



Université Abderrahmane Mira de Bejaia

Faculté de Technologie

Département des Mines et Géologie

Memoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Mines

Option : Valorisation des Ressources Minérales

Présenté par

LASTI Karim

RAHMANI Yanis

Thème

***Etude de l'impact de la granulométrie et de la
propreté des granulats sur la qualité des bétons
bitumineux***

Soutenu le 19 / 06 /2017 devant le jury composé de:

Président:	Mr. MOUSSACEB .K	Pr	U.A.M.B
Promoteur:	Mr. AKDIM .A	MAA	U.A.M.B
Examinatrice:	Mme. KICHER .K	MAB	U.A.M.B

Année Universitaire: 2016-2017

Remerciement

Dans le cadre de la réalisation de cette étude, nous remercions avant tous DIEU le tout puissant, de nous avoir accordé la santé, guidé vers le bon chemin et de nous avoir permis d'accomplir la présente recherche.

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire de la Mitidja des travaux publics et batiments

Nous tenons à remercier Monsieur MADANI le chef d'antenne, Madame MEDDAD l'ingénieur en travaux publics, ainsi que tous les techniciens de Salle des routes et des Produits Noirs pour nous avoir accueillis et permis de préparer cette thèse.

Cette thèse n'aurait vu le jour sans la confiance et la générosité de notre encadreur Monsieur AKDIM, que nous voulons vivement remercier. le remercier d'avoir cru en nos capacités et de nous avoir laissé une grande liberté dans notre travail.

Nos plus sincères remerciements vont également aux membres du jury, qui ont accepté d'examiner ce mémoire.

J'en profite aussi pour saluer très très chaleureusement mes amis, pour qui j'ai une affection toute particulière.

A vous et à ceux que j'aurais très injustement oubliés... merci.

DEDICACE

À MES PARENTS POUR LEUR AMOUR INESTIMABLE, LEUR CONFIANCE,
LEUR SOUTIEN, LEURS SACRIFICES ET TOUTES LES VALEURS QU'ILS
ONT SU M'INCULQUER.

À MES SŒURS AINSI QU'À MON FRÈRE POUR LEUR TENDRESSE, LEUR
COMPLICITÉ ET LEUR ENCOURAGEMENT.

À TOUS MES AMIS ET COLLÈGUES

À TOUS LES ÉTUDIANTS DE LA PROMOTION 2012/2013

À TOUS CEUX QUI, PAR UN MOT, M'ONT DONNÉ LA FORCE DE
CONTINUER...

YANIS RAHMANI

Dédicace

JE DÉDIE CE TRAVAIL EN PREMIER LIEU À MA
FAMILLE, ET À TOUS MES AMIS SANS EXCEPTION

LASTI KARIM

TABLE DES MATIERES

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
Chapitre I : Etude bibliographique	
Introduction	3
PARTIE 1 : Etude des granulats	
I.1.1. Définition des granulats	3
I.1.2. Classification des granulats	4
I.1.3. L'origine minéralogique des granulats	4
I.1.3.1. Les roches massives	4
❖ Les roches magmatiques	4
❖ Les roches sédimentaires.....	5
❖ Les roches métamorphiques	5
I.1.3.2. Les roches meubles.....	5
I.1.4. Rôles et qualités exigées des granulats	6
I.1.5. Caractéristique des granulats	7
I.1.6. Essais sur les granulats	8
I.1.6.1. Analyse granulométrique (NF EN 933-1)	8
I.1.6.2. Essai de propreté (NF P 18-591)	8
I.1.6.3. Essai d'équivalent de sable à 10% de fines (NF P 18-597).....	8
I.1.6.4. Essai de bleu de méthylène (NF P 18-592)	9
I.1.6.5. Mesure du coefficient de friabilité des sables (NF P 18 – 576)	9
I.1.6.6. Mesure de coefficient d'aplatissement (NF EN 933-3).....	9
I.1.6.7. Mesure de la masse volumique (NF EN 1097-6)	10
I.1.6.8. Mesure de la teneur en eau (NF EN 1097-5).....	10
I.1.6.9. Mesure de coefficient d'absorption d'eau	10
I.1.6.10. Essai de résistance a l'usure (Micro-Deval) (NF P 18-572).....	11
I.1.6.11. Essai de résistance au choc (Los Angeles) (NF P 18 – 573)	11

PARTIE 2 : Etude des bitumes

I.2.1. Définition de bitume	12
I.2.2. Production des bitumes en Algérie	12
I.2.3. Structure physico-chimique des bitumes	13
I.2.4. Différents types de bitumes	14
I.2.4.1. Bitumes purs	14
I.2.4.2. Bitumes fluidifiés ou cut-backs	14
I.2.4.3. Emulsions de bitume	14
I.2.4.4. Bitumes fluxés	15
I.2.4.5. Bitumes modifiés	15
I.2.4.6. Bitumes composés	15

PARTIE 3 : ENROBE BITUMINEUX

I.3.1. Définition d'enrobé bitumineux	16
I.3.2. Catégories d'enrobés bitumineux	16
I.3.2.1. Enrobés pour assises de chaussées	16
I.3.2.2. Enrobés pour couche de liaison	17
I.3.2.3. Enrobés pour couche de roulement	17
I.3.2.4. Enrobés spéciaux	17
I.3.3. Adhésivité granulats-bitume	18
I.3.3.1. Définition de l'adhésivité	19
I.3.3.2. Différents types d'adhésivité	19
❖ L'adhésivité passive	19
❖ L'adhésivité active	19
I.3.3.3. Phénomène de mouillage	20
❖ Définition	20
❖ Liaison bitume-granulat	20
I.3.3.4. Phénomène d'adsorption	21
I.3.3.5. L'adhésion	21
I.3.3.6. La cohésion	21
I.3.4. Méthodologies des études de formulations des enrobés bitumineux algérienne	22
I.3.5. Essais sur enrobés bitumineux	25
I.3.5.1. Essai Marshall	25
I.3.5.2. Essai Duriez	25

I.3.5.3. Essai ou Presse à cisaillement Giratoire (PCG)	26
I.3.5.4. Essai d'orniérage.....	26
I.3.5.5. Essai de Fatigue	27
I.3.6. Dégradations des couches en enrobés bitumineux	28
I.3.6.1. Influence des actions appliquées à la chaussée	28
❖ Effet du trafic	28
❖ Effet de la température.....	29
I.3.6.2. Les principales dégradations des chaussées	30
Conclusion.....	31

Chapitre II : Matériels et méthodes

Introduction	32
II.1. Essais sur granulats.....	32
Ñ Méthode d'essais et d'analyses	32
II.1.1. Méthode de réduction d'un échantillon au laboratoire (NA 453)	32
II.1.2. Analyse granulométrique par tamisage (Gr) (NF EN 933-1).....	33
II.1.3. Mesure du coefficient d'Aplatissement (A) (NF P 18-561).....	35
II.1.4. Détermination de la propreté superficielle (P) (NF P 18-591).....	37
II.1.5. Equivalent de sable à 10% de fines (ES) (NF P 18-597)	38
II.1.6. Essai de bleu de méthylène (NF P 18-592)	41
II.1.7. Mesure du coefficient de friabilité d'un sable : (NF P 18 – 576)	44
II.1.8. Mesure de la teneur en eau w	45
II.1.9. Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval) (NF P 18 572)	46
II.1.10. Essai de résistance au choc (Los Angeles) (NF P 18-573)	49
II.1.11. Mesure des masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau (EN 1097-6)	51
II.2. Essais sur le bitume	54
Ñ Méthode d'essais et d'analyses	54
II.2.1. Détermination du Point de ramollissement – Méthode Billes et Anneaux	54
II.2.2. Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426).....	56
II.2.3. Détermination de la densité relative.....	58
II.3. Formulation des mélanges bitumineux.....	58
II.3.1. Choix de la formule granulaire	59
II.3.2. Détermination des teneurs en bitume	59

II.3.3. Préparation des mélanges bitumineux.....	60
II.3.4. Les essais de performance mécanique sur éprouvettes bitumineuses ..	62
II.3.4.1. Essai de stabilité et de fluage Marshall.....	62
II.3.4.2. Essai de la tenue à l'eau (Duriez)	63
II.3.4.3. Compacité (%).....	65
Conclusion.....	65

Chapitre III : Résultats et discussions

Introduction	66
III.1. Résultats et discussions des essais sur granulats.....	67
III.1.1. Résultats et discussion de l'Analyse granulométrique par tamisage (Gr)	67
III.1.2. Résultats et discussion de la mesure du coefficient d'Aplatissement (A)	70
III.1.3. Résultats et discussion de la détermination de la propreté superficielle (P).....	72
III.1.4. Résultats et discussion de l'essai d'équivalent de sable à 10% de fines (ES)	73
III.1.5. Résultats et discussion de l'essai de bleu de méthylène	74
III.1.6. Résultats de la mesure du coefficient de friabilité d'un sable	75
III.1.7. Résultats de la détermination de la teneur en eau w	75
III.1.8. Résultats et discussion de la détermination de la résistance à l'usure	76
III.1.9. Résultats et discussion de l'essai de résistance au choc (Los Angeles).....	76
III.1.10. Résultats de la mesure des masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau .	77
III.2. Résultats des essais sur le bitume	82
III.3. Résultats des essais sur éprouvettes bitumineuses.....	83
III.3.1. Résultats de la détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses	83
III.3.2. Résultats des essais de performance mécanique.....	85
III.3.2.1. Essai Marshall (stabilité et fluage).....	85
III.3.2.2. Essai Duriez (tenue à l'eau)	85
III.4. Comparaison des formulations.....	87
III.4.1. Choix de la formule granulaire des 3 formulations	87
III.4.2. Résultats des essais de performance mécanique des 4 formulations	90
III.4.3. Comparaison et discussion des résultats de performance mécanique des 4 formulations	91

Conclusion.....	93
Conclusion générale	94
Perspectives	
Références bibliographiques	
Annexes	
Résumé	

Liste des tableaux

Tableau I.2.1 : Caractéristiques des produits fournis par la raffinerie de Skikda.....	13
Tableau I.3.1 : Les valeurs usuelles du module de richesse pour le béton bitumineux	22
Tableau II.1 : Charge abrasive selon la classe granulaire	47
Tableau II.2 : Nombre de boulets en fonction de la classe granulaire	50
Tableau II.3 : Fraction granulaire retenue (BB 0/14)	59
Tableau II.4 : Teneurs en bitume retenues pour les compositions du Béton Bitumineux	60
Tableau III.1 : Analyse granulométrique des granulats 0/3, 3/8 et 8/15	67
Tableau III.2 : Résultats de la mesure du coefficient d'Aplatissement des granulats.....	70
Tableau III.3 : Résultats de la propreté superficielle des granulats	72
Tableau III.4 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable à 10% de fines.....	73
Tableau III.5 : Références pour déterminer la signification de Esv et Esp	73
Tableau III.6 : Résultats de l'essai de bleu de méthylène	74
Tableau III.7 : Résultats de la mesure du coefficient de friabilité d'un sable.....	75
Tableau III.8 : Résultats de la détermination de la teneur en eau	75
Tableau III.9 : Résultats de la détermination de la résistance à l'usure	76
Tableau III.10 : Résultats de l'essai de résistance au choc	76
Tableau III.11 : Caractéristiques intrinsèques des granulats (LA et MDE)	76
Tableau III.12 : Classe de trafic en fonction d'enrobé	77
Tableau III.13 : Résultats de la mesure des masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau du sable.....	77
Tableau III.14 : Résultats de la mesure des masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau des granulats	78
Tableau III.15 : Caractéristiques de fabrication des gravillons.....	79
Tableau III.16 : Caractéristiques intrinsèques des gravillons	80
Tableau III.17 : Caractéristiques du sable	80

Tableau III.18 : Formule granulaire retenue (BB 0/14) de la formulation étudiée	81
Tableau III.19 : Analyse granulométrique du mélange 0/14 de la formulation étudiée.....	81
Tableau III.20 : Teneurs en bitume retenues pour les compositions du Béton Bitumineux ..	82
Tableau III.21 : Caractéristiques du bitume	83
Tableau III.22 : Résultats de la détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses	83
Tableau III.23 : Résultats de l'essai Marshall (stabilité et fluage)	85
Tableau III.24 : Résultats de l'essai Duriez	85
Tableau III.25 : Résultats de la tenue à l'eau	86
Tableau III.26: Résultats des performances mécaniques BB 0/14 de la formulation étudiée.	86
Tableau III.27 : Formule granulaire retenue (BB 0/14) des 3 formulations	87
Tableau III.28 : Analyse granulométrique du mélange 0/14 des 3 formulations	88
Tableau III.29 : Résultats des performances mécaniques des 4 formulations	90

Liste des figures

Figure I.2.1 : Différents types de bitumes existant	14
Figure I.3.1 : Angle de mouillage à l'interface Liquide – solide	20
Figure I.3.2 : Simulateur de trafic avec une roue en acier	27
Figure I.3.3 : Essai de fatigue	28
Figure I.3.4 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic.....	29
Figure I.3.5 : Schématisation des sollicitations induites par la température.....	30
Figure II.1 : Diviseur-échantillonneur	32
Figure II.2 : Principe de quartage	33
Figure II.3 : Appareillage nécessaire pour l'analyse granulométrique	34
Figure II.4 : Lavage et tamisage des granulats	35
Figure II.5 : Grilles à fente	36
Figure II.6 : Tamisage sur grilles à fentes	37
Figure II.7 : Eprouvettes et machine d'agitation	41
Figure II.8 : Mode opératoire de l'essai de bleu de méthylène.....	43
Figure II.9 : Appareil micro-Deval et cylindres	46
Figure II.10 : Mode opératoire de l'essai MDE.....	48
Figure II.11 : Machine Los Angeles	49
Figure II.12 : Mode opératoire de l'essai Los Angeles.....	51
Figure II.13 : Appareillage Bille et anneau.....	54
Figure II.14 : Remplissage des anneaux et préparation de l'essai	55
Figure II.15 : Test bille et anneau	56
Figure II.16 : Pénétromètre.....	57
Figure II.17 : Essai de pénétrabilité à l'aiguille.....	58
Figure II.18 : Malaxeur.....	61
Figure II.19 : Dame de compactage.....	62
Figure II.20 : Presse Marshall.....	63
Figure II.21 : Conservation des éprouvettes pour essai Duriez	64
Figure III.1 : Courbe granulométrique des granulats 0/3, 3/8 et 8/15	68
Figure III.2 : Formule granulaire retenue (BB 0/14) de la formulation étudiée	81
Figure III.3 : Courbe granulométrique du mélange 0/14 de la formulation étudiée.....	82

Figure III.4 : Formule granulaire retenue (BB 0/14) des 3 formulations	87
Figure III.5 : Courbe granulométrique du mélange (0/14) des 4 formulations	89
Figure III.6 : Résultats de performance mécanique des 4 formulations	92

Liste des abréviations

Gr	Analyse granulométrique par tamisage
A	Aplatissement
P	Propreté superficielle
MB	Valeur de bleu de méthylène
ES	Equivalent de sable
Fs	Friabilité d'un sable
w	Teneur en eau
AB	Coefficient d'absorption
MDE	Coefficient micro-Deval en présence d'eau
MDS	Coefficient micro-Deval sec
LA	coefficient Los Angeles
BB	Béton Bitumineux
GB	Grave Bitume
<i>pb</i>	masse volumique du bitume
K	Module de Richesse
TL	Teneur en bitume (%)
	Surface spécifique des granulats
	Coefficient correcteur
<i>pa</i>	Masse volumique absolue
<i>prd</i>	Masse volumique réelle
<i>pssd</i>	Masse volumique saturée
<i>pr_i</i>	Masse volumique réelle imbibée

MVR Masse volumique réelle (vraie) du granulat

MVA Masse volumique apparente du granulat

s Résistance à la compression des éprouvettes Duriez dans l'eau (kg/cm²)

Sm Résistance à la compression des éprouvettes Duriez dans l'air (kg/cm²)

G La proportion pondérale des granulats supérieurs à 6.3 mm (%)

S La proportion pondérale des granulats compris entre 6.3 et 0.315 mm (%)

s La proportion pondérale des granulats compris entre 0.315 et 0.08 mm (%)

f La proportion pondérale des granulats inférieurs à 0.08 mm (%)

PCG Essai ou Presse à cisaillement Giratoire

MTP Ministère des Travaux Publics

S Stabilité Marshall (KN)

F Fluage (mm)

C Compacité (%)

s/Sm Tenue à l'eau

Introduction générale

Dans nos jours, la route est le principal vecteur de communication et d'échange entre les populations et joue un rôle essentiel dans l'intégration des activités économiques à la vie locale. D'une manière générale, le réseau routier d'un pays constitue l'un des patrimoines qui revêt une importance capitale dans son développement. En effet, la route assure le lien entre les zones d'économie complémentaire, de production, d'importation, d'exportation et de consommation au sein des états mais aussi entre les états. Aussi, elle assure des liaisons humaines et sociales d'une importance inestimable car elle permet l'établissement d'échanges culturels, sociaux, politiques et administratifs qui s'avère aussi être un des éléments promoteur à tout développement [1].

La stabilité et la durabilité des chaussées routières et aéronautiques en enrobé bitumineux dépendent principalement de sa résistance aux sollicitations, dans le temps et sur le site pour des conditions spécifiques extrêmes, telles que les particularités de climat dans les différentes régions et les chargements des nouvelles conceptions d'avions très gros porteurs. Ces types de sollicitation entraînent des dégradations dangereuses dans les couches de roulement et demeurent des préoccupations majeures des maîtres d'ouvrages, qui sont tenus à formuler des mélanges bitumineux qui répondent à certaines exigences [2].

Les propriétés mécaniques et la durabilité des enrobés bitumineux sont assurées par la stabilité de l'édifice granulaire, par les propriétés cohésives du bitume et par une bonne adhésion entre le bitume et les granulats. De plus, les enrobés doivent adhérer à la surface sous-jacente de la route.

Il apparaît donc nécessaire d'approfondir les connaissances concernant les granulats, le bitume et l'enrobé ainsi que leur évolution dans le temps, qui permettra à terme de formuler des enrobés durable dans leur environnement climatique et suffisamment performant face aux exigences modernes [2].

Ainsi l'objet de notre travail, porte sur l'essai d'étude de l'impact de la granulométrie et de la propreté des granulats sur la qualité des bétons bitumineux.

Pour cela, à travers cette modeste recherche nous essaierons de répondre à la question suivante :

La formule granulaire retenue et la disposition granulaire du squelette minéral, ont-t-elles une influence sur la stabilité et la durabilité des bétons bitumineux ?

Dans le but de mener à bien notre recherche, et en fonction de données disponibles, nous avons structuré notre travail en trois chapitres :

Le premier chapitre, essentiellement bibliographique, subdivisé en 3 parties traitera des aspects théoriques sur les granulats, les bitumes ainsi que les enrobés bitumineux. La première partie est consacrée à une recherche sur les granulats, leur origine, les qualités exigées et les différents essais nécessaires pour leur caractérisation. La deuxième partie présentera des généralités sur les bitumes, leur production, leur structure, et leurs différents types. La troisième partie, destinée à l'étude de formulation, ainsi qu'une présentation des différents essais sur enrobés bitumineux.

Le deuxième chapitre portera sur le matériel utilisé pour la caractérisation des matériaux entrant dans la formulation de l'enrobé étudié, ainsi que la méthodologie à suivre lors de la manipulation et enfin la mise au point des essais expérimentaux Duriez et Marshall.

Le troisième chapitre expose les résultats obtenus, des interprétations sur les essais sur les granulats, le bitume et l'enrobé bitumineux, plus une série de recommandations destinée à optimiser les performances mécaniques des enrobés en question.

On termine notre thèse par une conclusion générale récapitulant l'ensemble du travail effectué.

Chapitre I

Introduction

La construction de routes est principalement basée sur l'utilisation de matières premières devant être en conformité avec les normes, assurant par suite une bonne qualité et durabilité de la route.

L'objectif de ce chapitre est de faire une recherche bibliographique concernant les granulats, les bitumes et aussi les enrobés en vue de fournir au travail expérimental une bonne base documentaire qui va permettre une meilleure exploitation des résultats obtenus.

PARTIE 1 : Etude des granulats

Les granulats sont utilisés avec des bitumes pour préparer différents types de béton bitumineux, chaque type pouvant servir à plusieurs usages. Puisque les granulats constituent 90% ou plus de la masse de ces bétons, leurs propriétés auront un effet très important sur la qualité de l'ouvrage fini, sans perdre de vue le rôle essentiel du liant qui est de les maintenir en place [1].

La consommation d'agréats est particulièrement importante dans les grands travaux publics, les infrastructures et les réseaux de toutes sortes. Parce qu'ils sont un point indispensable à l'économie nationale, les agrégats doivent être considérés à leur juste valeur dans la planification économique et l'aménagement du territoire. Les agrégats font partie des richesses naturelles au même titre que la forêt, l'agriculture, l'eau...etc. La demande du public pour les agrégats vise la construction de routes, d'établissements d'enseignement, d'hôpitaux, d'habitations et d'entreprises. Les ressources en agrégats sont également en demande dans le secteur manufacturier pour produire de l'acide, du vinyle, du verre, de la peinture, du papier des produits pharmaceutiques, des fertilisants, du ciment et des produits d'aménagement paysager. Grâce à l'accessibilité de ses ressources en agrégats, L'Algérie a pu offrir des coûts d'infrastructure et de logement modérés. La gestion judicieuse des ressources en agrégats et le juste équilibre des intérêts pour ces ressources assureront un approvisionnement continu à proximité du marché.

1.1. Définition des granulats

Le terme granulat désigne un ensemble de particules solides, provenant de roche meuble ou consolidée ou de matériaux recyclé.

Il s'agit en fait d'agrégats de nature et de proportions variées comprises entre 2 et 80 mm [1].

1.2. Classification des granulats

Les granulats sont classés par ordre de grosseur croissante, on distingue : les fines, les sables, les gravillons, les cailloux et les graves.

Les dimensions de ces différents agrégats ont été fixées par des normes françaises (NF P 18-101) de la manière suivante :

- Les fines : sont les éléments inférieurs à 80 mm
- Les sables : sont les éléments inférieurs à 6,3 mm
- Les gravillons : sont les éléments compris entre 2 et 31,5 mm
- Les cailloux : sont les éléments compris entre 20 et 80 mm
- Les graves : sont les éléments compris entre 6,3 mm et 80 mm [3].

1.3. L'origine minéralogique des granulats

1.3.1. Les roches massives

Les roches massives susceptibles de fournir des granulats, viennent surtout des gisements épais de roches dures. Il s'agit surtout de calcaires de formations géologiques plus anciennes (au plus tôt du tertiaire), ou de roches d'origine magmatiques, sédimentaires et métamorphiques [4].

❖ Les roches magmatiques

Elles se sont formées lors du refroidissement plus ou moins rapide d'un mélange fondu, appelé magma.

On parle de roches plutoniques, si le refroidissement s'est effectué en profondeur et lentement. On parle de roches volcaniques, si le refroidissement s'est effectué rapidement, près de la surface [4].

Les roches magmatiques sont composées essentiellement de silice (SiO_2) et de combinaisons de la silice avec d'autres éléments (aluminium, fer, magnésium,...).

Ce sont les silicates. Parmi ces derniers, on rencontrera très fréquemment :

- Les feldspaths, silicates d'aluminium, de sodium, de potassium et de calcium ;
- Les micas, silicates à structure feuilletée ;
- Les silicates « ferromagnésiens » contenant une forte proportion de fer et de magnésium.

❖ Les roches sédimentaires

Elles se forment à la surface de l'écorce terrestre par des processus de géodynamique externe : altération, érosion, transport et sédimentation.

Il existe une très grande variété de roches sédimentaires et il y a trois systèmes de classification :

- D'ordre génétique, distinguant les roches selon leur mode de formation : roches résiduelles et roches détritiques.
- D'ordre chimique, selon la nature des principaux composants : roches carbonatées, roches siliceuse, roches silico-alumineuses (argileuses) et roches salines ou évaporites.
- D'ordre granulométrique, en fonction de la dimension des éléments de la roche : fillers, sablons, sable, graves et gravillons [4].

❖ Les roches métamorphiques

Les roches métamorphiques résultent de la transformation à l'état solide de roches préexistantes. Ces dernières peuvent être magmatiques, sédimentaires ou déjà métamorphiques. Suivant l'intensité du métamorphisme et la nature de roche d'origine; il existe une grande variété de roches :

- Les schistes et micashistes, constitués de quartz et de micas.
- Les gneiss, qui ont les mêmes constituants que les granites.
- Les ardoises, qui sont d'anciennes pélites (argilites consolidées) ayant acquis mécaniquement une structure feuilletée.
- Les cornéennes, roches dures, formées de quartz, feldspaths, micas, pyroxènes et amphiboles en proportions variables [4].

1.3.2. Les roches meubles

Ce sont des dépôts anciens ou actuels résultant d'un processus d'érosion, d'altération et de sédimentation de roches massives. Ces dépôts se présentent sous forme :

- D'alluvions de rivières ou de fleuves déposées dans des basses vallées ou terrasses anciennes qui, peuvent avoir été submergées par la mer (sables et graviers marins) ;
- De plages et dunes ;
- De gisement appartenant à un horizon stratigraphique défini (sables siliceux provenant de rivages anciens) ;
- De formations autres, telles qu'éboulis, brèches, conglomérats.

Les alluvions peuvent être silico-calcaires, calcaires ou polygéniques (composées d'élément siliceux et silicaté), suivant la nature du bassin à partir duquel s'est constitué le dépôt.

Les éléments dominants sont, en général, ceux qui sont les moins altérables (quartz, silex, grès, calcaires) [4].

1.4. Rôles et qualités exigées des granulats

Les couches de fondations et de base sont presque exclusivement constituées par des granulats, dits à granulométrie continue, appelés grave. Ces graves doivent présenter les qualités suivantes :

- Ne doivent pas se fragmenter sous l'effet de la répétition de charge.
- Ne doivent pas évoluer par attrition au contact des grains.
- Avoir une stabilité propre qui évite le fluage sous l'effet de charges répétées.
- Rester dans la couche de roulement bitumineuse que l'on a choisie de mettre en œuvre : c'est le problème de l'adhésivité avec un liant et le rôle de la propreté.
- Assurer de bonnes caractéristiques antidérapantes, ce qui fait intervenir : la granularité, la forme et l'angularité, pour la macrotexture.
- La résistance au polissage, pour la microtexture.

Conserver leur intégrité là où elles sont aussi longtemps que possible : c'est le rôle des résistances la fragmentation sous l'effet de la répétition de charges et à l'attrition au contact des grains.

Ces qualités dépendent de certains facteurs :

- La nature de la roche dont est issue le grave
- L'échelonnement granulométrique
- Le coefficient de frottement des grains entre eux
- La présence d'argile.

Un granulat issue d'une roche dure se fragmentera pas ou très peu, et un matériau plein, anguleux et à fort frottement interne n'aura pas tendance à fluer au passage des roues, ce qui se produirait pour les granulats ronds et ayant peu de contact les un avec les autres.

En fin, la présence d'argile autour des grains risque, une fois humide, de leur faire perdre toute stabilité.

Pour le cas des granulats routiers, même si les exigences de qualité sont évidentes, les limites à fixer aux différents paramètres les caractérisant n'ont pas encore été établies pour notre pays.

En effet, l'établissement de spécifications adaptées au contexte national (environnement, géologie, trafic etc...) nécessite la réalisation d'un certain nombre d'étude de recherche permettant d'approcher l'influence de chaque paramètre sur la qualité de l'ouvrage [5].

1.5. Caractéristique des granulats

Les granulats sont obtenus en exploitant des gisements de sable et des graviers d'origine alluvionnaire terrestre ou marine, en concassant des roches massives (calcaires ou éruptives) ou encore par le recyclage de produit tel que les matériaux de démolition.

Leur nature, leur forme et leurs caractéristiques varient en fonction des gisements et des techniques de production. La nature minérale des granulats est un critère fondamental pour son emploi, chaque roche possédant des caractéristiques spécifique en termes de résistance mécanique, de tenue au gel et des propriétés physico-chimiques.

Les granulats sont considérés comme courant lorsque leur masse volumique est supérieure à 2 t/m^3 et légers si leur masse est inférieure à 2 t/m^3 . Les granulats doivent répondre à des exigences et des critères de qualité et régularité qui dépendent de leur origine et de leur procédé d'élaboration [6].

Les granulats sont donc spécifiés par deux types de caractéristique :

- Des caractéristiques intrinsèques, liées à la nature minéralogique de la roche et à la qualité du gisement, par exemple :

-) La masse volumique réelle.
-) L'absorption d'eau et la porosité
-) La sensibilité au gel
-) La résistance à la fragmentation et au polissage

- Des caractéristiques de fabrication, liées au procédé d'exploitation et de production des granulats telles que, en particulier :

-) La granularité
-) La forme (aplatissement)
-) La propreté des sables

1.6. Essais sur les granulats

1.6.1. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est la distribution en poids, de particules d'un matériau suivant ses dimensions [7]. L'essai consiste à séparer, au moyen d'une série de tamis, un matériau en plusieurs classes granulaires de dimensions décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision requise [8].

Les masses de grains retenues sur les différents tamis sont rapportées à la masse initiale de matériau. Les pourcentages cumulés passant à travers chaque tamis sont présentés sous forme numérique et si nécessaire sous forme graphique [9].

1.6.2. Essai de propreté

Le manque de propreté d'un granulat est lié à la présence d'éléments fins qui même en faible quantité sont indésirables pour les raisons suivantes ; ils peuvent :

-) Faire chuter la résistance des matériaux composites
-) Entraîner des difficultés de mise en œuvre
-) S'opposer à une bonne adhésivité des liants aux éléments granulaires [10]. (NF P 18-591)

1.6.3. Essai d'équivalent de sable à 10% de fines

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

La valeur de l'équivalent de sable à 10 % de fines est le rapport, multiplié par 100, de la hauteur de la partie sableuse sédimentée, à la hauteur totale du floculat et de la partie sableuse sédimentée [11].

I.6.4. Essai de bleu de méthylène

Cet essai permet de mesurer la capacité des éléments fins à adsorber du bleu de méthylène.

Le bleu de méthylène étant adsorbé préférentiellement par les argiles, les matières organiques et les hydroxydes de fer, cette capacité rend compte globalement de l'activité de surface de ces éléments.

On appelle «valeur de bleu» des fines, la quantité exprimée en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fines [12].

Des doses d'une solution de bleu de méthylène sont ajoutées successivement à une suspension de la prise d'essai dans l'eau. L'adsorption de la solution colorée par la prise d'essai est vérifiée après chaque addition de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.

Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB ou MBF) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kg de la fraction granulaire testée [12].

I.6.5. Mesure du coefficient de friabilité des sables

L'évolution granulométrique est caractérisée par la quantité d'éléments inférieurs à 0,1mm produits au cours de l'essai.

Si M est la masse de matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à 0,1mm produits au cours de l'essai le coefficient de friabilité du sable est :

$$F_s = 100 \frac{m}{M}$$

Cet essai consiste à mesurer l'évolution granulométrique des sables produite par fragmentation dans un cylindre en rotation à l'aide d'une charge en présence d'eau [13].

I.6.6. Mesure de coefficient d'aplatissement

L'essai consiste à effectuer un double tamisage. Tout d'abord, au moyen de tamis d'essai, l'échantillon est fractionné en différents granulats élémentaires d_i/D_i . Chacun des granulats élémentaires d_i/D_i est ensuite tamisé au moyen de grilles à fentes parallèles d'une largeur d'écartement $D_i / 2$.

Le coefficient d'aplatissement globale est calculé en tant que masse totale des particules passant au travers des grille à fentes, exprimé en pourcentage du totale de la masse sèche des particules faisant l'objet de l'essai.

Si nécessaire, le coefficient d'aplatissement de chaque granulats élémentaire d_i/D_i correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes correspondante, exprimé en pourcentage de la masse de ce granulats élémentaire [14].

I.6.7. Mesure de la masse volumique

La masse volumique réelle se calcule à partir du rapport masse / volume .la masse se détermine en pesant la prise d'essai saturée surface sèche et de nouveau après séchage à l'étuve. Le volume est calculé à partir de la masse du volume d'eau déplacé, déterminée soit par réduction du poids, selon la méthode du panier en treillis ou par pesée, selon la méthode au pycnomètre.

Si les granulats sont constitués de plusieurs classes granulaires, il est nécessaire de fractionner l'échantillon en différentes classes : de 0.063 mm à 4 mm, de 4mm à 31.5 mm de 31.5 mm à 63 mm avant de préparer la prise d'essai. Le pourcentage représenté par chaque classe doit être consigné dans le rapport d'essai [15].

I.6.8. Mesure de la teneur en eau

Le séchage à l'étuve fournit une mesure de la quantité totale d'eau libre présente dans une prise d'essai de granulats. Cette eau peut se trouver soit en surface, soit à l'intérieur des grains, dans les pores accessibles à l'eau.

Après pesée, une prise d'essai est placée dans une étuve ventilée à la température de $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$. Par pesées successives, on détermine la masse constante de la prise d'essai séchée. L'échantillon de laboratoire, puis la prise d'essai sont protégés contre toute perte ou tout gain d'eau à tous les stades de la manipulation et de la préparation avant l'essai [16].

I.6.9. Mesure de coefficient d'absorption d'eau

Certains matériaux granulaires peuvent présenter une porosité interne comme ceux d'origine volcanique qui est préjudiciable, en particulier, au dosage en eau des bétons ce qui influe à sa résistance. En effet, la détermination du coefficient d'absorption d'eau permet d'évaluer la quantité d'eau retenue par la porosité des granulats afin d'en tenir compte pour le dosage en eau efficace lors de la formulation des bétons [2].

On détermine un coefficient d'absorption qui est le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon après imbibition par l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures à 20°C . Le coefficient d'absorption d'eau A_b est défini par la relation :

$$AB = \frac{M - M_1}{M} \times 100$$

M_0 : masse de l'échantillon sec après passage à l'étuve à 105 °C

M_1 : masse de l'échantillon imbibé

I.6.10. Essai de résistance a l'usure (Micro-Deval)

Si un élément subit un frottement sous l'action d'un pneumatique ou par les mouvements relatifs des grains qui l'entourent, il y a production de fine ; c'est le phénomène d'usure [8].

La résistance à l'usure par frottement est caractérisée par l'essai Micro-Deval qui consiste à mesurer, dans des conditions normalisées, l'usure des granulats produites par frottements mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive, dans un cylindre en rotation (12 000 tours en 2 Heures) selon la norme française (NF P 18-572).

La résistance a l'usure s'exprime par le coefficient Micro-Deval MDE.

$$MDE = \frac{m}{M} \times 100$$

Où :

M : la masse du matériau soumise a l'essai.

m : la masse des éléments produits après abrasion et

Usure qui est inférieurs à 1,6 mm.

Ce résultat, qui est un nombre sans dimension, correspond soit au coefficient micro-Deval sec (MDS), soit au coefficient micro-Deval en présence d'eau (MDE) [7].

I.6.11. Essai de résistance au choc (Los Angeles) :(NF P 18 – 573)

Cet essai est utilisé pour évaluer la dureté des granulats. Selon la norme française (NF P 18 – 573) il consiste à mesurer la masse d'éléments inférieurs à 1,6 mm, produits par la fragmentation du matériau testé (diamètres compris entre 4 et 50 mm) et que l'on soumet au choc de boulets normalisés, dans le cylindre de la machine Los Angeles qui effectue 500 rotations [7].

Si M est la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai, la résistance a la fragmentation aux chocs s'exprime par le coefficient Los Angeles LA

$$LA = \frac{m}{M} \times 100$$

PARTIE 2 : Etude des bitumes

L'emploi du bitume s'est accru avec le développement de l'automobile. L'utilisation du bitume, naturellement collant, a permis de régler le problème de la poussière engendrée par la circulation sur le macadam. Progressivement, grâce à leurs caractéristiques de résistance, d'imperméabilité, et de facilité de mise en œuvre, des revêtements bitumineux ont recouvert pratiquement toutes les routes [16].

I.2.1. Définition de bitume

Le bitume est défini comme « un matériau non-volatil, adhésif et imperméable dérivé du pétrole brut, ou présent dans la nature asphalté, qui est complètement ou presque complètement soluble dans le toluène et très visqueux ou proche du solide à la température ambiante » dans les spécifications Européennes [17]. C'est un matériau très visqueux, noir ou brun foncé [18]. Il possède un grand pouvoir agglomérant car il adhère à la majorité des matériaux usuels : pierre, béton, bois, métal, verre [19]. Il a la propriété d'être plus souple à de haute température et plus rigide à de basse température [20].

I.2.2. Production des bitumes en Algérie

La consommation des bitumes en Algérie vit actuellement un accroissement considérable, notamment avec les projets de renforcements, d'entretien du réseau routier et de constructions nouvelles [21]. Le bitume Algérien n'est pas assez dense pour en extraire du bitume, celui-ci est alors importé soit sous forme :

- De matière première : brut réduit, raffiné à Arzew et Skikda.
- D'un produit fini : bitume pur.

Les classes de bitumes employés en technique routière sont 35/50 et 80/100.

- Le bitume 35/50 est destiné aux enrobés à chaud, il est fabriqué à la raffinerie d'Arzew par soufflage qui a été construite entre 1970-1973, elle a été conçue pour traiter :
 - Le pétrole brut de Hassi-Messaoud ;
 - Le brut réduit importé (production de bitume) ;
 - Satisfaire les besoins de consommation en carburants, lubrifiants, bitumes du marché national et exporté les produits excédentaires (kérosène, fuel)

- Le bitume 80/100 est fabriqué à la raffinerie de Skikda par le procédé de distillation sous vide. Cette raffinerie a été conçue pour fournir les produits représentés dans le tableau I.

Tableau I.2.1 : Caractéristiques des produits fournis par la raffinerie de Skikda [20].

Type de bitume	Pénétration 25°C, 100g, [1/100mm]	Température de ramollissement TBA [°C]
Bitume routier 35/50	35-50	47-60
Bitume routier 80/100	80-100	35-45
Bitume oxydé 20/30	20-30	80-90

En ce qui concerne les bitumes fluidifiés (les cut-backs), ils sont fabriqués aux unités de NAFTAL à partir des bitumes purs (80/100) auxquels on ajoute un solvant (kérosène) [21].

I.2.3. Structure physico-chimique des bitumes

Issus du raffinage des pétroles bruts, les bitumes sont des mélanges complexes de composés hydrocarbonés constitués de 82% à 85% de carbone (% massique) et de 8% à 11% d'hydrogène [22]. En outre, des hétéroatomes tels que le soufre (1-9%), l'azote (0 à 1,5%) et l'oxygène (0,5 à 1,5%) sont présents. On trouve également dans les bitumes des métaux (essentiellement vanadium (10-2000 ppm) ou nickel (20-200 ppm) mais aussi aluminium, silicium, chrome, cuivre, zinc, plomb,...) à l'état de traces [23]. Ils ont des masses molaires et des structures chimiques variées. La taille de ces molécules varie de quelques nanomètres à quelques dixièmes de micromètres pour les grandes tailles [22]. Les molécules des composés des bitumes sont constituées de motifs hydrocarbonés de quatre types:

-) Paraffiniques saturés linéaires ou ramifiés (chaînes linéaires sans cycle) ;
-) Naphténiques saturés cycliques (cycles à liaisons simples) ;
-) Aromatiques: présence d'au moins un cycle avec double liaisons de type benzène ;
-) Oléfines: chaînes contenant une ou plusieurs doubles liaisons [23].

I.2.4. Différents types de bitumes

Selon le procédé de fabrication, le grade, l'utilisation, la provenance ; il existe plusieurs types de bitumes [20].

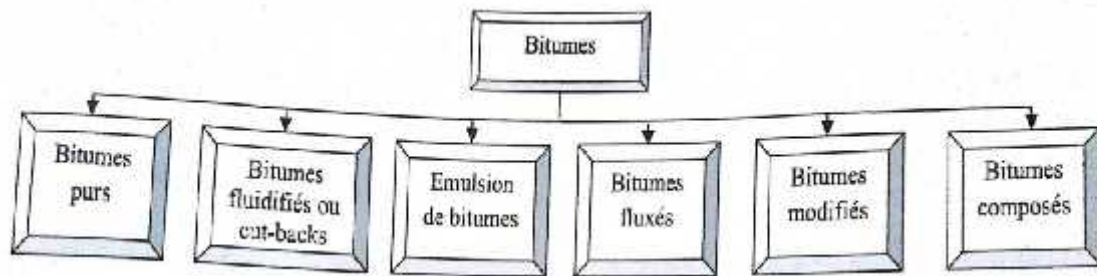


Figure I.2.1 : Différents types de bitumes existant [20].

I.2.4.1. Bitumes purs

Que l'on définit en plusieurs classes en fonction de leurs différentes caractéristiques (viscosité, pénétrabilité, point de ramollissement...). Les plus utilisés en France sont classés par leur dureté décroissante : 35/50, 50/70, 70/100, 160/220 [24].

I.2.4.2. Bitumes fluidifiés ou cut-backs

Ils sont obtenus par un mélange de bitume soit avec des fractions légères de distillation du pétrole telle que le kérosène, soit avec des huiles légères ou plus souvent moyenne, provenant de la distillation de la houille afin de réduire leur viscosité. Ce procédé permet notamment de les utiliser à une température nettement plus basse que celle nécessaire à la mise en œuvre du bitume pur [21].

I.2.4.3. Emulsions de bitume

Les émulsions sont des dispersions sous forme de gouttes d'au moins une phase liquide dans une autre, stabilisées par des tensioactifs adsorbés à l'interface [25]. Pour les émulsions

de bitumes, la phase dispersée est constituée par le bitume et la phase dispersante est constituée par l'eau additionnée par divers produits (acide ou base, amine ou résine), les globules de bitumes sont tapissées par un film protecteur d'émulsifiant [26]. Ils peuvent être fabriquées à base de bitume de pénétrabilités différentes (180/220, 80/100, 60/70, 40/50) [27].

I.2.4.4. Bitumes fluxés

Ce sont des bitumes purs dont on a diminué la consistance par incorporation de produit provenant de la distillation du pétrole et de la distillation de goudron de houille pour au moins cinquante pour cent des ajouts [20].

I.2.4.5. Bitumes modifiés

Bitumes dont on a modifié les propriétés par l'ajout d'agents chimiques : caoutchouc naturel, élastomères de synthèse, soufre, composés organométalliques, pigments...

I.2.4.6. Bitumes composés

Bitumes-goudrons, bitumes-brais dans lequel le bitume représente plus de 50% (actuellement ne sont plus utilisés même en revêtement anti-kérosène résistant aux carburants).

A tous ces bitumes peuvent être ajoutés des dopes d'adhésivité (dérivés aminés). Selon la température d'application on distingue :

- L'enrobé à chaud fabriqué aux alentours de 150°C -160°C et mis en œuvre à une température aux alentours de 140°C- 150°C au moyen d'un finisseur.
- L'enrobé tiède fabriqué aux alentours de 90°C à 130°C et appliqué à 90°C.
- L'enrobé à froid : mélange de granulats avec une émulsion de bitume mis en œuvre à température ambiante (entretien et réparation de chaussées) [24].

PARTIE 3 : Enrobé bitumineux

Dans les deux grands titres précédents nous avons vu le bitume et le granulat. Les deux ensemble forment l'enrobé.

Les enrobés bitumineux constituent un élément majeur dans la construction des routes. Ils doivent rencontrer plusieurs exigences :

- ✓ être maniable durant la mise en place et la compaction ;
- ✓ contribuer à la force de la structure de la route ;
- ✓ offrir une bonne résistance à l'orniérage, à la fissuration due à la fatigue et à la Fissuration thermique ;
- ✓ Résister aux effets de l'air et de l'eau (durabilité) ;
- ✓ Assurer une bonne adhérence des pneus dans des conditions climatique variées ;
- ✓ Offrir un niveau acceptable de bruit du au frottement des pneus sur la chaussée ;
- ✓ Offrir une douceur de roulement acceptable ; [28].

I.3.1. Définition de l'enrobé bitumineux

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

-Granulats: (environ 90% en poids) composés de plusieurs fractions en pourcentages variables :

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

-Bitumes : (5 à 7 % en poids)

-Vides : (de 2 à 20% selon les matériaux) [29].

I.3.2. Catégories d'enrobés bitumineux

I.3.2.1.Enrobés pour assises de chaussées

❖ Les graves bitumes (GB)

Mises au point au début des années 70, elles représentent aujourd'hui la première technique de construction d'assises de chaussées sur le réseau autoroutier.

La grave bitume classique est un enrobé à chaud de granulométrie 0/20. Les GB ont un domaine d'emploi de 10 à 15 cm.

❖ Les sables bitumes (SB)

C'est un mélange de sable naturel (souvent de forme arrondie), de sable concassé et de bitume très dur. Ce dernier venant compensé le manque de stabilité du sable naturel.

Cet enrobé de granulométrie 0/4 ou 0/6 contient 4 à 4.2% de bitume 20/30. Il est répandu en couche de 10 à 15 cm d'épaisseur.

I.3.2.2. Enrobés pour couche de liaison (BBL)

La couche de liaison étant une couche de transition entre la couche de base et la couche de roulement, sa formulation est intermédiaire entre les formulations de ces deux couches.

Ce béton bitumineux de liaison (BBL) est mis en œuvre en couche de 5 à 8 cm d'épaisseur.

I.3.2.3. Enrobés pour couche de roulement (BB)

Appelés Bétons Bitumineux, ils correspondent aux enrobés semi-grenus 0/14. Utilisés couramment sur l'ensemble des réseaux routiers, ils représentent la majeure partie des enrobés pour couche de roulement.

I.3.2.4. Enrobés spéciaux

On désigne sous ce vocable des produits qui se différencient des enrobés classiques à base de bitume pur. Ces différences tiennent :

- à des compositions granulométriques particulières (il s'agit souvent d'enrobés discontinus)
- à l'utilisation de liants modifiés ou à l'ajout de produits comme : fibres, poudrette de caoutchouc, polyéthylène, PVC ...pour objectif de modifier les caractéristiques rhéologiques du bitume pur.

❖ Les enrobés à module élevé (EME)

Concernent les assises de chaussée (base et fondation) et les couches de liaison. Le principe des EME repose sur deux idées :

- Le remplacement du bitume classique 35/50 par un bitume très dur 20/30 ou hyper dur 10/20, ce qui permettra d'augmenter notablement le module de rigidité de l'enrobé.
- On peut augmenter sensiblement le pourcentage de bitume sans risquer l'orniérage grâce à l'utilisation d'un liant très rigide, ce qui se traduit par une meilleure tenue à l'enrobé.

❖ Les bétons bitumineux minces (BBM)

Appliqués en épaisseur de l'ordre de 4 cm. Ces enrobés pour couche de roulement font appel en général à des courbes granulométriques discontinues.

Le bitume utilisé est souvent un liant modifié obtenu à partir de bitume pur et de polymères.

Ces enrobés coûtent de 20 à 50% plus cher que des enrobés classiques à base de bitume pur. Leur utilisation se limite aux voiries très circulées.

❖ Les bétons bitumineux très minces (BBTM)

Il s'agit d'un enrobé à chaud mis en œuvre en 2,5 cm d'épaisseur. Sa formulation se caractérise par :

- Une forte discontinuité : le mélange étant constitué par environ 25 à 27% de sable 0/2, 70 à 72% de gravillons 6/10 et 2 à 5% de fines d'apport.
- L'utilisation d'un bitume modifié avec un dosage de l'ordre de 6%.

❖ Les enrobés drainants

C'est une couche de roulement de 4 cm d'épaisseur dont la teneur en vides est comprise entre 20 et 25%.

Cette couche de roulement présente la particularité d'être perméable à l'eau. Cette dernière traverse le revêtement et s'écoule à la base de la couche pour ressortir sur le côté de la chaussée.

L'intérêt de l'enrobé est de présenter par temps de pluie l'aspect d'une chaussée sèche sans projection d'eau pour les usagers qui suivent un véhicule.

I.3.3. Adhésivité granulat-bitume

Les propriétés mécaniques et la durabilité des enrobés bitumineux sont assurées par la stabilité de l'édifice granulaire, par les propriétés cohésives du bitume et par une bonne adhésion entre le bitume et les granulats, de plus, les enrobés adhèrent à la surface sous-jacente de la route. Une détérioration de la chaussée se produit avec le temps, en raison de l'action combinée du trafic et du climat, soumettant, le revêtement de la route à des changements continuels de charge, de température et d'humidité [28].

I.3.3.1. Définition de l'adhésivité

L'adhésivité au point de vue générale est définie comme étant l'effort qu'il convient d'exercer uniformément sur l'unité de surface d'un enduit pour le détacher de son support (elle est donc d'une dimension d'une contrainte ou d'une pression).

L'adhésivité représente au sens physique, pour un liant ayant mouillé un minéral, la faculté de ce liant de résister au déplacement ou au décollement sous l'effet des actions extérieurs possibles [30].

I.3.3.2. Différents types d'adhésivité

L'action de l'eau sur l'interface peut se résumer en deux concepts : l'adhésivité passive et l'adhésivité active.

❖ L'adhésivité passive

L'adhésivité passive caractérise l'aptitude d'un film de bitume préalablement adsorbé à résister au désenrobage par l'eau.

La vapeur d'eau arrive toujours à pénétrer dans l'épaisseur du bitume [30], à atteindre la surface granulaire est à réagir avec celle-ci [31]. Au voisinage de cette surface, l'eau pénètre entre le granulat et la couche de bitume et peut ensuite provoquer le désenrobage.

L'adhésivité passive est donc liée au temps total mis par l'eau pour :

-) D'une part, traverser le film de bitume
-) D'autre part, provoquer le désenrobage

❖ L'adhésivité active

Ce concept caractérise l'aptitude du bitume d'absorber sur une surface de granulat préalablement hydratée.

Remarque

Une bonne adhésivité passive peut suffire au maintien des caractéristiques mécaniques sous intempéries. Il suffit que le temps mis par l'eau pour pénétrer à l'interface granulat/bitume soit toujours supérieur à la plus longue période d'intempérie probable [32].

Pour mieux comprendre le problème d'adhésivité, il est nécessaire de définir tous les phénomènes pouvant l'influencer. On peut citer : [33,34]

-) Le phénomène de mouillage
-) Le phénomène d'adsorption
-) Le phénomène d'adhésion
-) La cohésion.

I.3.3.3. Phénomène de mouillage

❖ Définition

Le mouillage est l'étalement de film mince du liant liquide à la surface du granulat supposé à la même température que le liant (cette condition est indispensable car un liant chaud répandu sur un granulat froid fige immédiatement et le mouillage ne peut se produire).

On note que le mouillage est une condition nécessaire, mais non suffisante pour une bonne adhésivité [33].

❖ Liaison bitume-granulat

Pour étudier le mouillage d'un matériau minéral donné par un liquide hydrocarboné, le plus simple d'observer l'angle de raccordement d'une goutte avec la surface minérale (voir figure I.3.1) [34].

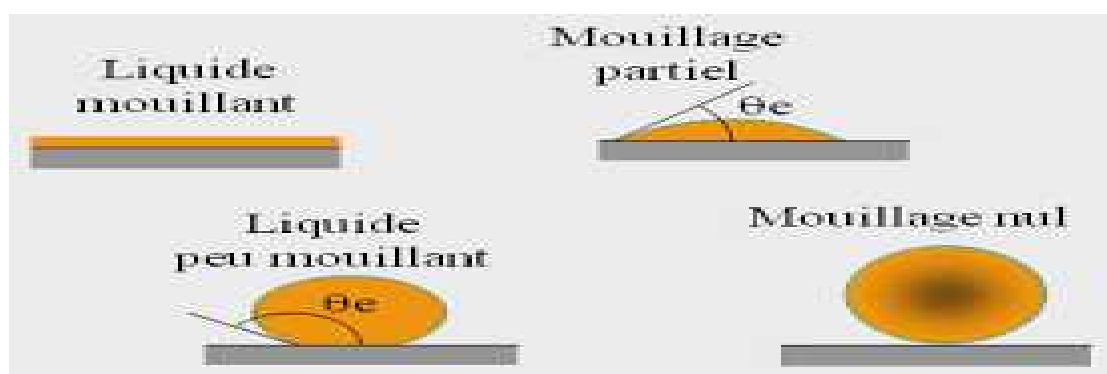


Figure I.3.1 : Angle de mouillage à l'interface Liquide – solide [35].

La figure (I.3.1) illustre le contact d'un élément solide avec un liquide. Le cas (A) schématise une bonne adhésivité entre ces deux matériaux [35].

I.3.3.4. Phénomène d'adsorption

Pour que les phénomènes d'adsorption aux interfaces puissent avoir lieu correctement, il ne faut pas mettre en œuvre des liants trop durs à la température ambiante, et il est utile que le refroidissement du liant à la paroi du granulat ne soit pas trop rapide.

Une fois que le liant a mouillé le granulat et que ce dernier soit propre et sec, certaines fractions de résines du bitume sont adsorbées à la surface.

Riedel et Weber, ont étudié l'influence de la nature du granulat sur les forces d'adhésivité ; leur théorie est que ces forces sont peu influencées par la tension superficielle du liant et, qu'au contraire, l'influence essentielle émane du granulat.

Leurs essais ont abouti à la conclusion que tous les liants adhérents bien aux matériaux hydrophobes et mal aux matériaux hydrophiles.

La conclusion semble généralement acceptable, car on conçoit qu'un granulat hydrophile adsorbe toujours de l'eau avant son emploi et quelque soit les précautions que l'on prenne, il reste une certaine couche d'eau (si mince) adsorbée qui ne peut être déplacée par le liant et qui facilitera la séparation complète ultérieure du liant et du granulat [36].

I.3.3.5. L'adhésion

D'un point de vue théorique, c'est la force par unité de surface reliant les molécules d'un corps aux molécules d'un autre corps.

Cette notion n'a donc de sens que lorsque sont envisagés deux corps en contact.

Dans le cas d'un contact bitume-solide, il est nécessaire que l'interface soit parfaitement définie et continue pour déterminer l'adhésion [1].

I.3.3.6. La cohésion

La résistance au collage ne dépend pas uniquement de l'adhésion, chaque matériau possède en effet une structure interne, plus au moins résistante qui est due à l'assemblage de ses propres molécules.

Nous appelons cette contrainte interne, propre à chaque matériau, sa cohésion interne [37].

I.3.4. Méthodologie des études de formulations des enrobés bitumineux algérienne

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

On doit vérifier premièrement que la courbe granulométrique du mélange s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique de référence au béton bitumineux 0/14 destiné pour une couche de roulement.

Les fractions granulaires du béton bitumineux 0/14 sont choisies parmi les granulats suivants : 0/3, 3/8, 8/15.

Détermination de la teneur en bitume (TL)

On appelle teneur en bitume (TL) la masse de liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage, Duriez a établi une formule pour déterminer la teneur en bitume des enrobés en fonction de la surface spécifique du mélange :

$$TL = k \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma} \dots (1) \quad [38].$$

❖ k : module de richesse

Il représente une quantité de liant en fonction de la surface spécifique du mélange sec. Il caractérise donc l'épaisseur du film de liant autour des granulats. Le module de richesse permet de classer les mélanges bitumineux :

- Les graves bitumes ($2 < k_{\text{grave bitume}} < 3,2$)
- Les bétons bitumineux ($3 < k_{\text{béton bitumineux}} < 3,9$)

Voir le tableau suivant :

Tableau I.3.1 : Les valeurs usuelles du module de richesse pour le béton bitumineux [38].

Enrobé	Module de richesse (k)			
0/14	3,45	3,6	3,75	3,90

❖ : coefficient correcteur :

Ce coefficient permet de tenir compte de la masse volumique réelle des granulats, si celle-ci diffère de

2.65 t/m³, on utilise la formule suivante : $= 2,65 / M_v \dots (2).$ [38].

❖ **Mv : masse volumique des granulats utilisés**

La méthode utilisée est la méthode classique au pycnomètre. On mesure un poids du granulat séché à 105°C, puis on détermine son volume par déplacement de liquide dans un pycnomètre comme suit :

Une masse connue M_G de granulats séché (par passage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante) est introduite dans un récipient contenant de l'eau distillée. Les bulles d'air libérées sont aspirées par un vide d'air (trompe à eau). Après s'être assuré qu'aucune bulle d'air n'est piégée entre les granulats, on détermine avec un très grand soin le volume d'eau déplacée par les particules.

Le volume des granulats V_G , égale au volume d'eau déplacée.

M_1 : masse du pycnomètre contenant l'eau distillée avec son bouchon.

M_2 : masse du pycnomètre contenant les granulats, l'eau distillée et le bouchon.

$$M_2 = M_1 + M_G - M_{VE} \cdot V_G \dots\dots (3). \quad [38].$$

Le volume des granulats s'exprime par:

$$V_G = \frac{M + M_G - M}{M_{VE}} \dots\dots\dots (4). \quad [38].$$

L'expression de la densité du solide est donc donnée par

$$M_{VG} = \frac{M}{V} = \frac{M}{M + M_G - M} \dots\dots\dots (5). \quad [38].$$

Avec :

M_G : masse des granulats ;

M_{VE} : masse volumique de l'eau distillée ;

V_G : volume des granulats ;

M_{VG} : masse volumique des granulats.

❖ : surface spécifique conventionnelle

La surface spécifique d'un granulat représente la surface totale des particules par rapport à son volume. Elle est exprimée en m^2/m^3 de granulat. Cette façon d'exprimer la surface spécifique permet de faire la comparaison entre les différents granulats. Elle est exprimée ensuite en m^2/kg , laquelle est essentiellement comparable entre les matériaux possédant une même densité [39].

$$: 0.25G + 2.3S + 12s + 135f \text{ en } \text{m}^2/\text{kg} \dots\dots (6). [38].$$

G : proportion pondérale des éléments supérieurs à 6.3 mm.

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

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

f : proportion pondérale des éléments inférieure à 0.08 mm.

Dans certains cas, on utilise la formule simplifiée suivante :

$$: 2.5 G + 1.3 f \text{ [m}^2/\text{kg]} \dots\dots (7). [38].$$

La surface spécifique est influencée par :

- A) La Grosseur Maximale ;
- B) La Granulométrie ;
- C) La Forme du Granulat.

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

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

C) Forme des granulats : La surface spécifique d'une particule cubique est 2 fois plus grande que celle d'une particule sphérique (Field, 1978). ce sont les particules plates et allongées qui ont la plus grande surface spécifique. Cependant, Field (1978) précise que la méthode des surfaces spécifiques, qui utilise des facteurs prédéterminés pour chacun des

tamis n'est pas toujours réaliste car elle utilise les mêmes facteurs peu importe la forme du granulat. Cela constitue une source d'imprécision [39].

I.3.5. Essais sur enrobés bitumineux

Les formulations de bétons bitumineux sont déterminées au moyen d'essais dans le laboratoire permettant d'évaluer le comportement des matériaux au compactage (Presse à cisaillement Giratoire PCG), d'apprécier leurs caractéristiques mécaniques (essais de fatigue, essais Marshall, essais LCPC-Duriez) et d'estimer leurs risques de déformations permanentes (essais à l'ornièrreur) [40].

I.3.5.1. Essai Marshall

L'essai Marshall est toujours très utilisé au niveau international, pour la détermination directe de la stabilité (force maximale appliquée) et du fluage Marshall (valeur de déformation en 1/10 mm correspondant à la stabilité) [41].

L'essai Marshall a pour but de déterminer, pour un taux de compactage donné, la stabilité et le fluage Marshall d'une éprouvette de dimensions déterminées.

- La stabilité Marshall : c'est la résistance de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette semi frettée. Cette compression est appliquée à une vitesse de 0,86mm/s après une demi-heure d'immersion dans l'eau à 60°C.
- Le fluage Marshall : c'est l'affaissement de l'éprouvette au moment de la rupture.

L'essai Marshall traditionnel est avantageusement complété par des essais sur éprouvettes compactées à 25,75 et 100 coups. Ces essais permettent d'apprécier la maniabilité d'un mélange c'est-à-dire son aptitude au compactage [42].

I.3.5.2. Essai Duriez

L'essai Duriez a pour but de déterminer, pour un compactage donné, les qualités de résistance mécanique et de résistance au désenrobage par l'eau d'une éprouvette cylindrique d'enrobé

Les principales mesures effectuées sont :

- Résistance à la compression axiale – vitesse d'essai 1mm/s
 - Après 8 jours de conservation à sec : R

- Après 8 jours dont 7 jours d'immersion : r

La température de l'essai est de 18°C.

La tenue à l'eau est chiffrée par le rapport immersion-compression r/R .

Il est aussi recommandé d'effectuer des essais à 0°C et à 50°C pour étudier la susceptibilité thermique du mélange [43].

I.3.5.3. Essai ou Presse à cisaillement Giratoire (PCG)

L'essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) est un essai de formulation.

La particularité de l'appareil réside dans le fait que l'échantillon n'est pas densifié par impact comme le cas de la méthode Marshall, mais plutôt sous l'action combinée d'un piston exerçant une pression fixée à 600 KPa et d'un moule cylindrique de 150 mm de diamètre incliné de 1,25 degré et décrivant un mouvement giratoire de 30 tr/min.

Le compactage est obtenu en effectuant le nombre de giration désiré, qui généralement de 200 tours. La température de l'échantillon est ajustée en fonction du bitume utilisé.

Ce mode de compactage traduit la relation linéaire qui existe entre le nombre de passes d'un rouleau compacteur de chantier et le nombre de giration ;(ce n'était pas le cas avec le nombre d'impacts de la méthode Marshall). Alors que la méthode Marshall ne permet la mesure d'un pourcentage de vides que pour un effort de compactage unique, l'essai à la PCG permet de mesurer l'évolution du pourcentage de vides dans le mélange en fonction du nombre de giration. Cette courbe de pourcentage de vides en fonction du nombre de giration décrit la maniabilité du mélange, qui est utilisée comme critère de formulation des enrobés.

Les critères de maniabilité permettent d'exercer une discrimination entre des mélanges trop maniables, qui auront tendance à présenter des ornières, et de mélanges peu maniables, qui seront perméables et peu durables. L'essai à la PCG permet également une appréciation qualitative de l'éprouvette dénitrifiée, de la texture de la surface et des risques de ressuage en service.

I.3.5.4. Essai d'orniérage

Cet essai est très important pour les routes fréquentées et avec un pourcentage de poids lourds assez élevé, il permettra de simuler au laboratoire la résistance de l'enrobé à l'orniérage [29].

L'orniérage est très populaire, car c'est une méthode qui est plus représentative que les autres méthodes de laboratoire lors de l'évaluation de la résistance à la déformation

permanente et les résultats ont montré une excellente corrélation avec la déformation de chaussée en service.

- ❖ **Mode d'essai** : on détermine la profondeur de l'ornièrre au passage répété d'un pneumatique, selon l'épaisseur de l'enrobé .On confectionne une plaque de 5 ou 10 cm qu'on lui fait subir une énergie de compactage normalisée à 60°C, plusieurs cycles sont appliqués 1000, 3000, 10000, 30000, 100000, le résultat (profondeur d'ornièrre) est comparé a la norme [29].



Figure I.3.2 : Simulateur de trafic avec une roue en acier.

I.3.5.5. Essai de Fatigue

Cet essai permet d'étudier le comportement des enrobés bitumineux vis-à-vis de la fissuration, il est pratiqué sur des éprouvettes de forme trapézoïdales (figure I.3.3), l'éprouvette est encastrée à la base, sollicités en tête en flexion sinusoïdale par déplacement imposé d'amplitude constante choisie afin de caractériser la rupture à un million de cycle.



Figure I.3.3 : Essai de fatigue.

L'essai est pratiqué à 10°C et à une fréquence de 25 Hz.

La répétitivité des cycles de flexion alternée entraîne un endommagement de l'éprouvette (des fissures sont localisées) [29].

I.3.6. Dégradations des couches en enrobés bitumineux

La fissuration thermique et l'orniérage des enrobés bitumineux sont des problèmes majeurs sur le réseau routier.

Les principales sollicitations auxquelles sont soumises les structures routières sont liées aux contraintes imposées par le passage des véhicules (effet du trafic) et aux effets créés par les changements climatiques, principalement en raison des variations de température (effets thermiques) [44].

I.3.6.1. Influence des actions appliquées à la chaussée

❖ Effet du trafic

Chaque couche de chaussée subit des écrasements et des flexions sous l'effet du trafic (figure I.3.4).

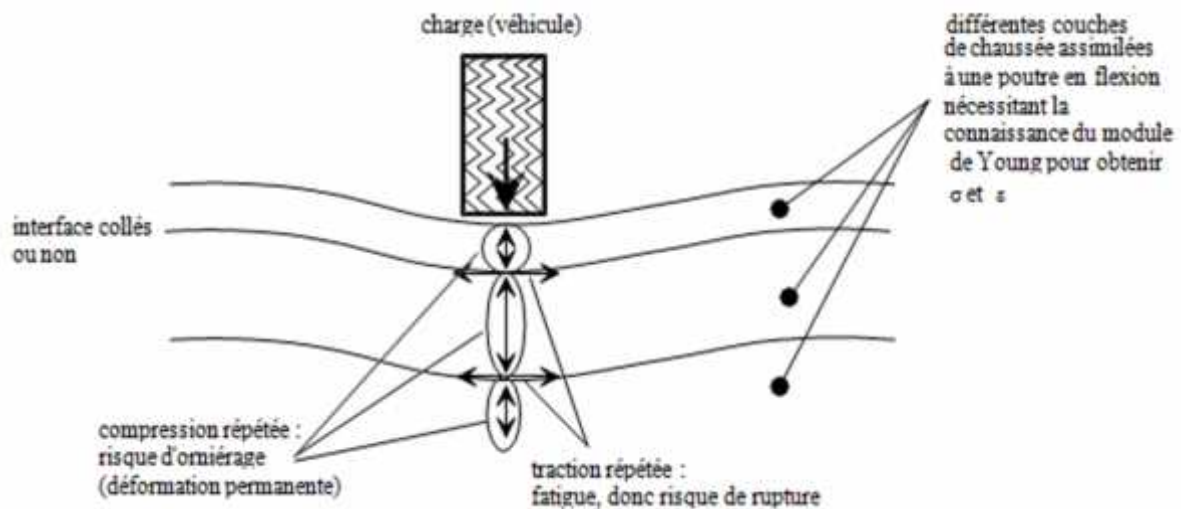


Figure I.3.4 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic [45].

Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée.

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée. Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées [46].

❖ Effet de la température

La température a deux effets mécaniques principaux :

- Le changement du comportement du matériau ;
- La Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations ou contractions thermiques lors des changements de température (figure I.3.5).

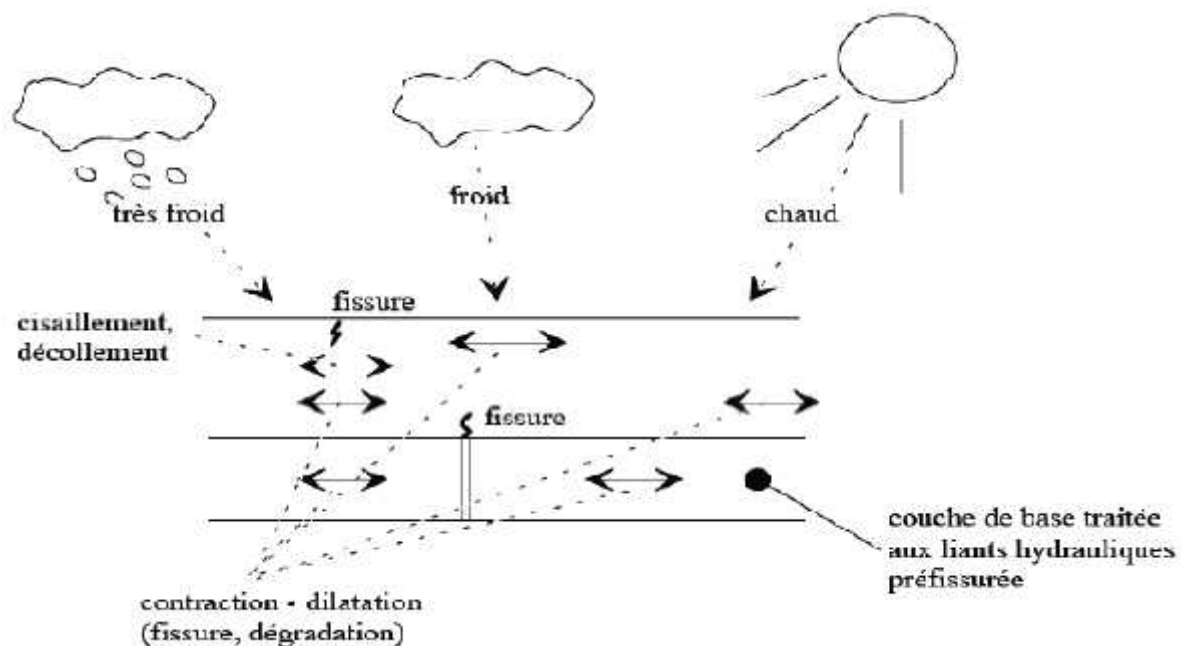


Figure I.3.5 : Schématisation des sollicitations induites par la température [45].

- Lorsque des températures très basses sont appliquées, des fissures peuvent apparaître et se propager avec les cycles thermiques (journaliers ou autres) ;
- Lorsqu'une couche de base traitée aux liants hydrauliques existe dans la chaussée (structure semi-rigides), cette couche est sujette au retrait thermique, de prise et de dessiccation. Le retrait empêché par le frottement à l'interface peut provoquer une fissure dans le revêtement en enrobé bitumineux. Cette fissure évolue avec les cycles thermiques et peut traverser la couche. Ce phénomène est connu sous le nom de « remontée de fissure » [44].

I.3.6.2. Les principales dégradations des chaussées

Les principaux mécanismes de dégradation d'une chaussée sont :

- l'orniérage de la partie supérieure de la chaussée : déformation permanente à des températures voisines de 50°C dues aux charges répétées (figure I.3.4). Ce phénomène est donc fonction de la température et du trafic ;
- la fatigue liée au trafic automobile : formation de nombreuses fissures longitudinales à des températures voisines de 0°C. Elle est fonction de la répétition des charges avec le temps.
- la fissuration thermique (fissuration transversale) résultant des basses températures (environ -20°C) auxquelles le liant devient cassant [47].

Conclusion

A la fin de ce chapitre, on peut conclure que les matériaux de qualité sont l'un des facteurs les plus importants qui assurent la stabilité et la durabilité des routes. Ces dernières sont liées aux mécanismes qui caractérisent l'adhésion bitume-granulats et les paramètres principaux influençant cette adhésion.

Chapitre II

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire les matériaux ayant été utilisés pour la formulation des enrobés confectionnés ainsi que le matériel ayant servi pour l'exécution des essais effectués au niveau du laboratoire de la Mitidja des Travaux Publics et Bâtiments (LMTPB).

La campagne expérimentale a été réalisée moyennant les matériaux suivants :

- Bitume de grade 35/50 ;
- Agrégats 0/3, 3/8 et 8/15.

II.1. Essais sur granulats

Les granulats : 0/3, 3/8, 8/15 sont entièrement concassés et proviennent de la carrière ENOF BEJAIA.

➡ Méthode d'essais et d'analyses

II.1.1. Méthode de réduction d'un échantillon au laboratoire (NA 453)

La réduction de l'échantillon au laboratoire a été faite à l'aide d'un diviseur-échantillonneur à ouverture variable. Les 3 types de granulats ont subi un quartage afin d'obtenir un échantillon représentatif de l'ensemble de l'échantillon ramené de la carrière d'ALGRAN.



Figure II.1 : diviseur-échantillonneur [9].

Quartage :

Comme le nom l'indique on divise l'échantillon en quatre. Placer l'échantillon bien homogénéisé dans un bac métallique à bords peu élevés (de préférence), et l'étaler. A l'aide d'une truelle, partager d'abord en deux moitiés(1) puis en 4 quarts(2), sensiblement égaux. Eliminer les fractions A et D, et réunir les fractions opposées B et C : on a ainsi la moitié de l'échantillon primitif. Si cette quantité ($1/2$) est encore trop importante, la partager suivant le même processus. D'où un échantillon représentatif égal au $1/4$ de la quantité primitive. Et ainsi de suite. Les fractions trouvées ($1/2, 1/4, 1/8, \dots$) permettent par addition d'obtenir toute quantité utile.

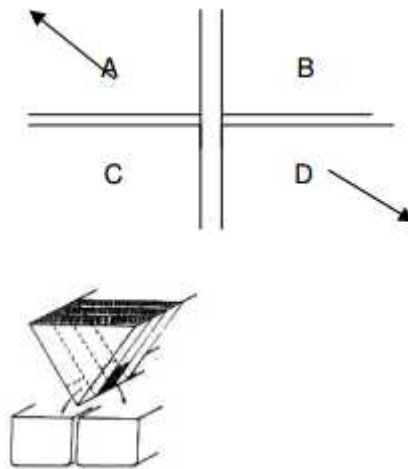


Figure II.2 : principe de quartage [9].

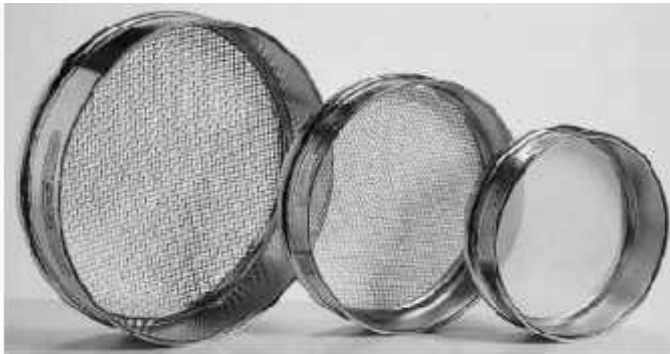
Le matériau à étudier, versé sur l'échantillonneur à l'aide d'une pelle spéciale, est recueilli dans 2 petits bacs. Chaque moitié, peut être encore partagée en 2, puis encore en 2, etc...la distance entre les cloisons définit la grosseur maximale des grains ; généralement, 5mm ou 30mm.

II.1.2. Analyse granulométrique par tamisage (Gr) (NF EN 933-1)

❖ Appareillage

- **Tamis** : avec des ouvertures conformes aux spécifications de la norme ISO 3310-1 et ISO 3310-2.
- **Fonds et couvercles s'adaptant aux tamis.**
- **Etuve ventilée** : réglée par thermostat pour maintenir une température de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$, ou tout autre appareillage adéquat pour sécher les granulats, sans entraîner de variation de la granularité.
- **Dispositif de lavage.**
- **Balances** : précises à $\pm 0,1 \%$ de la masse de la prise d'essai.

- Bacs, brosses.
- Tamiseuse (facultatif).



Série de tamis



Tamiseuse

Figure II.3 : Appareillage nécessaire pour l'analyse granulométrique [66].

❖ Mode opératoire

Lavage de la prise d'essai :

- On place la prise d'essai dans un récipient et on ajoute l'eau nécessaire pour la recouvrir.
- On agite la prise d'essai suffisamment vigoureusement pour obtenir une séparation complète et la mise en suspension des fines.
- On humidifie les deux côtés d'un tamis de $63\ \mu\text{m}$ réservé à l'usage exclusif de cet essai, et on adapte un tamis de protection (par exemple, d'ouverture 1 mm ou 2 mm) au-dessus. En suite, on place les tamis de façon que la suspension passant à travers le tamis puisse être évacuée ou, si besoin est, recueillie dans un récipient adéquat. On verse le contenu du récipient sur le tamis supérieur. On poursuit le lavage jusqu'à ce que l'eau passant à travers le tamis de $63\ \mu\text{m}$ soit claire.
- On sèche le refus sur le tamis de $63\ \mu\text{m}$ à $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la masse soit constante puis on laisse refroidir après on pèse.

Tamisage :

- On verse le matériau lavé et séché (ou l'échantillon sec directement) dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée d'un certain nombre de tamis emboîtés, et disposés de haut en bas, dans un ordre de dimension de mailles décroissant, avec le fond et le couvercle.
- On agite la colonne, manuellement ou mécaniquement, puis on reprend un à un les tamis en commençant par celui qui présente la plus grande ouverture et agiter manuellement chaque

tamis en s'assurant qu'il n'y a pas de perte de matériau, en utilisant, par exemple, un fond et un couvercle.

- On verse tout le matériau qui passe à travers chaque tamis sur le tamis suivant de la colonne avant de poursuivre l'opération avec ce tamis.
- On pèse le refus au tamis ayant la dimension de maille la plus grande et on note sa masse.
- On effectue la même opération pour tous les tamis qui sont dans la colonne, afin d'obtenir la masse des différentes fractions de matériaux retenus et on note ces masses.
- On Pèse le matériau tamisé, restant dans le fond le cas échéant, et on inscrit la valeur de sa masse.



Figure II.4 : Lavage et tamisage des granulats (photo prise en Mars 2017).

II.1.3. Mesure du coefficient d'Aplatissement (A) (NF P 18-561)

❖ Appareillage

- **Tamis d'essai :** à mailles carrées, ayant des dimensions d'ouvertures suivantes : 80 mm ; 63 mm ; 50 mm ; 40 mm ; 31,5 mm ; 25 mm ; 20 mm ; 16 mm ; 12,5 mm ; 10 mm ; 8 mm ; 6,3 mm ; 5 mm et 4 mm.
- **Grilles à fentes correspondantes :** comprenant des barres cylindriques parallèles conformes à la figure suivante.

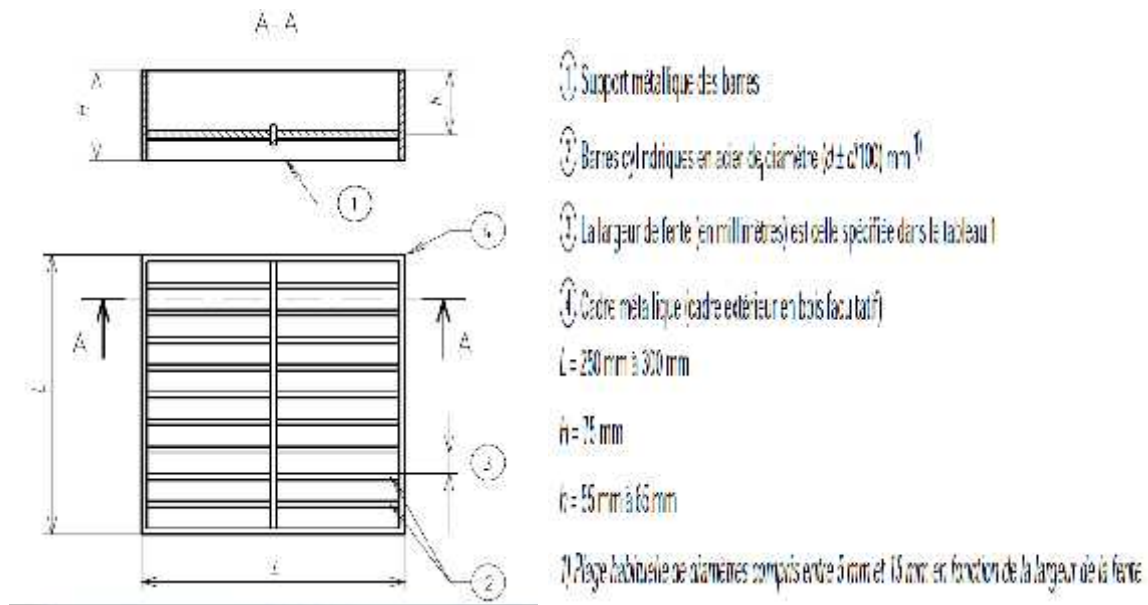


Figure II.5 : Grilles à fente [14].

- **Balance** : avec une précision de $\pm 0,1$ % de la masse de la prise d'essai.
- **Etuve ventilée** : réglée par thermostat pour maintenir une température de (110 ± 5) °C ou tout autre appareillage adéquat pour sécher les granulats, sans entraîner leur rupture.

❖ Mode opératoire

Tamissage sur tamis d'essai :

- On tamise la prise d'essai sur les tamis.
- On pèse et on élimine tous les grains passant au tamis de 4 mm et retenus sur celui de 80 mm.
- On pèse et on retient séparément tous les grains de chaque granulat élémentaire d_i / D_i compris entre 4 mm et 80 mm.

Tamissage sur grilles à fentes :

- On tamise chaque granulat élémentaire d_i / D_i obtenu selon le tamissage sur tamis d'essai, sur la grille à fentes correspondante. Ce tamissage doit être effectué manuellement et doit être considéré comme terminé lorsque le refus ne varie pas de plus de 1 % pendant 1 min de tamissage.
- Pour chaque granulat élémentaire, on pèse le matériau passant à travers la grille à fentes correspondante.



Figure II.6 : Tamisage sur grilles à fentes (photo prise en Mars 2017).

II.1.4. Détermination de la propreté superficielle (P) (NF P 18-591)

❖ Appareillage

- **Tamis** : de 0,5 mm ou 1,6 mm.
- Eventuellement un **tamis de décharge**.
- **Balance** : dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1%.
- **Etuve** ventilée réglée à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$.

❖ Mode opératoire

Préparation de l'échantillon pour l'essai :

- L'échantillon doit être préparé. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2 D$, avec M exprimé en kilogrammes et D (plus grande dimension spécifiée) en millimètres.
- On prépare deux échantillons à partir de l'échantillon pour laboratoire : l'un de masse M_{1h} pour déterminer la masse sèche de l'échantillon pour essai, l'autre de masse M_h pour déterminer la masse sèche des éléments inférieurs à 0,5 mm ou 1,6 mm pour le ballast.

Détermination de la masse sèche de l'échantillon pour essai :

- On pèse les deux échantillons M_{1h} et M_h .
- On sèche le premier échantillon à l'étuve à $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1%.

- La peser, soit M_{1s} sa masse sèche.

La masse sèche de l'échantillon soumis à l'essai de propreté est :

$$M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} M_h$$

Détermination de la masse sèche des éléments inférieurs à 0,5 mm ou 1,6 mm :

- On effectue l'essai sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant essai.
- On tamise sous eau l'échantillon M_h sur le tamis 0,5 mm ou 1,6 mm jusqu'à ce que l'eau qui s'écoule soit claire.
- On récupère le refus et le sèche à l'étuve à $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante. Le tamiser à nouveau sur le tamis de 0,5 mm ou 1,6 mm pendant une minute et le peser, soit m' sa masse sèche.

La masse sèche m des éléments inférieurs à 0,5 mm ou 1,6 mm est égale à :

$$m = M_s - m'$$

❖ Calcul et expression des résultats :

La propreté superficielle est donnée par : $P = \frac{m}{M} 100$.

II.1.5. Equivalent de sable à 10% de fines (ES) (NF P 18-597)

❖ Appareillage

Appareillage d'usage courant

- **Tamis** : de 5 mm d'ouverture de mailles avec fond.
- **Spatule et cuillère**.
- **Récipients** : de pesée pouvant recevoir environ 200 ml.
- **Balance** dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 %.
- **Chronomètre** : donnant la seconde.
- **Réglet** : de 500 mm, gradué en millimètres.
- **Goupillon** pour le nettoyage des éprouvettes.
- **Bacs** pour tamisage.

Appareillage spécifique

- **Éprouvettes** : cylindriques et transparentes en matière plastique, Chaque éprouvette porte des traits de repères gravés à : $100 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$ et $380 \text{ mm} \pm 0,25 \text{ mm}$ de la base.

L'éprouvette est fermée par un bouchon de caoutchouc ; l'équipement comprend deux éprouvettes et deux bouchons.

- **Un piston taré** : constitué par : une tige, une embase, un manchon et un poids fixé à l'extrémité supérieure de la tige (annexe II).

- **Un tube laveur** : constitué par un tube rigide (annexe II)

Ce tube laveur est muni à la partie supérieure d'un robinet, à la partie inférieure d'un embout.

- **Un flacon** : transparent en verre ou en matière plastique.

- **Siphon**.

- **Un tube de caoutchouc** : ou de plastique, reliant le tube laveur au siphon.

- **Un entonnoir** : à large ouverture pour transvaser l'échantillon dans l'éprouvette cylindrique (annexe II).

- **Une machine d'agitation** : manuelle ou électrique, capable d'imprimer à l'éprouvette un mouvement horizontal, rectiligne et périodique de $20 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$ d'amplitude et de période 1/3 seconde.

❖ Mode opératoire

Préparation de l'échantillon pour essai :

- L'échantillon pour laboratoire doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. Sa masse doit être telle que la fraction passant au tamis de 5 mm pèse 500 à 700g.

- Si l'échantillon pour laboratoire n'est pas humide, l'humidifier afin d'éviter les pertes de fines et la ségrégation.

- On tamise le matériau humide sur le tamis de 2 mm. On lave le refus sur ce même tamis en utilisant le moins d'eau possible et en associant les deux passants. Le 0-2 mm est alors mis à l'étuve, si nécessaire, en contrôlant qu'il n'atteint jamais l'état sec, puis en atmosphère ambiante pour l'amener à une teneur en eau comprise entre 1 % et 3 %.

- La masse de l'échantillon pour laboratoire doit être telle que la fraction passant au tamis de 2 mm pèse 1 500 g environ.

Exécution de l'essai :

- La solution lavante ayant été siphonnée dans l'éprouvette cylindrique, jusqu'au trait repère inférieur, la prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de matériau, est versée soigneusement à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement.

- On frappe fortement à plusieurs reprises la base de l'éprouvette sur la paume de la main pour déloger les bulles d'air et favoriser le mouillage de l'échantillon.
- On laisse reposer dix minutes.
- À la fin de cette période de dix minutes, on bouche l'éprouvette à l'aide du bouchon de caoutchouc, puis on fixe l'éprouvette sur la machine d'agitation.
- On fait subir à l'éprouvette $90 \text{ cycles} \pm 1 \text{ cycle}$ en $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$.
- On remet l'éprouvette en position verticale sur la table d'essai.
- On ôte le bouchon de caoutchouc et on le rince au-dessus de l'éprouvette avec la solution lavante.
- En descendant le tube laveur dans l'éprouvette, on rince les parois de l'éprouvette avec la solution lavante, puis on enfonce le tube jusqu'au fond de l'éprouvette.
- On lave le sable pour faire remonter les éléments argileux, tout en maintenant l'éprouvette en position verticale. On procède de la manière suivante : l'éprouvette étant soumise à un lent mouvement de rotation, on remonte lentement et régulièrement le tube laveur. Lorsque le niveau du liquide atteint le trait repère supérieur, on relève le tube laveur de façon à ce que le niveau du liquide se maintienne à hauteur du trait repère. On arrête l'écoulement dès la sortie du tube laveur.

Mesure :

-On laisse reposer pendant $20 \text{ min} \pm 10 \text{ s}$.

Au bout de ces 20 min :

- On mesure à l'aide du réglet la hauteur h_1 du niveau supérieur du floculat par rapport au fond de l'éprouvette. On fait descendre doucement le piston taré dans l'éprouvette, jusqu'à ce qu'il repose sur le sédiment. Pendant cette opération, le manchon coulissant prend appui sur l'éprouvette.
- Lorsque l'embase du piston repose sur le sédiment, on bloque le manchon coulissant sur la tige du piston. On introduit le réglet dans l'encoche du manchon, faire venir buter le zéro contre la face inférieure de la tête du piston.
- On lit la hauteur du sédiment h_2 au niveau de la face supérieure du manchon.
- On arrondit les hauteurs h_1 et h_2 au millimètre le plus proche.

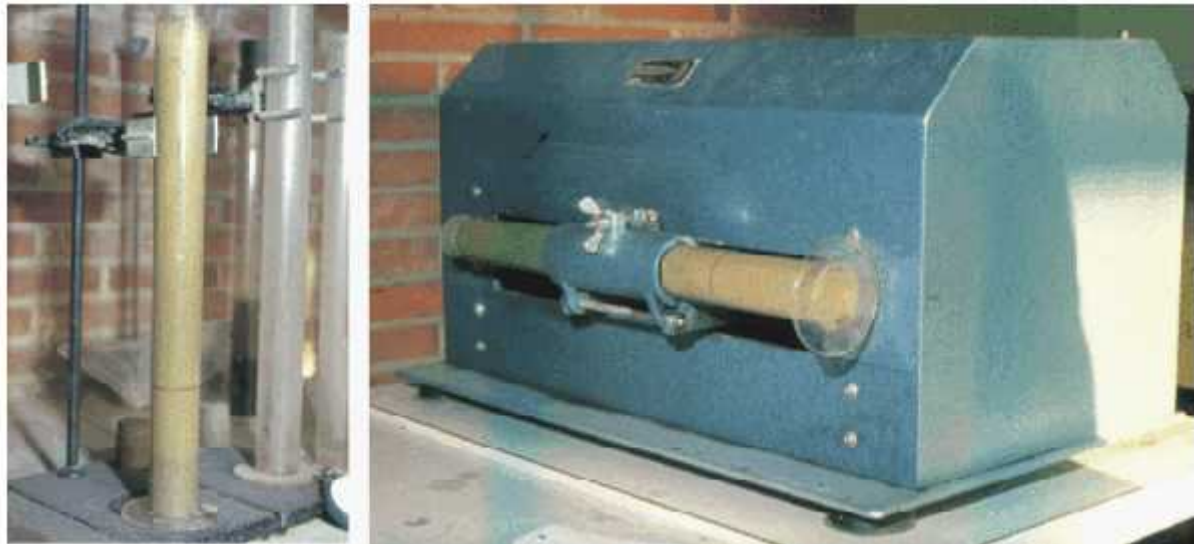


Figure II.7 : Eprouvettes et machine d'agitation [65].

II.1.6. Essai de bleu de méthylène (NF P 18-592)

❖ Appareillage

- **Burette** : d'une capacité de 100 ml ou de 50 ml et graduée en 1/10 ml ou 1/5 ml ou deux micro-pipettes, de 5 ml et 2 ml.
- **Papier-filtre**
- **Tige de verre**
- **Agitateur à ailettes** : capable de vitesses de rotation contrôlées variables pouvant atteindre (600 ± 60) tr/min avec 3 ou 4 ailettes de (75 ± 10) mm de diamètre.
- **Balance** : précise à 0,1 % de la masse de la prise d'essai.
- **Chronomètre** : gradué en secondes.
- **Tamis** : avec des ouvertures de 2 mm avec tamis de protection (si nécessaire).
- **Bécher** : en verre ou en plastique.
- **Fiole** : en verre d'une capacité de 1 l.
- **Étuve ventilée thermostatée** : pour maintenir une température de (110 ± 5) °C.
- **Thermomètre** : gradué en degré Celsius.
- **Spatule**.

- Dessiccateur.**❖ Mode opératoire**Description du test à la tache :

- Après chaque injection de colorant, le test à la tache consiste à prélever à l'aide de la tige de verre une goutte de la suspension et de la déposer sur le papier filtre. La tache qui se forme est composée d'un dépôt central de matériau, en général d'une couleur bleue foncée, entouré d'une zone humide incolore.
- La quantité de suspension prélevée par la goutte doit permettre d'obtenir un dépôt dont le diamètre est compris entre 8 mm et 12 mm.
- Le test est considéré comme positif si, dans la zone humide, une auréole bleue claire persistante d'environ 1 mm apparaît autour du dépôt central.

Préparation de la suspension :

- On verse (500 ± 5) ml d'eau distillée ou d'eau déminéralisée dans le bécher et on ajoute la prise d'essai séchée en remuant bien avec la spatule.
- On agite la solution de colorant ou bien la mélanger uniformément. On remplit la burette de solution colorée et on place la solution restante dans un endroit sombre.
- On règle l'agitateur sur la vitesse de 600 tr/min et on positionne les ailettes à environ 10 mm du fond du bécher.
- On met en marche l'agitateur et on déclenche le chronomètre, on agite le contenu du bécher pendant 5 min à (600 ± 60) tr/min, puis on agite continuellement à (400 ± 40) tr/min pendant la poursuite de l'essai.

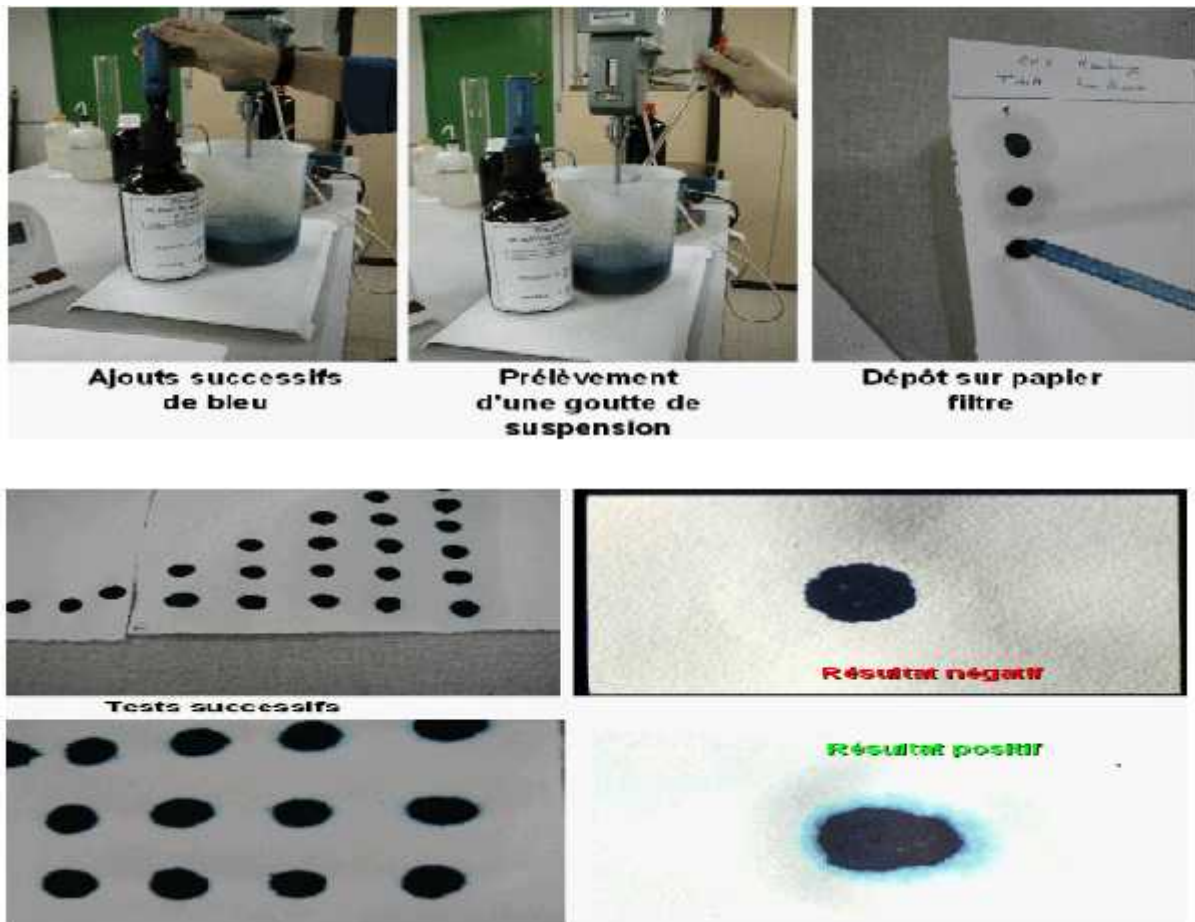


Figure II.8 : mode opératoire de l'essai de bleu de méthylène [65].

❖ Calcul et expression des résultats

La valeur de bleu de méthylène, MB, exprimée en grammes de colorant par kilogramme de fraction 0/2 mm est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$MB = \frac{V_1}{M} \times 100$$

Où :

M_1 : la masse de la prise d'essai, en grammes ;

V_1 : le volume total de solution de colorant injectée, en millilitres.

II.1.7. Mesure du coefficient de friabilité d'un sable (NF P 18 – 576)

❖ Appareillage

-Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage, dont un jeu de tamis de 0,1 – 0,2 – 1 – 2 – 4 et 8 mm d'ouverture et d'au moins 200 mm de diamètre.

Appareillage spécifique

- Appareil Micro-Deval.
- Charge broyante constituée par des billes sphériques en acier inox.

❖ Mode opératoire

Prise d'échantillon :

-La masse de l'échantillon envoyé au laboratoire est au moins égale à 2 kg, l'essai est effectué sur un sable 0,2-2 mm ou 0,2-4 mm.

Préparation de l'échantillon pour essai :

- On tamise par voie humide le matériau sur un tamis 0,2 mm et 2 mm ou 4 mm. On sèche à l'étuve à 105 °C, jusqu'à masse constante, c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1 %.
- On homogénéise et on pèse l'échantillon pour essai qui doit être de 500 g \pm 2 g.

Exécution de l'essai :

- On introduit la charge dans le cylindre d'essai, puis les 500 g de matériau préparé.
- On ajoute 2,5 l d'eau.
- On met le cylindre en rotation à la vitesse de 100 tr/min \pm 5 tr/min pendant 1500 t ou bien 15 min.
- On verse ensuite lentement la totalité du contenu du cylindre sur deux tamis superposés de 8 mm (pour recueillir la charge abrasive) et de 0,1 mm.
- On lave l'ensemble sous un jet d'eau, jusqu'à eau claire, puis on enlève le tamis de 8 mm.
- On sèche le refus au tamis de 0,1 mm à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- On tamise à sec le refus à 0,1 mm.
- On pèse à 0,1 près le refus sur le tamis de 0,1 mm, soit m' cette masse.

❖ Calcul et expression des résultats

La masse des éléments inférieurs à 0,1 mm produits durant l'essai est égale à $m = 500 - m'$. Le coefficient de friabilité mesuré est alors : $FS = \frac{m}{5}$

II.1.8. Mesure de la teneur en eau w

❖ Appareillage

- **Récipient** : suffisamment grand pour contenir la prise d'essai avant l'essai. Le récipient doit résister à la corrosion et être fermé de sorte à empêcher toute perte d'eau.
- **Agitateur résistant à la chaleur** : tel qu'un couteau ou une spatule.
- **Balance** : de portée convenable et de précision correspondant à 0,02 % de la masse de la prise d'essai.
- **Etuve ventilée** : thermorégulée de façon à maintenir la température à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.
- **Dessiccateur rempli de déshydratant** : à la place du dessiccateur, il est possible d'utiliser pour le refroidissement une enceinte fermée contenant le déshydratant.
- **Plateau** : résistant(s) à la chaleur et suffisant(s) en nombre et en dimensions pour contenir la prise d'essai.

❖ Mode opératoire

- On nettoie et on sèche un nombre de plateaux suffisant pour contenir la totalité de la prise d'essai pendant l'étuvage.
- On pèse le(s) plateau(x) et on enregistre cette masse (M_2).
- On étale la prise d'essai sur le ou les plateaux.
- On pèse le ou les plateaux contenant la prise d'essai humide et on détermine la masse de la prise d'essai (M) par soustraction de la masse du ou des plateaux (M_2).
- On place le ou les plateaux dans l'étuve à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à ce que la masse constante soit atteinte.
- On enregistre les valeurs finale M'_s .

❖ Calcul et expression des résultats

La valeur de la teneur en eau (w) correspond à la masse en eau de la prise d'essai exprimée en pourcentage de la masse de la prise d'essai sèche.

La teneur en eau (w) mesurer est alors :
$$w = \frac{M - M_s}{M_s}$$

Où :

M : est la masse de la prise d'essai, en grammes ;

M'_s : est la masse constante de la prise d'essai séchée, en grammes.

II.1.9. Détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval) (NF P 18-572)

❖ Appareillage

- Jeu de tamis de 1,6 – 4 – 6,3 – 8 – 10 – 14 – 25 – 40 et 50 mm, le diamètre des montures ne doit pas être inférieur à 200 mm.
- Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage.

Appareillage spécifique

- L'appareil micro-Deval est conforme aux caractéristiques essentielles suivant : il comporte un à quatre cylindre creux. Les cylindres d'essai sont en acier inox. Ils sont posés sur deux arbres horizontaux.
- La charge abrasive est constituée par de billes sphériques de $10 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ de diamètre en acier inox.
- Un moteur (environ 1 kW) doit assurer aux cylindres une vitesse de rotation régulière de $100 \text{ tr/min} \pm 5 \text{ tr/min}$.
- Un dispositif doit permettre d'arrêter automatiquement le moteur à la fin de l'essai.



Figure II.9 : Appareil micro-Deval et cylindres [65].

❖ Mode opératoire

Préparation de l'échantillon pour l'essai :

La masse de l'échantillon envoyée au laboratoire est au moins égale à 2 kg pour les gravillons compris entre 4 et 14 mm. L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553.

Préparation de l'échantillon pour essai

- L'essai doit être effectué sur un lot de granulats ayant une granularité conforme à l'une des classes granulaires types.
- On lave l'échantillon et on le sèche à l'étuve à 105°C , jusqu'à masse constante c'est - à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1 %.

- On tamise à sec sur les tamis de la classe granulaire choisie.
- La masse de l'échantillon pour essai est de $500 \text{ g} \pm 2 \text{ g}$ pour les 4 – 14 mm.

Exécution de l'essai

-On introduit dans le cylindre d'essai, disposé d'une ouverture vers le haut, la charge abrasive, puis les 500 g de matériau préparé. La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci- après.

Tableau II.1 : Charge abrasive selon la classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Charge abrasive (g)
4 -6,3	2000 ± 5
6,3-10	4000 ± 5
10-14	5000

- Pour effectuer un essai en présence d'eau, on ajoute 2,5 l d'eau.
- On met les cylindre en rotation à une vitesse de $100 \text{ tr/min} \pm 5 \text{ tr/min}$ pendant 2 h ou 12 000 t.
- Après essai, on recueille le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin d'éviter les pertes de granulat.
- On lave soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre, en recueillant l'eau et les parties minérales entraînées.
- On tamise le matériau dans le bac sur le tamis de 1,6 mm ; la charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8 mm.
- On lave l'ensemble sous un jet d'eau et on retire la charge abrasive (à l'aide d'un aimant par exemple). On procède en plusieurs fois pour faciliter l'opération.
- On sèche le refus à 1,6 mm à l'étuve à 105°C , jusqu'à masse constante.
- On pèse ce refus au gramme près, soit m' le résultat de la pesée.



Figure II.10 : Mode opératoire de l'essai MDE [65].

❖ Calcul et expression des résultats

Le coefficient micro-Deval M_{DE} ou M_{DS} est par définition le rapport :

$$100 \frac{m}{M} = 100 \frac{M-m'}{M}$$

Où :

M : la masse sèche de l'échantillon pour essai

$m = M - m'$: la masse sèche de la fraction passant après l'essai au tamis de 1,6 mm.

II.1.10. Essai de résistance au choc (Los Angeles) (NF P 18-573)**❖ Appareillage**

- Tamis de 1,6 – 4 - 6,3 – 10 – 14 – 16 – 20 - 25- 31,5 - 40 et 50 mm. Leur diamètre ne devra pas être inférieur à 250 mm.
- Matériel nécessaire pour effectuer l'échantillonnage du matériau et une analyse granulométrique par tamisage.

Appareillage spécifique

- La machine Los Angeles comporte : un cylindre creux en acier de $12 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités, ayant un diamètre intérieur de $711 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ et une longueur intérieure de $508 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$.
- Une ouverture de 150mm de largeur, sur toute la longueur du cylindre, permet d'introduire l'échantillon. Pendant l'essai, cette ouverture est obturée d'une façon hermétique aux poussières par un couvercle amovible, tel que la surface intérieur reste bien cylindrique.
- Cette surface cylindrique intérieure est coupée par une tablette en saillie, placée à une distance de 400 mm du rebord du couvercle, distance mesurée le long du cylindre dans le sens de la rotation.
- Charge de boulets : la charge est constituée par des boulets sphériques de $47 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ de diamètre et pesant entre 420 et 445 g, en acier. Ces boulets ne doivent pas s'user de façon trop irrégulière.
- Un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation régulière comprise entre 30 et 33 tr/min.
- Un bac destiné à recueillir les matériaux après essai.
- Un compte-tours de type rotatif, arrêtant automatiquement le moteur au nombre de tours voulu.



Figure II.11 : Machine Los Angeles [65].

❖ Mode opératoire

Prise d'échantillon :

-La masse de l'échantillon envoyée au laboratoire sera au moins égale à 15 kg. L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme expérimentale P 18-553.

Préparation de l'échantillon pour essai :

- On tamise l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.
- On lave le matériau tamisé et on le sèche à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante c'est-à-dire jusqu'à ce que deux passées successives de l'échantillon, séparée d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1%.
- La masse de l'échantillon pour essai sera de $5000 \text{ g} \pm 5 \text{ g}$.

Exécution de l'essai :

-On introduit avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai. La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après.

Tableau II.2 : Nombre de boulets en fonction de la classe granulaire.

Classe granulaire (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)
4-6,3	7	3080
6,3-10	9	3960
10-14	11	4840

- On fait effectuer à la machine 500 rotations, à une vitesse régulière comprise entre 30 tr/min et 33 tr/min.
- On recueille le granulat dans un bac placé sous l'appareil, en ayant soin d'amener l'ouverture, juste au-dessus de ce bac, afin d'éviter les pertes de matériau.
- On tamise le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm, le matériau étant pris en plusieurs fois afin de faciliter l'opération.
- On lave le refus au tamis de 1,6 mm puis on égoutte et on sèche à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- On pèse ce refus une fois séché. Soit m' le résultat de la pesée.



Figure II.12 : mode opératoire de l'essai Los Angeles [65].

❖ Calcul et expression des résultats

Le coefficient Los Angeles (L_A) est, par définition, le rapport :

$$L_A = \frac{5 - m}{5}$$

Où :

m: masse sèche du refus à 1,6 mm

II.1.11. Mesure des masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau (EN 1097-6)

a) sable :

❖ Appareillage

- **Etuve ventilée** : à thermostat, capable de maintenir la température à $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$.
- **Balance** : d'une précision de 0,1 % de la masse de la prise d'essai.
- **Bain d'eau** : contrôlé par thermostat, pouvant être maintenu à $(22 \pm 3) ^\circ\text{C}$.
- **Thermomètre** : précis à 0,1 $^\circ\text{C}$.
- **Tamis de contrôle** : de 0,063 mm, 4 mm.
- **Plateaux** : de taille appropriée et pouvant être chauffés dans une étuve ventilée sans que leur masse s'en trouve modifiée.
- **Chiffons absorbant, doux et secs**.

- **Matériel de lavage.**

- **Minuteur.**

Appareillage spécial pour la méthode au pycnomètre appliquée aux grains entre 0,063 mm et 4 mm

- **Pycnomètre** : se composant d'un flacon en verre, ou tout autre récipient approprié, d'une capacité comprise entre 500 ml et 5 000 ml, constante à 0,5 ml pendant la durée de l'essai.

- **Moule métallique** : tronconique de (40 ± 3) mm de diamètre au sommet et de (90 ± 3) mm, à la base, et de (75 ± 3) mm de haut. Le métal doit avoir une épaisseur minimale de 0,8 mm.

- **Pilon métallique** : pesant (340 ± 15) g, avec une face de pilonnage plate de (25 ± 3) mm de diamètre, à utiliser avec le moule métallique.

- **Entonnoir** : en verre ordinaire (pouvant remplacer le moule et le pilon métallique).

- **Plateau creux** : fabriqué dans un matériau imperméable à l'eau,

- **Source d'air chaud** : telle qu'un sèche cheveux.

❖ Mode opératoire

- On lave la prise d'essai sur un tamis de 4 mm et de 0,063 mm afin d'éliminer les grains les plus fins. On rejette les grains refusés au tamis de 4 mm.

- On immerge la prise d'essai préparée dans le pycnomètre rempli d'eau à (22 ± 3) °C et on élimine l'air occlus en faisant tourner et osciller doucement le pycnomètre en position inclinée. On place le pycnomètre dans le bain d'eau et on maintient la prise d'essai à une température de (22 ± 3) °C pendant $(24 \pm 0,5)$ h. À l'issue du trempage, on retire le pycnomètre du bain d'eau et on élimine tout reste d'air occlus en faisant tourner et osciller doucement le pycnomètre.

- On fait déborder le pycnomètre en rajoutant de l'eau et on place le couvercle en évitant de piéger de l'air dans le récipient. Puis on sèche l'extérieur du pycnomètre et on le pèse (*M2*). On note la température de l'eau.

- On laisse décanter la majeure partie de l'eau recouvrant la prise d'essai et on vide le pycnomètre sur un plateau.

- On remplit à nouveau le pycnomètre avec de l'eau et on remet le couvercle comme précédemment. Puis on sèche l'extérieur du récipient et on le pèse (*M3*). On note la température de l'eau.

- La différence entre les mesures de la température de l'eau du pycnomètre effectuées pour les pesées *M2* et *M3* ne doit pas dépasser 2 °C.

- On étale la prise d'essai imbibée pour obtenir une couche régulière au fond du plateau.

- On expose les granulats à un faible courant d'air chaud pour évaporer l'humidité en surface.
- On remue fréquemment les granulats afin de bien les sécher tous jusqu'à ce qu'on ne puisse plus voir de trace d'humidité en surface et que les grains n'adhèrent plus les uns aux autres.
- On laisse l'échantillon refroidir à température ambiante tout en le remuant.
- Pour s'assurer que le séchage de surface est atteint, on pose le moule tronconique sur le fond du plateau, le plus grand diamètre dirigé vers le bas. On remplit le moule avec une partie de la prise d'essai en cours de séchage et on la tasse légèrement à 25 reprises à l'aide du pilon. Ne pas rajouter de granulats après les avoir tassés. On soulève doucement le moule. Si le cône de granulats ne s'effondre pas, il faut poursuivre le séchage et on recommence l'essai jusqu'à ce que le cône s'effondre une fois le moule retiré.
- On pèse la prise d'essai saturée et séchée en surface ($M1$). On sèche les granulats dans une étuve ventilée à une température de $(110 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante ($M4$).
- On note toutes les masses de la prise d'essai avec une précision supérieure ou égale à 0,1 % ($M4$).

b) Gravillons et cailloux :

❖ Mode opératoire

La masse de l'échantillon pour essai doit avoir une masse M supérieure à $0,2 D$, avec M exprimé en kilogrammes et D en millimètres.

- On pèse l'échantillon, soit M sa masse.
- On note ensuite la masse M_s de cet échantillon, séché sans lavage préalable.
- On lave l'échantillon sur le tamis de 4 mm.
- On le sèche à l'étuve à $105 ^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ jusqu'à masse constante.
- On le laisse refroidir et on le pèse ; soit M_s sa masse.
- On immerge l'échantillon dans l'eau pendant 24 h à $20 ^\circ\text{C}$ à la pression atmosphérique.
- On pèse ensuite l'échantillon après l'avoir épongé soigneusement avec un chiffon absorbant, les gros éléments étant essuyés individuellement, soit M_a sa masse.
- Après la pesée précédente, on place l'échantillon imbibé dans le panier en toile métallique, on le suspend au fléau de la balance, on l'immerge dans l'eau à 20°C à l'aide du récipient prévu à cette effet, on agite le panier afin d'éliminer toute présence de bulles d'air avant la pesée.

II.2. Essais sur le bitume

Le bitume de type 35/50 provient de l'entreprise NAFTAL Béjaia.

❖ Méthode d'essais et d'analyses

L'analyse du bitume 35/50 au laboratoire a concerné les caractéristiques suivantes :

II.2.1. Détermination du Point de ramollissement – Méthode Billes et Anneaux (NF EN 14270)

❖ Appareillage

- **Appareillage bille et anneau**, qu'il soit manuel, semi-automatique ou automatique (annexe III).
- **Anneaux**, au nombre de deux, en laiton, à épaulement (annexe III)
- **Plaque de coulage**, métallique, plate et uniforme d'environ 50 mm ´x 75 mm, et d'une épaisseur comprise entre 1,5 mm et 2,0 mm, avec les rebords tournés vers le bas (annexe III).
- **Billes**, au nombre de deux, en acier, de $9,50 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ de diamètre et d'une masse de $3,50 \text{ g} \pm 0,05 \text{ g}$.
- **Dispositifs de guidage des billes**, en laiton, et au nombre de deux, permettant de centrer les billes d'acier, un pour chaque anneau.
- **Porte-anneaux et assemblage** (annexe III).
- **Bain**, un bécher en verre pouvant être chauffé, d'un diamètre intérieur d'au moins 85 mm et d'une profondeur d'au moins 120 mm.
- **Thermomètres**.
- **Agitateur**, soit un agitateur magnétique chauffant muni d'un barreau aimanté revêtu de manière appropriée, d'une longueur d'environ 40 mm et d'un diamètre de 8 mm.



Figure II.13 : Appareillage Bille et anneau [17].

❖ Mode opératoire

- On choisit le liquide de bain et le thermomètre.
- On assemble l'appareillage avec les anneaux d'échantillon, les dispositifs de centrage de billes et le thermomètre, et on remplit le bain pour que la surface du liquide se trouve à $50 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$ au-dessus du rebord supérieur des anneaux. À l'aide de pincettes, on place les deux billes d'acier au fond du bain, ou dans un récipient indépendant à 5°C . il faut s'assurer que les billes ont la même température que le reste de l'assemblage.
- On place le bain dans de l'eau glacée pour le refroidir jusqu'à $5^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ (bain d'eau), ou on le réchauffe lentement jusqu'à atteindre $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ (bain de glycérol), pour établir et maintenir la température initiale adéquate pendant 15 min avec le dispositif en place. Veiller à ne pas souiller le liquide du bain avec des substances qui pourraient affecter les résultats.
- À l'aide de pincettes, on saisit les billes et on les place dans chacun des dispositifs de centrage.
- On agite le liquide du bain et on le chauffe par en-dessous, afin que la température augmente à une vitesse uniforme de $5^\circ\text{C}/\text{min}$. On protège le bain des courants d'air par des déflecteurs, si nécessaire. L'augmentation de température doit être régulière pendant toute la durée de l'essai.
- Pour chaque ensemble bille et anneau, on note la température indiquée par le thermomètre au moment où le liant bitumineux qui entoure la bille touche la plaque inférieure si la mesure est effectuée à l'aide de la méthode manuelle, ou touche le rayon lumineux si un appareillage semi-automatique ou automatique est employé. Ne pas effectuer de correction pour tenir compte de la partie émergente de la tige du thermomètre.



Figure II.14 : Remplissage des anneaux et préparation de l'essai [17].

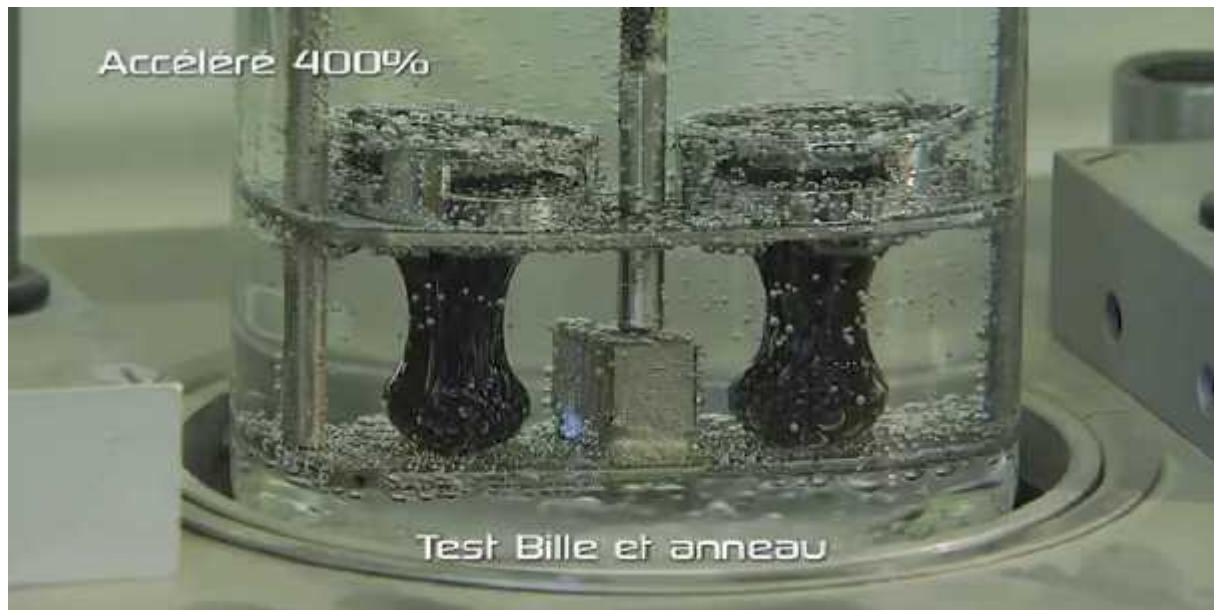


Figure II.15 : Test bille et anneau [17].

II.2.2. Détermination de la pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426)

❖ Appareillage

- **Pénétromètre**, dispositif permettant au porte-aiguille de se déplacer verticalement sans frottement mesurable, et permettant la détermination de la pénétration de l'aiguille au dixième de millimètre près.
- **Aiguille de pénétration**, en acier inoxydable trempé à cœur.
- **Récipient d'échantillon d'essai**, cylindrique, à fond plat, en verre ou en métal. La profondeur interne du récipient doit être supérieure d'au moins 10 mm à la pénétration attendue et elle ne doit pas être inférieure à 35 mm.
- **Bain-marie**, d'une capacité d'au moins 10 l, et capable d'assurer la stabilité de la température de l'échantillon d'essai dans une plage de $\pm 0,1$ °C.
- **Cuve de transfert**, pour les essais conduits en-dehors du bain-marie. Cette cuve doit avoir une capacité minimale de 350 ml.
- **Dispositif de chronométrage**, précis à 0,1 s.
- **Thermomètres, à tige solide**

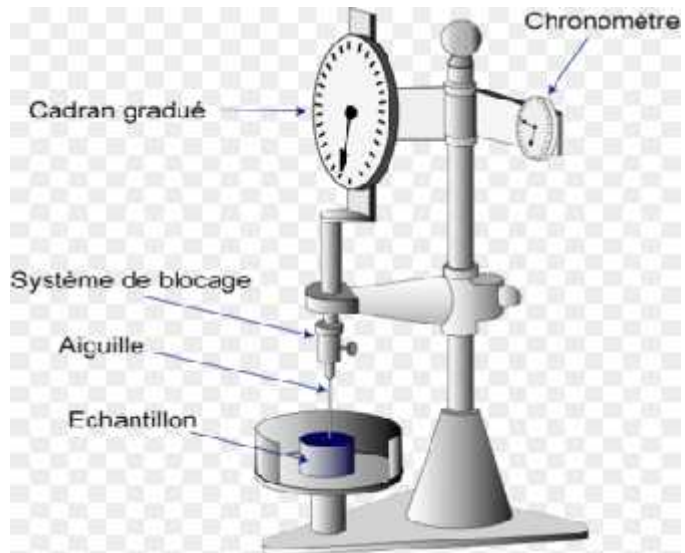


Figure II.16 : Pénétromètre [17].

❖ Mode opératoire

- On prélève l'échantillon de bitume en s'assurant que l'échantillon de l'essai est bien représentatif que l'échantillon de laboratoire tout en vérifiant que ce dernier soit homogène et non contaminé.
- On chauffe le matériau pour le liquéfier à une température de 30°C maximum.
- On prend au minimum 100grs de l'échantillon et on procède à son remplissage dans le récipient d'échantillon. (la profondeur de bitume dans le récipient doit être supérieure d'au moins 10mm)
- On le chauffe pour qu'il devienne liquide à une température comprise entre 125° à 147°C.
- On le laisse refroidir à la température ambiante, entre 15° et 30°C pendant 90 minutes.
- On place l'échantillon dans un bain marie à une température constante pendant 10minutes.
- On met en place le récipient.
- On abaisse lentement l'aiguille jusqu'à ce que sa pointe coïncide avec son image réfléchiée par la surface de l'échantillon puis on libère rapidement la porte aiguille pendant un laps de temps prescrit (5secondes).

- On mesure avec l'indicateur le déplacement vertical de l'aiguille avec une précision de 0,01mm.
- On effectue au moins deux opérations.



Figure II.17 : Essai de pénétrabilité à l'aiguille (photo prise en Mars 2017).

II.2.3. Détermination de la densité relative

Vu le manque de matériels, nous n'avons pas pu manipuler cet essai au sein du laboratoire.

L'ingénieur responsable du laboratoire s'est contenté de nous donner le résultat du dernier essai fait sur ce type de bitume (NAFTAL Béjaia).

II.3. Formulation des mélanges bitumineux

L'étude de formulation comprend :

- Le choix de la formule granulaire ;
- La détermination des teneurs en bitume ;
- La composition des mélanges bitumineux ;
- Les essais de performance mécanique.

II.3.1. Choix de la formule granulaire

Le mélange granulaire est constitué des trois fractions : 0/3, 3/8 et 8/15.

Tableau II.3 : Fraction granulaire retenue (BB 0/14).

Fraction granulaire	Pourcentages pondéraux
8/15	35%
3/8	20%
0/3	45%

II.3.2. Détermination des teneurs en bitume

Les teneurs en bitume sont déterminées à partir de la formule suivante :

$$\text{Teneur en liant} = K \sqrt[5]{\sum r}$$

Avec :

$$\sum : \text{Surface spécifique conventionnelle} = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f \left(m^2 / kg \right)$$

- G= pourcentage des éléments supérieurs à 6,3 mm ;
- S= pourcentage des éléments compris entre 6,3 mm et 0,315 mm ;
- s= pourcentage des éléments compris entre 0,315 mm et 0,08 mm ;
- f= pourcentage des éléments inférieurs à 0.08 mm.

K : Module de richesse ;

r : Coefficient correcteur, destiné à tenir compte de la masse volumique réelle des granulats si elle diffère de 2,65 T/m³.

Les modules de richesse, utilisés pour la composition du Béton Bitumineux, varient entre 3,45 et 3,75, pour une surface spécifique : $\sum = 12,52 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Les teneurs en bitume obtenues sont :

Tableau II.4 : Teneurs en bitume retenues pour les compositions du Béton Bitumineux.

Module de richesse	3,45	3,60	3,75
Teneur en bitume (%)	5,30	5,53	5,76

II.3.3. Préparation des mélanges bitumineux (NF P 98-250-1)

Les mélanges bitumineux sont fabriqués au laboratoire

❖ Appareillage

- Malaxeur à palettes verticales et cuve mobile de 25 kg.

La température de référence est définie comme suit en fonction de la catégorie de liant hydrocarboné utilisée :

Bitume 35/50 : 160 ± 5 °C

Préparation des granulats :

Les granulats sont séchés dans une étuve ventilée à une température comprise entre 90 et 110°C jusqu'à masse constante.

Préparation du liant :

Une quantité de liant correspondant aux besoins de l'essai est prélevée sans dépasser 100° C. Le liant prélevé est placé dans des récipients remplis et fermés.

Malaxage :

La cuve contenant les granulats à mélanger est installée sur le malaxeur en essayant de limiter au maximum les déperditions de température. Le malaxeur est actionné pendant $30 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$ afin de bien homogénéiser les granulats.

Le liant est versé. Pour déterminer la masse de liant introduite dans le mélange, il est procédé par pesées successives, à 0,1% près, du récipient contenant le liant. La masse du liant ne doit pas dépasser de plus de 1% en valeur relative la masse de liant théorique sinon la gâchée doit être rejetée. La durée de malaxage doit conduire à un mélange visuellement homogène. Sa durée totale est comprise entre 2 et 5 min.



Figure II.18 : Malaxeur (photo prise en Mars 2017).

Remplissage des moules et compactage :

- On pèse la quantité m de mélange hydrocarboné à 0,1% près en valeur relative. Après avoir placé un disque de papier en fond de moule et mis en place la hausse, on introduit le mélange en une seule fois dans le moule légèrement enduit d'oléate de soude glycéринé. Un disque de papier est mis en place à la surface du mélange hydrocarboné.
- Les moules sont remplis successivement (pour chaque teneur en liant, on réalise 6 moules) (annexe IV).
- L'éprouvette n°1 est immédiatement compactée, les autres moules étant placés dans une étuve.
- La dame étant maintenue perpendiculairement au moule, le mélange est compacté en appliquant 50 coups de marteau de la dame 55 ± 5 s (annexe IV).
- Le moule est retourné après avoir retiré la hausse afin de présenter la face inférieure de l'éprouvette au compactage (annexe IV).



Figure II.19 : Dame de compactage (photo prise en Mars 2017).

II.3.4. Les essais de performance mécanique sur éprouvettes bitumineuses

II.3.4.1. Essai de stabilité et de fluage Marshall

❖ Appareillage

- Moule de compactage.
- Piston extracteur.
- Une dame de compactage
- Un bloc support en chêne
- Au moins trois mâchoire d'écrasement

Appareillage spécifique

- 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 d'essai. L'erreur de justesse de ce dispositif doit être de $\pm 1 \%$ de la valeur lue, et la répétabilité de $\pm 0,5\%$ de la valeur lue.
- Un bain thermostatique pouvant contenir au moins trois éprouvettes en trois mâchoires d'écrasement.

❖ Mode opératoire

- Les éprouvettes et les mâchoires d'écrasement sont immergées dans l'eau à $60^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ pendant $30 \text{ min} \pm 1 \text{ min}$. compte tenu de la durée de l'essai il est nécessaire d'échelonner les mises en immersion des éprouvettes, toutes les 5 min.

- Les éprouvettes sont placées dans la mâchoire d'écrasement .L'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. La vitesse du plateau de la presse est réglée à $0,85 \text{ mm/s} \pm 0,1 \text{ mm/s}$. Ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute.
- La stabilité Marshall est la valeur de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette.
- Le fluage Marshall est la valeur de l'affaissement de l'éprouvette, selon son diamètre vertical, au moment de la rupture (ou à l'instant où on atteint le maximum de la charge).



Figure IV.20 : presse Marshall (photo prise en Mars 2017).

II.3.4.2. Essai de tenue à l'eau Duriez

D'autres éprouvettes (deux pour chaque teneur en liant) sont immergées dans l'eau, et d'autres sont laissées à l'état sec pendant 7 jours, puis chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression simple (essai Duriez).



Figure II.21 : conservation des éprouvettes pour essai Duriez (photo prise en Mars 2017).

▪ **Détermination de la masse volumique réelle (vraie) de l'enrobé bitumineux**

Elle peut être calculée à partir des masses volumiques des composants obtenues par diverses méthodes (eau, solvant, huile de paraffine) et est alors notée **MVR**, à partir des formules suivantes :

$$MVR = \frac{M_{dg} + M_{btu}}{V_g + V_{btu}}$$

D'où :

$$MVR = \frac{1}{\frac{\% G_1}{p_1} + \frac{\% G_2}{p_2} + \dots + \frac{\% G_T}{p_T} + \frac{T}{p}}$$

Avec :

%Gi : pourcentage des fractions granulaires.

p_{gn} : leurs masses volumiques respectives.

p_b : masse volumique du bitume (1,03 Mg/m³).

▪ **Détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses**

❖ **Appareillage**

- Marmite chauffante.
- La paraffine pour remplir et fermer les vides.
- La balance hydrostatique.

❖ Mode opératoire

- Après préparation des éprouvettes, on pèse l'éprouvette sèche et on mesure son épaisseur ;
- Introduire l'éprouvette dans la paraffine cette dernière et ramener à l'état liquide sous l'effet de la température.
- Retirer l'éprouvette ayant les fissures comblées avec la paraffinée qui s'est consolidé instantanément.
- Mesurer le poids de l'éprouvette paraffinée, et la réintroduire dans l'eau mesurer sa masse à nouveau.

II.3.4.3. Détermination de la compacité (%)

La compacité et le pourcentage de vides sont déterminés à partir des mesures de masse volumique réelle (vraie) MVR et de masse volumique apparente MVA et par les relations suivantes :

$$C\% = 100 \times (MVA / MVR) \Rightarrow \text{compacité}$$

$$v\% = 100 [1 - (MVA / MVR)] \Rightarrow \% \text{ de vides}$$

Conclusion

Cet ensemble d'essais effectués précédemment sur les matériaux entrant dans la formulation de l'enrobé de référence, nous permet de déterminer les différentes caractéristiques des granulats et du bitume, pour ne pas risquer de les utiliser dans un domaine où ils ne seront pas satisfaisants aux normes exigées.

Chapitre III

Introduction

Ce chapitre regroupe les différents résultats des essais d'identification réalisés sur les granulats, le bitume et l'enrobé dans le but d'évaluer l'impact de la granulométrie et la propreté des granulats sur les bétons bitumineux.

Pour cela, notre étude a consistée en la recherche, pour des formulations différentes, la meilleure composition granulométrique du mélange qui débouche sur un mélange ayant une bonne aptitude au compactage et qui pourrait donner une bonne stabilité au mélange hydrocarboné.

Pour parvenir à cet objectif, les résultats de performance mécanique de notre formulation sont comparés aux résultats de 3 autres formulations dans le but d'obtenir des performances meilleures de point de vue stabilité, fluage, compacité et tenue à l'eau.

Suivant les spécifications (Ministère des Travaux Publics) en possession, les formulations de béton bitumineux envisagé devra répondre à un certain nombre de caractéristiques mécaniques Marshall et Duriez, entre autres les performances suivantes :

- stabilité Marshall : $S \geq 10,5 \text{ KN}$;
- fluage : $F \leq 4 \text{ mm}$;
- compacité : $92\% < C < 98\%$;
- Tenue à l'eau $s/Sm \geq 0,75$.

III.1. Résultats et discussions des essais sur granulats

III.1.1. Résultats et discussion de l'Analyse granulométrique par tamisage (Gr)

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.1 : Analyse granulométrique des granulats 0/3, 3/8 et 8/15.

Tamis (mm)	% Tamisât cumulé		
	Gravillons 8/15	Gravillons 3/8	Sable 0/3
16	97,22		
14	79,64		
12,5	57,4		
10	26,87		
8	8,23	95,28	
6,3	1,79	66,24	
4	0,92	5,78	90,52
2	0,91	1,48	57,3
1	0,9	1,24	35,01
0,5	0,9	1,21	22,64
0,25	0,89	1,16	16,26
0,125	0,89	1,12	12,7
0,08	0,88	1,1	11,36
0,063	0,88	1,08	10,73

Les résultats détaillés de l'analyse granulométrique sont présentés en annexes (annexe 1).

Les résultats de l'analyse granulométrique des granulats sont présentés dans la figure III.1 :

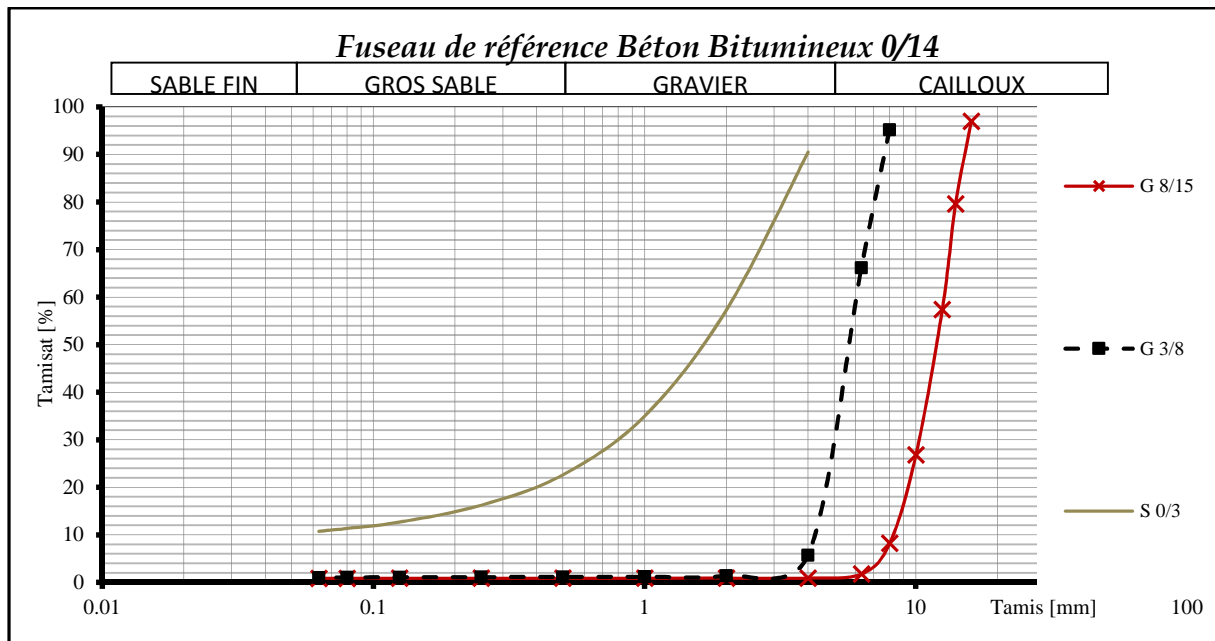


Figure III.1 : Courbe granulométrique des granulats 0/3, 3/8 et 8/15.

A partir de la courbe granulométrique, on définit les caractéristiques de cette de dernière en déterminant les coefficients suivant :

- Coefficient de HAZEN
- Coefficient de courbure.

Détermination des diamètres suivants : D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60} qui représentent respectivement les diamètres des mailles des tamis qui permettent le passage de : 10%, 30%, 50%, 60% du matériau de départ.

▪ **Gravillons 8/15**

$D_{10} = 8,3 \text{ mm}$; $D_{30} = 10,1 \text{ mm}$; $D_{50} = 10,25 \text{ mm}$; $D_{60} = 10,4 \text{ mm}$.

▪ **Gravillons 3/8**

$D_{10} = 4,3 \text{ mm}$; $D_{30} = 5 \text{ mm}$; $D_{50} = 5,8 \text{ mm}$; $D_{60} = 6 \text{ mm}$.

a- Coefficient de HAZEN (coefficient d'uniformité)

Le coefficient de HAZEN permet de savoir si la granulométrie est étalée ou serrée (uniforme). Ce coefficient est défini par la relation suivante :

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

$C_u < 2$: la granulométrie est serrée (uniforme).

$C_u > 2$: la granulométrie est étalée.

Dans notre cas

- Pour les gravillons 8/15 : $C_u = D_{60}/D_{10} = 1,25$

$C_u < 2$ alors, la granulométrie est serrée (uniforme).

- Pour les gravillons 3/8 : $C_u = D_{60}/D_{10} = 1,395$

$C_u < 2$ alors, la granulométrie est serrée (uniforme).

b- Coefficient de courbure

Le coefficient de courbure vient en complément du coefficient de HAZEN dans la classification des produits.

Le coefficient de courbure est donné par l'équation suivante :

$$C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \cdot D_{60}$$

Si : $1 < C_c < 3$: Alors la granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie).

$C_c < 1$ ou $C_c > 3$: Alors la granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

Dans notre cas :

- Pour les gravillons 8/15 : $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \cdot D_{60} = 1,18$

$1 < C_c < 3$, cela implique que la granulométrie est bien graduée (continuité bien répartie).

- Pour les gravillons 3/8 : $C_c = (D_{30})^2 / D_{10} \cdot D_{60} = 0,97$

$C_c < 1$, cela implique que la granulométrie est mal graduée (continuité mal répartie).

c- Module de finesse du sable

Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins ne soient ni en excès, ni en trop faible proportion.

Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MF).

Le module de finesse est d'autant plus petit que le granulat est riche en éléments fins.

• Norme Française [NFP 18-540]

Le module de finesse est égal au 1/100e de la somme des refus cumulés exprimée en pourcentages sur les tamis de la série suivante : 0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5 mm.

$$MF = \frac{1}{100} \text{ Refus cumulés en \% des tamis } \{0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,50 - 5\}$$

• Norme Européenne [EN 12620]

$$FM = \frac{1}{100} \text{ Refus cumulés en \% des tamis } \{0,125 - 0,25 - 0,50 - 1 - 2 - 4\}$$

Lorsque MF est compris entre :

- 1,8 et 2,2 : le sable est à majorité de grains fins,
- 2,2 et 2,8 : on est en présence d'un sable préférentiel,
- 2,8 et 3,3 : le sable est un peu grossier.
- > 3,3 : le sable est grossier.

Dans notre cas :

$$FM = \frac{1}{1} (87,3 + 83,74 + 77,36 + 64,99 + 42,70 + 9,48) = 3,66$$

Alors le sable est grossier

III.1.2. Résultats et discussion de la mesure du coefficient d'Aplatissement (A)

Les résultats de la mesure du coefficient d'Aplatissement des granulats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Résultats de la mesure du coefficient d'Aplatissement des granulats.

Gravillons 8/15				
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Classes granulaires d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passants Me (g)	$\frac{M}{M}$ 100
16 - 20	174,3	10	4,5	2,58
12,5 - 16	1306,2	8	122,8	9,40
10 - 12,5	1156	6,3	89,7	7,76
8 - 10	556,3	5	44,9	8,07
6,3 - 8	144,9	4	13,2	9,11
5 - 6,3	17	3,15	3,4	20
4 - 5	5,2	2,5	0,5	9 ,62
M = Mg = 3359,9		Me = 279		
A= $\frac{\Sigma M}{M}$ 100 = 8,30				

Gravillons 3/8				
Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles		
Classes granulaires d/D (mm)	Mg (g)	Ecartement des grilles (mm)	Passants Me (g)	$\frac{M}{M} 100$
12,5 - 16	4,2	8	1	23,80
10 - 12,5	5,1	6,3	1,4	27,45
8 - 10	124,7	5	16,1	12,91
6,3 - 8	707,2	4	111,5	15,77
5 - 6,3	732,7	3,15	123,2	16,81
4 - 5	337	2,5	88,7	26,32
M = Mg = 1910,9		Me = 341,9		
$A = \frac{\sum M}{M} 100 = 17,89$				

La qualité d'un béton bitumineux dépend beaucoup de la qualité des granulats, Parmi ces qualités la forme, Les graviers dont la forme se rapproche de la sphère ou d'un cube sont excellents et on peut les utiliser pour faire un béton de qualité. Au contraire, les graviers en aiguilles ou en plaquette sont à éviter car ils donnent un mauvais béton poreux en général.

Suite aux résultats obtenus qui sont de l'ordre de 8,30% et 17,89%, et qui sont inférieur à 25% comme le stipule la spécification du Ministère des Travaux Publics, on tire la conclusion suivante : les granulats peuvent être utilisés pour la confection des bétons bitumineux.

III.1.3. Résultats et discussion de la détermination de la propreté superficielle (P)

Le tableau III.3 présente les résultats de la propreté superficielle des granulats

Tableau III.3 : Résultats de la propreté superficielle des granulats.

Classe granulaire	Granulats 3/8		Granulats 8/15	
	Desséché	Lavé sur le tamis 0,5 mm	Desséché	Lavé sur le tamis 0,5 mm
Masse humide de l'échantillon	$M_{1h} = 2109,8$	$M_h = 1995,6$	$M_{1h} = 3715,8$	$M_h = 3416,7$
Masse sèche de l'échantillon	$M_{1s} = 2108,3$	$m' = 1967,6$	$M_{1s} = 3714,8$	$m' = 3389,3$
Masse sèche de l'échantillon soumis à l'essai	$M_s = \frac{M}{M} M_h = 1994,18$		$M_s = \frac{M}{M} M_h = 3415,78$	
Masse sèche des éléments < 0,5 mm	$m = M_s - m' = 26,58$		$m = M_s - m' = 26,48$	
Propreté superficielle	$P = \frac{m}{M} 100 = 1,33$		$P = \frac{m}{M} 100 = 0,77$	

Les résultats obtenus lors de l'essai de Propreté Superficielle sont respectivement 1,33 et 0,77, sont exploitables pour la mise en place des bétons bitumineux, car ils répondent aux spécifications du Ministère des travaux Publique selon la norme.

III.1.4. Résultats et discussion de l'essai d'équivalent de sable à 10% de fines (ES)

Les résultats de l'essai d'équivalent de sable à 10% de fines sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.4 : Résultats de l'essai d'équivalent de sable à 10% de fines.

Essai N°	Hauteur totale (h ₁)	Hauteur De sable à Vue (h' ₂)	Hauteur de sable à Piston (h ₂)	E.S à vue $100 \times \frac{h'_2}{h}$	E.S à piston $100 \times \frac{h_2}{h}$	Valeur moyenne
01	11,6	8,8	8,5	75,86	73,28	72,66
02	11,8	8,8	8,5	74,58	72,03	

A partir des résultats obtenus, et à l'aide du tableau ci-dessous, on pourra classer le sable suivant ses valeurs de l'équivalent de Sable à vue et à piston :

Tableau III.5 : Références pour déterminer la signification de Esv et Esp.

Es à vue	Es à piston	Nature et qualité du sable
Esv < 65	Esp < 60	Sable argileux – risque de retrait ou de gonflement. Sable à rejeter pour des bétons de qualité.
65 < Esv < 75	60 < Esp < 70	Sable légèrement argileux de propreté admissible pour béton de qualité courante.
75 < Esv < 85	70 < Esp < 80	Sable propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.
Esv 85	Esp 80	Sable très propre – l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton.

- ✓ Pour $E_{sp_{moyenne}} = 72,66$ on a $70 < E_{sp} < 80$ donc selon le tableau, le sable est propre à faible proportion de fines argileuses convenant parfaitement pour les bétons de haute qualité.

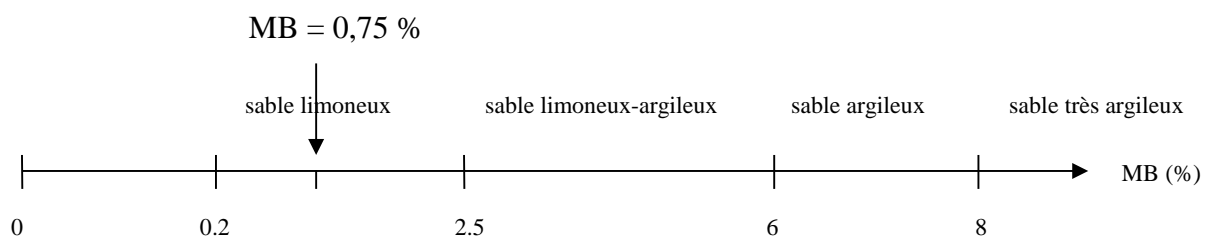
III.1.5. Résultats et discussion de l'essai de bleu de méthylène

Le tableau III.6 présente les résultats de l'essai de bleu de méthylène.

Tableau III.6 : Résultats de l'essai de bleu de méthylène.

Valeur de bleu de méthylène de la fraction 0/2 mm dans les sables ou le tout-venant	
Masse sèche de la prise d'essai de fraction granulométrique 0/2 mm	$M_1 = 200 \text{ g}$
Quantité totale de solution de colorant ajoutée	$V_1 = 15 \text{ ml}$
Valeur MB, exprimé en grammes de colorant par kg de grains de fraction 0/2 mm	
Sans ajout de la Kaolinite	Avec ajout de la kaolinite
$MB = \frac{V_1}{M_1} \times 100 = 0,75\%$	$MB = \frac{V_1 - V_f}{M_1} \times 100$

D'après les résultats obtenus, on peut classer notre échantillon comme sable limoneux (MB= 0,75%)



III.1.6. Résultats de la mesure du coefficient de friabilité d'un sable

Les résultats de la mesure du coefficient de friabilité du sable sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.7 : Résultats de la mesure du coefficient de friabilité d'un sable.

Classe granulaire	Masse sèche du refus à 0,1 mm m' (g)	Masse des éléments < 0,1 mm m=500-m'	Coefficient de friabilité $f_s = \frac{m}{5}$
0,2/2	277,9 g	222,1 g	44,42
	260,9 g	239,1 g	47,82

III.1.7. Résultats de la détermination de la teneur en eau w

Le tableau III.8 présente les résultats de la détermination de la teneur en eau

Tableau III.8 : Résultats de la détermination de la teneur en eau.

	Gravillons 3/8	Gravillon 8/15
Masse de l'échantillon à sa teneur en eau : M	2109,8 g	3715,8 g
Masse de l'échantillon sec : M's	2108,3 g	3714,8 g
Teneur en eau W en %	0,07	0,03

Les teneurs en eau obtenues sont respectivement 0,07% et 0,03% pour les classes granulaires 3/8 et 8/15.

Les conclusions tirées à partir des résultats obtenus sont :

- Les échantillons présentent une proportion négligeable des vides, chose qui explique la teneur en eau minime que possède l'échantillon.
- Les granulats contiennent généralement une certaine quantité d'eau variable selon les conditions météorologiques,

III.1.8. Résultats et discussion de la détermination de la résistance à l'usure (Micro-Deval)

Les résultats de la détermination de la résistance à l'usure sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.9 : Résultats de la détermination de la résistance à l'usure.

Essai	Classe granulaire	Charge abrasive	Eprouvette	Masse sèche du refus à 1,6 mm	Coefficient Micro Deval M_D	Moyenne
M_{DE}/M_{DS}	10/14	5000 g	1	412,7 g	17,46	17,71
			2	410,2 g	17,96	

III.1.9. Résultats et discussion de l'essai de résistance au choc (Los Angeles)

Le tableau III.10 présente les résultats de l'essai de résistance au choc.

Tableau III.10 : Résultats de l'essai de résistance au choc.

Classe granulaire	Nombre de boulets	Charge abrasive (g)	Masse sèche du refus à 1,6 mm	Coef. Los Angeles
10/14	11	5000 g	3715	25,7

On peut interpréter les résultats obtenus des caractéristiques intrinsèques des granulats à partir du tableau suivant :

Tableau III.11 : Caractéristiques intrinsèques des granulats (LA et MDE).

LA	MDE	QUALITE
LA < 15	MDE < 13	Très bon
15 LA < 20	13 MDE < 20	Bon à moyen
20 LA < 30	20 MDE < 25	Moyen à faible
LA 30	MDE 25	Médiocre

Les granulats ont des caractéristiques intrinsèques moyennes.

Les granulats sont de classe « C » limiter et peuvent être utilisés en trafic à différentes couches formant le corps de chaussée (couche de fondation, couche de base et couche de roulement), cela dépendra de la classe du trafic en question.

Tableau III.12 : Classe de trafic en fonction d'enrobé.

Type	Classe de trafic
Béton bitumineux	T ₃
Grave bitume	T ₁ -T ₀

Avec :

$$750 < T_0 < 2000. (PL/j)$$

$$300 < T_1 < 750. (PL/j)$$

$$50 < T_3 < 150. (PL/j)$$

PL/j : Trafic de poids lourds par jour.

III.1.10. Résultats de la mesure des masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau

a) Sable :

Les résultats de la mesure des masses volumiques et du coefficient d'absorption d'eau du sable sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.13 : Résultats de la mesure des masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau du sable.

Exécution de l'essai	
Masse pycnomètre + échantillon + eau : M2	1683,4 g
Masse pycnomètre+ eau : M3	1399,8 g
Masse de l'échantillon imbibé surface sèche : M1	453,9 g
Masse de l'échantillon séché : M4	446,4 g

Expression des résultats	
Masse volumique absolue : $pa = \frac{M4}{M4 - (M2 - M3)}$	2,742 t/m ³
Masse volumique réelle : $prd = \frac{M4}{M1 - (M2 - M3)}$	2,621 t/m ³
Masse volumique saturée : $pssd = \frac{M1}{M1 - (M2 - M3)}$	2,665 t/m ³

b) Gravillons et cailloux :

Le tableau III.14 présente les résultats de la mesure des masses volumiques et du coefficient d'absorption d'eau des granulats.

Tableau III.14 : Résultats de la mesure des masses volumiques et coefficient d'absorption d'eau des granulats.

Exécution de l'essai	Gravillons 3/8	Gravillons 8/15
Masse de l'échantillon à sa teneur en eau en l'état : M	2109,8 g	3715,8 g
Masse de l'échantillon sec : M's	2108,3 g	3714,8 g
Masse de l'échantillon sec après lavage au tamis 4 mm et séchage à l'étuve : Ms	1084,2 g	1638,5 g
Masse dans l'air de l'échantillon après imbibition pendant 24 h : M_a	1095,9 g	1647,8 g
Masse dans l'eau de l'échantillon imbibé : M'a	681,6 g	1029,7 g

Expression des résultats	Gravillons 3/8	Gravillon 8/15
Masse volumique réelle : $pr = \frac{M}{M - M_a}$	2,617 t/m ³	2,651 t/m ³
Coefficient d'absorption d'eau : $Ab = \frac{M - M}{M} \times 100$	1,08 %	0,57 %
Masse volumique réelle imbibée : $pr_i = \frac{M}{M - M_a}$	2,645 t/m ³	2,666 t/m ³

Les résultats cités dans les tableaux concernant les masses volumiques (masse volumique absolue, réelle, saturées) et le coefficient d'absorption d'eau sont similaires à ceux qui figurent dans les rapports de formulations rédigés par le laboratoire de la MITIDJA des Travaux Publics et sont conformes à la norme française AFNOR.

L'ensemble des résultats de l'analyse des granulats de la carrière d'ENOF Béjaia, ainsi que les spécifications du MTP sont résumés dans les tableaux suivants :

► Gravillons 3/8, 8/15: Caractéristiques de fabrication :

Les caractéristiques de fabrication des gravillons sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.15 : Caractéristiques de fabrication des gravillons.

Désignation	Gr.- Passants (%) à :					A	P	Catégorie XP P 18- 540
	2 D	1,58 D	D	d	0,63 d			
Gravillon 3/8	100	100	95	6	1	17,89	1,33	III
Gravillon 8/15	100	100	93	8	1	8,30	0,77	III
<i>Spécifications</i> MTP PL- MJA<150	100	100	85-99	1-15	3	30	3	-
<i>Spécifications</i> MTP PL- MJA 150						25	2	-

Caractéristiques intrinsèques :

Le tableau III.16 présente les caractéristiques intrinsèques des gravillons.

Tableau III.16 : Caractéristiques intrinsèques des gravillons.

Désignation	Coefficient Los Angeles « LA »	Coefficient micro- Deval « MDE »	LA+MDE	Masse Volumique absolue	Catégorie XP P 18- 545
Gravillon 3/8	25,7	17.71	43,41	2,62	C
Gravillon 8/15				2,65	
<i>Spécifications</i> MTP PL- MJA<150	30	25	-	-	-
<i>Spécification MTP</i>	25	20	-	-	-

■ Sable 0/3 :

Les caractéristiques du sable sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau III.17 : Caractéristiques du sable.

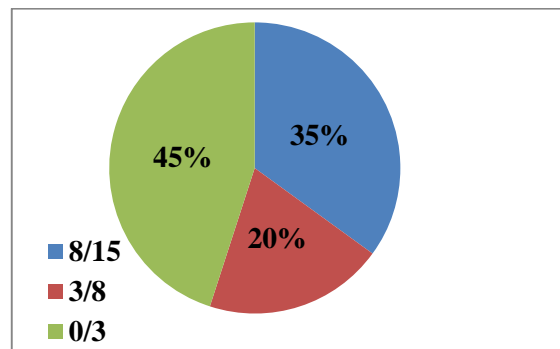
Désignation	Gr.- Passants (%) à :				E.S. à 10% de fines	MB	Masse Volumique absolue	Catégorie XP P 18- 540
	2 D	1,58 D	D	80μ				
Sable 0/3	100	100	91	11	73	0,75	2,74	A
<i>Spécifications</i> MTP	100	100	85 à 99	10 à 22	60	<2	-	-

Choix de la formule granulaire :

Le mélange granulaire est constitué des trois fractions : 0/3, 3/8 et 8/15.

Tableau III.18 : Formule granulaire retenue (BB 0/14) de la formulation étudiée.

Fraction granulaire	Pourcentages pondéraux
8/15	35%
3/8	20%
0/3	45%

**Figure III.2 :** Formule granulaire retenue (BB 0/14) de la formulation étudiée.

La disposition granulaire du squelette minéral, est donnée dans le tableau suivant :

Tableau III.19 : Analyse granulométrique du mélange 0/14 de la formulation étudiée.

Mélange granulaire 0/14		Fuseau de spécification	
Tamis (mm)	Tamisât (%)	Min	Max
14	93	94	100
10	74	72	84
6,3	59	50	66
2	26	28	40
0,08	6	7	10

La courbe granulométrique du mélange granulaire 0/14 est présentée dans la figure III.3 :

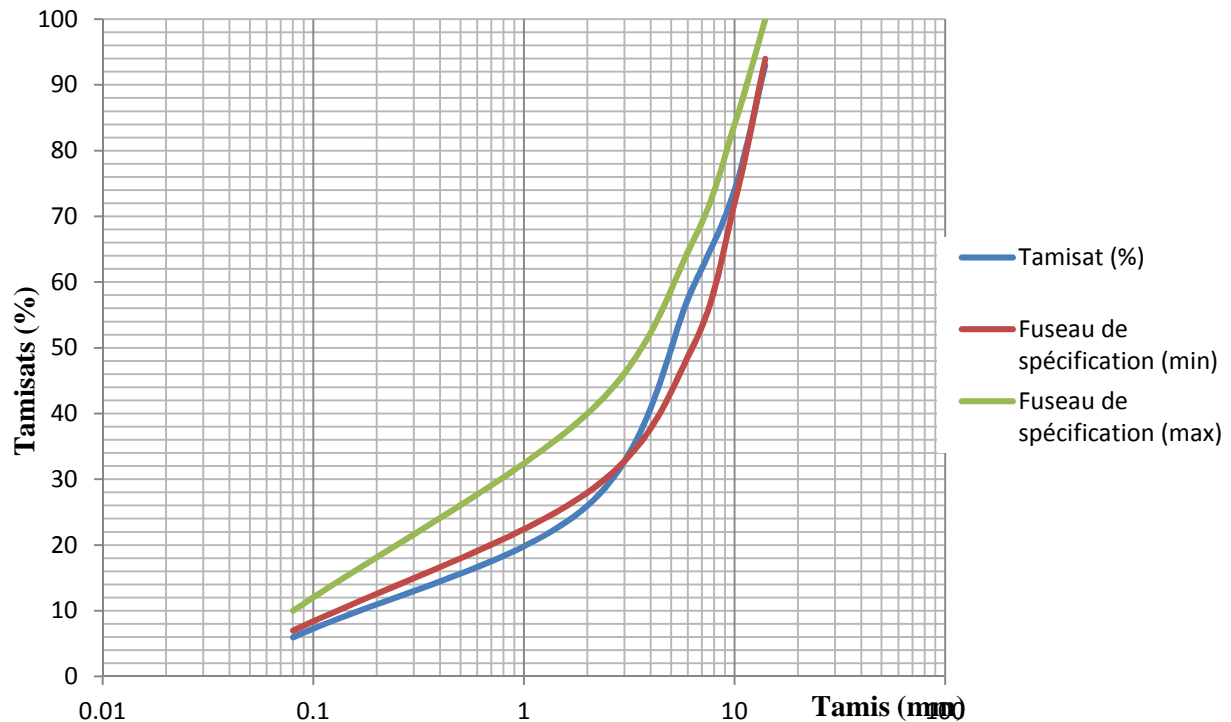


Figure III.3 : Courbe granulométrique du mélange 0/14 de la formulation étudiée.

III.2. Résultats des essais sur le bitume

Détermination des teneurs en bitume

Les modules de richesse, utilisés pour la composition du Béton Bitumineux, varient entre 3,45 et 3,75, pour une surface spécifique de : $\Sigma = 12,52 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Les teneurs en bitume obtenues sont :

Tableau III.20 : Teneurs en bitume retenues pour les compositions du Béton Bitumineux.

Module de richesse	3,45	3,60	3,75
Teneur en bitume (%)	5,30	5,53	5,76

Les résultats de l'analyse du bitume provenant de NAFTAL Béjaia, ainsi que les spécifications du MTP sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau III.21 : Caractéristiques du bitume.

Désignation	Unité	Valeur	<i>Spécifications MTP classe 35/50</i>
Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C	1/10 mm	39,6	35 à 50
Point de ramollissement	°C	56	50 à 57
Densité relative à 25°C	g/ml	1,01	1,0 à 1,10

Les résultats obtenus lors des essais de pénétrabilité de l'aiguille à 25° C, point de ramollissement, densité relative à 25° C sont respectivement : 39.6 (1/10 mm), 56 °C, 1.01 g/ml. Ces dernières sont incluses dans l'intervalle permis par le Ministère des travaux Publics.

Les résultats obtenus témoignent sur le fait que notre bitume répond aux spécifications.

III.3. Résultats des essais sur éprouvettes bitumineuses

III.3.1. Résultats de la détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses

Tableau III.22 : Résultats de la détermination de la masse volumique apparente des éprouvettes bitumineuses.

Teneur en bitume : 5,76%		
N° de l'éprouvette	1	2
Epaisseur en (mm)	62	63
Masse de l'éprouvette sèche (m ₁)	1206	1207
Poids de l'éprouvette paraffinée en (g) (m ₂)	1227,5	1224,3
Poids de l'éprouvette paraffinée dans l'eau en (g) (m ₃)	687,5	685,1
La densité de la paraffine P _{sm} = 0,9		
Masse volumique apparente en (kg/ m ³)		
$P_{bsea} = \frac{m_1}{(m_2 - (\frac{m_2}{P})) - (m_3 - (\frac{m_1}{P}))}$	2,36	2,36

Teneur en bitume : 5,53%		
N° de l'éprouvette	1	2
Epaisseur en (mm)	62	63
Masse de l'éprouvette sèche (m_1)	1200	1204
Poids de l'éprouvette paraffinée en (g) (m^2)	1260,6	1230,9
Poids de l'éprouvette paraffinée dans l'eau en (g) (m^3)	683,8	686,6
La densité de la paraffine $P_{sm} = 0,9$		
Masse volumique apparente en (kg/m^3) $P_{bsea} = \frac{m_1}{(m_2 - (\frac{m_2}{P})) - (m_2 - (\frac{m_1}{P}))}$	2,34	2,34
Teneur en bitume : 5,30%		
N° de l'éprouvette	1	2
Epaisseur en (mm)	62	61
Masse de l'éprouvette sèche (m_1)	1214	1205
Poids de l'éprouvette paraffinée en (g) (m^2)	1240,8	1245,8
Poids de l'éprouvette paraffinée dans l'eau en (g) (m^3)	694,2	686,1
La densité de la paraffine $P_{sm} = 0,9$		
Masse volumique apparente en (kg/m^3) $P_{bsea} = \frac{m_1}{(m_2 - (\frac{m_2}{P})) - (m_2 - (\frac{m_1}{P}))}$	2,35	2,34

Les masses volumiques apparentes citées dans les tableaux sont de l'ordre de : 2.36, 2.34, 2.35 pour les teneurs en bitume respectives : 5.76, 5.53 ,5.30.

Ces résultats vont servir ultérieurement pour le calcul de la compacité, cette dernière n'est autre que le résultat de la masse volumique (estimée après tests) sur la masse volumique réelle calculée théoriquement.

III.3.2. Résultats des essais de performance mécanique

III.3.2.1. Essai Marshall (stabilité et fluage)

Les résultats de stabilité et de fluage sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III.23 : Résultats de l'essai Marshall (stabilité et fluage).

Conduite de l'essai	Teneur en liant : 5,30	Teneur en liant : 5,53	Teneur en liant : 5,76
Stabilité en KN (après 24 h)	9,169	9,271	10,92
Fluage en mm (après 24 h)	3,24	3,55	2,56

L'essai de stabilité Marshall a ressorti les valeurs suivantes : 9.169, 9.271 et 10.92 KN pour les teneurs suivantes respectivement : 5.30, 5.53 et 5.76%

Les conclusions tirées par rapport aux résultats citées précédemment sont :

- Il y a une proportion entre la teneur en liant et la stabilité chose qui justifie l'efficacité des deux premières valeurs qui sont 9,169 et 9,271 respectivement et qui ne satisfont pas les exigences imposées par le ministère des travaux publics qui est (stabilité Marshall 10,5) contrairement à la 3^{ème} valeur qui est de 10,92 KN.

- Les résultats de fluage sont satisfaisants pour les 3 teneurs en liant, mais la teneur 5,76% a présenté le meilleur

III.3.2.2. Essai Duriez (tenue à l'eau)

Tableau III.24 : Résultats de l'essai Duriez.

Conduite de l'essai	Teneur en liant : 5,30	Teneur en liant : 5,53	Teneur en liant : 5,76
Stabilité en KN (après 7 jours dans l'eau) (s)	11,01	10,70	9,69
Fluage en mm (après 7 jours dans l'eau)	3,16	4,83	5,75

Conduite de l'essai	Teneur en liant : 5,30	Teneur en liant : 5,53	Teneur en liant : 5,76
Stabilité en KN (après 7 jours à l'état sec) (Sm)	11,52	11,03	10,41

Fluage en mm (après 7 jours à l'état sec)	3,16	3,37	3,58
---	------	------	------

Tableau III.25 : Résultats de la tenue à l'eau.

Conduite de l'essai	Teneur en liant : 5,30	Teneur en liant : 5,30	Teneur en liant : 5,76
Tenue à l'eau (s/Sm)	0,96	0,97	0,93

Les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableau ci-après :

Tableau III.26 : Résultats des performances mécaniques BB 0/14 de la formulation étudiée.

Désignation	Résultats			Spécifications	
Formule	A	B	C	MTP	
Teneur en bitume (%)	5,30	5,53	5,76	<i>PL-MJA<150</i>	<i>PL-MJA</i>
Densité vraie	2,495	2,482	2,486		
Densité apparente	2,35	2,34	2,36		
Compacité (%)	94,2	94 ,3	94,9	92 à 98	
Stabilité Marshall (KN)	9,169	9,271	10,92	10,5	
Tenue à l’eau s/Sm	0,96	0,97	0,93	> 0,70	> 0,75
Fluage (mm)	3,24	3,55	2,56	4	

Afin d'aboutir à une meilleure appréciation de notre Béton Bitumineux, nous avons réalisé trois formules A, B et C auxquelles correspondent trois teneurs en liant différentes, à savoir : 5.30, 5.53 et 5.76 respectivement.

Le tableau ci-dessus montre que la teneur en liant correspondant à la formule C donne les meilleurs résultats pour tous les paramètres cités dans le tableau précédent.

Les conclusions tirées sont conforme aux stipulations des normes adoptées par le Ministère des Travaux Publics.

III.4. Comparaison des formulations

III.4.1. Choix de la formule granulaire des 3 formulations

Le mélange granulaire est constitué des trois fractions : 0/3, 3/8 et 8/15.

Tableau III.27 : Formule granulaire retenue (BB 0/14) des 3 formulations.

Fraction granulaire	Pourcentages pondéraux de la formulation 1	Pourcentages pondéraux de la formulation 2	Pourcentages pondéraux de la formulation 3
8/15	30%	40%	33%
3/8	25%	15%	23%
0/3	45%	45%	44%

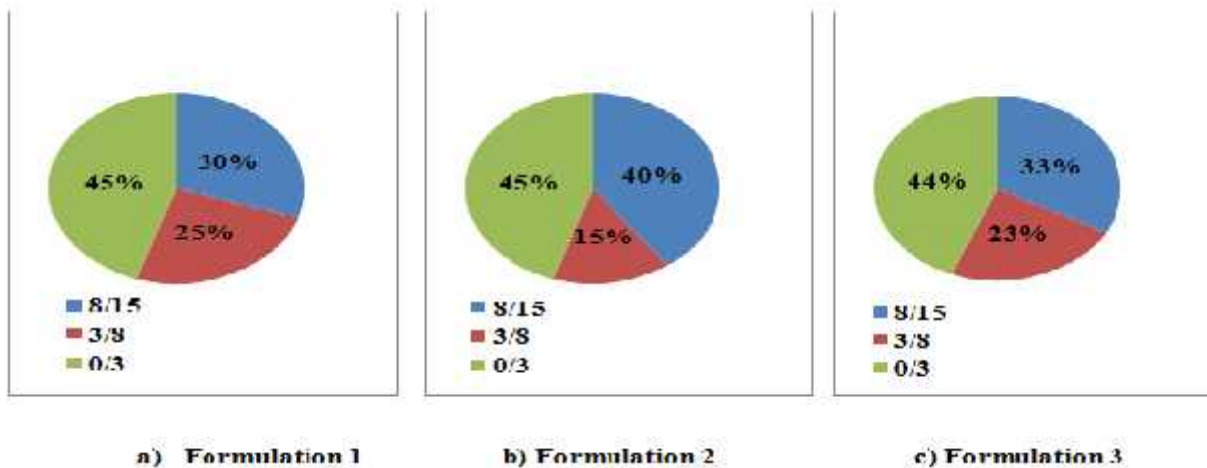


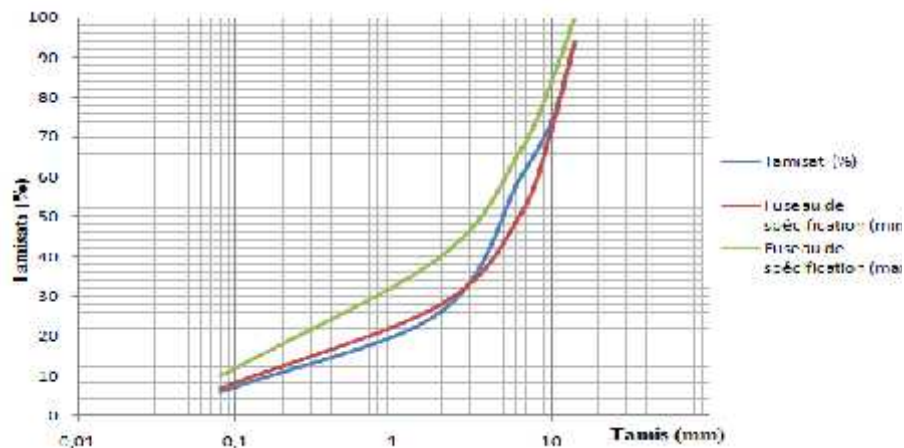
Figure III.4 : Formule granulaire retenue (BB 0/14) des 3 formulations.

La disposition granulaire du squelette minéral, issu de cette formule, est donnée dans le tableau suivant :

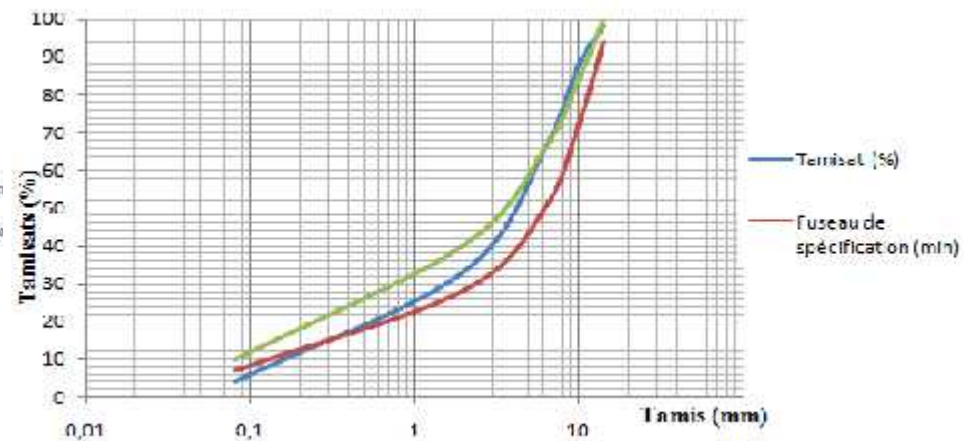
Tableau III.28 : Analyse granulométrique du mélange 0/14 des 3 formulations.

Mélange granulaire 0/14				Fuseau de spécification	
Tamis (mm)	Tamisât (%) Formulation 1	Tamisât (%) Formulation 2	Tamisât (%) Formulation 3	Min	Max
14	98	98	97	94	100
10	88	80	75	72	84
6,3	66	55	58	50	66
2	33	31	30	28	40
0,08	4	6	8	7	10

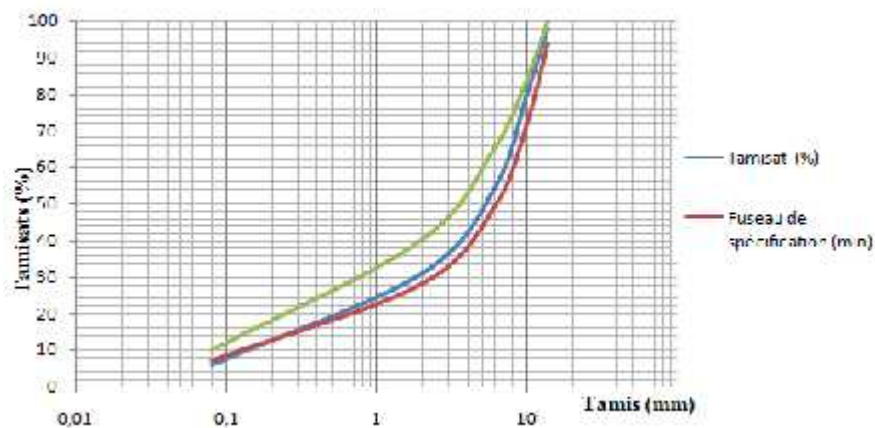
Les courbes granulométriques du mélange granulaire 0/14 des 3 formulations sont présentés dans la figure III.5.



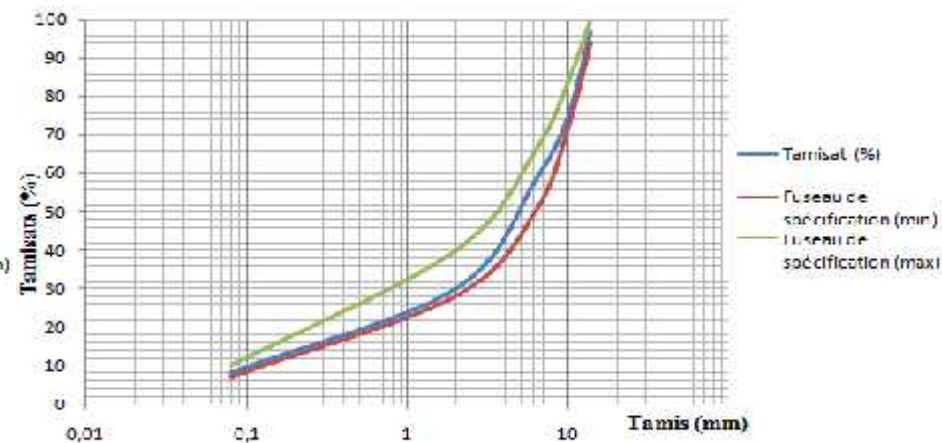
Formulation étudiée



Formulation 1



Formulation 2



Formulation 3

Figure III.5 : Courbe granulométrique du mélange (0/14) des 4 formulations.

III.4.2. Résultats des essais de performance mécanique des 4 formulations

Les résultats de performance mécanique des 4 formulations sont présentés dans le tableau III.29.

Tableau III.29 : Résultats des performances mécaniques BB 0/14 des 4 formulations.

Désignation	Résultats										Spécifications MTP	
Formulation	Formulation étudiée			Formulation 1		Formulation 2		Formulation 3				
Formule	A	B	C	A	B	A	B	A	B	C		
Teneur en bitume (%)	5,30	5,53	5,76	5,55	5,78	5.48	5.72	5,69	5,94	6,19	PL-MJA<150	PL-MJA
Densité théorique	2,442	2,456	2,438	2,44	2,43	2.431	2.423	2,456	2,448	2,441		
Densité apparente	2,35	2,34	2,36	2,38	2,40	2.328	2.311	2,303	2,304	2,304		
Compacité moyenne en (%)	96,2	95 ,3	96,8	95.69	98.76	95.8	95.4	93,8	94,1	94,4	95 à 97	
Stabilité Marshall (KN)	9,169	9,271	10,92	13.32	10.86	15.76	13.88	14,09	11,60	11,33	10,5	
Tenue à l'eau s/Sm	0,96	0,97	0,93	0.88	0.75	0.75	0.85	/	0,98	0,97	0,75	
Fluage (mm)	3,24	3,55	2,56	3.85	4.56	3.06	4.90	2,93	2,39	4,24	4	

III.4.3. Comparaison et discussion des résultats de performance mécanique des formulations

La figure 1 (stabilité Marshall) illustre les résultats de stabilité concernant les 4 formulations.

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de stabilité pour les 4 formulations sont conformes aux normes exigées par le Ministère des Travaux Publics.

Les résultats de la figure 1 (stabilité Marshall) montrent que le mélange ayant une courbe granulométrique qui s'intègre dans le fuseau de spécification et un pourcentage de tamisât proche de la valeur maximale exigée dans les spécifications, cela montre une meilleure stabilité Marshall (c'est le cas de la formulation 2, et d'un degré moins la formulation 1).

Les résultats obtenus à partir de la figure 2 (fluage) montrent que les valeurs de cette dernière pour les 4 formulations sont conformes aux normes exigées par le Ministère des Travaux Publics.

Les résultats des essais de fluage des éprouvettes bitumineuses sont étroitement liés avec ceux de la stabilité Marshall par une proportionnalité inverse, chose qui contredit les résultats obtenus.

Cette contradiction peut être justifiée par les résultats exposés dans la figure 3 (compacité). Cette dernière démontre que la compacité influence le fluage car le faible affaissement des éprouvettes est dû au pourcentage des vides qu'elles contiennent. Au début de la compression par la presse Marshall, les éprouvettes vont se compacter de plus et les vides se combleront de petit à petit. Et c'est au moment où les vides seront éliminés que l'affaissement commence à apparaître.

La comparaison des résultats de la tenue à l'eau des différentes formulations a montré que la formulation 3 et celle étudiée représentent une meilleure tenue à l'eau avec 0,98 et 0,93 respectivement par rapport aux deux autres formulations, chose qui contredit les résultats de compacité obtenus. Donc on peut conclure que les résultats de tenue à l'eau sont dus au pourcentage du bitume utilisé du fait que l'épaisseur du film de bitume empêche l'eau de s'infiltrer et causant un détachement des granulates.

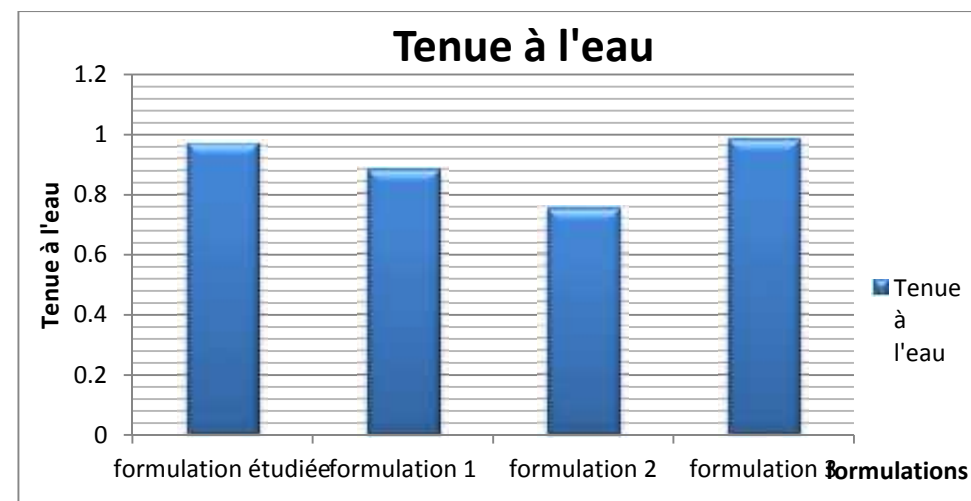
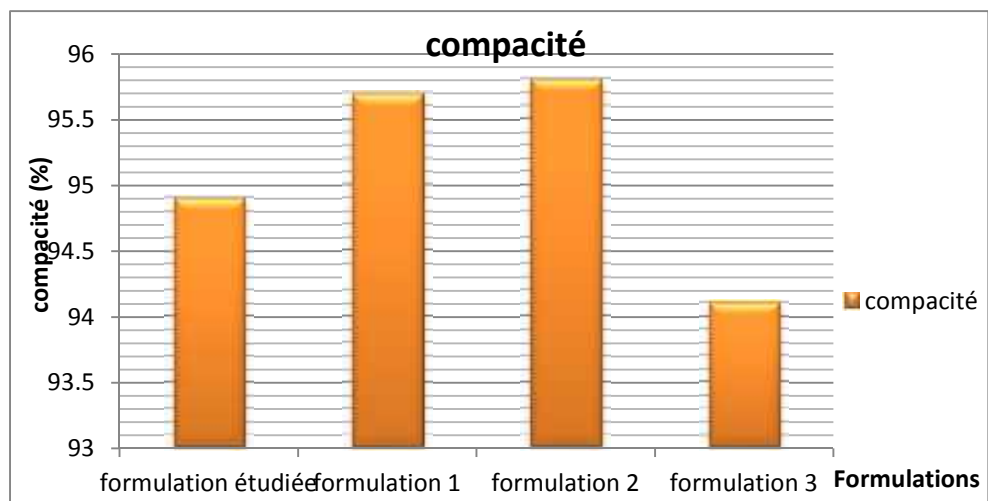
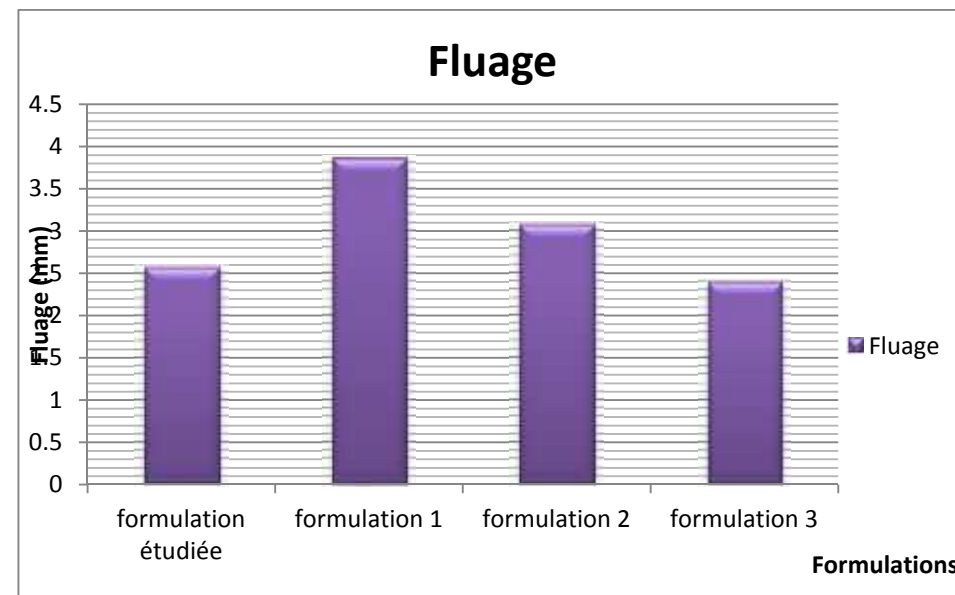
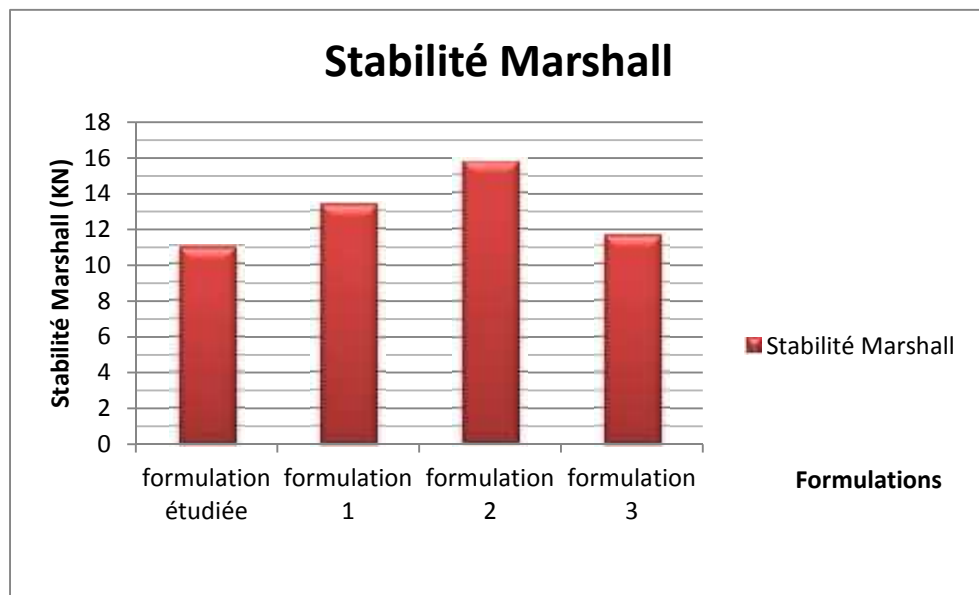


Figure III.6 : Résultats de performances mécaniques des 4 formulations

Conclusion

Au vu des résultats obtenus au laboratoire sur les constituants (granulats, liant) qui composent la formule BB 0/14, et à travers les essais de performances mécaniques, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- Les granulats de la carrière ALGRAN BEJAIA ont les caractéristiques requises pour une utilisation dans la confection de Béton Bitumineux 0/14.
- Le bitume analysé a les caractéristiques requises pour la classe de bitume 35/50, utilisable dans la confection des enrobés bitumineux;
- Les essais de performances mécaniques de la formulation étudiée ont montré une stabilité moyenne et une résistance au fluage, et une bonne tenue à l'eau, sur les teneurs retenues par rapport aux résultats des 3 autres formulations.
- La comparaison de la formulation étudiée par rapport aux 3 autres formulations montre l'impact de la fraction granulaire retenue et de la disposition du squelette minéral sur la stabilité et la durabilité des bétons bitumineux, et cela à travers les résultats de stabilité, fluage, compacité et tenue à l'eau.

Conclusion générale

De nos jours, les routes tissent de véritables toiles d'araignées afin de relier les zones d'économie complémentaires et de permettre un rapprochement industriel, économique et socio culturel entre les populations.

Ainsi, un grand profit est tiré par les individus de toutes les sphères de la société lorsque les routes sont de qualité adéquate à une bonne circulation des véhicules.

Dans ce sens, nous avons essayé d'éclaircir quels sont les problèmes et les contraintes face auxquelles sont confrontées les couches de roulement, de même, nous avons essayé d'apprécier les performances de ces dernières lorsqu'elles sont soumises à divers essais, tests et maintes formulations à l'échelle du laboratoire.

Il en résulte que :

- Les granulats de la carrière ENOF Béjaia montrent des caractéristiques géométriques (module de finesse, aplatissement et qualité des fines) et physique (les masses volumiques, teneur en eau et résistance à la fragmentation) acceptables pour la confection des différents types d'enrobés bitumineux (couche d'assise, couche de liaison et couche de roulement).
- La présence d'impuretés influence défavorablement l'adhésion bitume-granat et provoque ainsi une chute de résistance.
- L'échantillonnage est une étape primordiale pour une meilleure caractérisation des granulats, il permet de fournir des informations sur une population globale, avec un niveau de fiabilité acceptable et de choisir un sous-ensemble qui représente le plus fidèlement possible les caractéristiques de la population entière.
- L'étude de la répartition dimensionnelle d'un échantillon est une étape tranchante permettant une élaboration d'enrobés ou de bétons de qualité, du point de vue résistance, étanchéité et même durabilité.
- L'essai pénétrabilité à l'aiguille permet de mesurer la résistance à la pénétrabilité d'un bitume afin de lui donner sa classe correspondante.
- Les mélanges bitumineux sont conçus pour répondre aux exigences, et leur formulation (proportions et caractéristique des constituants) varie selon le rôle assuré par l'enrobé dans la chaussée, le type de trafic ainsi que les conditions climatiques.

- Les propriétés mécaniques et la durabilité des enrobés bitumineux sont assurées par la stabilité de l'édifice granulaire, par les propriétés cohésives du bitume et par une bonne adhésion entre le bitume et les granulats.
- Pour une bonne adhésion du bitume au granulat, il doit y avoir contact entre le bitume et les granulats. Cependant, en présence d'obstacles physiques tels que les poussières, ou l'argile à la surface des granulats, il peut y avoir recouvrement sans qu'il y ait adhésion.
- L'infiltration des eaux influence négativement l'adhésivité passive des bétons bitumineux, chose qui accélère le détachement des granulats de la matrice provoquant ainsi sa détérioration et affectant directement sa durabilité.
- Le malaxage confère une correcte répartition spatiale des différents constituants de l'enrobé bitumineux ainsi une bonne adhésivité entre le liant et le granulat.

En comparant la formulation étudiée par rapport aux 3 autres formulations de référence, nous avons tirés que :

- La disposition des squelettes minéraux a une influence remarquable sur les performances mécanique des enrobés bitumineux.
- La connaissance des caractéristiques mécaniques et des lois de comportement des matériaux routiers est indispensable pour concevoir des enrobés bitumineux de qualité.
- Les enrobés bitumineux sont des corps viscoélastiques, leur réponse mécanique dépend fortement des variations d'essais qui peuvent être classées en deux types : variables de formulation (granulométrie, nature de liant, teneur en liant, compacité...) et variables de sollicitation (température, contraintes appliquées...).

Perspectives

Au terme de notre travail, nous conseillons timidement que les travaux futurs portés sur le même sujet puissent prendre en considération les points suivants :

- Procéder à des essais de presse à cisaillement giratoire (PCG)
- Des tests de fatigue et d'orniérage.
- Variation plus poussée de la provenance des granulats.

Afin d'aboutir à une meilleure compréhension de l'impact des granulats sur la qualité des bétons bitumineux, nous aurions voulu si le temps, les moyens matériels et les compétences de procéder à des essais de presse à cisaillement giratoire (PCG), des tests de fatigue et d'orniérage à l'échelle du laboratoire

Aussi une variation plus poussée de la provenance des granulats aurait été un choix judicieux quant à l'appréciation de l'influence de la variation des paramètres intrinsèques des granulats liés aux variations de leurs origines sur la qualité et les performances des mélanges bitumineux soumis à des maintes formulations

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1]. **BELKADA.Z, KARL.N** «Amélioration de l'adhésivité liant granulat par l'ajout de dopes et leur influences sur les caractéristiques mécaniques» PFE,ENTP,1994.
- [2]. International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 15 No. 1 Mar. 2016, p 141-152.
- [3]. LCPC n 114 juillet, 1982.
- [4]. **BARON.J, OLIVER J-P** «La durabilité des bétons », presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1995.
- [5]. Revue générale des routes, n°788, Octobre 2000.
- [6]. **LALOU.A**, Rapport « plan de tir 2015 ».
- [7]. **DUPAIN.R, LANCHAN R, SAINT.J, ARROMAN** « Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire »1999.
- [8]. **DAHMANI.O** « Contribution à l'étude de l'adhésivité passive liée aux enrobés à chaud »
PFE, USTHB, 1996.
- [9]. NF EN 933-1 : norme européenne, essais pour déterminer le caractéristique géométrique des granulats, partie 1 : détermination de la granularité –analyse granulométrique par tamisage. AFNOR 1997.
- [10]. **BOUABDALLAH.Z, RABIA.S** « Etude de la modification des bitumes sur leur adhésivité aux granulats », Thèse d'ingénieur d'état en Génie Civil, Université des Sciences et de la Technologie HOUARI BOUMEDIENNE, 2001.
- [11]. NF P 18-597 : norme européenne, détermination de la propreté des sables : équivalent de sable a 10 de fines, AFNOR 1990.
- [12]. NF P 18-592 : norme européenne, essais de bleu de méthylène, AFNOR 1990.
- [13]. NF P 18-576 : norme européenne, mesure du coefficient de friabilité des sables, AFNOR 1990.

- [14]. NF EN 933-3 : norme européenne, essais pour déterminer les caractéristiques géométrique des granulats, partie 3 : détermination de la forme des granulats-coefficient d'aplatissement AFNOR 1997.
- [15]. NF EN 1097-6 : norme européenne, essais pour déterminer les caractéristiques mécanique et physique des granulats, partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau, juin 2001.
- [16]. Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française, « Le bitume : histoire d'un matériau routier », Ed décembre, 2011.
- [17]. **LESUEUR.D**, « The colloïdal structure of bitumen : consequences on the rheologie and the mecanismes of bitumen modification », Advances in colloid and interface science, 2009, p234.
- [18]. **LAFONTAINE.M**, « bitumes, asphaltes, goudrons, enrobés... », INRS, 2006.
- [19]. **BEGHIN.A**, « Apport de mesures rhéologiques et de pelage à l'analyse de la rupture de liants bitumineux », Version 1-8 Juillet 2009.
- [20]. **DEHOUCHE.N**, « Etude de la stabilité de bitumes modifiés par des copolymères caoutchouteux de type styrène-butadiène-styrène (SBS) et acétate de vinyle et d'éthylène (EVA) », Thèse de Magister, Université A. Mira de Bejaia, 2009.
- [21]. **LARADI.N**, « Caractérisation des liants hydrocarbonés utilisés en Algérie, bilan et perspective », 1st workshop bitumes, USTHB-NAFTAL, Avril 2004.
- [22]. **NGUYEN.H**, « Etude numérique de la fissuration d'un milieu viscoélastique : Analyse de l'essai de rupture sur bitume », Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Septembre 2008.
- [23]. **EL BEZE.L**, « Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux : Identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport », Thèse de doctorat, Université Paul Cézanne Aix-Marseille III, Décembre 2008.
- [24]. GNM ST PTB, « Bitumes et travaux routiers », 03 Juillet 2012.

- [25]. Institut des sciences et des techniques de l'équipement et de l'environnement pour le développement (ISTED), « Le savoir-faire français de matière en émulsions de bitume », 1989.
- [26]. **ALBERTO.E, TUAREZ.P** « Emulsions inverses très concentrées, formulation, comportement rhéologique et modélisation », thèse de doctorat, 2010.
- [27]. **BENNOUR.ED, CHIRAGA**, « Fabrication des émulsions, leurs stockages, Murissement sur chantier et rupture », 1st workshop bitumes, USTHB-NAFTAL, Mai 2004.
- [28]. **Carmel jolicoeur, PhD**, professeur Département de chimie université de Sherbrooke «Etude du mécanisme d'adhésion entre un liant bitumineux et un granulat ».
- [29]. **ZEMMIRI.A A** «Comparaison des formulations d'enrobés à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniérage» Certificat d'études supérieures - ENTPE de Lyon 2008, 112 p.
- [30]. **RAYMOND.M** « L'adhésivité » 1987.
- [31]. **JAN.S, SHELLEKENS.J C A, VONK.WC, WILSON.PN** « Etude des mécanismes d'adhésion et de désenrobage des bitumes routiers » p 191,1974.
- [32]. **FROUIN.L** «Etude expérimentale des interactions surfaces minérales-bitume » rapport de recherche , LCPC, n 154 ,juin 1989.
- [33]. **FROMM.H** «The mécanisme of asphalt stripping from aggregate surfaces», proceeding of asphalt paning technologists.
- [34].**VARLAND.G** « L'étanchéité dans la construction ».
- [35]. **LCPC** «Le problème de l'adhésivité liants hydrocarbonés – granulats».
- [36].**DAHMANI.O** « Contribution à l'étude de l'adhésivité passive liée aux enrobés à chaud ».PFE,USTHB,1996.
- [37].**AIROLA.C, BONNVIE, SSVENDSEN.S** (nordic liaison com tee for atomic energy) «Longtermproperties of bituminized wost products » technical research of Filand,p88,1985.
- [38]. Guide technique «Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud», fascicule2 (La formulation), CTPP, Février 2004.

- [39]. **LAMOTHE.S** «Enrobé grenu : influence du dosage en filler et de l'ajout d'un sable roulé sur le couple ouvrabilité-ornière» Mémoire présenté à l'école de Technologie supérieur de l'université de Québec ,2004.
- [40]. **SIDIBÉ.M** «Etude de l'utilisation des granulats de type silixite en géotechnique routière (notamment en couches de base et revêtement des couches de chaussées» projet de fin d'étude de l'école polytechnique de Tries, Université CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR, Juillet 1995.
- [41].**DONGMO.B J** «Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses» Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquée de Lyon, 2005, 264 p.
- [42]. **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.** Essai Marshall. Projet de mode opératoire, RE. E2. Paris : Dunod, 1973. 13p.
- [43]. **Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.** Fabrication de plaques d'enrobés au compacteur de plaques LPC. Avant projet de mode opératoire. Paris : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Décembre 1981, 21p.
- [44]. **NGUYEN.M L** « Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux» Thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliques des Lyon. 2009, 264 p.
- [45]. **BENEDETTO.D** « écarts entre état des connaissances et application» journée LAVOC. Genève.1998.
- [46]. **ALI.B, SHAHROUR.I, WOZNICA.K** «Etude du comportement mécanique des chaussées souples application à la prévision de l'orniérage» communication au 17ème Congrès Français de Mécanique.
- [47]. **EL BEZE.L** «Recyclage à chaud des agrégats d'enrobés bitumineux: Identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport» Thèse de Doctorat de l'Université Paul CÉZANNE, Décembre 2008.

Annexes

Annexe I : Analyse granulométrique des granulats

Gravillons 8/15 :

Echantillonnage		Analyse granulométrique		
Echantillon pour séchage	Tamis (mm)	Masse des refus cumulés : Ri (g)	% Refus cumulés	% Tamisats cumulé
Masse humide M _{1h} = 3715,8 g			$\frac{R}{M} \cdot 100$	$100 - [\frac{R}{M} \cdot 100]$
Masse sèche M _{1s} = 3714,8 g	20			
	16	84,4	2,78	97,22
Echantillon pour analyse	14	616,2	20,36	79,64
	12,5	1289,5	42,60	57,40
Masse humide M _h = 3027,41 g	10	2213,4	73,13	26,87
	8	2777,4	91,77	8,23
Masse sèche après lavage M _{s1} = 3005,4 g	6,3	2972,5	98,21	1,79
	4	2998,7	99,08	0,92
Masse totale sèche M _s = (M _{1s} /M _{1h}) M _h M _s = 3026,59 g	2	2999,1	99,09	0,91
	1	2999,3	99,10	0,90
	0,50	2999,4	99,10	0,90
	0,25	2999,6	99,11	0,89
	0,125	2999,8	99,11	0,89
	0,08	2999,9	99,12	0,88
	0,063	3000,1	99,12	0,88

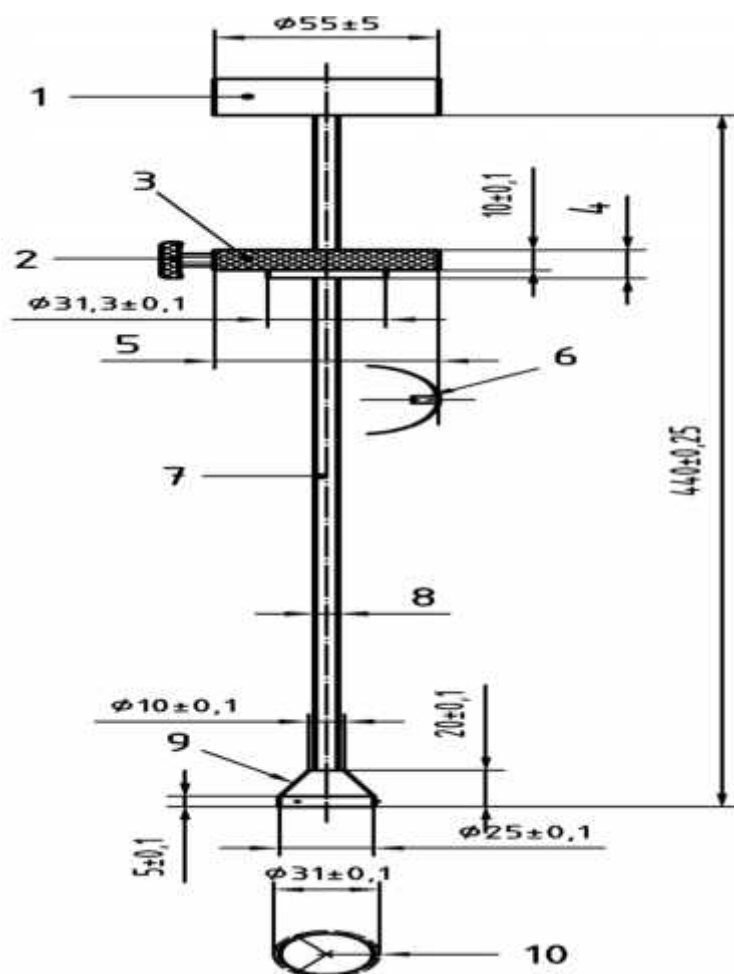
Gravillons 3/8 :

Echantillonnage		Analyse granulométrique		
Echantillon pour séchage	Tamis (mm)	Masse des refus cumulés : Ri (g)	% Refus cumulés	% Tamisats cumulé
Masse humide M _{1h} = 2109,8 g			$\frac{R}{M} \cdot 100$	$100 - [\frac{R}{M} \cdot 100]$
Masse sèche M _{1s} = 2108,3 g	20			
	16			
Echantillon pour analyse	14			
	12,5			
Masse humide M _h = 1616,64 g	10			
	8	76,3	4,72	95,28
Masse sèche après lavage M _{s1} = 1600,4 g	6,3	545,4	33,76	66,24
	4	1522,1	94,22	5,78
Masse totale sèche M _s = (M _{1s} /M _{1h}) M _h M _s = 1615,49 g	2	1591,5	98,52	1,48
	1	1595,5	98,76	1,24
	0,50	1596	98,79	1,21
	0,25	1596,8	98,84	1,16
	0,125	1597,4	99,88	1,12
	0,08	1597,8	98,90	1,10
	0,063	1598,1	98,92	1,08

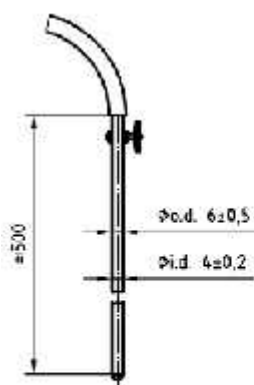
Sable 0/3 :

Echantillonnage		Analyse granulométrique		
Echantillon pour séchage	Tamis (mm)	Masse des refus cumulés : Ri (g)	% Refus cumulés	% Tamisats cumulé
Masse humide $M_{1h} = 2109,8 \text{ g}$			$\frac{R}{M} \cdot 100$	$100 - [\frac{R}{M} \cdot 100]$
Masse sèche $M_{1s} = 2108,3 \text{ g}$	20			
	16			
Echantillon pour analyse	14			
	12,5			
Masse humide $M_h = 1616,64 \text{ g}$	10			
	8			
Masse sèche après lavage $M_{s1} = 1600,4 \text{ g}$	6,3			
	4	84,5	9,48	90,52
Masse totale sèche $M_s = (M_{1s}/M_{1h}) \cdot M_h$ $M_s = 1615,49 \text{ g}$	2	380,5	42,70	57,30
	1	579	64,99	35,01
	0,50	689,2	77,36	22,64
	0,25	746,1	83,74	16,26
	0,125	777,8	87,30	12,70
	0,08	789,7	88,63	11,36
	0,063	795,4	89,27	10,73

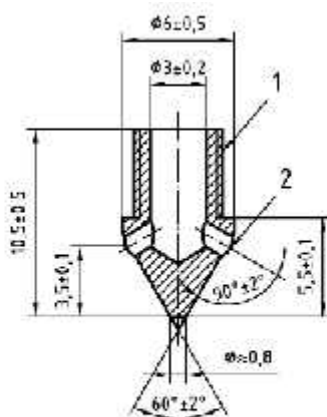
Annexe II : Dimensions en millimètre de l'appareillage de l'essai équivalent de sable



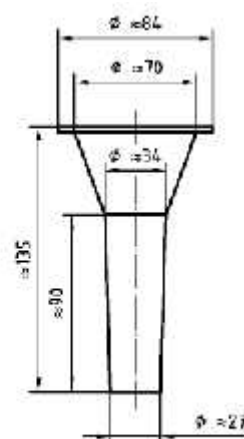
Piston d'essai



Tube laveur



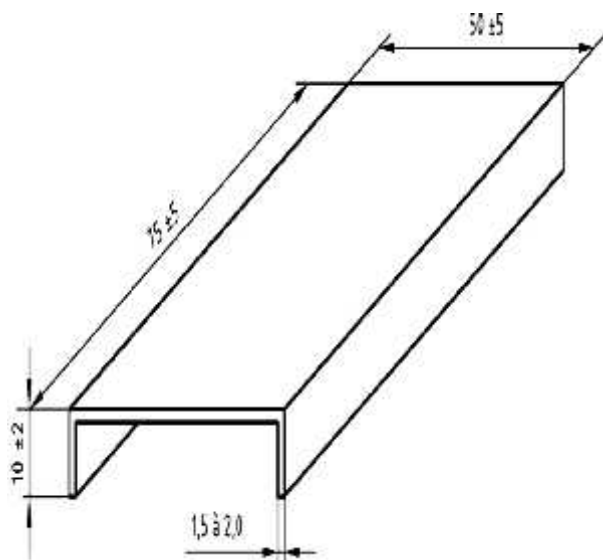
Détail de l'extrémité du Tube laveur



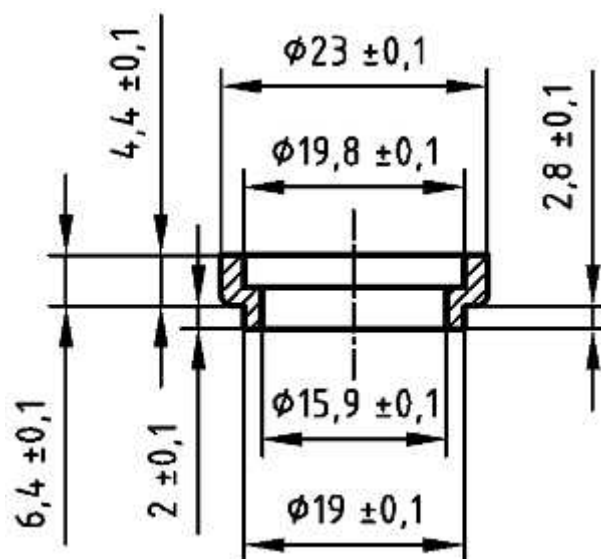
Entonnoir

- 1 Raccord fileté au tube laveur
- 2 2 orifices $\phi 1 \pm 0,1$

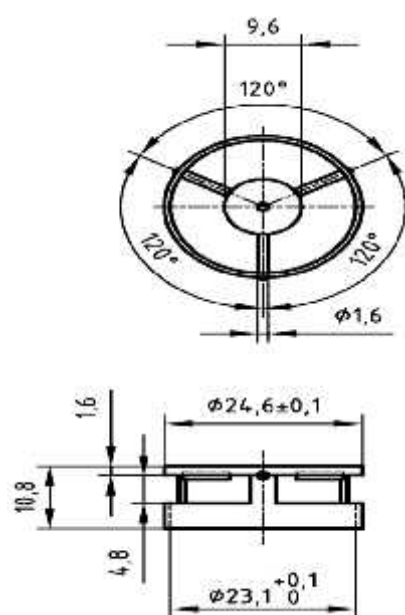
Annexe III : Dimensions en millimètre de l'appareillage Billes et Anneaux



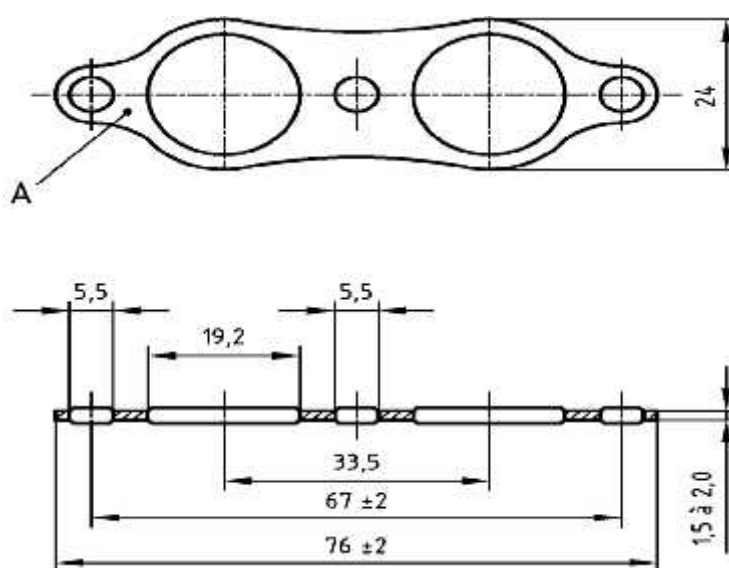
Plaque de coulage



Anneau

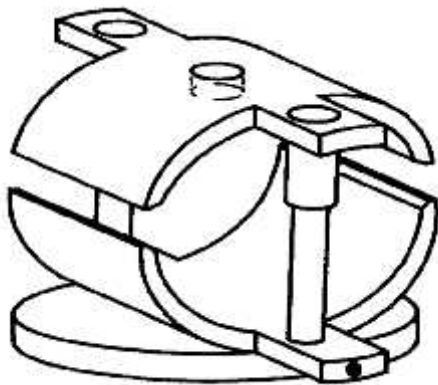


Dispositif de centrage des billes

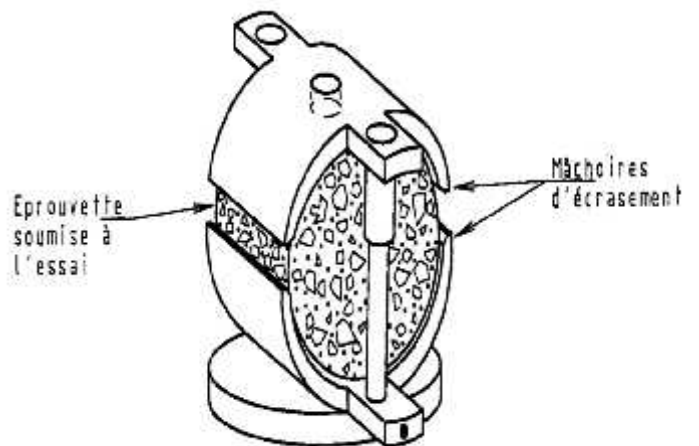


Porte-anneau

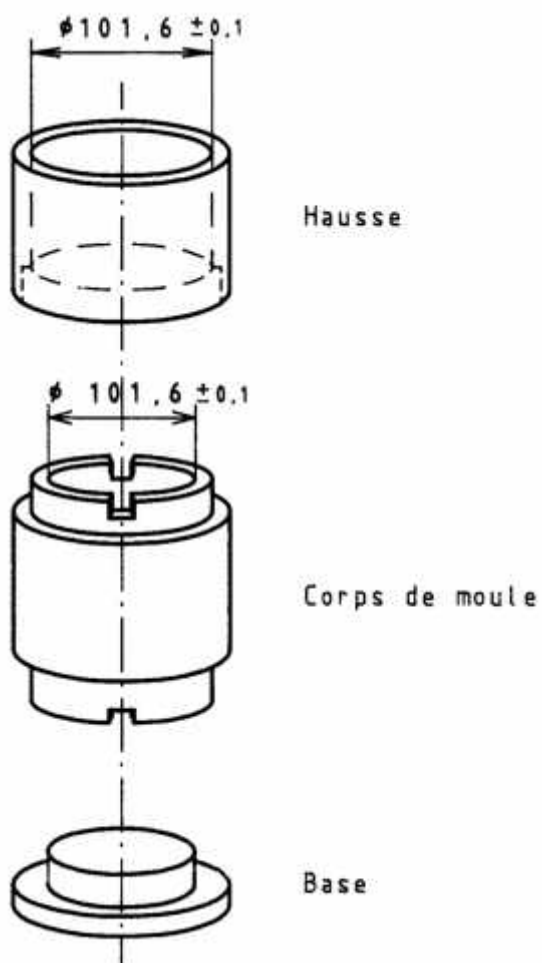
Annexe IV : Dispositif de l'essai Marshall



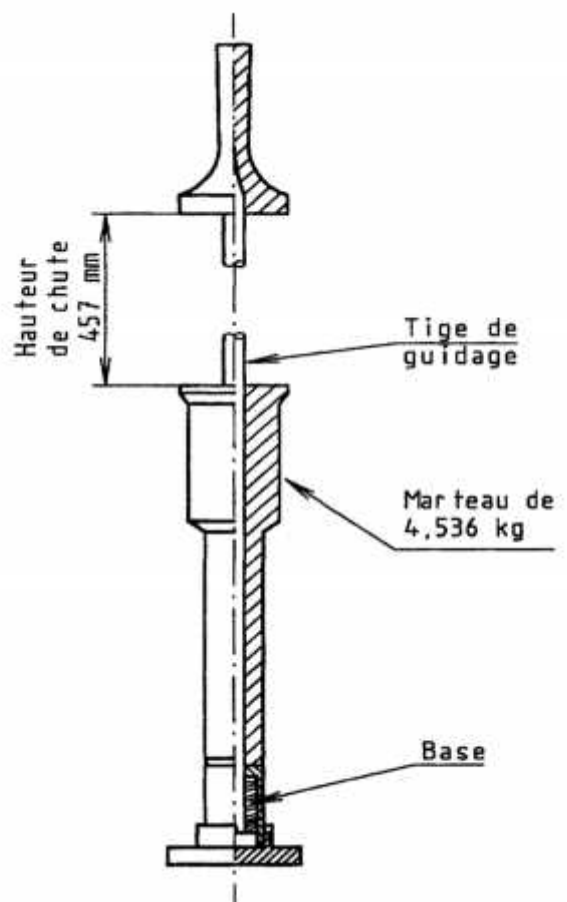
Mâchoires d'écrasement



Principe de l'essai de compression



Corps de moule, hausse, base



Exemple de dame de compactage

Résumé

Le trafic routier de plus en plus contraignant et agressif ainsi que les températures durablement élevées sont à l'origine des déformations des couches supérieures de la chaussée, ces contraintes imposent une étude approfondie sur la stabilité et la durabilité des enrobés bitumineux, ainsi qu'une description complète du concept de liaison bitume-granat.

La présente étude a pour objectif, d'évaluer les performances mécaniques d'un enrobé bitumineux obtenu à partir d'un squelette granulaire, et d'étudier l'impact de la granulométrie et la propreté des granulats sur la qualité des bétons bitumineux, par une comparaison des résultats des performances mécaniques d'un ensemble de formulations.

Les essais réalisés ont montrés que l'analyse granulométrique (squelette granulaire) et la propreté des granulats possèdent une influence significative sur les performances rhéologico-mécaniques du béton bitumineux notamment sur la stabilité, le fluage, la compacité et la tenue à l'eau.

Mots clés :

Enrobé bitumineux, granulats, bitume, performances mécaniques, stabilité Marshall, fluage.

Abstract

Increasingly constraining and aggressive traffic as well as long-lasting temperatures cause deformation of the upper layers of the roadway. These constraints require a thorough study of the stability and durability of bituminous mixes, as well as a description Of the concept of bitumen-aggregate bonding.

The aim of this study is to evaluate the mechanical performance of a bituminous mix obtained from a granular skeleton and to study the impact of granulometry and the cleanliness of aggregates on the quality of bituminous concretes. A comparison of the results of the mechanical performances of a set of formulations.

The tests carried out showed that the granulometric analysis (granular skeleton) and the cleanliness of the aggregates have a significant influence on the rheologico-mechanical performances of the bituminous concrete, in particular on stability, creep, compactness and resistance to water.

Keywords :

Bituminous asphalt, aggregates, bitumen, mechanical performance, stability Marshall, creep.