcement du béton bitumineux recyclé par des granulats plastiques [Mémoire de magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou]. Option : Géotechnique et Environnement
- [21]AFNOR. (1990). NF P98-251-1: Essais relatifs aux chaussées – Essai statique sur mélange hydrocarboné – Partie 1: Essai de Duriez. Association Française de Normalisation.
- [23]AFNOR. (2007). NF EN 12697-31: Mélanges bitumineux — Méthodes d’essai — Partie 31 : Essai de cisaillement à la presse de giration (PCG). Paris, France : Association Française de Normalisation.
- [24] Meunier, M. (2012). Prédiction de l’orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux [Mémoire de master, École Centrale de Nantes]
- [25] CST COLAS. (2006). Caractérisation des mélanges hydrocarbonés par essais de compactage [Rapport technique]
- [26] Valorisation des déchets de :::ll :l bouteilles en plastiques et gobelets en papier dans la fabrication des matières plastiques à usage quotidien

Annexes

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

FEUILLE D'ESSAI - ESSAI MARSHALL
NA 5227 | EN 12697 - 34

Structure : unité de ouargla

Lieu de travail : salle de mélange / hydro

N° Dossier interne : 042 / 2022

Date :

Type de Liant : 400 / 600

Opérateur : KORICHI / BOUKHALFA

PRESSE MARSHALL N. Inv. : L74-03-09

BALANCE N. Inv. : L21-23-15

ETUVE N. Inv. : L49-38-15

BAIN N. Inv. : /

COMPOSITION (%)	Type de malaxeur	SINMAG
Fraction	Température de référence du bitume	160
Fraction	Date de confection de l'enrobé	23/09/2022
Fraction	Date de confection des éprouvettes	23/09/2022
Fraction	Heure début de compactage	
Additif	Heure d'immersion à 60° pendant 40min	
Filler	Heure d'écrasement	
Liant 400/600	Nombre de coups par face	50

N° Eprouvettes		1	2	3	4	5
Poids Eprouvettes (g)		12099	12099	12099		
Moyenne des hauteurs (H) (mm)		65,5	64,06	64,04		
Moyenne des diamètres des éprouvettes (D) (mm)		100	100	100		
Volume des éprouvettes : $(\pi \cdot D^2 \cdot H) / 4$ (cm ³)						
Masse volumique apparente des éprouvettes par Mesure géométrique (méthode D de NA 5238) (g/cm ³)						
Masse volumique apparente selon la norme NA 5238	Méthode :					
Charge Maximale	Valeur moyenne :					
Stabilité MARSHALL (kN)			11,645	12,702		
Moyenne : Stabilité			11,173	12,194		
			11,686			
Fluage (mm)	Lecture initiale		21502	21436		
	Lecture finale					
Moyenne : fluage (mm)			21469			
Quotient Marshall = Stabilité / Fluage (kN/mm)			4,468	5,005		
Moyenne : Quotient Marshall			4,7365			

Observation : 015% PET
BB 557 +

Opérateur

Visa du Responsable

F-5-Sad.05

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

FEUILLE D'ESSAI - ESSAI MARSHALL
NA 5227 | EN 12697 - 34

Structure : unité de ouargla
N° Dossier interne : 042 / 2022
Type de Liant : 400 / 600

Lieu de travail : salle de mélange / hydro
Date :
Opérateur : KORICHI / BOUKHALFA

PRESSE MARSHALL N. Inv : L74-03-09
ETUVE N. Inv : L49-38-15

BALANCE N. Inv : L21-23-15
BAIN N. Inv : /

COMPOSITION	(%)
Fraction	100
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	400/600

Type de malaxeur	SINMAG
Température de référence du bitume	160
Date de confection de l'enrobé	23/09/2022
Date de confection des éprouvettes	23/09/2022
Heure début de compactage	
Heure d'immersion à 60° pendant 40min	
Heure d'écrasement	
Nombre de coups par face	50

N° Eprouvettes		1	2	3	4	5
Poids Eprouvettes	(g)	120114	120114	120117		
Moyenne des hauteurs (H)	(mm)	65,75	65,76	65,90		
Moyenne des diamètres des éprouvettes (D)	(mm)	100	100	100		
Volume des éprouvettes : $(\pi \cdot D^2 \cdot H/4)$	(cm ³)					
Masse volumique apparente des éprouvettes par Mesure géométrique (méthode D de NA 5238)	(g/cm ³)					
Masse volumique apparente selon la norme NA 5238		Méthode : Valeur moyenne :				
Charge Maximale		81179	71872	71206		
Stabilité MARSHALL	(kN)	71688	71359	71260		
Moyenne : Stabilité		7154				
Fluage (mm)	Lecture initiale	4,723	4,624	3,062		
	Lecture finale					
Moyenne : fluage (mm)			3,54			
Quotient Marshall = Stabilité / Fluage			1,663	2,572		
Moyenne : Quotient Marshall	kN/mm		2,417			

Observation :

BBSG + L/PET

2/2

Opérateur

Visa du Responsable

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD
 FEUILLE D'ESSAI - ESSAI MARSHALL
 NA 5227 | EN 12697 - 34

Structure : unité de ouargla
 N° Dossier interne : 042 / 2022
 Type de Liant : 400 / 600

Lieu de travail : salle de mélange / hydro
 Date :
 Opérateur : KORICHI / BOUKHALFA

PRESSE MARSHALL N.Inv : L74-03-09
 ETUVE N.Inv : L49-38-15

BALANCE N. Inv : L21-23-15
 BAIN N. Inv : /

COMPOSITION	(%)
Fraction	100
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	400/600

Type de malaxeur	SINMAG
Température de référence du bitume	160
Date de confection de l'enrobé	23/09/2022
Date de confection des éprouvettes	23/09/2022
Heure début de compactage	
Heure d'immersion à 60° pendant 40min	
Heure d'écrasement	
Nombre de coups par face	50

N° Eprouvettes		1	2	3	4	5
Poids Eprouvettes	(g)	1208,9	1207,2	1208,2		
Moyenne des hauteurs (H)	(mm)	62,95	62,83	63,82		
Moyenne des diamètres des éprouvettes(D)	(mm)	100	100	100		
Volume des éprouvettes : $(\pi \cdot D^2 \cdot H/4)$	(cm ³)					
Masse volumique apparente des éprouvettes par Mesure géométrique (méthode D de NA 5238)	(g/cm ³)					
Masse volumique apparente selon la norme NA 5238		Méthode : Valeur moyenne :				
Charge Maximale		7,806	9,152	9,844		
Stabilité MARSHALL	(kN)	7,260	9,771	9,746		
Moyenne : Stabilité		9,728				
Fluage (mm)	Lecture initiale	3,106	5,222	5,776		
	Lecture finale					
Moyenne : fluage (mm)		4,113				
Quotient Marshall = Stabilité / Fluage	kN/mm	3,172	1,869			
Moyenne : Quotient Marshall		2,152,0				

Observation :

BBSG7 + 1,25% PET

Opérateur

Visa du Responsable

F-5-5ad.05

LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS DU SUD

FEUILLE D'ESSAI – ESSAI MARSHALL
NA 5227 | EN 12697 – 34

Structure : unité de ouargla
N° Dossier interne : 042 / 2022
Type de Liant : 400 / 600

Lieu de travail : salle de mélange / hydro
Date :
Opérateur : KORICHI / BOUKHALFA

PRESSE MARSHALL N. Inv : L74-03-09
ETUVE N. Inv : L49-38-15

BALANCE N. Inv : L21-23-15
BAIN N. Inv : /

(BBSG)

COMPOSITION	(%)
Fraction	100
Fraction	
Fraction	
Fraction	
Additif	
Filler	
Liant	400/600

Type de malaxeur	SINMAG
Température de référence du bitume	160
Date de confection de l'enrobé	23/09/2022
Date de confection des éprouvettes	23/09/2022
Heure début de compactage	
Heure d'immersion à 60° pendant 40min	
Heure d'écrasement	
Nombre de coups par face	50

N° Eprouvettes		1	2	3	4	5
Poids Eprouvettes	(g)	1200	1200	1200		
Moyenne des hauteurs (H)	(mm)	64,98	64,98	64,98		
Moyenne des diamètres des éprouvettes(D)	(mm)					
Volume des éprouvettes : $(\pi \cdot D^2 \cdot H/4)$	(cm ³)					
Masse volumique apparente des éprouvettes par Mesure géométrique (méthode D de NA 5238)	(g/cm ³)					
Masse volumique apparente selon la norme NA 5238		Méthode : Valeur moyenne :				
Charge Maximale		12,102	9,754	10,580		
Stabilité MARSHALL	(kN)	11,688	9,364	10,157		
Moyenne : Stabilité		10,37				
Fluage (mm)	Lecture initiale	3,365	2,486	2,814		
	Lecture finale					
Moyenne : fluage (mm)		2,188				
Quotient Marshall = Stabilité / Fluage	kN/mm	3,45	3,76	3,68		
Moyenne : Quotient Marshall		3,533				
Observation :						

Opérateur

Visa du Responsable

F-5-5ad.05

I - RAPPORT D'IMBIBITION DES EPROUVETTES

Eprouvette N°		1	2	3	4	5
1 / Poids de l'éprouvette sec						
J+	2	Poids humide				
	$\frac{(P-h)}{P} \times 100$	Rapport d'imbibition				
	Rapport d'imbibition moyenne		$\omega_{J+} =$			
J+	2	Poids humide				
	$\frac{(P-h)}{P} \times 100$	Rapport d'imbibition				
	Rapport d'imbibition moyenne		$\omega_{J+} =$			
J+	2	Poids humide				
	$\frac{(P-h)}{P} \times 100$	Rapport d'imbibition				
	Rapport d'imbibition moyenne		$\omega_{J+} =$			

II - ECRASEMENT & RESISTANCES (BB5G)

N° Eprouvettes		EAU					AIR				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Poids Eprouvettes	(g)	100,68	100,5	100,1			100,2	100,15			
Moyenne des hauteurs (H)	(mm)										
Moyenne des diamètres (D)	(mm)										
Volume des éprouvettes : $(\pi \cdot D^2 \cdot H / 4)$	(cm³)										
Masse volumique apparente des éprouvettes par Mesure géométrique (méthode D de NA 5238)	(g/cm³)										
Masse volumique apparente selon la norme NA 5238		Méthode : Valeur moyenne :									
Charge totale « F »	kN										
Résistance à la Compression	Bars	78,4	9,7				101,61	105,15			
Résistance à la Compression Moyenne	Bars	$r = 77,75$					$R = 101,87$				
Tenue à l'eau / Rapport d'immersion	/	$r/R =$					0,96				

L'Opérateur

Visa du Responsable

F-5-5u.05

Annexes

Norms	Essais	Gravier des classes			Sable	Bitume	Ecart
		Tamis(mm)	8/15	3/8			
NF15-560	Analyse granulométrique	31.5	100,00	100,00	100,00		Voir en annexe graphes courbes granulométrique Comparées avec leurs fuseaux de référence
		25	100,00	100,00	100,00		
		20	99,70	100,00	100,00		
		16	93,80	100,00	100,00		
		14	79,60	100,00	100,00		
		12.5	60,30	100,00	100,00		
		10	20,10	100,00	100,00		
		8	4,40	97,50	100,00		
		6.3	1,50	44,00	100,00		
		5		9,83	99,49		
		4		1,67	96,56		
		2		0,67	72,50		
		1			56,79		
		0.5			38,53		
		0.315			30,96		
0.125			22,14				
0.08			15,51				
NF P18-591	Essai de propreté	P%	0.60	0.75			
NF P18-561	Essai d'aplatissement	A%	10	13		< 20%	
NF P18-573	Essai de Los Angeles	%	15	16		< 25%	
NF P18-572	Essai Micro-Deval Humide	%	14	15		< 20%	
	Densité absolus	g/m3	2,70	2,70	2,68		
NF P18-597	Equivalent de sable	%			64	> 60%	
NF T66-004	Pénétration à 25°C	1/10mm				45	40 à 50
	Point de ramollissement en degrés C bille et anneau					51	47 à 60
NF T66-007	Densité	Relative à 25°C				1.03	1.00 à 1.10