



المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics

National School of Built and Ground Works Engineering

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : TRAVAUX PUBLICS

Spécialité : INFRASTRUCTURES DE BASE

Thème

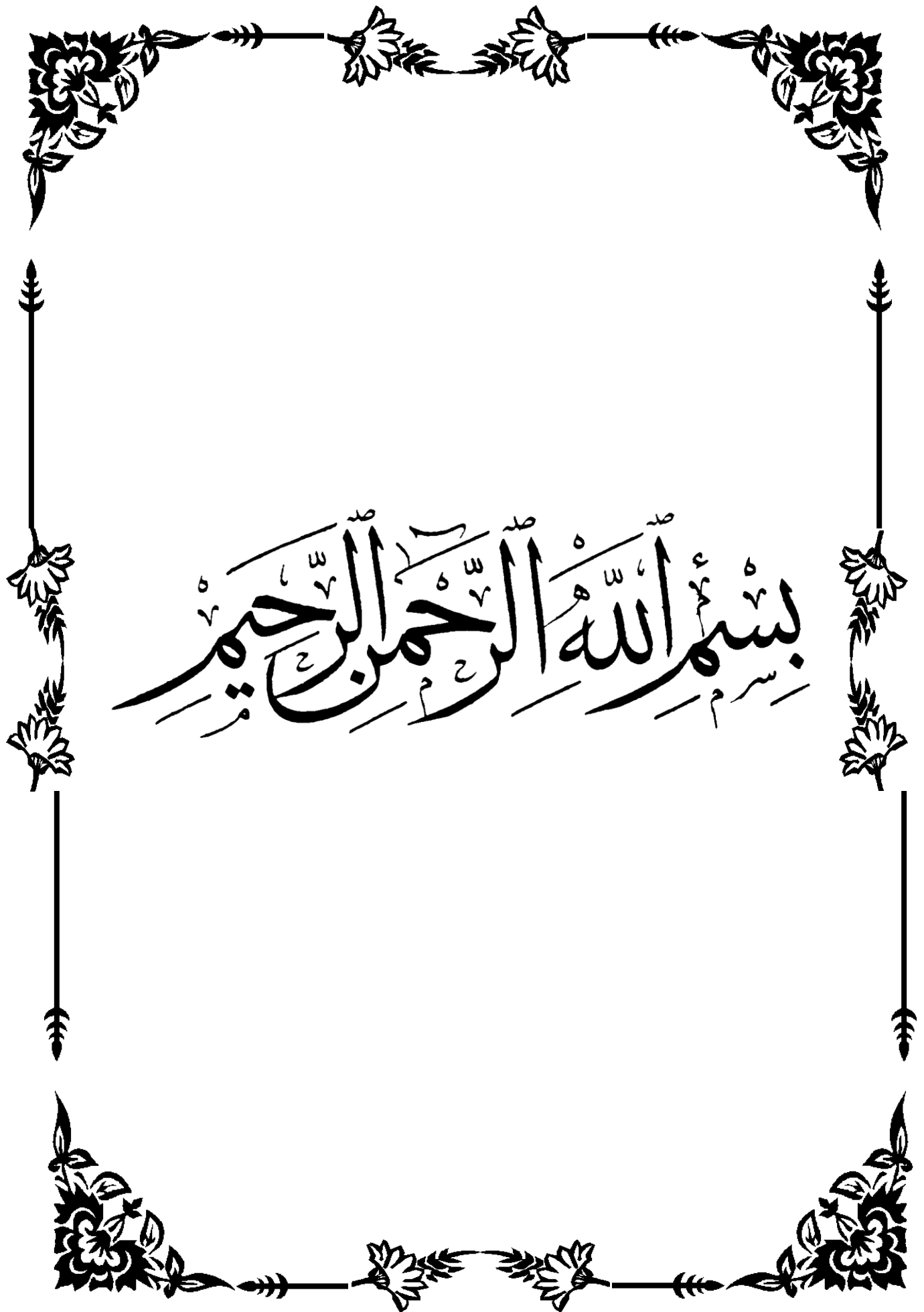
SABLE BITUME

Proposé par :

Dr : KARA.BENCHOHRA

Présenté par :

AICHE HAMZA



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux Qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

En second lieu, Nous remercions nos familles pour leurs soutiens morales et physiques sans lesquelles nous ne pouvons avoir établi ce modeste travail.

Nos vifs remerciements de reconnaissance vont également adressées aux membres du jury pour l'intérêt Qu'ils ont porté à notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

*Nous tenons à remercier également notre encadreur **Mr. kara**, pour tous les efforts qu'il a fournis pour nous faciliter et aider à accomplir notre travail, nous le remercions pour ses conseils avisés qui ont rendu ce travail possible.*

Sans oublier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à notre formation dans cette école.

تدخل الحصى في تكوين الملبسات الزفتية بما يقارب 95 % من وزنها الإجمالي وهذه الأخيرة تتكون من حصى و رمل يعاني الجنوب الجزائري كبقية المناطق الصحراوية من ندرة فادحة في مادة الحصى ونوعيته الرديئة بالمقارنة مع المقاييس والمعايير العالمية و لذلك فالإتجاه الحالي هو تكييف هاته المواد التقنيات المستعملة في إنجاز الطرق على استخدام المواد المحلية لأسباب توفر هذه المواد من جهة وإنعكاسها على الناحية الاقتصادية والبيئية من جهة أخرى من ضمن هاته المواد المحلية نجد الكثبان الرملية التي تتميز بوفرته من جهة ومن جهة أخرى تشكل بديلا جيدا للمواد المستعملة في الطريق.

تهدف هذه الدراسة إلى استعمال هذه الرمال المحلية في إنجاز طبقة السير وذلك بتسليط الضوء على إمكانية تثمين ثلاثة أنواع من الرمال المحلية رمل الكثبان الرمل الغريني و الرمل المكسر لإنجاز ملابس زفتية عادي عن طريق دراسة خصائصه الميكانيكية والنهج المتبع في هذه الدراسة هو عن طريق استبدال المواد الحصوية و تبديلها بالرمل المحلية الموجودة بوفرة وتحديد التركيب الأمثل للحصول على أفضل النتائج وبالإضافة إلى ذلك يخضع التركيب الجديد لمجموعة من تجارب مارشال و دوريز الجافة و في وجود الماء ومقارنة مختلف الخصائص الميكانيكية المتحصل عليها أولا بالخصائص الميكانيكية لخرسانة زفتية عادية ثم ثانيا بالخصائص الميكانيكية لرمل زفتي.

على الرغم من أوجه القصور من حيث الخصائص الميكانيكية مقارنة مع المعايير الميكانيكية للخرسانة الزفتية فإن هذه النتائج كانت مرضية بالمقارنة مع المواصفات الميكانيكية للرمل الزفتي وعلى ضوء هذه النتائج فإنه يمكن استخدام الرمل الزفتي في الطرق ذات حركة المرور الضعيفة.

كلمات دالة: تثمين، رمل الكثبان، زفت، رمل زفتي، طبقة السير .

RESUME :

Les agrégats entrant dans la composition des enrobés bitumineux représentent plus de 95% en poids. Ci sont constitués de graviers et de sables.

Le Sud algérien à l'instar des régions sahariennes souffrent du problème de déficit en agrégats et leur mauvaise qualité en comparaison aux normes. La tendance actuelle est d'adapter la technique routière à l'emploi des matériaux locaux pour des raisons d'économie, de disponibilité et environnementale. Parmi les matériaux locaux, les sables de dunes, de part leur disponibilité et leur abondance, peuvent constitués de bons matériaux de substitution en technique routière.

La présente étude aborde l'utilisation de ces matériaux en couche de roulement ; elle s'appuie sur la contribution à la valorisation des sables locaux, sable de dunes ; sable alluvionnaire et sable concassé, dans l'enrobé bitumineux ordinaire en étudiant l'évolution des performances mécaniques d'un béton bitumineux à base des sables locaux : c'est le sable bitume.

La démarche s'est faite par la substitution de graviers par ces matériaux sableux et de déterminer la composition optimale donnant les meilleurs résultats. En plus, les performances mécaniques trouvés du mélange, à travers différentes essais notamment les essais Marshall et Duriez à sec et en présence d'eau, sont comparés premièrement aux bétons bitumineux ordinaires et deuxièmement aux spécifications de sable bitume.

Les résultats trouvés dénotent des insuffisances en termes de performances mécaniques en comparaison aux spécifications relatives aux bétons bitumineux, par contre ces résultats sont jugés satisfaisants en comparaison aux spécifications de sable bitume (sand asphalt) ce qui justifie leur utilisation pour les routes à faible trafic.

MOTS-CLE : Valorisation, Sable de dunes, Bitume, Sable bitume, Couche de roulement.

ABSTRACT:

The aggregates used in the composition of asphalt more than 95% by weight, they are composed of gravel and sand.

Southern Algeria like the Saharan regions suffer from the problem of shortage of aggregates and poor quality compared to norms. The current trend is to adapt the technique to the road use of local materials for reasons of economy, availability and environmental. From local materials, sand dunes, due to their availability and abundance are good alternative materials in road construction. This study discusses the use of these materials in the surface layer and is intended to highlight the possibility to develop three types of local sand, sand of dunes; sand alluvial and sand crushed, in bitumen binder studying the evolution of the mechanical performance of asphalt concrete based local sands.

The approach was made by the substitution of these materials sandy gravel and determines the optimal composition giving the best results. In addition, the mechanical performances found of composite through various tests including Marshall and Duriez dry and in the presence of water, are compared with ordinary asphalt concrete and sand asphalt specifications. Despite the shortcomings in terms of mechanical performance compared to specifications for asphalt concrete, these results are satisfactory in comparison to specifications for sand asphalt which justifies their use for roads with low traffic.

KEYWORDS: Valorization, Sand dunes, Bitumen, Sand asphalt, Surface layer

REMERCIEMENT.....	I
RESUME.....	II
TABLE DES MATIERES.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Liste des figures.....	V
Liste des photos.....	VI
NOMENCLATURE.....	VII
INTRODUCTION.....	1

PARTIE A : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES ROUTIERES ET LES ENROBES BITUMINEUX

I.1 LES CHAUSSEES ROUTIERES

I.1.1 Introduction.....	3
I.1.2 Constitution des chaussées routières.....	3
I.1.2.1 Couche de surface.....	3
I.1.2.2 Couche de base.....	4
I.1.2.3 Couche de fondation.....	4
I.1.2.4 Couche de forme.....	4
I.1.3 Familles de structures de chaussée.....	4
I.1.4 Sollicitation des couches en enrobés bitumineux.....	6
Conclusion.....	7

I.2 LES ENROBES BITUMINEUX

I.2.1 Introduction.....	9
I.2.2 Définition de l'enrobé bitumineux.....	9
I.2.3 Composition des matériaux bitumineux.....	9
I.2.3.1 Liants hydrocarbonés.....	9
I.2.3.1.1 Fabrication industrielle et composition du bitume.....	10
I.2.3.1.2 Propriétés mécaniques et rhéologiques du bitume.....	12
I.2.3.1.3 Principales caractéristiques des bitumes routiers.....	12
I.2.3.2 Composants minéraux.....	15
I.2.3.2.1 Caractéristiques géométriques des granulats.....	16
I.2.3.2.2 Caractéristiques intrinsèques des granulats.....	16
I.2.4 Liaison bitume – granulat.....	117
I.2.5 Bitume dans les routes.....	18
I.2.6 Formulation des enrobés.....	18
I.2.6.1 Paramètres influençant sur le choix d'une formulation.....	19
I.2.6.1.1 Critères de base.....	19
I.2.6.1.2 Influence des caractéristiques des composants d'un mélange hydrocarbonés.....	19
I.2.6.2 Etapes de formulation d'un enrobé bitumineux.....	21
I.2.6.2.1 Les classes granulaires.....	22
I.2.6.2.2 La teneur en bitume.....	22
I.2.6.3 La compacité.....	23
I.2.6.4 Les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux.....	24

Conclusion.....	24
-----------------	----

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE TRAITEMENT DU SABLE AUX LIANTS HYDROCARBONES

II.1 Introduction.....	26
II.2 Matériaux composant le sable-bitume.....	26
II.2.1 Les sables.....	26
II.2.2 Le bitume.....	30
II.2.3 Fine d'apport.....	30
II.3 Les sables traités au bitume pour couche de roulement.....	31
II.3.1 Les Sheet asphalt.....	31
II.3.2 Les Micro-bétons.....	31
II.3.3 Les Sand asphalt (sable bitume).....	31
II.4 Sable bitume en route saharienne.....	31
II.5 Technique Routière Saharienne.....	32
II.5.1 Définition de la technique routière saharienne.....	32
II.5.2 Les idées générales.....	32
II.5.3 Principe de la technique.....	33
II.6 Les règles pour réussir un sable bitume.....	33
II.7 Formulation des sables bitumes.....	34
II.8 Propriétés mécaniques des sables bitumes.....	35
II.9 Comportement des sables bitumes.....	35
Conclusion.....	36

PARTIE B: ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III.1 Introduction.....	37
III.2 Le sable des dunes.....	37
III.2.1 Les caractéristiques des sables utilisés.....	37
III.2.1.1 Masses volumiques (NFP 18-301).....	37
III.2.1.2 Analyse chimique.....	38
III.2.1.3 Analyse granulométrique.....	39
III.2.1.4 Equivalent de sable.....	41
III.3 Caractéristiques de bitume utilisé.....	41
III.4 Description des différents mélanges "sable bitume" étudiés.....	42
III.4.1 Détermination des mélanges des sables étudiés.....	42
III.4.2 Détermination des teneurs en bitume.....	46
Conclusion.....	48

CHAPITRE VI : ESSAIS REALISES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

VI.1 Introduction.....	49
VI.2 Confection des éprouvettes.....	50
VI.2.1 Préparation des mélanges.....	50
VI.2.1.1 Préparation des sables.....	50

VI.2.1.2 Préparation du liant.....	50
VI.2.1.3 Malaxage.....	51
VI.2.2 Confection des éprouvettes pour l'essai Marshall (NFP 98-251-2).....	52
VI.2.2.1 Remplissage des moules et compactage.....	52
VI.2.2.2 Démoulage.....	54
VI.2.3 Confection des éprouvettes pour l'essai Duriez	54
VI.2.3.1 Remplissage des moules et compactage.....	55
VI.2.3.2 Démoulage.....	56
VI.3 Équipements et procédures d'essais.....	56
VI.3.1 Essai Marshall.....	56
VI.3.1.1 Principe de l'essai	57
VI.3.1.2 Déroulement de l'essai.....	57
VI.3.2 Essai Duriez.....	58
VI.3.2.1 Principe de l'essai.....	58
VI.3.2.2 Déroulement de l'essai.....	59
VI.4 Détermination de la densité apparente par peser hydrostatique (NFP 98-250-6).....	59
VI.5 Détermination de la densité théorique ou absolue.....	60
VI.7 Détermination de pourcentage d'imbibition W	62
Conclusion.....	62
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION	
V.1 Introduction.....	53
V.2 L'essai Marshall.....	53
V.2.1 La densité apparente et la densité absolue.....	53
V.2.2 Pourcentage des vides.....	54
V.2.3 La compacité.....	56
V.2.4 Stabilité Marshall.....	58
V.2.5 Fluage Marshall.....	61
V.3 L'essai Duriez.....	62
V.3.1 Compacité de Duriez.....	62
V.3.2 Stabilité Duriez.....	63
V.3.3 Pourcentage d'imbibition " W "	65
Conclusion.....	67
CONCLUSITON ET RECOMMANDATIONS.....	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	72

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : GENERALITES LES CHAUSSES ROUTIERES ET SUR LES PAGE ENROBES BITUMINEUX

Tableau (I.1) : Spécification de quelques types de bitume utilisé en Algérie.....	14
Tableau (I.2) : Classification des granulats.....	15
Tableau (I.3) : Paramètres caractéristiques des granulats.....	16
Tableau (I.4) : Les zones climatiques dans l'Algérie.....	19
Tableau (I.5) : Le choix de la classe de bitume selon le trafic et l'altitude.....	21
Tableau (I.6) : Relation entre les facteurs et les propriétés recherchées.....	21

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

Tableau (III.1) : La masse volumique absolue et apparente des sables.....	38
Tableau (III.2) : Résultats d'analyse chimiques pour les différents sables.....	39
Tableau (III.3) : Analyse granulométrique des sables utilisés.....	39
Tableau (III.4) : ES des différents sables.....	41
Tableau (III.5) : Caractéristiques du bitume 40/50.....	41
Tableau (III.6) : Fuseau de référence du sable bitume ou sand asphalt.....	42
Tableau (III.7) : Résultat récapitulatif de calcul les pourcentages du bitume.....	47

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

Tableau (V.1) : Variation de la densité apparente et absolue.....	53
Tableau (V.2) : Valeurs de volume des vides (V_v).....	54
Tableau (V.3) : Variation de la compacité des éprouvettes Marshall.....	57
Tableau (V.4) : Variation de la stabilité Marshall.....	59
Tableau (V.5) : Variation du fluage Marshall.....	61
Tableau (V.6) : Variation de la compacité des éprouvettes Duriez.....	63
Tableau (V.7) : Stabilité de Duriez.....	63
Tableau (V.8) : Variation du pourcentage d'imbibition des éprouvettes Duriez.....	

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES ROUTIERES ET LES ENROBES BITUMINEUX	PAGE
Figure (I.1) : Profil type d'une chaussée.....	3
Figure (I.2) : Chaussée de structure souple.....	5
Figure (I.3) : Chaussée bitumineuse épaisse.....	5
Figure (I.4) : Chaussée semi rigide.....	6
Figure (I.5) : Sollicitations induites par le trafic.....	6
Figure (I.6) : Sollicitations induites par la température.....	7
Figure (I.1) : Matériaux bitumineux.....	9
Figure (I.2) : Schéma général de la fabrication industrielle des bitumes.....	11
Figure (I.3) : Séparation d'un bitume en asphaltènes, résines et huiles.....	12
Figure (I.4) : Mesure de la pénétrabilité.....	13
Figure (I.5) : Mesure du température de ramollissement Bille et Anneau.....	13
Figure (I.6) : Schéma de l'essai du RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test).....	14
Figure (I.7) : Représentation schématique de l'énergie de cohésion et d'adhésion.....	17
Figure (I.8) : Angle de mouillage a l'interface liquide-solide.....	17
Figure (I.9) : L'influence de l'ajout de filler.....	20
Figure (I.10) : L'influence le surdosage de filler.....	20
CHAPITRE II : TECHNIQUES DE TRAITEMENT DU SABLE AU LIANTS HYDROCARBONES	
Figure (II.1) : Dunes de sable.....	27
CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES	
Figure (III.1) : Analyse granulométrique des sables naturels utilisés.....	40
Figure (III.2) : Analyse granulométrique du sable concassé.....	40
Figure (III.3) : Fuseau de référence du sable bitume.....	43
Figure (III.5) : La courbe granulométrique du sable de dunes.....	43
Figure (III.7) : Courbe granulométrique du mélange étudié dans le 2^{ème} mélange.....	44
Figure (III.9) : La courbe granulométrique du mélange étudié dans le 3^{ème} mélange.....	45
Figure (III.11) : La courbe granulométrique du mélange étudié dans le 4^{ème} mélange.....	45
Figure (III.13) : La courbe granulométrique du mélange étudié dans le 5^{ème} mélange.....	46
CHAPITRE IV : ESSAIS REALISES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX	
Figure (IV.1) : Etape de formulation.....	49
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION	
Figure (V.1) : Variation des vides comblés par le bitume en fonction des teneurs bitume optimales.....	55
Figure (V.2) : Variation de la compacité en fonction des teneurs en bitume optimale pour chaque mélange étudié.....	57
Figure (V.3) : Variation de stabilité Marshall maximale en fonction des teneurs en bitume optimale pour les cinq mélanges.....	59
Figure (V.4) : Variation du fluage en fonction des teneurs en bitume optimale pour les cinq mélange.....	62
Figure (V.5) : Variation de la compacité en fonction des teneurs en bitume optimales.....	63
Figure (V.6) : Variation du rapport r/R en fonction des teneurs en bitume optimale.....	65
Figure (V.7) : Variation du pourcentage d'imbibition en fonction des teneurs en bitume optimales selon chaque mélange.....	66

LISTE DES PHOTOS

CHAPITRE IV : ESSAIS REALISES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

Page

Photo (IV.1) : Etuve utilisé dans cette étude.....	51
Photo (IV.2) : L'opération de malaxage.....	52
Photo (IV.3) : Exemple des éprouvettes confectionnées de l'essai Marshall.....	52
Photo (IV.4) : Remplissage du moule.....	53
Photo (IV.5) : L'opération de compactage.....	53
Photo (IV.6) : L'opération de démoulage.....	54
Photo (IV.7) : Exemple des éprouvettes confectionnées de l'essai Duriez.....	55
Photo (IV.8) : Remplissage du moule.....	55
Photo (IV.9) : L'opération de compactage.....	56
Photo (IV.10) : Principe de l'essai Marshall.....	57
Photo (IV.11) : Le bain thermostatique.....	58
Photo (IV.12) : L'éprouvette dans les mâchoires.....	58
Photo (IV.13) : Les éprouvettes dans un bain normalisé de 18°C.....	59
Photo (IV.14) : Eprouvettes paraffinées.....	6

ENSTEP

Nomenclatures

SD : Sable de dunes

SA : Sable alluvionnaire

SC : Sable concassé 0/3

LTPS : Laboratoire des travaux publics du sud

TL : Teneur en bitume

f : pourcentage de filler

K : module de richesse

Σ : surface spécifique

W : pourcentage d'imbibition

TL : la teneur en bitume utilisé dans un mélange (en %).

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

r : Résistance à la compression avec immersion à 18°C en Kg/cm²

ML : la masse de bitume utilisé

MS : la masse de mélange des sables utilisés

TL : la teneur en bitume utilisé dans un mélange (en %).

P₁ : le poids de l'éprouvette après paraffinage, pesée dans l'air,

P₂ : le poids de l'éprouvette après paraffinage, pesée dans l'eau.

γ_{app} : la densité apparente de l'éprouvette

γ_b : la densité du bitume

γ_{S1} : la densité de sable 1; γ_{S2} , γ_{S3} ...celles des sables 2, 3...etc.

P_b : le pourcentage en poids du bitume; P_{S1}, P_{S2}, P_{S3} ...ceux des sables.

γ_{abs} : la densité absolue du matériau enrobé en (g/cm³)

V_v : Pourcentage volumétrique des vides de l'éprouvette (%)

V_L : Pourcentage des vides comblés par le liant (%)

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

γ_a : La masse volumique apparente des sables (t/m³, g/cm³,...)

ES : d'équivalent de sable (%)

LCPC : laboratoire des ponts et chaussées

CTTP : organisme national de control technique des travaux publics



Dédicace

Je dédie ce travail :

à mon très chère père ;

à ma très chère mère ;

à mes frères et sœurs ;

Ainsi qu'à toute ma famille et mes amis(es)

Introduction générale

Dans la plupart des pays, le réseau routier représente le patrimoine le plus important qui appartient essentiellement à l'état. Chaque jour plusieurs kilomètres de rues, de routes, d'autoroutes, de pistes d'aéroports sont construits pour accroître les échanges et donner un dynamisme aux régions. Les administrations routières doivent entretenir, exploiter, améliorer, remplacer et préserver ce patrimoine tout en gérant avec soin les ressources financières et humaines qui doivent servir à réaliser ces objectifs.

La recherche de l'économie dans les projets, ainsi que la nécessité d'exploiter convenablement les ressources naturelles conduisent à essayer d'utiliser au mieux tous les matériaux locaux disponibles sur place.

Il faut orienter la recherche vers l'utilisation du sable, vu que le problème de déficit des agrégats dans certaines régions, en particulier le Sud Algérien, où le coût de transport des agrégats se pose avec acuité.

Cette préoccupation de réduction des coûts des projets n'est pas nouvelle, elle avait été aperçue au moment où la construction des premières routes dans le sud par les pétroliers à la fin des années 1950. L'exploitation du pétrole a commencé à Hassi Messaoud en Algérie en 1956.

A l'époque déjà, les ingénieurs avaient recours à l'utilisation du sable mélangé à un liant hydrocarboné en particulier pour les couches de roulement. Le sable est disponible en abondance dans le sud du pays. Cette technique est tombée un peu dans la désuétude. Avec la crise économique des années 1980-1990, un regain d'intérêt est venu remettre à jour la recherche de l'économie à travers l'utilisation du sable comme substituant des graviers de carrière.

A partir que le sable de dunes constitue un énorme gisement près de 60% du territoire national et l'importance des recherches actuelle sur l'exploitation des matériaux locaux, le présent mémoire s'appuie sur la contribution à la valorisation des matériaux locaux, notamment le sable de dunes, dans les enrobés bitumineux ordinaires.

L'objectif de notre travail consiste à substituer les agrégats entrant dans les enrobés bitumineux par les sables locaux (sable de dunes, sable alluvionnaire et sable concassé). Puis déterminer les performances mécaniques des différents mélanges de sable bitume à base des sables locaux afin de déterminer l'évolution des caractéristiques de ce dernier par rapport les spécifications d'un béton bitumineux destiné à la couche de roulement.

Après la détermination des différents mélanges de sable bitume Le présent mémoire est divisé en deux parties, partie bibliographique et partie expérimentale. La première partie est consacrée à une revue bibliographique, nous commençons par le premier chapitre qui résume des généralités sur les chaussées : définition, constitution, mode de fonctionnement, les sollicitations engendrées par les deux principales causes comme le trafic et la température. Dans le deuxième chapitre, la revue de la littérature cerne les connaissances actuelles sur les enrobés bitumineux : composants, rhéologie, comportement et propriétés mécaniques. Il y a de brefs résumés sur les essais les plus utilisés pour leur caractérisation. Enfin, le troisième chapitre parle sur la technique du sable bitume dans les constructions routières, nous nous basons sur l'utilisation du sable des dunes dans le corps de chaussée notamment dans la couche de roulement. Ensuite nous parlons sur leur caractérisation du côté de la composition, spécification, comportement... etc.

Dans la deuxième partie : le programme expérimental, comprend trois chapitres. Le quatrième chapitre étudie la caractérisation des matériaux utilisés : sable de dunes, sable alluvionnaire et sable concassé afin de connaître les propriétés physiques (masse volumique, analyse granulométrique...etc.), ainsi que les propriétés chimiques.

Le cinquième chapitre présente les essais et les dispositifs expérimentaux utilisés. Dans ce chapitre, premièrement, nous répondons à la question : quelle est la conception de formulation d'un sable bitume ? Deuxièmement, nous exposons les essais mécaniques utilisés dans ce travail : essai Marshall et essai Duriez ; définition, principe et déroulement de l'essai...

Le sixième chapitre : dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus après les essais effectués sur les cinq mélanges retenus. Les résultats sont analysés, discutés et une déduction se fait sur les meilleurs résultats.

Finalement, nous concluons par des recommandations sur l'utilisation de sable bitume dans le domaine routier

ENSTP

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES CHAUSSEES ROUTIERES ET LES ENROBES BITUMINEUX

I.1 LES CHAUSSEES ROUTIERES

I.1.1 Introduction:

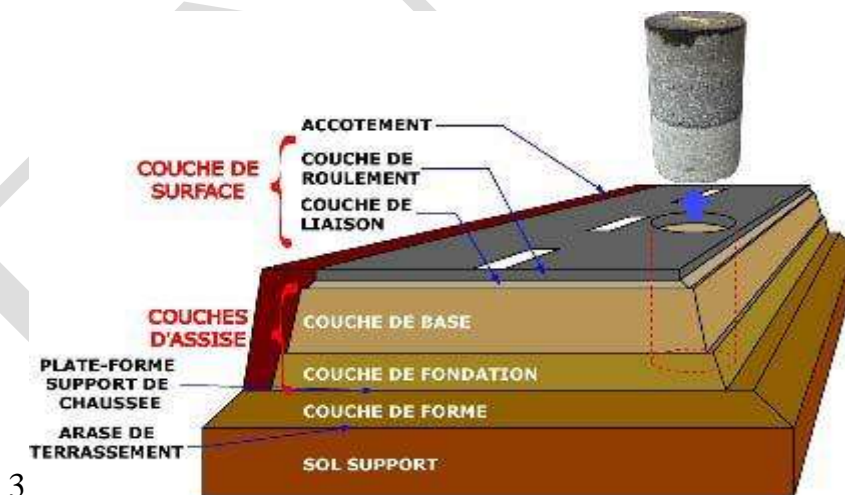
Chaque type d'enrobé est définie : premièrement par sa nature et le dosage de ses composants, deuxièmement par ses performances particulières et troisièmement par la couche de la chaussée à laquelle il est destiné.

Dans ce chapitre nous avons essayé de citer les composants d'une chaussée, couche de roulement ; couche de liaison ; couche de base..., et de définir le rôle de chaque composant. Ensuite, nous parlons sur la famille de structure d'une chaussée routière et les critères de dénomination de chaque structure.

Finalement, nous décrivons les principales causes de détérioration d'une chaussée, le trafic et la température, ainsi que les maladies engendrés à cause de ces agents.

I.1.2 Constitution des chaussées routières :

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches (figure (I.1)), qui sont mises en œuvre pour répartir les charges induites par le trafic sur le sol support. La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation. Les différentes couches de haut au bas sont:



3

Figure (I.1) : Profil type d'une chaussée

I.1.2.1 Couche de surface:

Cette couche est en contact direct avec les pneumatiques des véhicules et les effets extérieurs. Elle a pour rôle essentiel d'encaisser les efforts de cisaillement provoqués

par la circulation. Elle est, en général, composée d'une couche de roulement et d'une couche de liaison.

La couche de roulement a pour rôle :

- D'imperméabiliser la surface de la chaussée ;
- D'assurer la sécurité (adhérence) et le confort des usagers (bruit, uni) ;
- De résister au vieillissement dû aux agents atmosphériques et aux gradients thermiques ;

La couche de liaison a pour rôle essentiel :

- D'assurer une transmission aux couches inférieures plus rigides,
- D'assurer une bonne adhérence entre les couches qui l'enveloppent.

I.1.2.2 Couche de base :

La couche de base a pour rôle essentiel de reprendre les efforts verticaux et de répartir les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes.

I.1.2.3 Couche de fondation :

Le rôle de la couche de fondation est d'assurer un support à la couche de base et permet un bon compactage, elle reprend les contraintes normales et les répartit sur le sol support.

I.1.2.4 Couche de forme :

La couche de forme est généralement prévue pour répondre à certains objectifs en fonction de la nature du sol support :

- Sur un sol rocheux, la couche de forme aura un rôle de nivellement afin d'aplanir la surface avant de mettre en œuvre la couche de fondation.
- Sur un sol peu portant, la couche de forme est mise en œuvre essentiellement pour assurer une portance suffisante à court terme permettant aux engins de chantier de circuler librement.

I.1.3 Familles de structures de chaussée: On distingue les principaux types de structure de chaussée:

- Les chaussées souples dont le revêtement est à base du liant hydrocarboné « Bitume » qui comportent une couverture bitumineuse mince reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités (Figure (I.2)).

Les matériaux granulaires non liés ont une faible rigidité qui dépend de celle du sol et de leur épaisseur. Comme la couverture bitumeuse est relativement mince, les

efforts verticaux dus au trafic sont transmis au support avec une faible diffusion latérale. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques du sol ou du grave qui se répercutent en déformations permanentes en surface de la chaussée. La couverture bitumeuse subit à sa base des efforts répétés de traction-flexion. [1]



- ← Couche de surface en matériaux bitumineux
- ← Matériaux bitumineux d'assise
- ← Matériaux granulaires non traités
- ← Plate forme support

Les couches

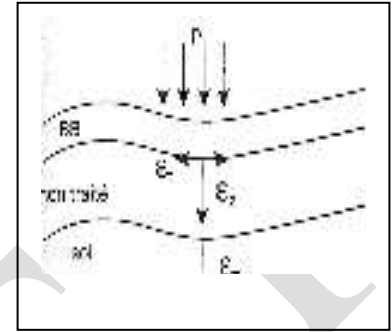
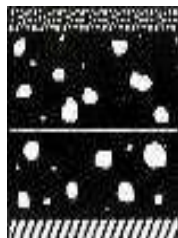


Schéma de travail

Figure (I.2) : Chaussée de structure souple

- Les chaussées bitumineuses épaisses se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, disposés en une ou deux, voire trois couches (Figure (I.3)). La rigidité et la résistance en traction des couches d'assise en matériaux bitumineux permettent de diffuser les charges en atténuant fortement les contraintes verticales transmises au support. [1]



- ← Couche de surface en matériaux bitumineux
- ← Matériaux bitumineux d'assise
- ← Plate forme support

Figure (I.3) : Chaussée bitumineuse épaisse

- Les chaussées à assise traitées aux liants hydrauliques (semi-rigides) comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposée en une ou deux couches (Figure (I.4)). Compte tenu de la très grande rigidité des matériaux traités aux liants hydrauliques, les contraintes verticales transmises au support sont très faibles. En revanche, la couche traitée subit des contraintes de traction-flexion et qui s'avèrent prédominantes pour son dimensionnement. (Les chaussées en béton de ciment ont un mode de fonctionnement de même type que les chaussées semi-rigides).

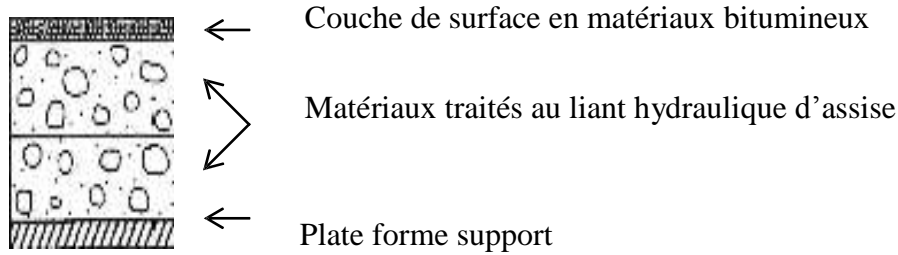


Figure (I.4) : Chaussée semi rigide

- Les chaussées rigides sont des structures dont la couche de base, au moins, est en béton de ciment.

I.1.4 Sollicitation des couches en enrobés bitumineux:

Les principales sollicitations externes imposées sur les enrobés bitumineux sont les chargements mécaniques dus aux trafics et les sollicitations climatiques.

a - Effet du trafic:

L'effet du trafic est issu du passage des véhicules qui imposent un chargement sur la surface de la chaussée sous forme de chargements surfaciques répétés. Ce passage provoque des dommages sur les différentes couches, on distingue :

- Sur le sol-support ou couche de forme, on enregistre à chaque passage une charge provoquant une déformation permanente en fonction de la contrainte verticale. L'accumulation de ces déformations permanentes se traduit à la surface de la chaussée par des déformations du profil. [2]
- A la base des chaussées, les couches à chaque passage de la charge sont soumises à des contraintes de traction par flexion (figure (I.5)), la répétition de ces contraintes conduit à une accumulation de dommage de fatigue qui peut provoquer la ruine de la chaussée.[2]

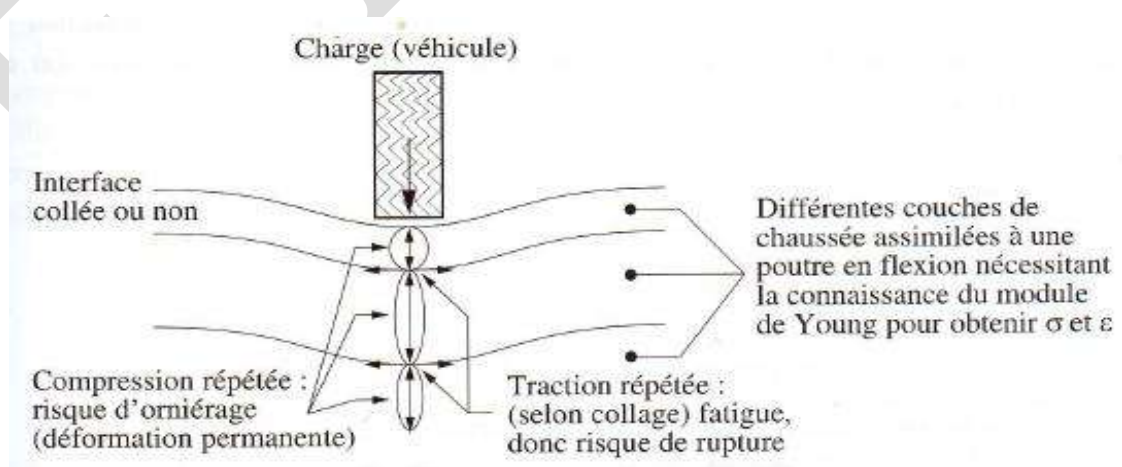


Figure (I.5): Sollicitations induites par le trafic. [3]

- Sur la couche de surface, le revêtement peut s'user jusqu'au moment où il devient glissant (efforts tangentiels). La répétition des contraintes de compression peut conduire à un orniérage notable (figure (I.5)).

b - Effet de la température:

Outre les chargements mécaniques, les chaussées subissent des chargements consécutifs aux variations de la température. Ces variations thermiques entraînent des changements de la rigidité du mélange : à température basse le mélange bitumineux est rigide et fragile tandis qu'à haute température la rigidité du mélange chute et sa ductilité augmente. (figure (I.6)) [3]

D'autre part, le changement de température peut entraîner des contraintes et des déformations au sein des matériaux en raison des contractions-dilatations thermiques.

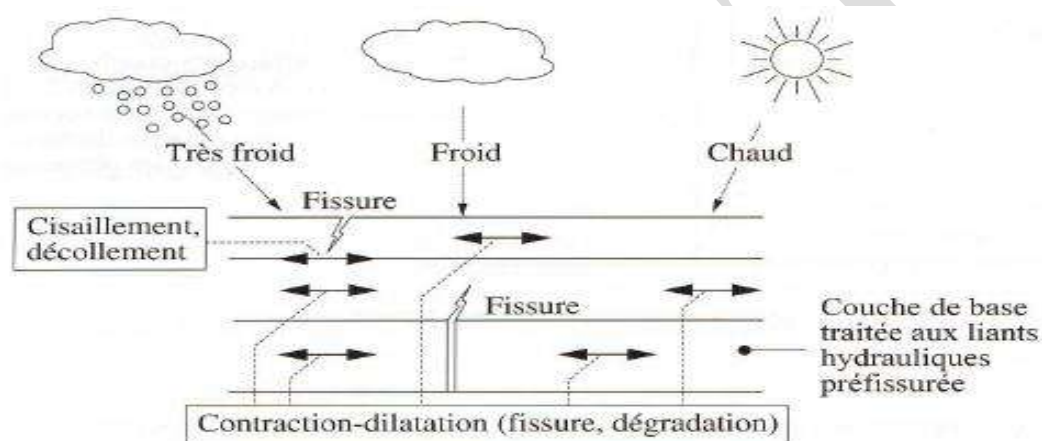


Figure (I.6): Sollicitations induites par la température [3]

Ces actions diverses, agissant simultanément sur le revêtement bitumineux conduisent aux dégradations couramment observées, notamment:

- Les fissurations de surface sous la forme de fissures isolées ou, dans les cas les plus graves, sous la forme de faiençage généralisé,
- Les déformations permanentes (ou orniérage) suite à l'accumulation de déformations irréversibles,
- Les dégradations de surface sous la forme de polissage des granulats, les désenrobages et perte de gravillons, les pelades et les nids de poule.

Conclusion:

L'analyse dans les paragraphes précédents, a permis de souligner la nécessité

d'interposer, entre le véhicule et le sol, un écran qui aura pour but de répartir les charges sur une plus grande surface et de réduire ainsi les pressions transmises au sol jusqu'à une valeur admissible. La chaussée constitue cet écran.

Une couche granulaire traitée au bitume présente l'inconvénient d'avoir un module variable en fonction de la température et de la durée d'application de la charge. Son comportement dépend beaucoup du climat et de la déformabilité des couches inférieures.

I.2 LES ENROBES BITUMINEUX

I.2.1 Introduction:

Dans ce chapitre nous allons définir les enrobés bitumineux. Tout d'abord nous présentons brièvement quelques généralités sur l'enrobé bitumineux et ses composants (bitume et granulats) avec les caractéristiques appropriées de chacun d'eux.

Ensuite, nous étudions la formulation de l'enrobé en considérant les paramètres suivants: la teneur du bitume, la dureté du bitume et la grosseur des granulats...qui ont des influences sur la compacité, la mise en œuvre et la durabilité..., ainsi que les principaux essais de caractérisation selon les normes pour obtenir un enrobé selon le choix désiré.

Enfin, quelques types de bétons bitumineux utilisés dans la couche de roulement.

I.2.2 Définition de l'enrobé bitumineux:

L'enrobé bitumineux est un matériau composite constitué d'un mélange de granulats (graviers, sables, fines) et d'un liant hydrocarboné (bitume, éventuellement des additifs); Les granulats assurent la structure rigide de l'enrobé et le bitume procure la cohésion de l'ensemble et il est responsable du caractère visqueux.

Chacun de ces deux constituants est défini par ses caractéristiques rhéologiques et mécaniques. La connaissance de ces caractéristiques permet d'obtenir la bonne tenue du mélange bitumineux.

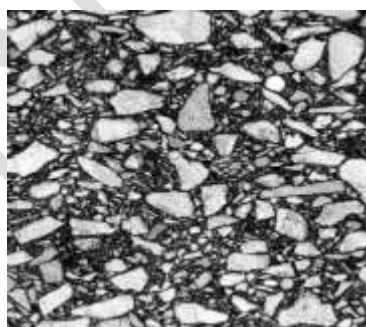


Figure (I.1): Matériaux bitumineux

I.2.3 Composition des matériaux bitumineux :

I.2.3.1 Liants hydrocarbonés:

Définition:

Les liants hydrocarbonés, qui jouent un rôle important dans la technique routière moderne, sont connus et utilisés depuis longtemps. Les propriétés d'adhésivité et l'imperméabilité des bitumes naturels et les asphaltes ont été connus depuis l'apparition

de la civilisation dans la vallée de l'Euphrate en Mésopotamie (actuellement **Irak**, le berceau de la civilisation). [6]

Le mot "liant" peut être défini comme substance qui sert à rassembler de façon durable, des particules généralement solides, l'adjectif "hydrocarboné" désigne l'assemblage d'atomes de carbone et d'hydrogène.

La substance additionnée aux particules solides développe au sein d'un mélange des forces d'adhésion et de cohésion, assurant une certaine rigidité et une résistance à la déformation en traction, une résistance à la compression et une résistance au cisaillement.

On distingue trois familles de liants hydrocarbonés:

- ✓ **Les liants naturels**, qui se trouvent dans la nature le plus souvent, associés à des matières minérales, et qui sont utilisés depuis très longtemps .C'est la roche *asphaltique* qui se présente dans le gisement et qui après broyage donne *asphalte* ou bitume naturel.
- ✓ **Les goudrons**, qui proviennent de la pyrogénéation, à l'abri de l'air, de matières d'origine végétal: houille, tourbe, bois, lignite...etc. [9]
- ✓ **les bitumes**, qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers.

Le bitume présente des propriétés complexes, soit sur le plan de sa composition chimique ou soit sur sa réponse aux sollicitations mécaniques. Il possède un grand pouvoir adhésif pour agglomérer les matériaux minéraux et les empêcher de se désunir sous les diverses sollicitations. Les variations importantes de sa viscosité en fonction de la température permettent un mélange adéquat avec les granulats lors dans les différentes étapes de fabrication et de mise en œuvre de l'enrobé et par conséquent une bonne stabilité lors de l'exploitation de la chaussée, sous sollicitation mécaniques, thermiques et climatiques.

I.2.3.1.1 Fabrication industrielle et composition du bitume:

a. Fabrication industrielle:

Le bitume utilisé aujourd'hui, à travers le monde, provient de façon presque exclusive du raffinage des pétroles riches en composants lourds, les " bruts à bitume". La plus grande partie de la production (80 à 90 %) est issue d'une double distillation : le brut, chauffé à plus de 300°C, est envoyé dans une colonne de fractionnement à la pression normale, c'est la distillation atmosphérique ; le produit récupéré en fond du tour est réchauffé à 400°C environ, puis introduit dans une colonne où règne une pression réduite, c'est la distillation sous-vide. (Figure (I.2)) [10]

Suivant les conditions d'emploi et les propriétés recherchées, le bitume peut être utilisé pur ou en association avec d'autres composants. Il existe également des bitumes fluidifiés (par addition de solvants), des bitumes fluxés (mélange de bitume avec des huiles de houille et des dérivés pétroliers) et des bitumes modifiés par ajout de polymères.

Les différents procédés de fabrication, qui viennent faire l'objet d'une présentation très sommaire, permettent d'obtenir une gamme variée de produits tous désignés par l'appellation bitume.

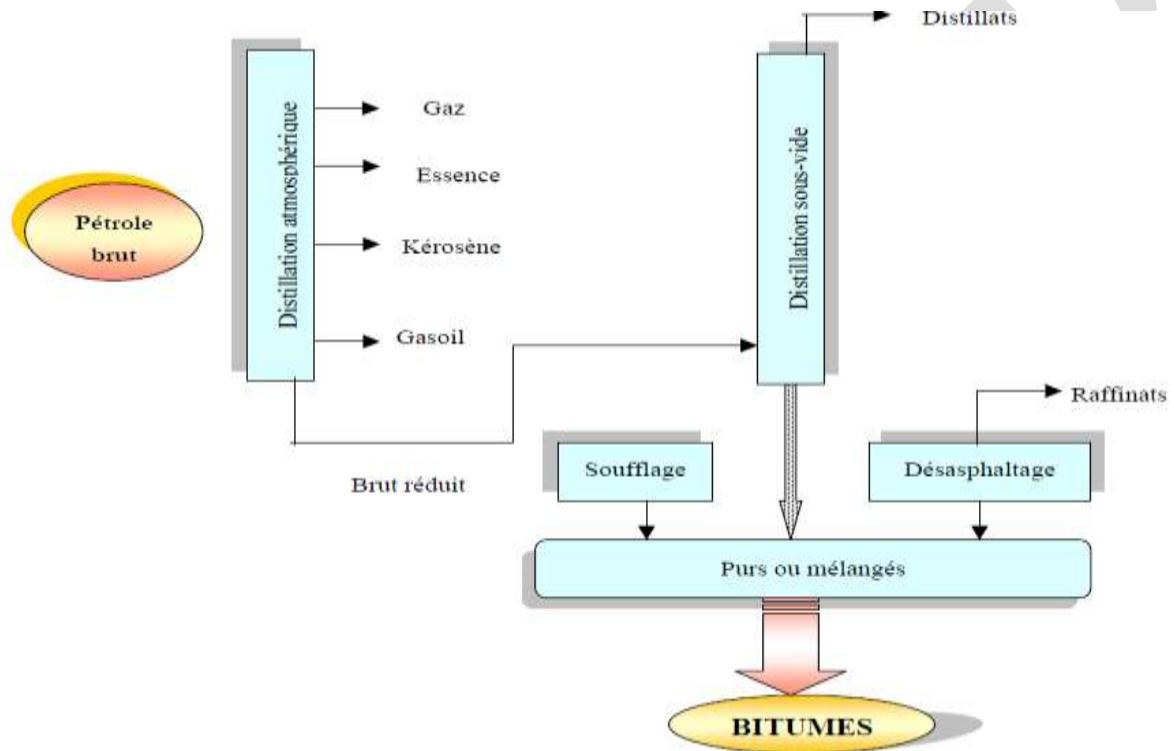


Figure (I.2): Schéma général de la fabrication industrielle des bitumes [10]

b. Composition du bitume:

A température ordinaire, les bitumes se présentent comme des corps visqueux ou des solides susceptibles de fluer sous leurs poids propre.

La séparation du bitume par solvant permet de séparer les bitumes en **asphaltènes** et en **maltènes** [12]: les asphaltènes représentent 10 à 30% des bitumes, ils constituent la partie insoluble des bitumes dans les solvants de type n-alcanes et se présentent sous la forme d'un solide dur friable, brun-noir qui contribue largement à la couleur noir du bitume. Les maltènes, partie soluble correspondent à l'association des résines et des huiles; les résines ont un rôle essentiel vis-à-vis la stabilité colloïdale du bitume, les huiles représentent 40% à 60% du bitume. (Figure (I.3))

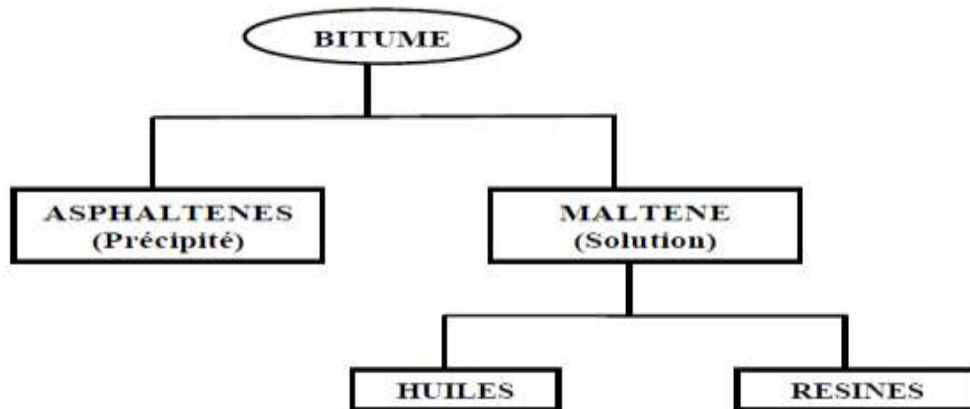


Figure (I.3): Séparation d'un bitume en asphaltènes, résines et huiles

I.2.3.1.2 Propriétés mécaniques et rhéologiques du bitume :

Le bitume confère à l'enrobé sa flexibilité et sa capacité à résister à certaines dégradations causées par plusieurs facteurs dont le trafic, les conditions climatiques du site, etc. A température de service élevée, le bitume doit demeurer suffisamment visqueux afin d'éviter que ne se produise le phénomène d'orniérage. A l'opposé, à basse température, le bitume doit conserver une certaine élasticité pour éviter le phénomène de fissuration par retrait thermique et la fragilisation de l'enrobé. Aux températures intermédiaires, il doit être résistant à la fatigue sous l'effet du trafic répété.

Ces propriétés sont généralement difficilement conciliables, sinon incompatibles, il est donc difficile d'obtenir un bitume utilisable et durable sous tous les climats et trafics possibles. On peut dire que le bitume rassemble certains de ces conditions, donc c'est un matériau visco-élastique dont la souplesse d'emploi et les propriétés essentielles d'adhérence, de plasticité, d'élasticité, d'insolubilité dans l'eau et d'inertie à de nombreux agents chimiques lui ont valu un développement important dans la construction routière et industrielle.

I.2.3.1.3 Principales caractéristiques des bitumes routiers:

Le bitume doit d'abord être pompable et maniable à température élevée (vers 160°C). Ensuite, il doit être suffisamment rigide aux températures élevées de service. Enfin, il doit être suffisamment mou aux basses températures de service.

C'est pourquoi différents types de bitumes sont disponibles et divers critères rhéologiques permettent de les caractériser et de les classer. Les essais pour mesurer ces propriétés sont:

a - Pénétrabilité à l'aiguille :

La pénétrabilité à l'aiguille est la profondeur d'enfoncement, exprimée en dixièmes de millimètre, d'une aiguille normalisée de **1 mm** de diamètre, sous une charge de **100 g**, appliquée pendant **5 s** sur un échantillon de bitume maintenu à **25°C** (figure (I.4)).

La pénétrabilité est une des deux caractéristiques fondamentales qui permettent de définir un bitume, où est définis par leur classe de pénétrabilité (la pénétrabilité exprimé en **1/10^{ème}** de millimètre) dont l'appellation correspond à sa borne inférieure et à sa borne supérieure par exemple un bitume de classe 40/50. Plus un bitume est dur, plus sa valeur de pénétrabilité est faible.

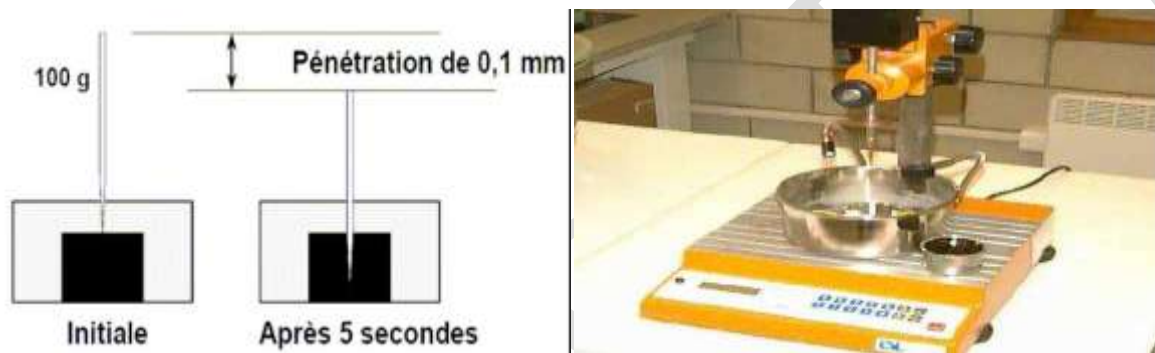


Figure (I.4): Mesure de la pénétrabilité

b - La Température de ramollissement Bille et Anneau (TBA):

Ce test consiste à déterminer la température pour laquelle la poche de bitume, formée pendant la chute de la bille, touche la plaque de référence placée à 25,4 mm sous l'anneau de bitume. Le bain est chauffé à une vitesse constante de 5 °C/min. (figure (I.5))

Le point de ramollissement est la deuxième caractéristique fondamentale d'un bitume.

Dans cet essai, plus le point de ramollissement est élevé plus le bitume est dur.

T début = 5° C

T fin = mesurée °C

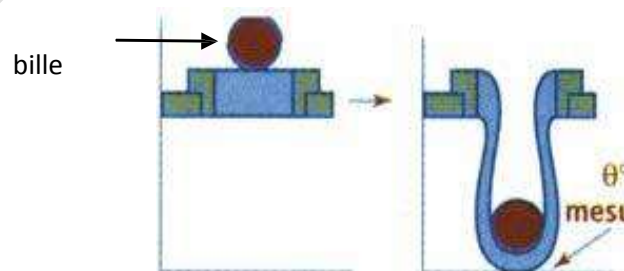


Figure (I.5): Mesure du température de ramollissement Bille et Anneau

c - Essai de la résistance au vieillissement RTFOT :

L'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes à l'enrobage.

A l'enrobage, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui se répartit en film mince autour des granulats, favorisant le vieillissement du liant et ainsi dans la chaussée.

Pour cet essai, le bitume placé en film mince est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé (figure (I.6)). Les propriétés habituelles du liant sont ensuite mesurées (pénétrabilité, température de ramollissement bille-anneau). Ces valeurs après RTFOT qui sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé, sont comparées à celles obtenues auparavant.

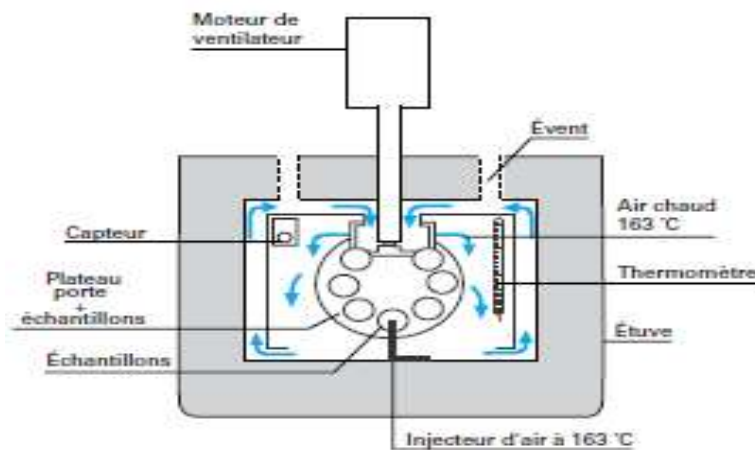


Figure (I.6): Schéma de l'essai du RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test)

Le tableau suivant donne quelques types de bitume utilisé en Algérie [44] :

Tableau (I.1) : Spécification de quelques types de bitume utilisé en Algérie

	Unité	Norme	Classe			
			35/50	40/50	80/100	100/150
Pénétrabilité à 25°C	mm	EN 1426	35-50	40-50	80-100	100-150
Point de ramollissement	$^{\circ}\text{C}$	EN 1427	50-58	51-61	41-51	39-47
Pénétrabilité restante Après durcissement, minimum	%	EN 1426	53	50	46	43
Point de ramollissement après durcissement, minimum	$^{\circ}\text{C}$	EN 1427	52	49	45	41
Point d'éclair, minimum	$^{\circ}\text{C}$	EN 22592	240	250	230	230

I.2.3.2 Composants minéraux:

- **Définition:**

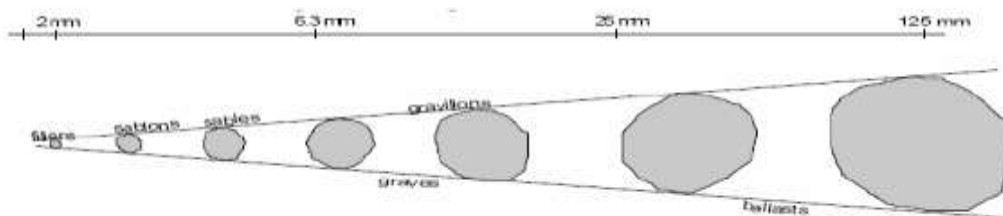
Les composants minéraux constituent environ 95% de la masse d'un enrobé bitumineux (80-85% du volume). Cette prépondérance des matériaux granulaires dans le mélange a une influence sur les caractéristiques mécaniques et sur les performances du matériau bitumineux.

Les granulats sont l'ensemble des sables, gravillons ou pierres concassées qui proviennent du creusement d'un gisement ou d'une extraction à partir d'une roche mère compacte. Les granulats sont utilisés soit comme matériaux en vrac, soit après transformations (criblage, concassage, tamisage, dépoussiérage, lavage...).

Les granulats sont désignés par d et D , qui représentent respectivement la plus petite et la plus grande des dimensions demandées, on distingue :

Tableau (I.2) : Classification des granulats [14]

Classe de produits	Dimensions
Fillers	0/D avec $D < 2\text{mm}$
Sablons	0/D avec $D \leq 1\text{mm}$
Sables	0/D avec $1 < D \leq 6,3\text{mm}$
Graves	0/D avec $D > 6,3\text{mm}$
Gravillons	d/D avec $d \geq 1\text{mm}$ et $D \leq 12,5\text{mm}$
Ballasts	d/D avec $d \geq 25\text{mm}$ et $D \leq 50\text{mm}$



Certaines propriétés des granulats sont directement liées aux caractéristiques intrinsèques des roches originelles comme la masse volumique réelle, l'absorption d'eau et la résistance mécanique qui s'exprime par la résistance à la fragmentation, à l'usure et au polissage. D'autres caractéristiques sont déterminées selon le mode d'élaboration des granulats, soit après extraction alluvionnaire ou soit par concassage des roches massives en carrières. Il s'agit principalement de la granularité, l'angularité, la porosité et le pourcentage de fines.

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques recherchées pour les granulats à usage routier:

Tableau (I.3) : Paramètres caractéristiques des granulats [14]

	Mise en œuvre	Niveau de service
Granulats pour usage routiers	Comportement à court terme <ul style="list-style-type: none"> • granulométrie • angularité • propreté • teneur en eau • masse volumique 	Evolution à long terme et niveau d'usage <ul style="list-style-type: none"> • résistance mécanique : <ul style="list-style-type: none"> ▪ fragmentation ▪ usure ▪ polissage • affinité aux liants • angularité

I.2.3.2.1 Caractéristiques géométriques des granulats :

La géométrie d'un grain peut théoriquement être étudiée à l'aide deux principales caractéristiques, à savoir : l'angularité, la granularité.

- **La granularité** : La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulats. Elle est appréciée par l'analyse granulométrique à l'aide de tamis et passoires.
- **L'angularité** : Le grain de granulats est limité par des faces plus moins rugueuses, faisant entre elles des angles plus ou moins aigus. L'angularité est un paramètre important qui favorise la résistance mécanique et l'adhérence des pneumatiques avec la couche de roulement.

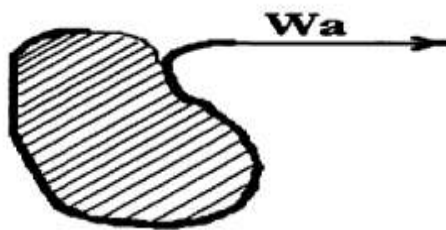
I.2.3.2.2 Caractéristiques intrinsèques des granulats :

Il s'agit des caractéristiques régies par la qualité propre de la roche mère. Elles concernent la dureté, la résistance à l'usure par frottement et la résistance au polissage. Les essais les plus fréquents utilisés pour déterminer ces caractéristiques sont :

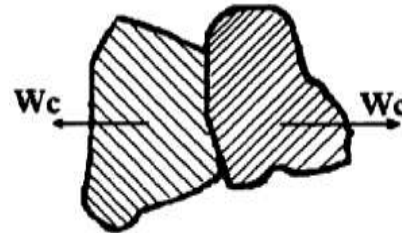
- **L'essai Los Angeles (LA)** : Ou l'essai de résistance aux chocs, permet d'évaluer la résistance des granulats à la fragmentation sous l'action de trafic.
- **L'essai Micro Deval (MDE)** : Ou l'essai de résistance à l'usure et à l'attrition, permet de quantifier l'usure par frottement des granulats dans une assise, et l'usure par frottement des pneumatiques sur les granulats à la surface des revêtements.
- **L'essai de résistance au polissage** : Polissage des gravillons superficiels de chaussées par les pneus des véhicules.

I.2.4 Liaison bitume – granulat :

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. La figure ci-dessous illustre les différentes énergies d'adhésion et de cohésion.



a) énergie d'adhésion



b) énergie de cohésion

Figure (I.7): Représentation schématique de l'énergie de cohésion et d'adhésion [15]

Wa: énergie d'adhésion = énergie dépensée pour arracher un film de bitume fortement adsorbé sur la surface du granulat. (Figure (I.7.a))

Wc: énergie de cohésion = énergie dépensée pour décoller deux granulats unies par un film de bitume. (Figure (I.7.b))

L'adhésion du bitume à un granulat est d'autant plus importante que le bitume le mouille parfaitement. Le pouvoir mouillant du bitume liquéfié et sa capacité à réaliser un contact étroit avec les surfaces des agrégats dépendent à la nature du solide considéré à savoir la nature minéralogique du granulat et en grande partie de sa viscosité. Plus la viscosité du bitume est faible, plus son pouvoir mouillant est grand.

La Figure (I.8) illustre le contact d'un élément solide avec un liquide. Le cas (A) schématise une bonne adhésivité entre ces deux matériaux, l'angle de mouillage β est grand, alors que le cas (B) représente une mauvaise adhésivité, l'angle β est petit.

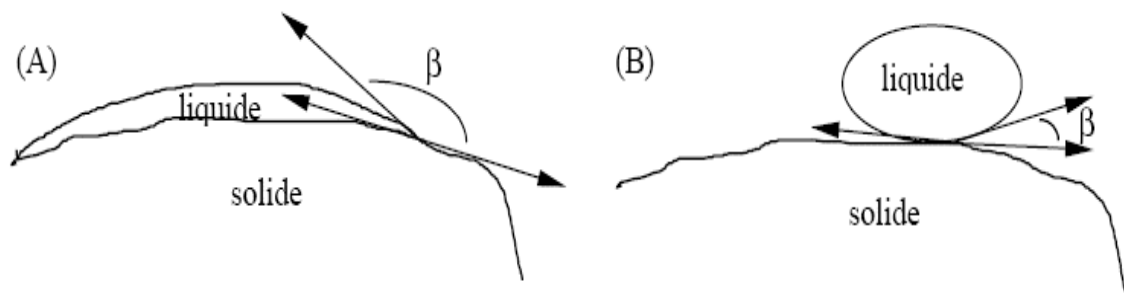


Figure (I.8): Angle de mouillage à l'interface liquide-solide [11]

I.2.5 Bitume dans les routes :

L'utilisation du bitume dans les routes se fait selon la mise en œuvre en deux axes :

- **Les enrobés bitumineux** : on distingue selon la mise en œuvre :
 - **Les enrobés à froid** : fabriqués à température ambiante.
 - **Les enrobés à chaud** : le bitume est mélangé aux granulats et aux fines à des températures élevées (environ 160°C) pour former un enrobé bitumineux.
 - **Les enrobés tièdes** : Les enrobés tièdes se composent d'une famille d'enrobés préparés à chaud, dont la température de fabrication varie entre 80°C et 130°C.
- **Les enduits superficiels** : concernent les bitumes fluidifiés (par addition de solvant) et fluxés (mélange de bitume avec des huiles de houille et des dérivés pétroliers) et les émulsions de bitumes obtenues par mélange avec des coupes plus légères, pour rendre le bitume fluide à température ambiante. Ces bitumes fluidifiés et fluxés sont utilisés directement en épandage ou encore en enrobage de granulats. (couche de granulat puis couche de bitume ainsi de suite selon les types des enduits superficiels). [11]

I.2.6 Formulation des enrobés :

Formuler un enrobé hydrocarboné, est de déterminer le meilleur mélange de granulats de diverses dimensions et d'un liant (le bitume) permettant d'atteindre des performances visées : imperméabilité, rugosité, résistance mécanique (à l'orniérage et la fatigue). Donc l'objectif de formulation est de déterminer un mélange de différentes classes granulaires qui constitue un squelette granulaire ayant un pourcentage de vides ni trop faible ni trop élevé. Un faible pourcentage de vide empêche l'introduction d'une quantité du liant suffisante pour enrober l'ensemble des grains sans saturer le mélange, et un pourcentage de vides élevé favorise le développement des déformations permanentes par post-compaction.

I.2.6.1 Paramètres influençant sur le choix d'une formulation :

Les principaux caractères à prendre en compte lors du choix d'une formule d'enrobé sont les suivants:

I.2.6.1.1 Critères de base :

- Le choix de l'enrobé dépend de la fonction que doit remplir : couche de base, de liaison, de surface, etc.
- Le trafic

- Le type de structure: chaussée souple ou semi-rigide
- Les conditions climatiques.

Le découpage géographique de l'Algérie donne trois zones climatiques I, II et III, leurs caractéristiques sont illustrées dans le tableau suivant:

Tableau (I.4): Les zones climatiques dans l'Algérie [45]

caractéristiques Zones	Température maximale	Température minimale	Hauteur de précipitation annuelle
I	$\leq 45^{\circ}\text{c}$	$-2,5^{\circ}\text{c} \leq T_{\text{min}} \leq 2,5^{\circ}\text{c}$	$H \geq 600\text{mm}$
II	$45^{\circ}\text{c} < T_{\text{max}} \leq 50^{\circ}\text{c}$	$< -2,5^{\circ}\text{c}$	$H < 600\text{mm}$
III	$> 50^{\circ}\text{c}$	$\geq -5^{\circ}\text{c}$	$H < 100\text{mm}$

- L'épaisseur d'enrobé adéquate de résister aux différentes sollicitations.
- La qualité des matériaux utilisés

I.2.6.1.2 Influence des caractéristiques des composants d'un mélange hydrocarbonés:

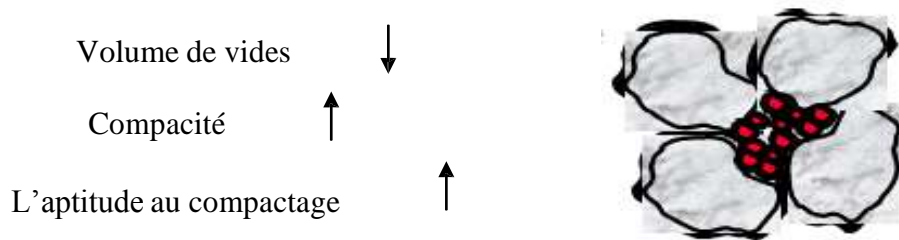
Les propriétés des enrobés hydrocarbonés peuvent dépendre selon les caractéristiques de différentes compositions que sont les granulats, les fines, le liant

a - Influence des granulats:

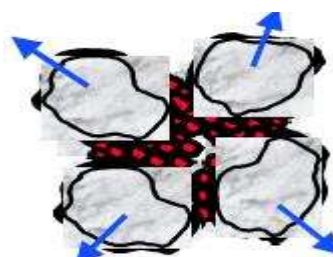
Il y a plusieurs types de béton bitumineux. Cependant, il est possible de formuler un concept d'un agrégat selon les performances désirées. Le choix d'un agrégat idéal à granulométrie voulue rempli les conditions suivantes: l'agrégat sera dur et résistant, constitué des particules angulaires ayant une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

b - Influence des fines :

Le rôle principal des fines est de remplir les vides du squelette granulaire conduisant ainsi à une augmentation de la compacité et à une meilleur imperméabilité de l'enrobé (figure (I.9)). Les fines (ou filler) agissent par leur dosage sur les caractéristiques mécaniques de l'enrobé notamment sur la rigidité et la résistance à l'orniérage à haute température. La figure (I.10) ci-dessous illustre le surdosage des fines qu'il conduise au desserrement entre les granulats.

**Figure (I.9):** L'influence de l'ajout de filler

Effet desserrement
Le dosage en filler peut donc s'avérer
critique

**Figure (I.10):** L'influence sur le surdosage de filler

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

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

Le choix de la classe du bitume dépend de l'altitude et du trafic en poids lourds illustrés dans le tableau ci-dessous selon le protocole de contrôle revêtement béton bitumineux de CTTTP et les recommandations de CTTTP sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud: (La région d'étude, Ouargla, est située dans la zone III)

Tableau (I.5): Le choix de la classe de bitume selon le trafic et l'altitude [45]

Zone	Altitude	Classe du bitume		
I	alt ≤ 500m	60/70	40/50	40/50
	alt > 500m	80/100	80/100	60/70
II	alt ≤ 500m	40/50	40/50 ou 20/30	20/30
	500m < alt ≤ 1000m	60/70	40/50	40/50
	1000m < alt	80/100	80/100	60/70

III	$500m \leq alt \leq 1000m$	40/50	40/50 ou 20/30	20/30
	$1000m < alt$	60/70	40/50	40/50
Trafic		$PLMJA < 150$	$150 \leq PLMJA < 500$	$PLMJA \geq 500$

PLMJA : le nombre de poids lourds en moyenne journalière annuelle

Le tableau suivant présente la relation entre les facteurs et les propriétés recherchées afin de déduire un meilleur enrobé :

Tableau (I.6): Relation entre les facteurs et les propriétés recherchées

Propriétés	Facteurs		
	Teneur en bitume	Granulométrie	Compacité
Cohésion	élevée	dense	élevée
Confort	élevée	dense-fermée	élevée
Sécurité	basse	dense-ouverte	élevée
Maniabilité	élevée	ouverte	-
Compactibilité	élevée	dense	-

Pour des enrobés cohésif doivent posséder une teneur en bitume élevée, une granulométrie dense et une compacité élevée. Pour obtenir des enrobés sécurisés doivent posséder une teneur en bitume basse, une granulométrie dense-ouverte et une compacité élevée... Ces propriétés, qui sont souvent en opposition, nécessitent d'optimiser les choix concernant les dosages de bitume et la formulation à utiliser.

I.2.6.2 Etapes de formulation d'un enrobé bitumineux:

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

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

I.2.6.2.1 Les classes granulaires:

Le squelette granulaire d'un mélange bitumineux est composé de plusieurs fractions homogènes qui sont:

- sable: 0/2 ou 0/4
- gravillon: 2/6,3; 4/6,3; 4/10; 6,3/10; 6,3/14 et 10/14
- filler: élément < 0,08

La formulation d'un enrobés bitumineux repose essentiellement sur les caractéristiques

géométriques des granulats (90% environ en masse du mélange) qui désigner par le choix de la courbe granulométrique selon les propriétés recherchées. La Directive SETRA et LCPC prévoit deux types de bétons bitumineux :

- les bétons bitumineux grenus 0/10 et 0/14
- les bétons bitumineux semi-grenus 0/10 et 0/14

En fait, seules les mélanges semi-grenus sont utilisés car les mélanges grenus sont difficiles à mettre en œuvre.

I.2.6.2.2 La teneur en bitume:

La teneur en liant TL est le rapport de la masse du liant, à la masse des granulats secs, exprimé en pourcent. Duriez a établi une formule pour déterminer la teneur en bitume des enrobés en fonction de la surface spécifique du mélange sec [4]:

$$TL = K \times \alpha \times \sqrt[5]{\Sigma} \quad (1.1)$$

K: module de richesse

est un coefficient proportionnel à l'épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant le granulat varier entre 3,50 et 5 selon le type d'enrobés.

α : coefficient correcteur

Ce coefficient permet de tenir en compte la masse volumique réelle des granulats.

$\alpha = 2,65 / Mv$ où **Mv**: la masse volumique des granulats utilisés.

Σ : surface spécifique conventionnelle du mélange en m²/kg

$$\Sigma = (0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f) / 100$$

G: surface spécifique des éléments > 6,3 mm

S: surface spécifique des éléments compris entre 0,315 et 0,063 mm s: surface spécifique des éléments compris entre 0,315 et 6,3 mm

f: surface spécifique des fines < 0,063 mm

I.2.6.3 La compacité:

La compacité "C" est une conséquence directe de la formulation: [18]

$$C = 100 - \% \text{ vides} \quad (1.2)$$

Pour ce calcul, il faut connaître la densité apparente de l'éprouvette, la densité du bitume, la densité de chacun des agrégats, les pourcentages en poids de chacun des constituants rapportés à 100(liant et filler compris).

Soit :

- ♦ γ_{app} : la densité apparente de l'éprouvette;
- ♦ γ_b : la densité du bitume ;
- ♦ γ_{G1} : la densité de l'agrégat 1; $\gamma_{G2}, \gamma_{G3}, \dots$ celles des agrégats 2, 3...etc
- ♦ P_b : le pourcentage en poids du bitume;
- ♦ $P_{G1}, P_{G2}, P_{G3} \dots$ ceux des agrégats.

Donc la densité réelle γ_{rel} du matériau enrobé est:

$$\gamma_{rel} = \frac{100}{(P_b / \gamma_b) + (P_{G1} / \gamma_{G1}) + (P_{G2} / \gamma_{G2}) + \dots}$$

Le pourcentage volumétrique des vides V_v de l'éprouvette est:

$$V_v = \frac{100 (\gamma_{rel} - \gamma_{app})}{\gamma_{rel}} \quad (1.4)$$

Et la compacité C :

$$C = 100 - V_v$$

Une bonne compacité conditionne les performances mécaniques des enrobés et leur durée de vie. La compacité est influencée par la nature et la forme des granulats. Elle joue un rôle déterminant dans l'obtention de bonnes caractéristiques mécaniques : module de rigidité, comportement en fatigue, mais un compromis doit être fait pour que le comportement à l'orniérage soit satisfaisant.

En modulant ces différents paramètres, il est ainsi possible de formuler un enrobé ayant les caractéristiques nécessaires pour l'usage et pour sa place dans la chaussée.

Pour une couche de roulement, les granulats seront anguleux et la courbe granulométrique sera le plus souvent discontinue mais l'enrobé devra être imperméable.

I.2.6.4 Les propriétés mécaniques des enrobés bitumineux:

Pour connaître les propriétés mécaniques d'un enrobé bitumineux ; on fait un essai ou le plus souvent une série d'essais normalisés ; ces méthodes ou essais diffèrent sur plusieurs points comme le mode de préparation, les dimensions des éprouvettes, les paramètres mesurés, l'appareillage utilisé et la température de réalisation des essais...etc.

En Algérie, la méthode de formulation est basée sur les essais mécaniques traditionnels qui sont l'essai Marshall et l'essai Duriez. Ces méthodes traitent un seul aspect du comportement mécanique des enrobés à savoir la rupture plastique d'une éprouvette dans des conditions normalisées de température, d'humidité et de charges basées sur le principe que le choix de la composition appropriée doit répondre à des exigences de résistance .

I.2.6 Différent types des enrobés bitumineux pour la couche de roulement :

Les types d'enrobés bitumineux utilisés en couche de roulement sont nombreux. Chacune d'elle a ses points forts et ses points faibles et le choix est guidé par les propriétés recherchées. Parmi ces types on distingue :

- Les enrobés minces
- Les enrobés très minces
- Les enrobés ultra-minces
- Les enrobés épais
- Les enrobés drainants
- Les enrobés cloutés
- Les enrobés à liants spéciaux

Conclusion :

Comme nous avons vu précédemment que l'enrobé est constitué deux éléments principale les granulats et le bitume. La liaison entre les granulats et le bitume est très complexe et pour formuler un enrobé convenable plusieurs critères sont à prendre en considération telle que le trafic, les conditions climatiques et les matériaux existants...etc.

Le mélange bitume-agrégat obtenu doit avoir:

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

CHAPITRE II : TECHNIQUES DE TRAITEMENT DU SABLE AUX LIANTS HYDROCARBONES

II.1 INTRODUCTION:

Dans le présent chapitre, nous allons parler sur les sables bitumes de leurs formulations ainsi que de leurs spécifications.

On va voir les points suivants :

- les matériaux composant le sable bitume (sable + bitume).
- caractéristiques du sable de dunes du Sahara en général.
- L'utilisation du sable de dunes soit dans le béton soit dans les routes.
- Les techniques routières sahariennes.
- Formulation du sable bitume et ses propriétés mécaniques en relation avec l'apparition des déformations permanentes.

Ces études bibliographiques serviront à l'analyse de base des facteurs à prendre en compte lors du choix de formulation adéquate qui peut donner les bonnes performances répondant aux sollicitations due soit par le trafic soit par la température.

II.2 Matériaux composant le sable-bitume:

II.2.1 Les sables: Les sables se sont des matériaux pulvérulents dont le diamètre maximal est inférieur à 6,3 mm et dont le passant à 0,08 mm n'excède pas 30%. (Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Group EIER- ETSHER [25]) Les sables ainsi disponibles sont le résultat d'un processus souvent complexe d'érosion et de sédimentation comportant à des degrés divers une décomposition sur place des différentes roches suivies d'un transport fluvial et parfois éolien. Donnant alors aux formes de grains les aspects suivants :

- Emoussés luisants : caractéristique du transport par l'eau
- Ronds mats, émoussés et piquetés caractéristiques du transport par le vent
- Non usé : caractéristiques des grains non transportés

Et généralement selon leur histoire géologique, les sables se distinguent les uns des autres par de multitudes d'aspect: granulométrie, teneur et nature des fines, la nature minéralogique, angularité...etc.

Dans cette étude nous avons utilisé le sable de dunes de la région de SIDI KHOULED Wilaya d'Ouargla.

◆ Les sables de dunes:

Les sables, que l'on trouve dans les dunes mouvantes, sont composés de particules siliceuses pratiquement de même taille et de petites dimensions. Ces sables sont accumulés sous forme de dunes mouvantes de hauteur très variable.

D'après Fookes et Higginbotham (1968), le Sahara est constitué d'environ 40 % de montagnes désertiques, 15 % de plaines désertiques et 30% de dunes de sable, le reste étant constitué de sebkhas, de chotts, etc. Le Sahara, quant à lui, couvre environ le tiers du continent africain. Ces chiffres montrent bien l'intérêt que l'on doit apporter à la construction routière dans le Sahara, qui reste fort démunie en infrastructures, et aussi l'importance que l'on doit accorder au sable dans toute investigation visant la valorisation des matériaux locaux dans ces lieux.



Figure (II.1) : Dunes de sable

Identification des sables de dunes du Sahara**➤ Composition chimique**

Ce sont des sables dont la composition chimique est très simple : plus de 95 % de silice, de 1 à 2 % de calcaire et des traces de différents oxydes. Du fait de cette constitution, le sable a une couleur blanche légèrement jaune et ocre, il se dessèche et perd facilement sa cohésion en surface. [26]

➤ Granulométrie

Le diamètre des plus gros éléments des sables des dunes du Sahara est de l'ordre de 0,5 mm. Il est maximal aux endroits les plus proches de la roche mère et diminue de plus en plus quand on s'en éloigne. Les particules deviennent aussi de plus en plus arrondies. Le diamètre des éléments les plus fins est de l'ordre de 0,04 mm.

Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60} / D_{10}$) est de l'ordre de 1,8 et le coefficient de courbure ($C_c = D_{30}^2 / [D_{10} \cdot D_{60}]$) est de l'ordre de 10. Il s'agit donc d'un sable très fin mal gradué. [26]

➤ **Propreté**

Le sable de dunes ne contient pratiquement pas de traces d'argile. Il a une limite de liquidité WL de l'ordre de 25 et une limite de plasticité non mesurable. La valeur de l'équivalent de sable est supérieure à 60 %. La valeur du bleu est de l'ordre de 0,1.

➤ **Comportement mécanique**

Des essais de compactage puis de cisaillement direct ont été réalisés par Ould Sid et al. Les principaux résultats trouvés sont que:

- l'effet de la teneur en eau sur le compactage est peu significatif quand la teneur en eau est faible (0 à 6 %) ;
- la cohésion a une valeur très faible, de l'ordre de 5 kPa ;
- l'angle de frottement interne varie de 30 à 35°, selon la densité du sable.

Les valeurs de ces paramètres montrent que le sable de dune peut avoir un bon comportement mécanique même lorsque sa compacité est faible, à condition d'être à l'abri du vent. Par ailleurs, l'indice portant CBR de ces sables, au poids volumique et à la teneur en eau de l'optimum Proctor modifié, est relativement faible. Il est de l'ordre de 10 %. C'est ce qui permet, entre autres, d'écarter toute possibilité d'utilisation de ces sables seuls en corps de chaussée.

II.2.1.1 Utilisation du sable de dunes:

a - Utilisation du sable de dunes dans le béton:

Le sable de dunes était utilisé depuis longtemps dans l'exécution des travaux de remblayage des fouilles de fondations et les travaux routiers, mais l'utilisation comme constituant principal du béton n'apparaît qu'après la naissance du béton de sable en 1853. Cette naissance a donné le courage de commencer une nouvelle investigation qui a étudié la possibilité d'utiliser le sable de dunes comme un constituant principal dans les structures des ouvrages en génie civil; pour cette raison plusieurs actions de recherches, soit en Algérie ou à l'étranger, ont été engagées et hypothéquées.

On trouve comme exemple les recherches menées à l'étranger: les travaux de **KOTZIAS** [27] qui sont fait au golfe d'Arabie pour les deux raisons suivantes :

- Les gros granulats disponibles uniquement dans des endroits très lointains.

- Il y a abondance de sable de dunes qu'on peut obtenir à moindre frais

Les recherches menées en Afrique occidentales par **UZOMAKA** au **Nigeria** et **I. J. CHAUVIN** et **MIKHAILOV** au Russie.... [27]

Les recherches effectuées en Algérie; sont mentionnés comme exemples : les recherches du **CNERIB** [27] où une série des travaux ont été réalisés pour la valorisation de sable de dunes dans la masse de béton. On trouve aussi plusieurs thèses de magistère, doctorat ou projet de fin d'étude traitant ce sujet le tous à pour objectif de valoriser le sable de dunes dans le béton.

b - Utilisation du sable de dunes dans le domaine routier :

L'utilisation des sables en techniques routières n'est pas nouvelle. A l'époque déjà, les ingénieurs avaient recours à l'utilisation du sable mélangé à un liant hydrocarboné en particulier pour les couches de roulement. Beaucoup d'études et des réalisations ont été faites et un guide pratique d'utilisation routière de sables a été publié par **Chauvin** (1987) [26]. Cependant, les sables de dunes constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques. L'utilisation du sable de dune seul ne peut être envisagée malgré la facilité qu'il présente au reprofilage, car sa stabilité de surface est souvent incertaine, ce qui augmente la résistance au roulement et provoque parfois des enlacements (Autret, 1989). Mais il pourrait être mélangé avec d'autres matériaux [27].

(En France l'utilisation de sable bitume en corps de chaussée reste limité dans la couche de base ou de fondation.

Parmi les recherches menées dans cette technique, la demande de la direction des travaux publics de Ouargla, en 1999, au CTPP Organisme National de Contrôle Technique des Travaux Publics, de formuler un sable enrobé présentant les meilleures performances mécaniques à base des matériaux locaux d'une part et d'autre part d'assurer le suivi de réalisation d'une planche expérimentale de 300 m de longueur au niveau du chantier de renforcement de la RN49.

Les principaux matériaux composant les mélanges utilisés sont : le sable de dunes, sable alluvionnaire, le sable de concassage 0/3 et le bitume 40/50. Les sables de dunes et alluvionnaire utilisés séparément seuls mélangés au bitume donnent des stabilités et compacités insuffisantes quant à leurs utilisation en corps de chaussée.

Les essais Marshall ont été réalisés à différents pourcentages de sable concassé ajouté aux

sables de base (sable de dunes et sable alluvionnaire). Pour ce qui concerne le sable de dunes, le résultat montre que la stabilité recommandée sera atteinte pour un ajout de plus de 50% de sable concassé, mais la correction avec du sable concassé peut être envisageable dans la mesure où elle peut se faire dans les limites raisonnables (30% au maximum). Pour le sable alluvionnaire, la stabilité recommandée est atteinte à partir de 30% d'ajout de sable concassé. On peut conclure que l'ajout de sable concassé améliore fortement la stabilité.

On voit aussi des projets de fin d'étude de **M.BENKHALIFA** et **N.KEBAILI** [33], où ils sont étudiés le sable enrobé à froid au moyen de cut-back

On n'oublie pas aussi les recherches de **T.KERROUM** et **M.FERHI** [34] intitulé sur le sable bitume en couche de roulement, étude et formulation

Les thèses de **L.MESTAR** et **M.BENCHEIKHE** [35] sur l'étude d'un sable bitume, **H.KACI** [35] sur le sable bitume en couche de roulement : étude et formulation et **A.S.BOUKHALKHAL** et **K.BOUKHALFA** [36] sur le sable bitume : étude comparative à froid et à chaud...etc.

Ces recherches montrent l'importance de l'investigation de sable de dunes dans le domaine routier même dans les bâtiments avec nos connaissances que ce matériau est inépuisable et existe en abondance surtout dans le sud d'Algérie où on trouve la rareté des agrégats ou ces agrégats non conforme aux spécifications.

II.2.2 Le bitume:

Compte tenu généralement du manque d'angularité du matériau sableux, il conviendra d'éviter les bitumes de pénétration élevée, donc le choix de bitume sera très dur de classe 20/30 à raison de 3% à 4% qui reste essentiel pour l'obtention d'une rigidité et d'une stabilité mécanique convenable. On pourra d'utiliser un bitume 40/50 pour un sable-bitume inclut un sable de . Le bitume le plus dur utilisable en Algérie est de classe 40/50.

II.2.3 Fines d'apport:

Lorsque la teneur en fine, élément inférieur à 0,08, apportées par le sable entrant dans le mélange bitumineux s'avère insuffisant et pour assurer une stabilité suffisante et facilite la mise en œuvre, il faut adapter des mélanges minéraux dont la teneur minimum absolu de fine est 3% mais il apparaît très souhaitable de fixer aux environs de 5%.

Dans le cas d'utilisation de sables naturels (qu'ils ne présentent pas une teneur en fine suffisante) on pourra soit :

- utiliser des fines d'apport
- l'addition d'un pourcentage de sable broyé

II.3 Les sables traités au bitume pour couche de roulement :

On peut dire un sable bitume ou un mortier bitumineux, les mortiers qui peuvent être considérés comme un cas particulier des bétons : le cas où ces bétons ont une teneur nulle en gravillons et ne comprennent par conséquent que du sable, du filler et un liant bitumineux.

Selon ARRAMBIDE et DURIEZ [21] les mortiers bitumineux se divisent en trois types :

II.3.1 Les Sheet asphalt : sont, ainsi comme nom l'indique, des mortiers de couverture destinés à créer des surfaces d'usure imperméable, toujours en épaisseur mince, et qui sont très riches non seulement en sable mais en filler et en bitume.

Ce type d'enrobé ne peut être utilisé au Sahara parce qu'il est très couteux et le pourcentage élevé de bitume crée un ressuage en été et des fissures plus ou moins importantes en hiver.

II.3.2 Les Micro-bétons: sont analogues aux bétons bitumineux, mais en réduction, des éléments bien gradués, un sable gros et un sable fin, du filler et du bitume.

II.3.3 Les sables bitume (sand asphalt): sont comparable en quelque sorte aux enrobés denses, qui contiennent donc moins de filler et moins de liant que les micro-bétons et a fortiori que les sheet asphalte.

Notre étude est basée sur les **sand asphalte**

➤ **Utilisation du sable bitume:** les sables bitumes sont des matériaux qui permettent d'effectuer des revêtements minces de l'ordre de 2,5 à 3,5 cm. selon ARRAMBIDE et DURIEZ l'épaisseur n'atteignant pas 5 cm, car ils risquent de fluer, bien que la richesse en liant ne soit pas très élevée (ce qui leur donne une cohésion peut-être insuffisante pour les véhicules rapides); leur résistance est moindre aussi, du fait que l'angle de frottement interne est plus faible en comparaison avec les bétons et les enrobés denses.

Les sables bitumes risquent, surtout d'être déficients lorsqu'il s'agit de chaussées à forte trafic où il y a une circulation de camions très lourds. On risque, sur des chaussées à grosse circulation lourds et rapides, l'apparition des fissurations dans le revêtement accompagnées d'un fluage de celui-ci si l'épaisseur du revêtement de sand asphalte est trop forte, accompagnées d'un décollement si l'épaisseur est plus faible. (A l'épaisseur égale, la limite d'endurance des sables bitumes est moindre que celle des bétons bitumineux).

II.4 Sable bitume en route saharienne :

Vu le problème de déficit des agrégats dans certaines régions, en particulier le Sud Algérien, et en plus le coût de transport des agrégats qui intervient de manière très significative dans la construction du prix de revient final des ouvrages. La tendance actuelle est d'adapter la technique routière avec l'emploi des matériaux locaux, notamment les sables, et d'orienter la recherche vers l'utilisation de ces sables.

Cette technique a fait son apparition lors de la réalisation des premières routes dans le sud par les pétroliers à la fin des années 1950.

Plusieurs exemples de routes ont été réalisés avec un sable-bitume en couche de roulement.

On trouve [33] :

- RN 3 région de Gassi Touil : ce tronçon de longueur environ de 300 km, réalisé avec un sable enrobé en couche de roulement d'épaisseur 5,5 cm (1960).
- RN 49 Ouargla – Hassi Messaoud : 12 km de cette route a été réalisée en sable enrobé.
- RN 3 Stil – Touggourt : 140 km cette route réalisés en sable enrobé avec des épaisseurs variables d'environ 6 cm (1956 – 1957).
- RN 48 Stil – El Oued : réalisé avec un revêtement en sable bitume, le seul sable utilisé est le sable de dunes (1956).
- RN 56 : sur une longueur de 67 km de Touggourt vers Ouargla.

En tant que parle sur les routes en milieu saharien, il faut présenter les règles de « **la Technique Routière Saharienne** » telles qu'elle a été décrite par ses fondateurs lors du congrès de Beni-Abbes en 1965.

II.5 Technique Routière Saharienne :

II.5.1 Définition de la technique routière saharienne

Entre 1956 (date de la découverte des premiers gisements pétroliers) et 1963 (date de la tenue de la première rencontre sur les techniques routières sahariennes) plus de 2.500 km de routes ont été construites. C'est lors de ces impressionnantes réalisations qu'un certain nombre de problèmes spécifiques à la région désertique ont été constatés, analysés et ont finalement trouvé des solutions.

Fort de cette expérience, les ingénieurs et techniciens de la route ont jeté les premiers jalons de la construction routière saharienne. C'est en 1965, lors du séminaire de Beni-Abbes, que les principes de la technique routière saharienne ont été arrêtés (M. Fenzy " codifia " et justifia cette technique dans un article paru dans la "revue générale des routes et aérodromes" en 1966). [38]

II.5.2 Les idées générales :

Le trafic saharien est essentiellement composé de camions gros porteurs souvent en surcharge. Donc, on se dirigera vers une chaussée qui accepte sans désordres immédiats des déformations élastiques même relativement importantes, car les répétitions de charges étant faibles, les phénomènes de fatigue doivent apparaître lentement.

Le climat saharien est très sec. Les quelques pluies tombent presque toujours en précipitations relativement importantes pendant un temps très court. L'imbibition n'est pas à craindre à la seule condition que la forme de la surface permette l'écoulement des eaux. Le problème des chotts doit être dissocié de la technique routière saharienne.

II.5.3 Principe de la technique :

La couche de roulement doit être souple pour se plier sans se rompre. Le matériau de la couche de base doit pouvoir supporter des déformations élastiques (réversibles). Grâce au climat sec, la résistance de la couche de base peut être obtenue soit par frottement entre grains, soit par cohésion. L'épaisseur de la couche de base peut être faible car le sol de fondation étant sec, sans portance est en général bon (C.B.R > 20). La possibilité d'utiliser des matériaux cohérents plus ou moins argileux en couche de base impose de s'assurer du bon écoulement des eaux de pluie.

II.6 Les règles pour réussir un sable bitume :

Suivant les connaissances de ARRAMBIDE et DURIEZ pour réussir un sable enrobé on peut suivre les règles suivantes :

Pour les agrégats :

- Durs et peu fragiles
- Concassés ou naturels
- Granulométrie et compacité : courbe minimum ; pour obtenir 80% de compacité et pas d'arrachement, il faut s'il s'agit d'un enrobé à base de sable 0/2 mm : 5% de filler et 25% du mélange « filler + sable » moyen (égale ou inférieur à 0,05 mm). S'il s'agit d'enrobé entièrement concassé du calibre 0/6 mm, il faut au moins 4% de filler et au moins 20% du mélange de filler et de sable moyen inférieur ou égale à 0,5 mm. Pour obtenir 85 à 92% de compacité, dans ce cas on propose de 6 à 10% de filler et de 25% à 50% du mélange filler + sable moyen (inférieur à 0,5mm).

Ces derniers mélanges s'obtiennent facilement avec un sable de rivière, un sable de mer ou un sable de dunes ou un sable alluvionnaire 0/1 à 0/3 mm, ayant de 10 à 20% de filler, en

les mélangeant dans des proportions convenables avec 2 à 5% de filler complémentaire.

Avec le sable de rivière, les proportions optimums sont plutôt de 30% et 70% de sable alluvionnaire.

Pour le liant :

Les tapis des enrobés bitumineux posés au finisseur doivent employer un bitume pur avec un module de richesse de 4 si on veut d'obtenir moins de 10% de vides résiduels et de 4,25 si on a 10% ou plus de vides résiduels.

II.7 Formulation des sables bitumes :

Nous nous intéressons ici aux matériaux traités aux liants hydrocarbonés à chaud, bétons et enrobés bitumineux, graves et sables bitume, qui résultent du mélange de granulats et de liant hydrocarboné avec éventuellement des additifs, dosés, chauffés et malaxés en centrale. La plupart de ces techniques font l'objet des normes de la série **NF P98-130 à 150**.

Cependant la recherche d'une formulation optimum reste complexe car elle doit tendre vers un compromis. Par exemple, l'utilisation des matériaux roulés facilite la maniabilité au détriment de la résistance. L'utilisation de matériaux concassés augmente la résistance mais demande beaucoup d'énergie pour le compactage (augmentation du coût). D'autres interactions sont rencontrées avec des paramètres externes comme la température, ce qui complique davantage le choix de la formulation.

Ainsi la formulation doit jouer sur différents paramètres tels que la courbe granulaire, la compacité, l'angularité des granulats, le type de bitume, la teneur en liant, le type et la teneur en fines.

Tant que le mélange de sable bitume dépourvu des classes granulaire supérieur à 5 mm donc la formule de **Duriez** citée dans le 2^{ème} chapitre sera simplifiée et basée sur deux paramètres : pourcentage des fines et module de richesse.

La formule simplifiée de Duriez est : [21

$$TL = K \times \sqrt[5]{\Sigma} \quad (2.5)$$

Où :

K: module de richesse, est un coefficient proportionnel à l'épaisseur conventionnelle du film de liant enrobant le granulat qui varie entre 3,75 et 4,5. [21

Σ : surface spécifique conventionnelle du mélange en m²/kg

$$\Sigma = (4,75 + 1,3 \cdot f)$$

f: pourcentage des éléments < 0,08mm

Les bitumes 80/100, 60/70 et 40/50 peuvent être utilisés avec une préférence les bitumes durs pour les zones de forte chaleur. Le dosage est généralement compris entre 6 et 8% du bitume.

II.8 Propriétés mécaniques des sables bitumes :

Les propriétés mécaniques peuvent être déduites de l'analyse de résultats d'essais de laboratoire.

Ces essais normalisés sont effectués dans des conditions bien définies de températures et de sollicitations, sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire ou éventuellement prélevées sur la chaussée. En comparant les performances obtenues à celles des normes prescrites ; la valeur de ces normes étant fixée par l'expérience et les conditions climatiques de chaque pays. Le problème essentiel consiste de déterminer la teneur optimale en liant convenablement et juger l'aptitude du sol à être stabilisé avec un liant hydrocarboné.

Il n'existe pas de méthode normalisée et les meilleures méthodes généralement utilisées sont celle de l'essai Hubbard-Field (H.F) et celle de Marshall. La stabilité du mélange sable bitume ne dépend pas uniquement de la graduation du sable, mais d'autres paramètres qui sont des facteurs de surface de l'agrégat.

Dans le cas où on utilise du bitume pur (Ce souci d'utiliser un liant de grande dureté tient au fait que le principal problème avec les sables bitume est d'obtenir une bonne résistance et une faible déformabilité), le mélange est étudié le plus souvent avec l'essai Hubbard Field (moule de 5 x 2,5 cm). On demande en général une stabilité H.F supérieures à 4000 N. La méthode de Marshall est parfois utilisée et on exige une stabilité supérieure à 2500 N.

La plupart des sables bitumes sont exploités dans la couche de base ou fondation (Ministère de l'aménagement du territoire, de l'équipement, du logement et du tourisme en collaboration avec SETRA et LCPC [30] ; Ministère des transports, direction des routes en collaboration avec SETRA et LCPC [29]) tant que cette technique a donné des résultats satisfaisants au Sénégal, au Bénin et en Côte d'Ivoire en couche de roulement .

II.9 Comportement des sables bitumes :

Le comportement du sable bitume est caractérisé par les spécifications suivantes :

- La stabilité immédiate et à long terme ;
- Le comportement après immersion ;
- Le gonflement ;

- Le pourcentage d'eau absorbée.

Les désordres qui se manifestent rapidement après la mise en œuvre se rattachent généralement à l'une des causes suivantes:

- des écarts par rapport aux spécifications sur le matériau,
- des conditions météorologiques défavorables au moment de la mise en œuvre,
- des écarts de mise en œuvre sous compactage de la couche de sable traité ou de la sous-couche, surdosage en liant, mauvais accrochage entre les couches.

A long terme, on peut voir qu'au niveau des accotements si le sable bitume en couche de base, il est souvent en sur largeur par rapport à la couche de roulement. Dans ce cas, cette sur largeur n'est pas protégée et donc est exposée aux variations climatiques dans une tendance à se rigidifier par le vieillissement du liant. Si les écarts de température sont importants, un phénomène de fissuration de retrait peut se développer et s'étendre ensuite à la chaussée.

Si le sable bitume en couche de roulement, la texture lisse de surface engendre des glissements et la forte teneur en bitume avec la température élevée particulièrement à l'été permettent de l'apparition des ressuages et des déformations permanentes type ornières.

Les sables traités au bitume conservent généralement une teneur en vides importante rendant capables d'absorber beaucoup d'eau. A l'état imbibé, leur niveau de performances est beaucoup plus faible et des dégradations peuvent apparaître.

Conclusion :

Cette étude bibliographique a permis de cerner globalement l'ensemble des éléments ainsi que les difficultés à entrevoir dans une étude éventuelle d'un mélange sable bitume. L'étude devra concerner la formulation, le comportement et les caractéristiques des matériaux à utiliser ainsi que le mélange des différentes proportions. Ces dernières seront définies en rapport avec cette même étude bibliographique.

Nous allons, maintenant, entamer l'étude expérimentale pour ainsi déterminer les performances réelles des différents mélanges à étudier.

CHAPITRE III : CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES

III.1 Introduction:

Ce chapitre a pour objectif de présenter les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude et les diverses techniques qui ont servi à fabriquer et à caractériser les sables bitumes.

Donc dans ce chapitre, d'abord, nous allons exposer les caractéristiques des différents matériaux utilisés dans la composition de sable bitume, à savoir :

- La masse volumique ;
- La granulométrie ;
- La composition chimique;
- Equivalent de sable...etc.

Puis, nous présentons les mélanges choisis dans cette étude par la détermination de distribution granulométrique de chaque mélange choisi et les dosages de bitume supposés. Finalement la conclusion qui récapitule tout les renseignements nécessaires exposé (Sachant que les essais réalisés dans cette étude sont faites au niveau de laboratoire LTPS de Ouargla).

III.2 Le sable de dunes :

Le sable de dunes est le résultat d'une érosion et d'une sédimentation des différentes roches suivie d'un transport fluvial et parfois éolien. La plus grande partie des formations sableuses est constituée de quartz.

Pour notre étude nous avons utilisé le sable de dunes de la région de SIDI KHOULED wilaya de Ouargla (cette zone est plus proche du centre-ville et le sable de dunes de celle-ci n'est pas utilisé dans une étude similaire).

III.2.1 Les caractéristiques des sables utilisés :

Dans notre étude nous avons utilisé trois types de sable d'origines différentes telle que: le sable de dunes de SIDI KHOULED, sable alluvionnaire de Hassi ESSAYEH et le sable concassé 0/3 de carrière BEN BRAHIM. Tous ces sables sont prélevés de la région d'Ouargla.

III.2.1.1 Masses volumiques :

a. Masse volumique absolue : est la masse par unité du volume de la matière qui constitue le sable, sans tenir compte des vides qui peuvent prendre place entre les grains
La formule qui permet de calculer ce paramètre est :

$$\gamma_s = \frac{M}{V_s} \quad (3.6)$$

Tels que:

γ_s : La masse volumique absolue (t/m^3 , g/cm^3 , ...)

M : La masse de l'échantillon (g)

V_s : Le volume absolu de l'échantillon (cm^3)

b. Masse volumique apparente : par définition la masse volumique γ_a d'un échantillon est le quotient de sa masse M par son volume V_a qu'il occupe

$$\gamma_a = \frac{M}{V_a} \quad (3.7)$$

γ_a : La masse volumique apparente (t/m^3 , g/cm^3 , ...)

M : La masse de l'échantillon (g)

V_a : Le volume apparent de l'échantillon (cm^3)

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

Tableau (III.1): La masse volumique absolue et apparente des sables utilisés

Type de sable	γ_s (g/cm^3)	γ_a (g/cm^3)
Sable de dunes	2,63	1,46
Sable alluvionnaire	2,58	1,50
Sable concassé 0/3	2,57	1,43

III.2.1.2 Analyse chimique:

Le tableau (III.2) expose les pourcentages des composants chimiques de différents sables

Tableau (III.2): Analyse chimiques des sables utilisés

Composant	Pourcentage (%)		
	Sable de dunes	Sable alluvionnaire	Sable concassé 0/3
Insolubles	95,99	92,94	32,24
CaSO ₄ , 2H ₂ O	2,63	1,16	1,80
SO ₃	0,49	0,21	0,33
CaCO ₃	1,5	2	68
Na Cl	0,046	0,035	0,0129
Cl ⁻	0,028	0,021	0,0079

D'après cette analyse nous remarquons que les compositions chimiques pour les deux sables de dunes et alluvionnaire presque sont les mêmes, ce qui va être compatible au mélange entre les deux.

Le sable concassé 0/3 contient 68% de carbonate de calcium donc il a une origine calcaire.

III.2.1.3 Analyse granulométrique:

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

Le tableau (III.3) ci-dessous présente la distribution granulométrique pour les différents sables :

Tableau (III.3): Analyse granulométrique des sables utilisés

Diamètre des tamis (mm)	Tamisât (%)		
	Sable de dunes	Sable alluvionnaire	Sable concassé 0/3
5	100	100	100
4	100	99	100
3,15	100	98	100
2,5	100	97	97
2	100	93	92
1,6	100	88	83
1,25	100	82	72
1	100	76	66
0,63	98	63	55
0,315	78	25	43
0,16	25	5	32
0,08	3	1	28

La figure (III.1) présente les courbes granulométriques des différents sables utilisés :

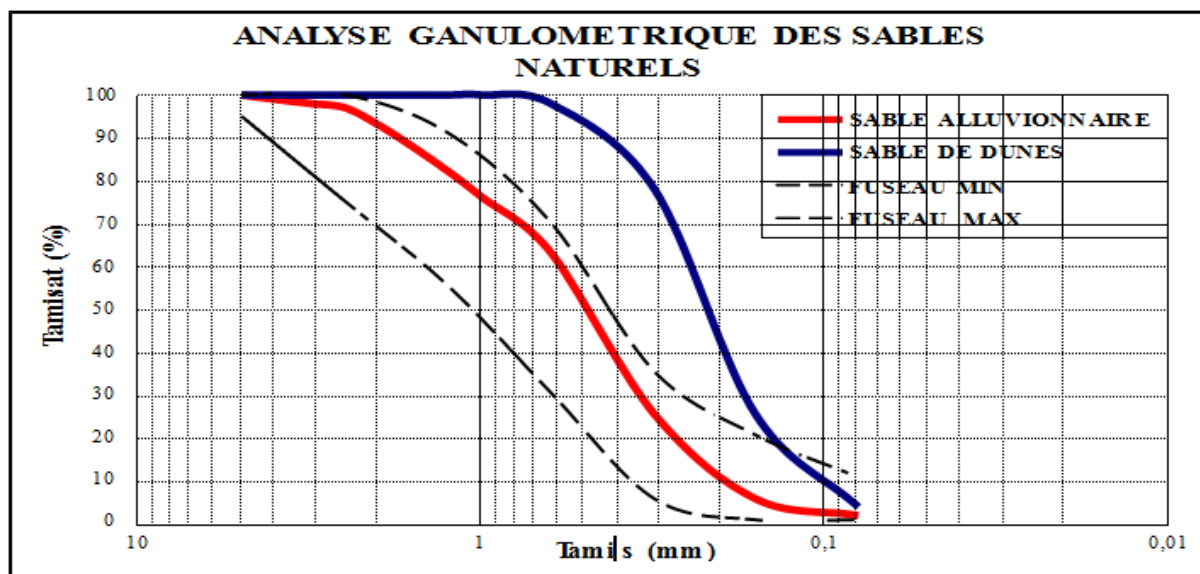


Figure (III.1) : Analyse granulométrique des sables naturels utilisés

SD : Sable de dunes

SA : Sable alluvionnaire

SC 0/3: Sable concassé 0/3

La présente courbe montre bien que la granulométrie du sable de dunes utilisée est bien serrée comme le montre la figure (III.1) ci-dessus. Elle se caractérise par une granularité discontinue 90 % des grains sont inférieurs à 0,4 mm.

Le sable alluvionnaire est un sable plus grossier que le sable de dune (99% des éléments sont inférieurs à 5mm), sa granulométrie est étalée, le pourcentage de fines est de 1%.

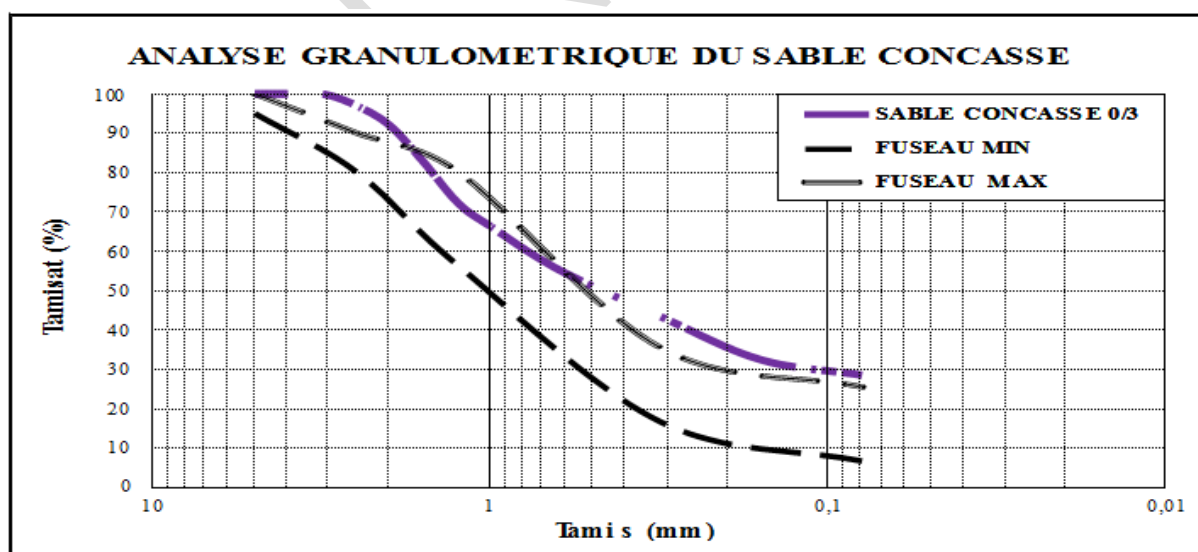


Figure (III.2) : Analyse granulométrique du sable concassé

La courbe granulométrique de sable concassé 0/3 présente une granularité étalée et continue

et une forte teneur en fine 28 % (figure (III.2)).

III.2.1.4 Equivalent de sable:

Cet essai utilisé de manière courante pour évaluer la propreté des sables. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable effectué sur une fraction 0/5 mm du matériau à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout au bout de 20 minutes on mesure les éléments suivants

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

$$ESV = 100. h2 / h1 \quad (3.8)$$

Les résultats trouvés sont mentionnés dans le tableau suivant:

Tableau (III.4): ES des sables utilisés

Type de sable	Sable de dunes	Sable alluvionnaire	sable concassé 0/3	Valeur recommandée
ES (%)	81,94	63,28	53,92	ES > 45

Les valeurs trouvées sont supérieures à la valeur recommandée c'est-à-dire que ces sables sont propres.

III.3 Caractéristique de bitume utilisé :

Le bitume utilisé dans cette étude est un bitume pur de classe 40/50 provenant des fondoirs de la centrale d'enrobage du groupe TOTAL à Ouargla. Après les essais d'identification réalisés sur ce bitume dans le laboratoire LTPS on a obtenu les résultats suivants :

Tableau (III.5) : Caractéristiques du bitume 40/50

Essai	Unité	Valeur
Densité	g.cm ⁻³	1,04
Pénétrabilité à 25°C	1/10 mm	49
Point de ramollissement TBA	°C	50

III.4 Description des différents mélanges "sable bitume" étudiés :

III.4.1 Détermination des mélanges des sables étudiés :

Dans notre étude nous avons utilisé trois types de sable : sable de dunes, sable alluvionnaire et sable concassé 0/3. Le mélange granulométrique utilisé permet d'obtenir un mélange d'enrobé type sable bitume ou sand asphalt.

D'après les recherches ce que nous avons fait dans la partie bibliographique, nous avons

déduit que le pourcentage de sable alluvionnaire entrant dans le mélange de sable bitume sera limité entre 30 à 70%. Pour le sable concassé 0/3 ne doit pas dépassé 30%.

Suivant à notre objectif dans ce mémoire de valoriser le maximum les dunes de sable qu'ils sont existé en abondance dans le sud algérien, une part, et les bons résultats trouvés par les chercheurs sur l'utilisation de sable de dunes dans le béton de sable, dans les briques..., d'autre part. Nous avons essayé de choisir, aléatoirement, cinq mélanges de proportions différents entre les trois sables « sable de dunes + sable alluvionnaire + sable concassé 0/3 » où le pourcentage de sable de dunes est prédominant.

Le choix de ces mélanges se fait par deux démarches :

- Premièrement, nous avons choisi trois mélanges où le pourcentage de sable de dunes est fixé à la valeur de 50% et le pourcentage 50% restant sera décomposé entre les autres sables alluvionnaire et concassé 0/3.
- Deuxièmement, nous avons essayé de choisir un pourcentage égal entre les différents sables.

Sachant que les courbes de mélanges obtenus doivent situer dans le fuseau de référence recommandé concernant le sable bitume comme le montre le tableau (III.6) :

Tableau (III.6): Fuseau de référence du sable bitume ou sand asphalt [21]

Tamis	Sable bitume	
	MIN	MAX
5	100	100
2	80	100
0,8	50	95
0,5	25	90
0,2	5	60
0,08	0	10

La figure (III.3) présente la courbe granulométrique du fuseau de référence pour le sable bitume :

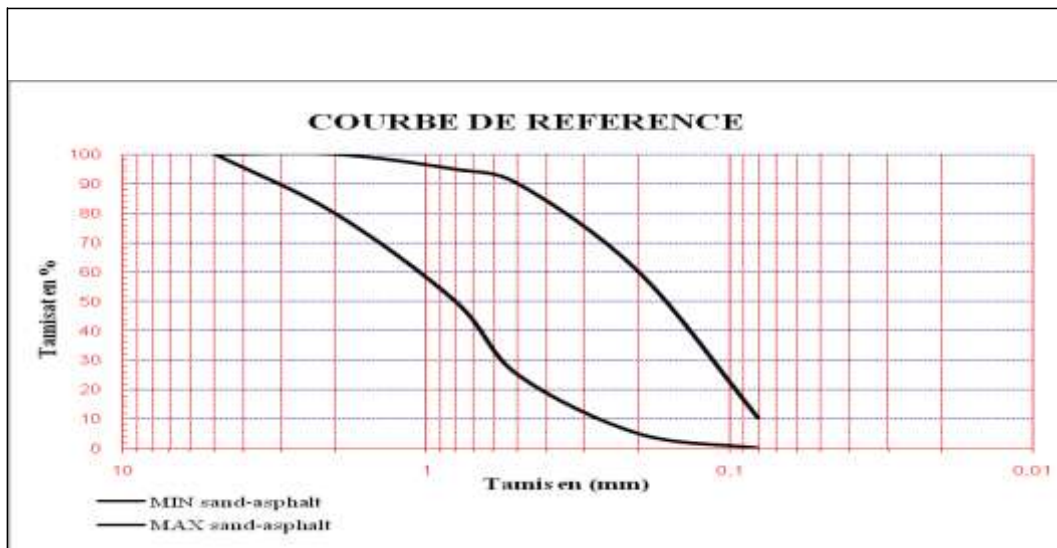


Figure (III.3): Fuseau de référence du sable bitume [21]

On remarque sur la figure ci-dessus que la courbe de référence de sable bitume est large cela permet de déduire plusieurs suggestions ou plusieurs mélanges.

Dans notre étude nous essayons de retenir cinq mélanges granulaires qui sont résumés comme suit:

✚ 1^{er} mélange:

Dans ce mélange nous avons choisi 100% sable de dunes.

La figure (III.5) suivante présente la courbe granulométrique de sable de dunes :

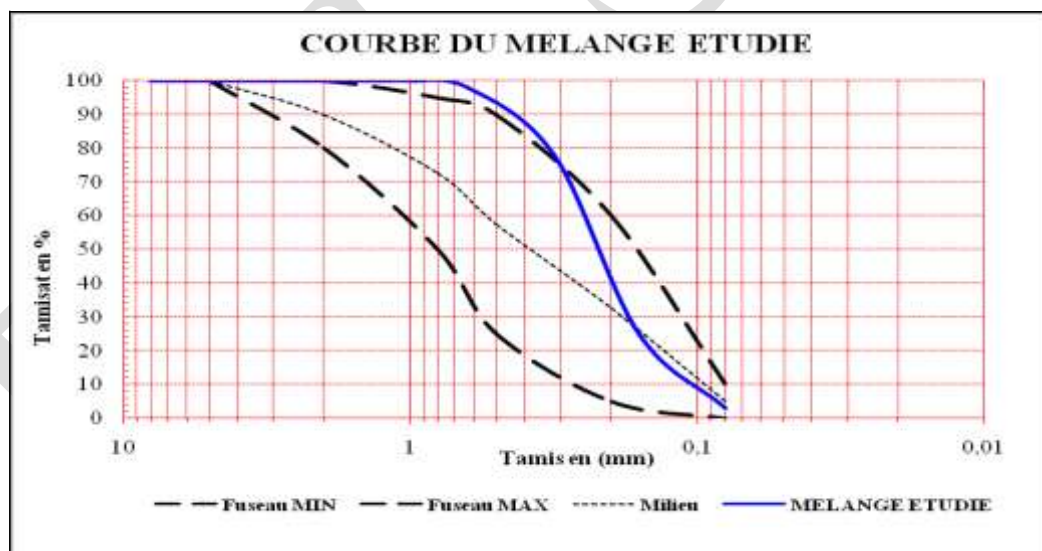


Figure (III.5) : La courbe granulométrique du sable de dunes

Comme nous avons exprimé d'après l'analyse granulométrique que le sable de dunes est caractérisé par une granulométrie serré, pour cette raison nous observons que sur la figure ci-dessus 35 % de la courbe de sable de dunes est située en dehors du fuseau recommandé.

Plus la courbe du mélange étudiée est située dans le milieu du fuseau recommandé plus

elle donne de bonnes performances mécaniques, c'est-à-dire que le mélange se caractérise par une courbe granulométrique étalé.

2^{ème} mélange

Les proportions des différentes fractions sont les suivantes :

- sable de dunes50%
- sable alluvionnaire.....25%
- sable concassé 0/3.....25%

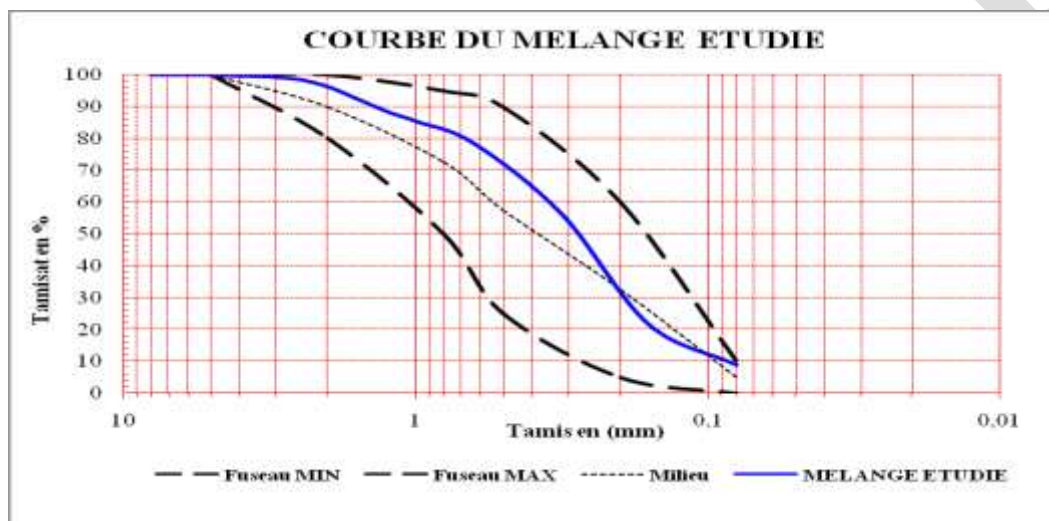


Figure (III.7) : Courbe granulométrique du mélange étudié dans le 2^{ème} mélange

Nous remarquons sur la figure ci-dessus que la courbe de mélange rentre dans le fuseau recommandé et proche du milieu du fuseau.

3^{ème} mélange

Les proportions des différentes fractions sont les suivantes

- sable de dunes.....50%
- sable alluvionnaire.....35%
- sable concassé 0/3.....15%

La figure (III.9) illustre la courbe granulométrique de 3^{ème} mélange :

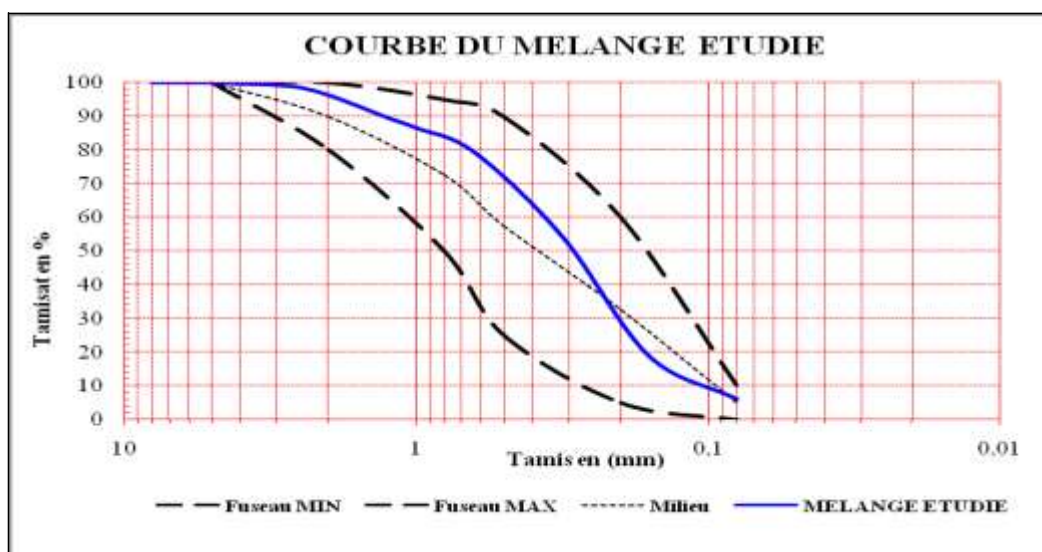


Figure (III.9) : La courbe granulométrique du mélange étudié dans le 3^{ème} mélange

Nous distinguons sur la figure ci-dessus que la courbe de mélange est proche du milieu du fuseau recommandé et le coupe dans un point.

4^{ème} mélange

Les proportions des différentes fractions sont les suivantes :

- sable de dunes.....50%
- sable alluvionnaire.....15%
- sable concassé 0/3.....35

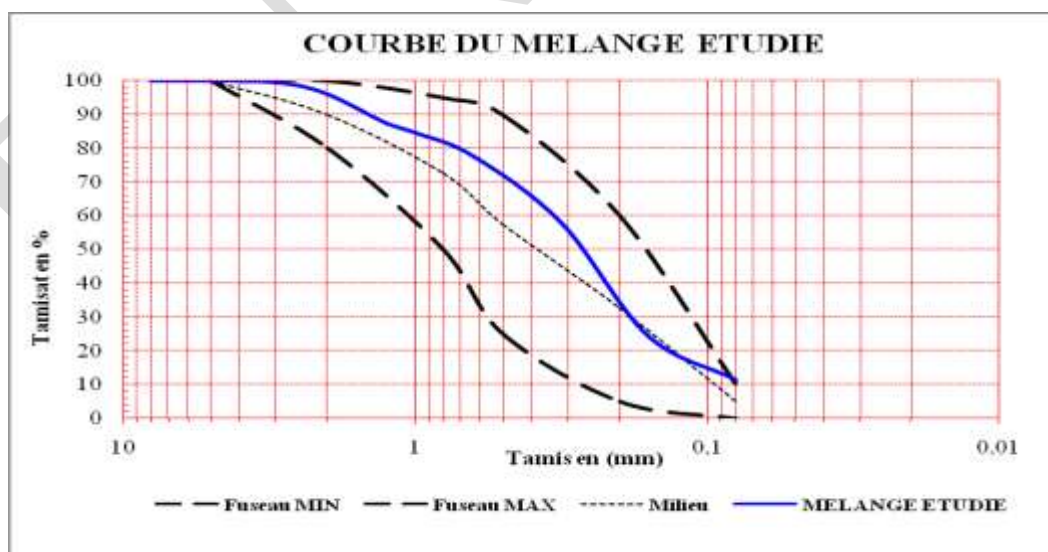


Figure (III.11) : La courbe granulométrique du mélange étudié dans le 4^{ème} mélange

Nous observons sur la figure ci-dessus que la courbe de mélange rentre dans le fuseau recommandé et proche du milieu du fuseau.

5^{ème} mélange

Les proportions des différentes fractions sont les suivantes :

- sable de dunes.....34%
- sable alluvionnaire.....33%
- sable concassé 0/3.....33%

La figure (III.13) présente la courbe granulométrique de 5^{ème} mélange :

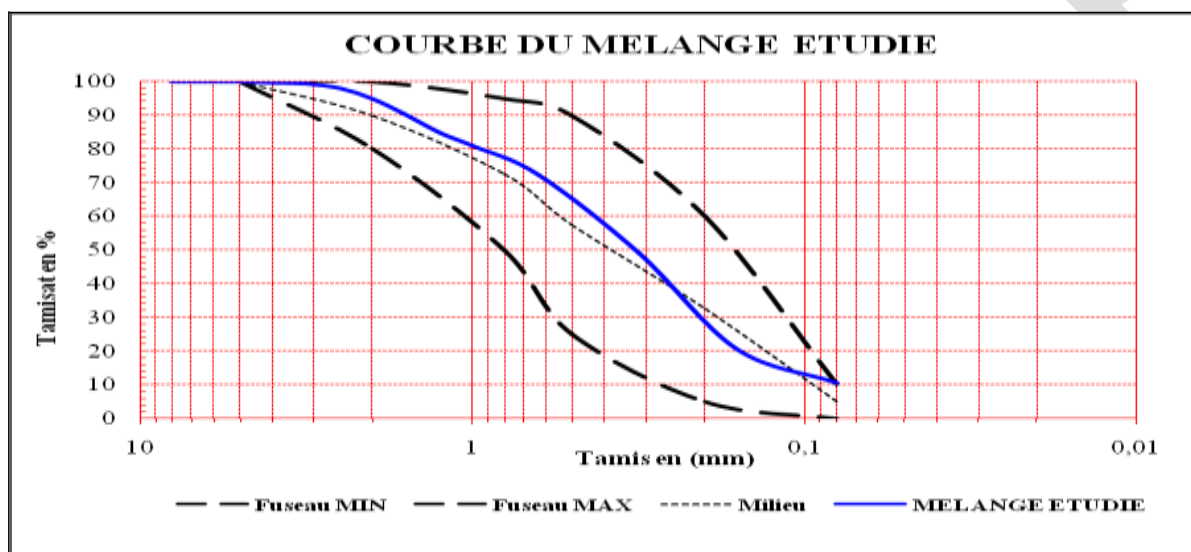


Figure (III.13) : La courbe granulométrique du mélange étudié dans le 5^{ème} mélange

Nous remarquons sur la figure ci-dessus que la courbe du mélange rentre dans le fuseau, plus proche du milieu et elle la coupe dans deux points.

III.4.2 Détermination des teneurs en bitume :

Des recherches expérimentales ont montré l'existence d'une teneur en bitume optimale pour chaque mélange, pour laquelle la stabilité, la cohésion et le frottement interne des agrégats (les derniers deux facteurs qui améliorent la résistance aux déformations permanentes du mélange) atteignent leurs valeurs maximales.

Nous avons choisi trois valeurs de module de richesse 3,75 ; 4 et 4,25 (ces valeurs sont aléatoires) en complaisant le côté économique (le prix du bitume est élevé dans le marché).

La détermination du pourcentage de bitume dépend du pourcentage des fines < 0,08 obtenu à partir de la courbe de mélange et elle dépend aussi du module de richesse. D'après la formule simplifiée de Duriez N° [5] citée dans le troisième chapitre, on peut déterminer les pourcentages de bitume suivant le pourcentage des fines et les valeurs de module de richesse.

Le choix de la teneur en bitume optimale sera obtenu par la réalisation de l'essai Marshall sur des éprouvettes normalisées, correspond à une stabilité maximale.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau (III.7) : Résultat récapitulatif de calcul des pourcentages du bitume

N° de mélange	Teneur en bitume %	Mélange étudié
1 ^{er} mélange	K ₁ = 3,75 TL ₁ = 5,77 K ₂ = 4 TL ₂ = 6,16 K ₃ = 4,25 TL ₃ = 6,54	100% sable de dunes
2 ^{ème} mélange	K ₁ = 3,75 TL ₁ = 6,57 K ₂ = 4 TL ₂ = 7,00 K ₃ = 4,25 TL ₃ = 7,44	50% sable de dunes 25% sable alluvionnaire 25% sable concassé 0/3
3 ^{ème} mélange	K ₁ = 3,75 TL ₁ = 6,23 K ₂ = 4 TL ₂ = 6,64 K ₃ = 4,25 TL ₃ = 7,06 K ₄ = 4,50 TL ₄ = 7,47	50% sable de dunes 35% sable alluvionnaire 15% sable concassé 0/3
4 ^{ème} mélange	K ₁ = 3,75 TL ₁ = 6,80 K = 4 TL = 7,26 K ₃ = 4,25 TL ₃ = 7,71	50% sable de dunes 15% sable alluvionnaire 35% sable concassé 0/3
5 ^{ème} mélange	K ₁ = 3,75 TL ₁ = 6,76 K ₂ = 4 TL ₂ = 7,21 K ₃ = 4,25 TL ₃ = 7,66 K ₄ = 4,50 TL ₄ = 8,11	34% sable de dunes 33% sable alluvionnaire 33% sable concassé 0/3

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons essayé d'identifier les types de sables utilisés dans cette étude: sable de dunes, sable alluvionnaire et sable concassé 0/3 en suivant les normes recommandées.

Après analyse des différents sables nous avons conclu que le sable de dunes est un sable très propre, fin, de granulométrie serrée, de nature siliceuse et contient 95,99 % d'insolubles (silice SiO_2 +silicates). Puis le sable alluvionnaire est un sable propre aussi de nature siliceuse et a une distribution granulométrique bien graduée. Finalement le sable concassé est un sable peu propre et comporte des pourcentages élevés de fines égale 28%, de nature calcaire.

De cette étude cinq mélanges ont été formulées à fin de faire les expérimentations nécessaires.

Le liant utilisé est la bitume pur 40/50 du pénétration moyenne (1/10mm) 49 mm et
TBA = 50°C

CHAPITRE IV : ESSAIS REALISES ET DISPOSITIFS EXPERIMENTAUX

IV.1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons exposer l'étape expérimentale par la réalisation des deux essais mécaniques l'essai Marshall et l'essai Duriez sur le sable bitume,

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

L'étude expérimentale déroulée dans cette thèse montrée dans le schéma ci-dessous:

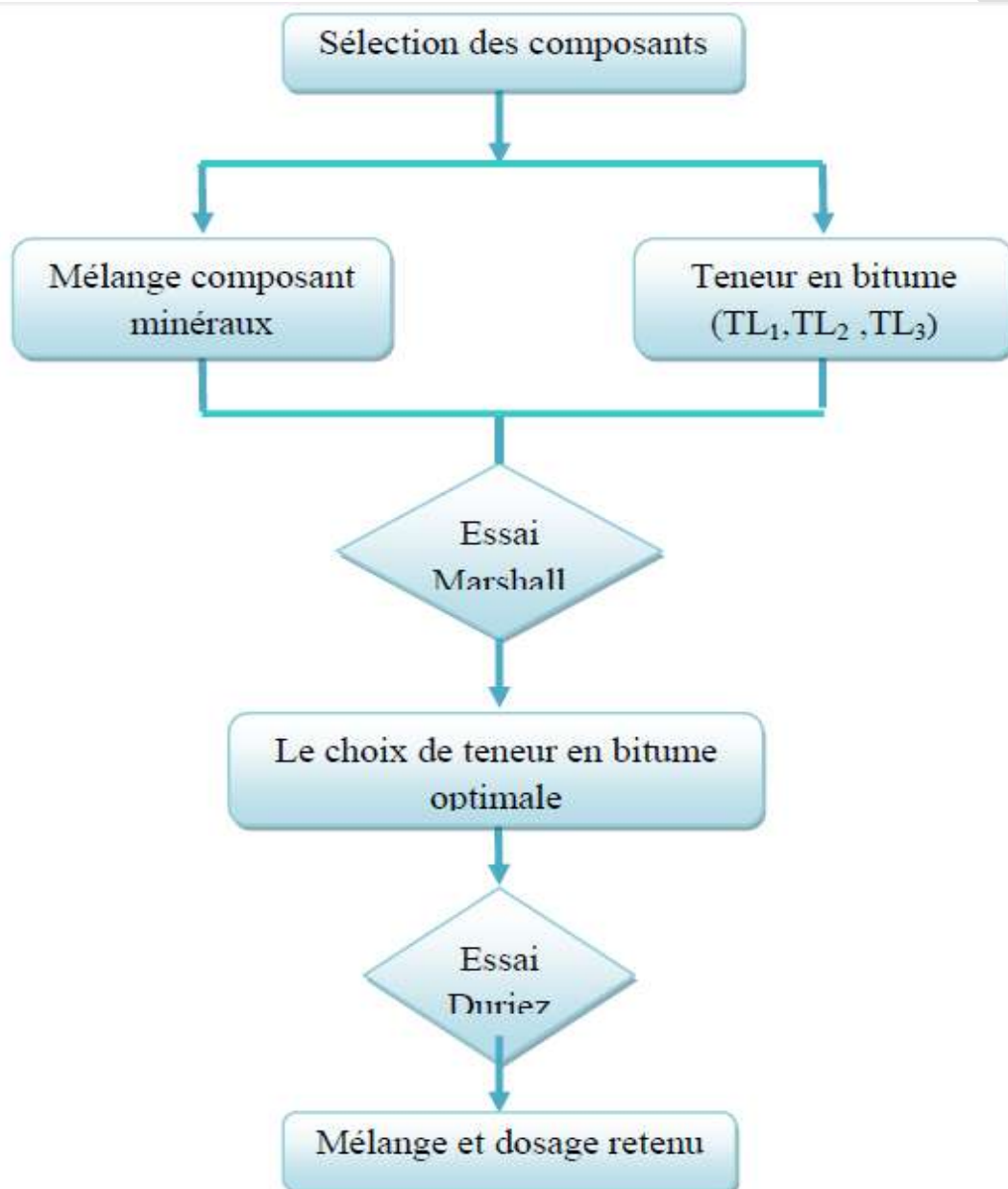


Figure (IV.1) : Etape de formulation

IV.2 Confection des éprouvettes:

Les éprouvettes sont confectionnées suivant le type d'essai soit Marshall ou Duriez

IV.2.1 Préparation des mélanges:

La fabrication de mélange de sable bitume au niveau du laboratoire a été réalisée conformément à la norme NFP 98-250-1 soit pour l'essai Marshall ou pour l'essai Duriez.

IV.2.1.1 Préparation des sables :

Chacune des types des sables entrant dans la composition du mélange hydrocarboné est prélevée selon la norme P18-553 « préparation d'un échantillon pour essai ».

Les différents sables sont séchés dans une étuve à une température comprise entre 90 et 110°C (photo (IV.1)) jusqu'à masse constante. la masse des sables est considérée constante lorsque la variation de masse entre deux pesées d'un échantillon, à deux heures d'intervalle, est inférieur à 0,1% de la masse des sables.

Les sables secs à mélanger sont maintenue à une température supérieure de $20 \pm 5^\circ\text{C}$ à la température de référence de l'essai pendant au moins 10h.

IV.2.1.2 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 un récipient remplis et fermé. La mise en température du liant est effectuée en deux phases :

- Le récipient rempli et fermé, placé en étuve, est porté à la température de référence - 0°C , + 10°C en moins de 5h. (Dans notre étude la température de référence de bitume 40/50 était entre 160°C et 170°C).
- Le récipient est placé sur une plaque chauffante et son contenu est agité constamment pour homogénéiser sa température, et le maintenir à sa température de référence. Cette opération ne doit pas se prolonger plus de 10mn.
- La température de référence de préparation des mélanges est définie suivant la catégorie de liant hydrocarboné utilisée comme suit (NFP 98-250-1[47]):
 - Bitume 80/100 : $140^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$
 - Bitume 60/70 : $150^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$
 - **Bitume 40/50 : $160^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$**
 - Bitume 20/30 : $180^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$



Photo (IV.1) : Etuve utilisé dans cette étude

IV.2.1.3 Malaxage :

La cuve contenant les sables à mélanger est installée sur le malaxeur en essayant de limiter au maximum les déperditions de température. Le malaxeur (voir la photo (IV.2)) est actionné pendant $30 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$ afin de bien homogénéiser les sables.

Le liant est versé. La masse de liant ne doit pas dépasser de plus de 1% en valeur relative la masse de liant théorique sinon la gâchée est rejetée. La durée de malaxage doit conduire à un mélange visuellement homogène donc la durée totale du malaxage est comprise entre 2 et 5 mn.

Après la fin de malaxage, le mélange doit être utilisé immédiatement avant le refroidissement sinon la gâchée est rejetée.

La masse du bitume se calcule à partir de la masse des sables comme l'indique la formule suivante:

$$ML = (MS \times TL) / 100 \quad (4.9)$$

Où :

ML : la masse de bitume utilisé

MS : la masse de mélange des sables utilisés

TL : la teneur en bitume utilisé dans un mélange (en %).

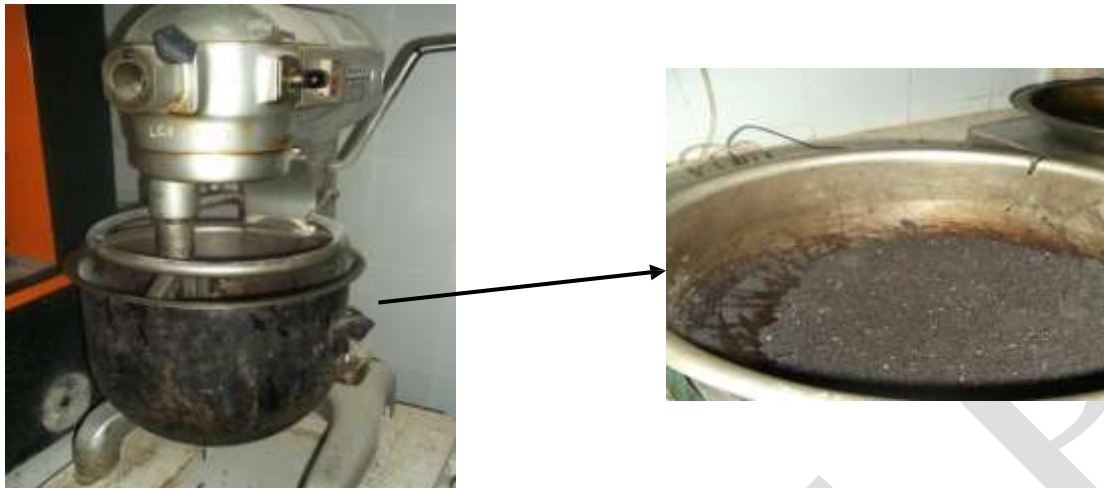


Photo (IV.2) : L'opération de malaxage

IV.2.2 Confection des éprouvettes pour l'essai Marshall:

Comme dans les autres méthodes d'analyse, l'éprouvette de Marshall est déterminée par confection d'une éprouvette cylindrique (photo (IV.3)), d'une masse indicative de 1200 g, de 105 mm de diamètre et de 63,5 mm de hauteur théorique.



Photo (IV.3) : Exemple des éprouvettes confectionnées de l'essai Marshall

IV.2.2.1 Remplissage des moules et compactage :

On pèse une quantité m égale 1200 g de mélange à 0,1% prés en valeur relative. Après avoir placé un disque de papier en fond de moule, les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes 2 h au minimum, et on mit en place la hausse puis on introduire le mélange en une seule fois dans le moule légèrement enduit d'oléate de soude glycéricé (photo (IV.4)). Ensuite, on place le deuxième disque de papier sur le mélange, on maintient fermement à la vertical la tige de la dame et on compacte le mélange 50 coups de marteau de la dame en $55 \text{ s} \pm 5 \text{ s}$ (voir la photo (IV .5)). On démonte et remonte le moule en intervertissant la base et la hausse et on répète à nouveau le damage. Le nombre total des

coups est 100 coups.

Le compactage dans le laboratoire LTPS unité d'Ouargla était manuellement donc le travail était difficile. Le moule est conservé 5 h au moins à température ambiante (15 à 25° C) après leur compactage.



Photo (V.4) : Remplissage du moule

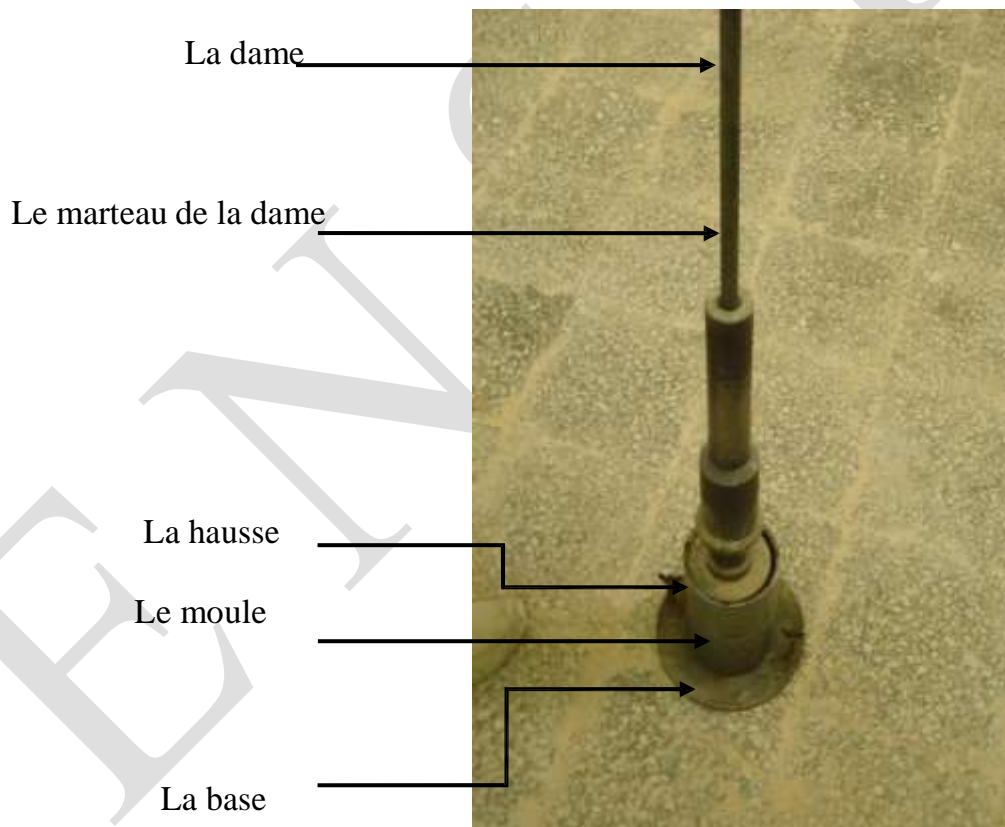


Photo (IV.5) : L'opération de compactage

IV.2.2.2 Démoulage :

Après refroidissement les moules et pour les démouler, on fait passer l'éprouvette dans la hausse en s'aidant du piston extracteur et de la presse comme la photo (IV.6) ci-dessous explique ce démarche :

La confection des autres éprouvettes se fait avec les mêmes étapes précédentes.

Quand les éprouvettes sont prêtes, on commence le déroulement de l'essai Marshall qui on détermine de celui-ci les paramètres suivants :

- ✓ La densité apparente de l'éprouvette
- ✓ La densité vraie ou théorique (absolu) de l'éprouvette
- ✓ Compacité de l'éprouvette
- ✓ % des vides résiduels ou vides de l'éprouvette
- ✓ % des vides occupé par l'air et le bitume (vide de l'agrégat)
- ✓ % des vides comblés par le bitume
- ✓ Déformation ou fluage Marshall en mm
- ✓ Stabilité Marshall en Kg

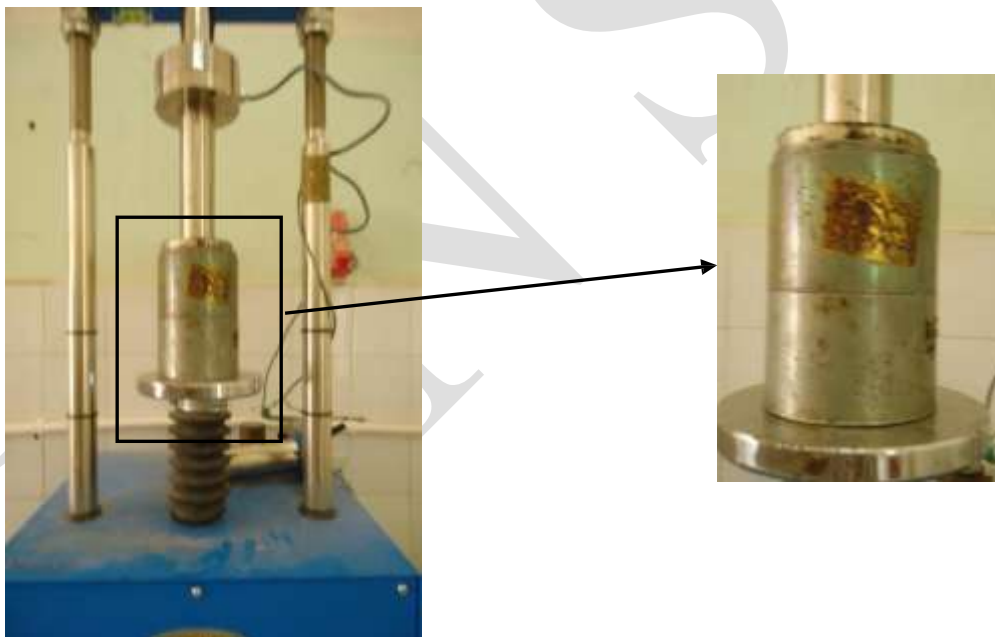


Photo (IV.6) : L'opération de démoulage

IV.2.3 Confection des éprouvettes pour l'essai Duriez:

L'éprouvette de Duriez est déterminée par confection d'une éprouvette cylindrique (photo (IV.7)), d'une masse indicative de 1000 g, de 80 mm de diamètre et de 190 mm de hauteur.



Photo (IV.7) : Exemple des éprouvettes confectionnées de l'essai Duriez

IV.2.3.1 Remplissage des moules et compactage

Un piston est placé à la partie inférieure du moule. On introduit le mélange en une seule fois dans le moule très légèrement enduit d'oléate de soude glycéro (les moules sont portés à la température de référence de préparation des éprouvettes 2 h au minimum) avant l'opération (photo (IV.8)). Les moules pleins sont ensuite introduits dans une étuve dont la température est à proximité de la température de référence ; ils doivent y séjourner entre ½ h et 2 h.

On ajuste le cylindre plein et on porte le tout entre les plateaux de la presse. Le compactage des éprouvettes doit être réalisé par double effet (les opérations doivent être menées de manière à éviter au maximum les déperditions de température). On maintient la pression cinq minutes sachant que la charge appliquée est de l'ordre $60 \text{ KN} \pm 0,5\%$. Photo (IV.9)

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



Photo (IV.8) : Remplissage du moule



Photo (IV.9) : L'opération de compactage

IV.2.3.2 Démoulage :

Le démoulage se fera à l'aide de la presse. Les éprouvettes extraites sont réparties en deux lots, les éprouvettes de premier lot (sont au nombre de 2) sont destinées pour déterminer la densité apparente et les éprouvettes de deuxième lot sont destinées pour l'essai de résistance à la compression. Les éprouvettes de deuxième lot sont réparti comme suit : deux éprouvettes se font sans immersion et les deux autres se font avec immersion le tout sont placées dans une armoire spéciale à $18^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ pendant 7 jours.

Les paramètres issus de cet essai sont :

- ✓ La densité apparente de l'éprouvette
- ✓ La densité vraie ou théorique (absolu) de l'éprouvette
- ✓ Compacité de l'éprouvette
- ✓ % des vides résiduels ou vides de l'éprouvette
- ✓ % des vides comblés par le bitume
- ✓ La résistance à la compression " **r** " après immersion 7 jours à 18°C en Kg/cm^2
- ✓ La résistance à la compression " **R** " avant immersion à 18°C en Kg/cm^2
- ✓ Le rapport " **r/R** "
- ✓ Le pourcentage d'imbibition W

IV.3 Équipements et procédures d'essais :

IV.3.1 Essai Marshall :

Le concept de l'essai Marshall était développé par Bruce Marshall en 1948 au Mississippi State Highway Department, USA. (J.Zhang, E. R. Brown, P.S. Kandhal, R.West [41])

Cet essai permet de mesurer en laboratoire, avec une température et une énergie de compactage données, la résistance d'une éprouvette à la déformation sous l'application graduelle d'une charge et la déformation subie par cette éprouvette au moment de sa rupture sous l'application de la charge maximale dite stabilité et fluage Marshall.

Ces derniers facteurs permettent de donner des indications sur la qualité globale de l'enrobé dont le choix et le dosage des constituants pour obtenir une meilleure composition ou une formulation à adopter pour un enrobé. (La stabilité présente un maximum pour une certaine teneur en bitume, puis elle décroît).

IV.3.1.1 Principe de l'essai :

L'essai de stabilité Marshall est un essai de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée (photo(IV.10)). Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après ½ heure d'immersion dans un bain d'eau à 60°C, et à la vitesse de 0,85 mm/s \pm 0,1mm/s.

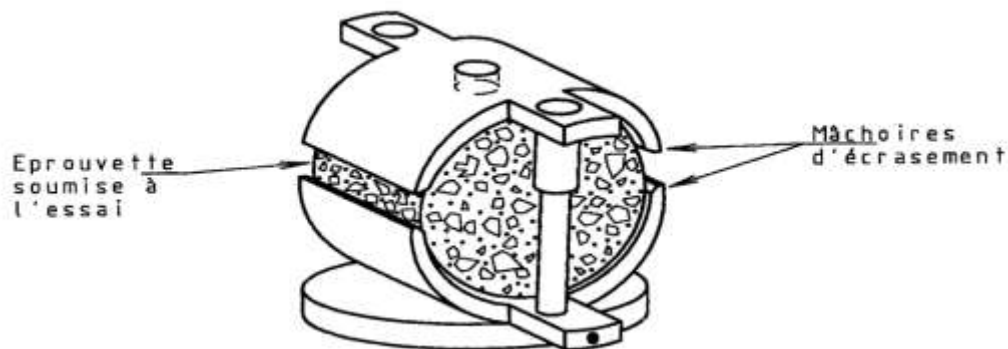


Photo (IV.10) : Principe de l'essai Marshall

IV.3.1.2 Déroulement de l'essai :

Après confection les éprouvettes, une partie sera réservée pour déterminer la densité apparente et l'autre sera réservée pour déterminer la stabilité et le fluage.

On immerge les éprouvettes dans le bain thermostatique réglé à 60°C \pm 0,5 °C avec les mâchoires d'écrasement pour une durée de 30 mn (\pm 1mn). Photo (IV.11) Pendant ce temps, on installe également le dispositif contrôleur de cadence réglé pour une vitesse 0,85 mm/s \pm 0,1mm/s.

L'éprouvette est placée dans les mâchoires d'écrasement (photo (IV.12)), l'ensemble est porté entre les plateaux de la presse pour être soumis à l'essai de compression. ces opérations doivent être réalisées en moins d'une minute.

La rupture se produit au moment de l'arrêt de l'appareil puis on note les chiffres qu'indiquent

l'écran de l'appareil (stabilité et fluage). Les mêmes étapes sont faites pour toutes les éprouvettes réalisées dans cette étude.



Photo (IV.11) : Le bain thermostatique

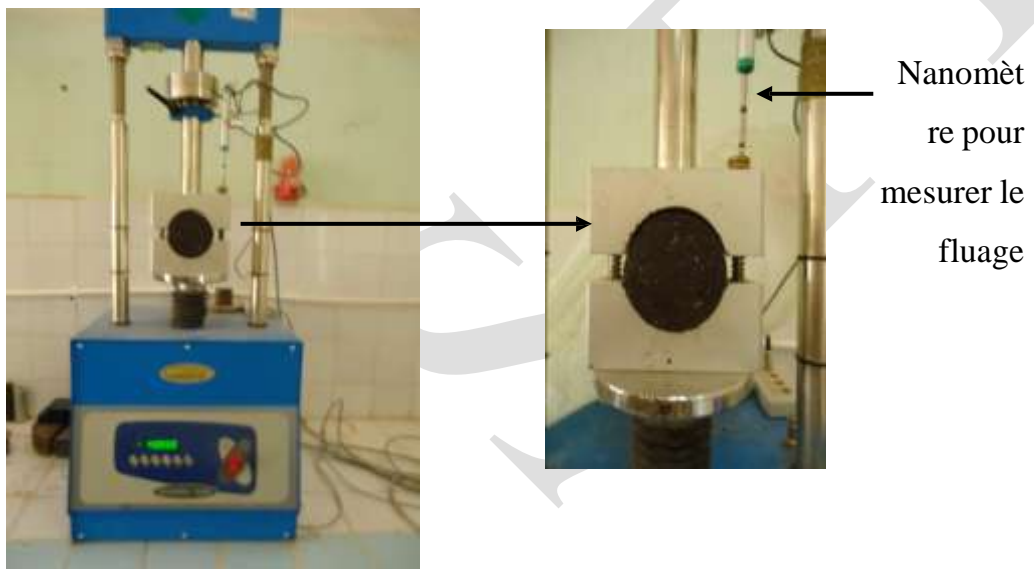


Photo (IV.12) : L'éprouvette dans les mâchoires

IV.3.2 Essai Duriez :

L'essai Duriez ou essai de compression-immersion ayant pour but de caractériser les qualités de résistance à la compression et résistance au dés enrobage par l'eau des matériaux enrobés. Effectivement cet essai permet de déterminer à 18°C pour un compactage donné, la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à partir du rapport de résistance à la compression avant et après immersion des éprouvettes. L'essai Duriez est réalisé sur les éprouvettes qui donnent des meilleures stabilités Marshall correspondant des teneurs en bitumes optimales.

IV.3.2.1 Principe de l'essai:

Les éprouvettes nécessaires à la réalisation de l'essai sont fabriquées par compactage

statique à double effet.

Les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression après conservation à 18 °C dans des conditions définies : à l'air pour certaines éprouvettes, en immersion pour d'autres durant 7 jours. La tenue à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances avant ou après immersion.

IV.3.2.2 Déroulement de l'essai:

J étant le jour de confection des éprouvettes, on commence la conservation sans immersion au jour J + 1. Les éprouvettes sont conservées à $18^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ et dans une ambiance à $50 \% \pm 10 \%$ d'humidité relative pendant 7 j. Photo (IV.13)

À jour J + 8, les éprouvettes sont soumises à l'essai de compression, qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion. Pour chaque éprouvette, le délai entre la sortie du dispositif de maintien en température et le début de l'écrasement est inférieur à 2 min. La vitesse du plateau de la presse est réglée à $1 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ mm}$. La résistance à la compression simple est déterminée à partir de la charge maximale à la rupture de l'éprouvette d'essai exprimée en Kg. en divisant sur 50 (J.ARRAMBIDE, M.DURIEZ [21]), on a la résistance à la compression exprimée en Kg/cm^2 qu'on s'appelle stabilité Duriez. Les mêmes étapes sont faites pour toutes les éprouvettes réalisées dans cette étude.

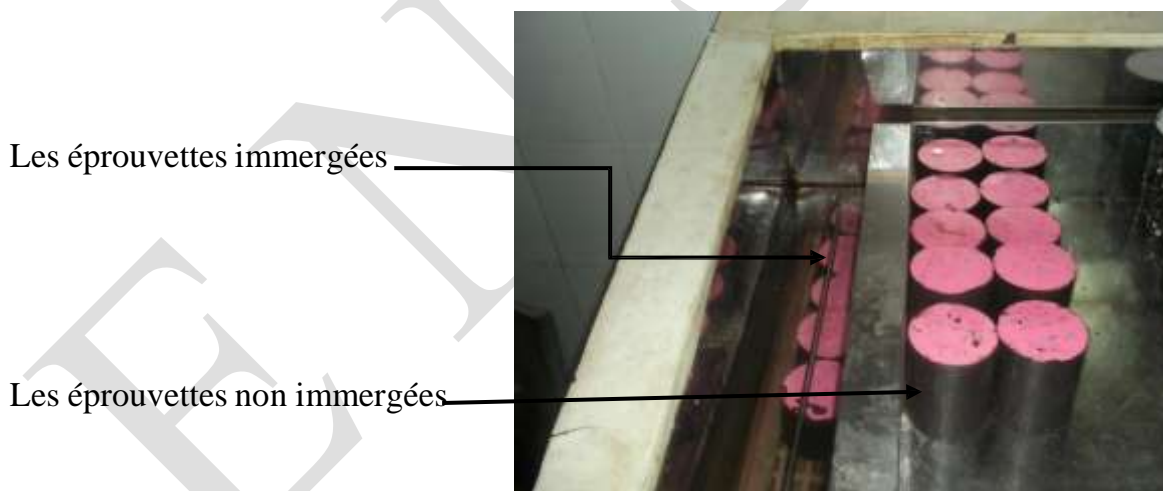


Photo (IV.13) : Les éprouvettes dans un bain normalisé de 18°C

IV.4 Détermination de la densité apparente par peser hydrostatique :

L'éprouvette prévue pour cette mesure est pesée après sa confection et après immergée dans un bain de paraffine fondue (photo (IV.14)). Elle est repesée à la balance hydrostatique, d'abord dans l'air puis dans l'eau, suspendue à un fil métallique. Ces

différentes pesées permettent le calcul de la densité apparente.

Soit P_0 le poids de l'éprouvette avant paraffinage,

P_1 le poids de l'éprouvette après paraffinage, pesée dans l'air,

P_2 le poids de l'éprouvette après paraffinage, pesée dans l'eau.

La différence ($P_1 - P_2$) correspond au volume de l'éprouvette enduite.

Le volume de la paraffine se calcule, en considérant sa densité égale à 0,9, suivant la

formule : $(P_1 - P_2) / 0,9$ (4.10)

Le volume de l'éprouvette nue est donné par :

$$(P_1 - P_2) - (P_1 - P_0) / 0,9 = V_0 \quad (4.11)$$

La densité apparente cherchée se déduit par :

$$\gamma_{app} = P_0 / V_0 \quad (\text{g/cm}^3) \quad (4.12)$$



Photo (IV.14) : Epreuves paraffinées

IV.5 Détermination de la densité théorique ou absolue :

Soit :

- ♦ γ_{app} : la densité apparente de l'éprouvette;
- ♦ γ_b : la densité du bitume ;
- ♦ γ_{S1} : la densité de sable 1;
- ♦ $\gamma_{S2}, \gamma_{S3} \dots$ celles des sables 2, 3...etc.
- ♦ P_b : le pourcentage en poids du bitume;

- ♦ $P_{S1}, P_{S2}, P_{S3} \dots$ ceux des sables.

Donc la densité absolue du matériau enrobé en (g/cm^3) :

$$\gamma_{\text{abs}} = \frac{100 + P_b}{(P_b / \gamma_b) + (P_{S1} / \gamma_{S1}) + (P_{S2} / \gamma_{S2}) + \dots} \quad (4.13)$$

- La densité apparente des sables dans l'éprouvette est :

$$\gamma_{\text{app sables}} = \gamma_{\text{app}} \left[1 - \frac{TL}{100 + TL} \right] \quad (4.14)$$

où TL : teneur en bitume en %

$$V_v = \frac{100 (\gamma_{\text{abs}} - \gamma_{\text{app}})}{\gamma_{\text{abs}}} \quad (4.15)$$

- Pourcentage des vides occupés par l'air et le liant (vides de sable), soit V_s (%) :

$$V_s = \frac{100 (\gamma_{\text{abs sables}} - \gamma_{\text{app sables}})}{\gamma_{\text{abs sables}}} \quad (4.16)$$

$$\gamma_{\text{abs sables}} = \frac{100}{(P_b / \gamma_b) + (P_{S1} / \gamma_{S1}) + (P_{S2} / \gamma_{S2}) + \dots} \quad (4.17)$$

- Pourcentage des vides comblés par le liant, soit V_L (%) :

$$V_L = \frac{100 (V_s - V_v)}{V_s} \quad (4.18)$$

- Compacité d'une éprouvette, soit C % :

$$C = 100 - V_v$$

IV.7 Détermination le pourcentage d'imbibition W (%) :

Le pourcentage d'imbibition se calcule à partir de la formule :

$$W = \frac{100 (P_h - P_0)}{P_0} \quad (4.19)$$

P_0 : étant le poids de l'éprouvette avant immersion

P_h : le poids de l'éprouvette imbibée après 7 jours d'imbibition.

Conclusion :

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

Les deux principaux paramètres issus de l'essai Marshall sont premièrement la stabilité qui elle est définie par la charge atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette et deuxièmement le fluage qui est définie par la diminution du diamètre vertical atteint au moment de la rupture de l'éprouvette.

Pour l'essai Duriez, Les deux principaux paramètres déduit sont le rapport entre la résistance à la compression après immersion et la résistance à la compression avant immersion. Et le pourcentage d'imbibition.

Nous complétons ce chapitre par l'exposition et les définitions des paramètres supplémentaires issu des deux essais utilisés dans ce chapitre.

Nous allons voir dans le chapitre suivant les résultats trouvés dans chaque essai.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

V.1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats relatifs aux essais Marshall et Duriez.

V.2 Essai de Marshall:

V.2.1 La densité apparente et la densité absolue:

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

Tableau (V.1) : Variation de la densité apparente et absolue

1^{er} mélange	teneur en bitume (%)	5,77	6,16	6,54	
	la densité apparente (g/cm³)	1,79	1,79	1,78	
	la densité absolue (g/cm³)	2,41	2,40	2,39	
2^{ème} mélange	teneur en bitume (%)	6,57	7,00	7,44	
	la densité apparente (g/cm³)	1,92	2,03	1,99	
	la densité absolue (g/cm³)	2,37	2,36	2,35	
3^{ème} mélange	teneur en bitume (%)	6,23	6,64	7,06	7,47
	la densité apparente (g/cm³)	1,97	1,96	1,99	1,99
	la densité absolue (g/cm³)	2,38	2,37	2,35	2,35
4^{ème} mélange	teneur en bitume (%)	6,80	7,26	7,71	
	la densité apparente (g/cm³)	1,99	2	1,98	
	la densité absolue (g/cm³)	2,36	2,35	2,34	
5^{ème} mélange	teneur en bitume (%)	6,76	7,21	7,66	8,11
	la densité apparente (g/cm³)	1,99	2,00	2,06	2,03
	la densité absolue (g/cm³)	2,36	2,35	2,33	2,32

Nous remarquons dans ce tableau que la densité apparente et la densité absolue dans les cinq mélanges, approximativement sont constantes en fonction de la variation des teneurs en bitumes.

Cela est dû à la méthode de formulation qui se base sur le module de richesse, où le dosage en bitume qui est déterminé pour un enrobé presque de manière totale ou quasi-totale des grains dans les différents mélanges.

V.2.2 Pourcentage des vides:

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

Le tableau suivant présente les différents pourcentages des vides :

Tableau (V.2) : Valeurs de V_v

1^{er} mélange				
teneur en bitume (%)	5,77	6,16	6,54	
V_v (%)	25,69	25,60	25,66	
2^{ème} mélange				
teneur en bitume (%)	6,57	7,00	7,44	
V_v (%)	19,18	14,09	15,00	
3^{ème} mélange				
teneur en bitume (%)	6,23	6,64	7,06	7,47
V_v (%)	17,52	17,51	15,80	16,00
4^{ème} mélange				
teneur en bitume (%)	6,80	7,26	7,71	
V_v (%)	15,91	15,00	15,38	
5^{ème} mélange				
teneur en bitume (%)	6,76	7,21	7,66	8,11
V_v (%)	14,14	13,90	11,48	12,70

❖ Pourcentage volumétrique des vides de l'éprouvette, soit V_v %

Pour plus d'explication sur les résultats trouvés sur le pourcentage des vides. On a utilisé un autre terme qui explique l'aptitude de chaque mélange d'absorber une quantité du bitume qui est le pourcentage des vides comblé par le bitume V_L . La figure (VI.1) ci-dessous présente le pourcentage des vides V_L qui correspond à la teneur en bitume optimale qui correspond aussi à la meilleure stabilité Marshall trouvée pour chaque mélange:

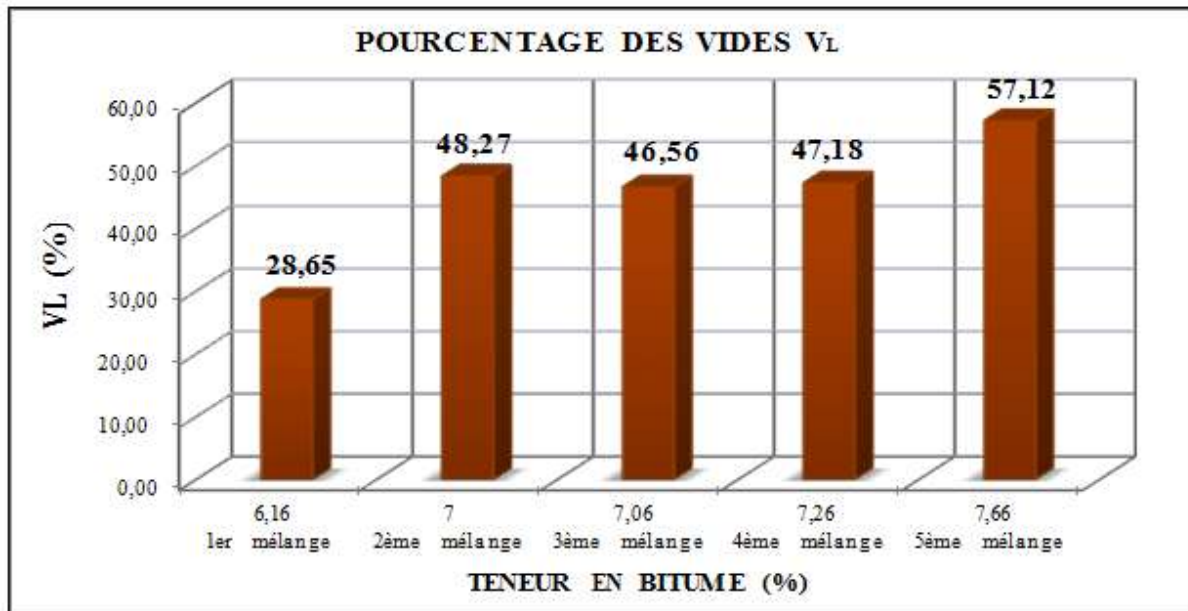


Figure (V.1): Variation des vides comblés par le bitume en fonction des teneurs en bitume optimales

Sur la figure (V.1) ci-dessus, on remarque que le meilleur résultat enregistré est situé dans le 5^{ème} mélange et faible valeur dans le 1^{er} mélange.

Pour les vides comblés par le bitume où ils constituent le volume des vides intergranulaire occupé par le bitume effectif exprimé en pourcentage du volume des vides intragranulaires. Plus le V_L est élevé plus le bitume joue un rôle important dans la reprise des sollicitations.

On constate que le pourcentage des vides est diminué avec l'augmentation des teneurs en bitume, cette diminution est expliquée que le bitume va remplir ces vides.

Les valeurs de pourcentage des vides trouvées sont supérieures à la valeur recommandée d'avoir un minimum de 3% de vides en place dans un enrobé bitumineux et préférentiellement autour de 4% selon les normes françaises et algériennes. Pour un sand asphalt ne doit pas dépasser 16%.

Ces résultats trouvés montrent que les sables sont poreux, contiennent pas mal des petits vides. Le mélange des sables a une distribution uniforme donc elle présente un volume des vides intergranulaire élevé. Par exemple, l'empilement de billes de mêmes dimensions,

représentant un granulat uniforme, dans un milieu illimité sera caractérisé par des vides intergranulaire varie entre de 26 à 48%, le meilleur exemple dans le 1^{er} mélange 100% sable de dunes.

Le moins de pourcentage des vides trouvés dans le 5^{ème} mélange et le maximum dans Le 1^{er} mélange. Dans la 5^{ème} mélange les pourcentages des sables sont égaux par contre les quatre mélanges 1, 2, 3 et 4, le pourcentage de sables des dunes est le plus élevé et ceci il peut justifier l'augmentation de % des vides par rapport le 5^{ème} mélange.

On trouve aussi que le pourcentage de fines était élevé dans le 4^{ème} et 5^{ème} mélange par rapport les autres mélanges, on peut expliquer que le fait augmenter la teneur en filler permet de combler une partie des vides entre les particules grossiers et d'assurer ainsi un certain blocage du squelette granulaire. Toutefois, cet effet bénéfique du dosage croissant en filler peut s'avérer nuisible dans les cas d'un surdosage

V.2.3 La compacité :

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

Tableau (V.3) : Variation de la compacité des éprouvettes Marshall

1^{er} mélange				
teneur en bitume (%)	5,77	6,16	6,54	
C (%)	74,31	74,40	74,34	
2^{ème} mélange				
teneur en bitume (%)	6,57	7,00	7,44	
C (%)	80,82	85,91	85	
3^{ème} mélange				
teneur en bitume (%)	6,23	6,64	7,06	7,47
C (%)	82,48	82,49	84,20	84,00
4^{ème} mélange				
teneur en bitume (%)	6,80	7,26	7,71	
C (%)	84,09	85,00	84,62	

5 ^{ème} mélange				
teneur en bitume (%)	6,76	7,21	7,66	8,11
C (%)	85,86	86,10	88,52	87,30

La figure (V.2) présente les meilleures compacités trouvées dans les cinq mélanges correspondant les teneurs en bitume optimales :

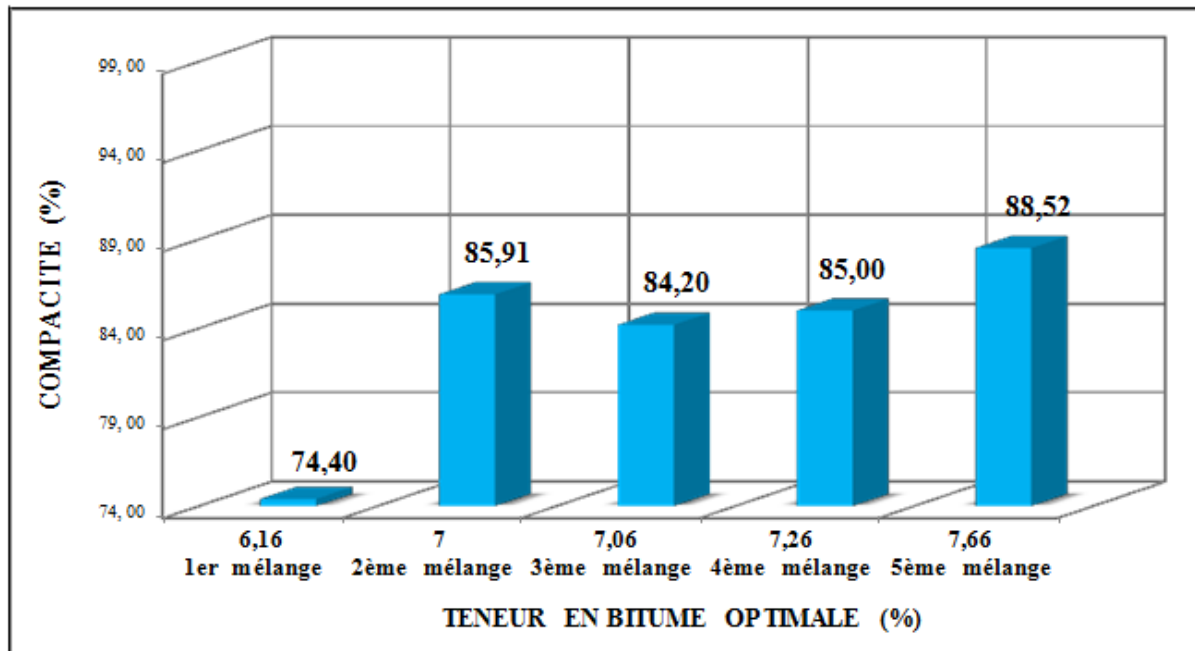


Figure (V.2): Variation de la compacité en fonction des teneurs en bitume optimales pour chaque mélange étudié

On remarque sur la figure (V.2) que les bonnes valeurs de compacité enregistrées sont dans le 5^{ème} mélange qui a atteint 88,52% et les faibles valeurs dans le 1^{er} mélange. On peut dire que le 1^{er} mélange, 100% sable de dunes, l'insuffisance de compacité est due à la granulométrie serrée du sable de dunes. Pour les autres mélanges elle est bonne à cause de l'amélioration de la granulométrie de sable de dunes par l'ajout de sable alluvionnaire et sable concassé.

Les valeurs de compacités trouvées dans tous les mélanges sont insuffisantes par la comparaison aux normes Algérienne (CTTP) et LCPC (la valeur de compacité recommandée est 95-97% pour un BB 0/14). Par contre, on trouve que la seule compacité dans le 5^{ème} mélange est satisfaisante par rapport aux autres mélanges par le faire une comparaison

aux normes de LCPC relative un sand asphalt (valeur recommandée est 87-94%) de trafic "T" inférieur au 1000 v/j.

D'après tous les résultats trouvés, nous constatons que la compacité augmente avec l'augmentation des teneurs en bitumes jusqu'à une valeur puis elle décroît. L'augmentation de la compacité dans les derniers quatre mélanges est due à l'amélioration de la granulométrie du sable de dunes qui devient moins serré avec l'ajout du sable concassé et le sable alluvionnaire. Ceci favorise le réarrangement des grains entre eux. La décroissance justifiée par le remplissage des vides avec le bitume; le surdosage en bitume a pour effet, d'une part, de réduire l'efficacité du compactage par absorption d'énergie et, d'autre part, d'occuper un volume qui reste pour la compacité de squelette granulaire (les vides intergranulaires augmentent).

Les résultats obtenus dénotent des insuffisances de compacité en comparaison par un enrobé bitumineux semi grenu 0/14 utilisé en couche de roulement dans les routes algériennes suivant les normes Algérienne (CTTP) et LCPC. En outre le 5^{ème} mélange répond aux performances minimales recommandées selon les normes françaises relative d'un sand asphalt de trafic inférieur au 1000 v/j.

Une compacité élevée assure une bonne stabilité et une bonne résistance à l'orniérage sous charges répétées, elle limite l'attrition des grains, elle augmente le module d'élasticité E et assure un meilleur étalement des charges sur le sol de fondation.

Donc on peut choisir d'après les résultats de compacité obtenus pour les cinq mélanges étudiés dans ce mémoire. Le mélange qui donne la meilleure compacité est le cinquième mélange.

V.2.4 Stabilité Marshall:

Le tableau suivant présente la variation de la stabilité Marshall des éprouvettes en fonction de la variation des dosages du bitume selon chaque mélange :

Tableau (V.4) : Variation de la stabilité Marshall

1^{er} mélange			
Teneur en bitume (%)	5,77	6,16	6,54
Stabilité Marshall (Kg)	76,20	79,60	71,30
2^{ème} mélange			
Teneur en bitume (%)	6,57	7,00	7,44
Stabilité Marshall (Kg)	407,40	609,10	292,00

3^{ème} mélange				
Teneur en bitume (%)	6,23	6,64	7,06	7,47
Stabilité Marshall (Kg)	266,70	224,90	422,60	169,65
4^{ème} mélange				
Teneur en bitume (%)	6,80	7,26	7,71	
Stabilité Marshall (Kg)	322,40	418,80	371,40	
5^{ème} mélange				
Teneur en bitume (%)	6,76	7,21	7,66	8,11
Stabilité Marshall (Kg)	328,20	394,50	578,40	311,60

La figure (V.3) présente les valeurs maximales de stabilité Marshall enregistré dans tous les mélanges étudiés correspond les dosages optimums du bitume:

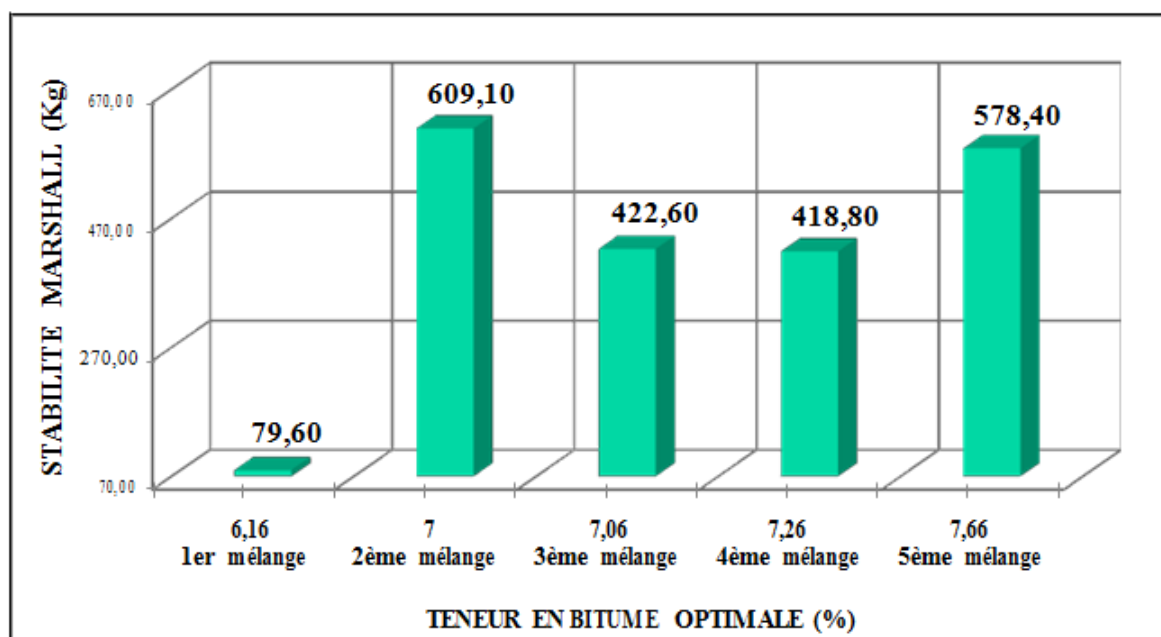


Figure (V.3): Variation de stabilité Marshall maximale en fonction des teneurs en bitume optimales pour les cinq mélanges

On observe sur la figure (V.3) ci-dessus, que les résultats de la stabilité Marshall trouvés sont faibles en comparaison par les normes Algérienne, valeur recommandée qui consiste que la stabilité doit $> 1000,5$ Kg. Normes Française, valeur recommandée > 1200 Kg. (pour un enrobé semi grenue 0/14).

Dans notre cas, la stabilité trouvée dans les derniers quatre mélanges étudiés sont acceptables aux recommandations minimales demandées (>300 Kg) en comparaison avec les spécifications françaises relatives d'un sand asphalt de trafic inférieur au 1000 v/j. On trouve aussi que le résultat dans le 2^{ème} et 5^{ème} mélange est le plus satisfaisant et la faible valeur trouvée dans le 1^{er} mélange.

On constate d'après les résultats trouvés que la stabilité Marshall dans tous les mélanges augmente avec l'augmentation des dosages du bitume puis elle décroît. Donc on observe deux phases de l'évolution de stabilité Marshall en fonction des teneurs en bitume croissante. Dans la première phase, l'augmentation de la teneur en bitume va accroître l'ouvrabilité d'un enrobé jusqu'à une valeur minimale. En effet, la hausse de la teneur en bitume se traduit par deux effets: 1) augmentation de la lubrification entre les particules (un bon enrobage) et 2) remplissage d'une partie des vides laissé par les sables, ces deux rôles vont permettre un meilleur compactage donc une meilleure stabilité.

Dans la deuxième phase, le surdosage en bitume a pour effet, d'une part de réduire l'efficacité du compactage par absorption d'énergie et d'autre part, d'occuper un volume qui reste pour la compacité du squelette granulaire. Et ceci s'explique par la diminution de stabilité.

Les résultats de stabilités trouvées sont faibles en comparaison avec les normes Algérienne et Française pour un enrobé bitumineux semi grenue 0/14 destiné au couche de roulement. Cette insuffisance est due :

- par les grains de sable, relativement fins, qui forment un corps moins rigide que celui des matériaux nobles, des cailloux. Il crée un frottement très fort et une certaine rigidité.
- Le manque presque total de cohésion, notamment pour les sables propres, entraîne un manque de stabilité.
- La forme des grains (rond) → manque d'angularité.

Par contre, quand on fait une comparaison avec les normes de LCPC concernant un sand asphalt de trafic "T" inférieur à 1000 v/j, on trouve que les résultats obtenus pour les derniers quatre mélanges (2^{ème}, 3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} mélange) sont conformes aux normes de LCPC.

V.2.5 Fluage Marshall:

Le tableau suivant présente la variation du fluage Marshall des éprouvettes en fonction de la variation des dosages du bitume selon chaque mélange :

Tableau (V.5) : Variation du fluage Marshall

1^{er} mélange				
Teneur en bitume (%)	5,77	6,16	6,54	
Fluage Marshall (mm)	3,239	2,292	2,079	
2^{ème} mélange				
Teneur en bitume (%)	6,57	7,00	7,44	
Fluage Marshall (mm)	2,789	1,849	2,120	
3^{ème} mélange				
Teneur en bitume (%)	6,23	6,64	7,06	7,47
Fluage Marshall (mm)	2,030	1,534	2,231	2,143
4^{ème} mélange				
Teneur en bitume (%)	6,80	7,26	7,71	
Fluage Marshall (mm)	2,426	2,356	2,153	
5^{ème} mélange				
Teneur en bitume (%)	6,76	7,21	7,66	8,11
Fluage Marshall (mm)	1,572	1,681	2,083	2,229

La figure (V.4) ci-dessous présente la variation du fluage en fonction des teneurs en bitume optimale:

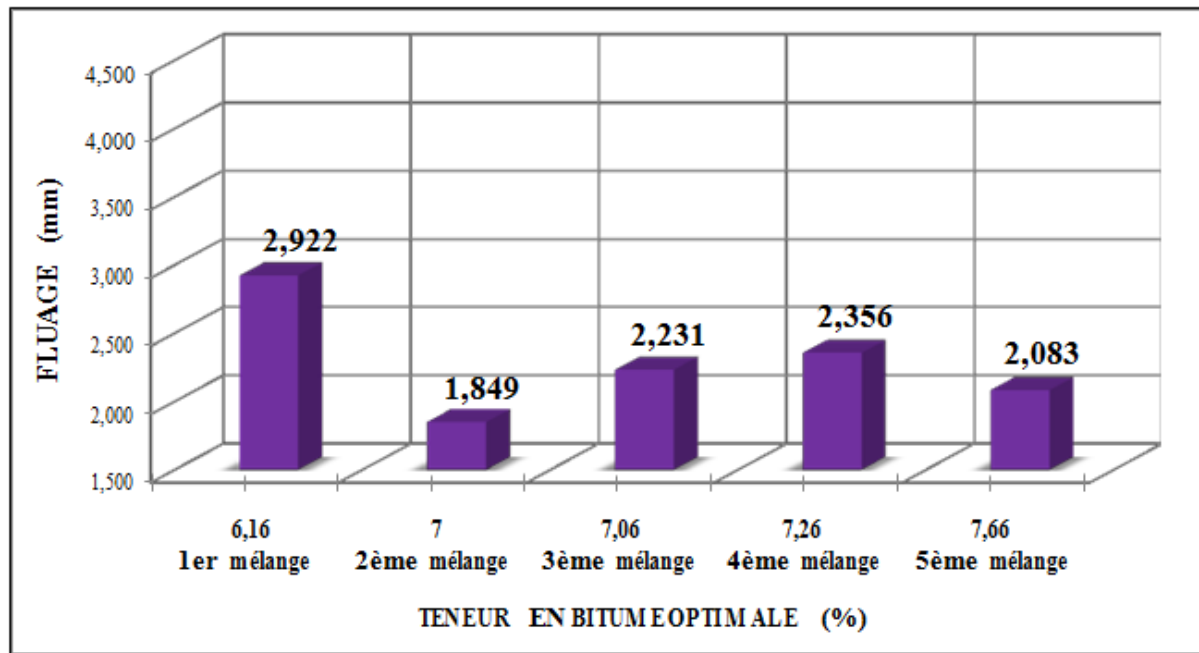


Figure (V.4): Variation du fluage en fonction des teneurs en bitume optimale pour les cinq mélanges

Le fluage Marshall ou déformation Marshall qui fait dans cet essai est le raccourcissement du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture.

On voit sur la figure (V.4) ci-dessus que le résultat du fluage trouvé pour les cinq mélanges remplit les conditions des normes Algérienne et LCPC (valeur recommandée est <4mm). Le résultat du fluage dans le 2^{ème} mélange est le plus satisfaisant par rapport aux autres mélanges par ce que quand le fluage est diminué la déformation par l'orniérage est diminuée.

Le malheur que le fluage donné par cet essai ne représente pas réellement ce phénomène sur terrain parce que le fluage engendre des orniérages ou déformations permanentes qui sont des problématiques des chaussées souples qui diminuent la durée de vie de la chaussée, diminuent également le niveau de confort et créent un risque pour les usagers.

V.3 L'essai Duriez :

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

V.3.1 La compacité de Duriez:

Le tableau (V.6) suivant présente la variation de la compacité des éprouvettes en fonction

de la variation de dosage du bitume selon chaque mélange :

Tableau (V.6) : Variation de la compacité des éprouvettes Duriez

N° de mélange	1 ^{er} mélange	2 ^{ème} mélange	3 ^{ème} mélange	4 ^{ème} mélange	5 ^{ème} mélange
Teneur en bitume (%)	6,16	7,00	7,06	7,26	7,66
% C	68,99	83,80	83,77	84,10	84,68

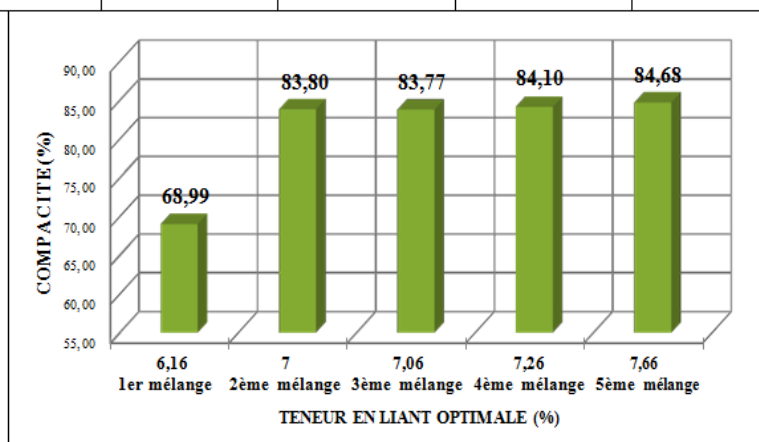


Figure (V.5): Variation de la compacité en fonction des teneurs en bitume optimales

Après la comparaison entre les résultats trouvés et les normes Algérienne et Française, on constate que les résultats sont inférieurs à la spécification exigée pour un béton bitumineux semi grenu 0/14. Par contre on trouve que la compacité dans le 4^{ème} et 5^{ème} mélange est acceptable par rapport aux spécifications d'un sand asphalt selon les normes Françaises.

V.3.2 Stabilité Duriez:

Le tableau (V.7) présente les résultats obtenus de l'essai Duriez telle que la résistance à la compression avant et après immersion et le rapport entre eux :

Tableau (V.7) : Stabilité de Duriez

N° de mélange	1 ^{er} mélange	2 ^{ème} mélange	3 ^{ème} mélange	4 ^{ème} mélange	5 ^{ème} mélange
Teneur en bitume (%)	6,16	7,00	7,06	7,26	7,66
R (Kg/cm ²)	22,89	45,78	43,79	49,76	45,78
r (Kg/cm ²)	17,91	31,85	31,85	32,84	31,85
rapport r/R	0,78	0,69	0,72	0,66	0,69

R : Résistance à la compression avant immersion

r : Résistance à la compression après immersion

on remarque que la meilleure résistance à la compression avant immersion enregistrée dans les cinq mélanges est dans le 4^{ème} mélange, la valeur obtenue est de 49,76 bars. Dans le 1^{er} mélange la valeur de la résistance à la compression est faible par rapport aux autres à cause de la granulométrie de sable de dunes, elle est serré, mono granulaire et pauvre au fines et en plus manque d'angularité (les grains ronds).

Dans les autres mélanges, on trouve la faible résistance à la compression avant immersion dans le 3^{ème} mélange et on peut expliquer ceci par l'élévation de pourcentage de sable alluvionnaire (35%) qui se caractérise par des grains de forme rond dans lequel le chevauchement entre les grains sera difficile.

On trouve la meilleure résistance à la compression avant immersion dans le 4^{ème} mélange et on peut expliquer par l'élévation de pourcentage de sable concassé (35%) c'est-à-dire on observe une augmentation des pourcentages d'éléments anguleux qui améliorent le frottement intergranulaire. Mais on voit deux valeurs de résistance sont égaux, malgré la différence entre le pourcentage des sables, dans le 2^{ème} mélange (50% SD + 25% SA + 25% SC) et 5^{ème} mélange (34% SD + 33% SA + 33% SC) mélange.

Les résultats trouvés montrent des insuffisances après la comparaison entre eux et les spécifications de LCPC pour un BB 0/14 (valeur recommandée $> 70 \text{ Kg/cm}^2$), la différence estimée peut atteindre jusqu'à 28% par rapport à la meilleure résistance enregistrée dans le 4^{ème} mélange. Par contre, ces résultats sont satisfaisants en comparaison par les spécifications de sand asphalt (valeur recommandée $> 35 \text{ Kg/cm}^2$) sauf dans le 1^{er} mélange elles sont médiocres.

on remarque que la résistance à la compression après immersion obtenue sur les éprouvettes confectionnées avec le mélange 100% sable de dunes est faible par rapport aux autres mélanges.

On remarque aussi que l'allure des résistances pour les autres mélanges est à peu près stable où on trouve le même résultat dans le 2^{ème}, 3^{ème} et 5^{ème} mélange sauf dans le 4^{ème} mélange on constate la meilleure valeur de résistance qui est égale $32,84 \text{ kg/cm}^2$. Quand on fait une comparaison avec les résultats trouvés et les spécifications de LCPC pour un BB/014 on trouve que les résultats sont insuffisantes (valeur recommandée est $r > 56 \text{ Kg/cm}^2$). Par contre, on observe des résultats satisfaisants en comparaison aux spécifications Françaises pour un sable bitume (valeur recommandée $r > 24,50 \text{ Kg/cm}^2$).

La figure (V.6) ci-dessous présente la variation de rapport r/R en fonction des teneurs en bitume optimale selon chaque mélange :

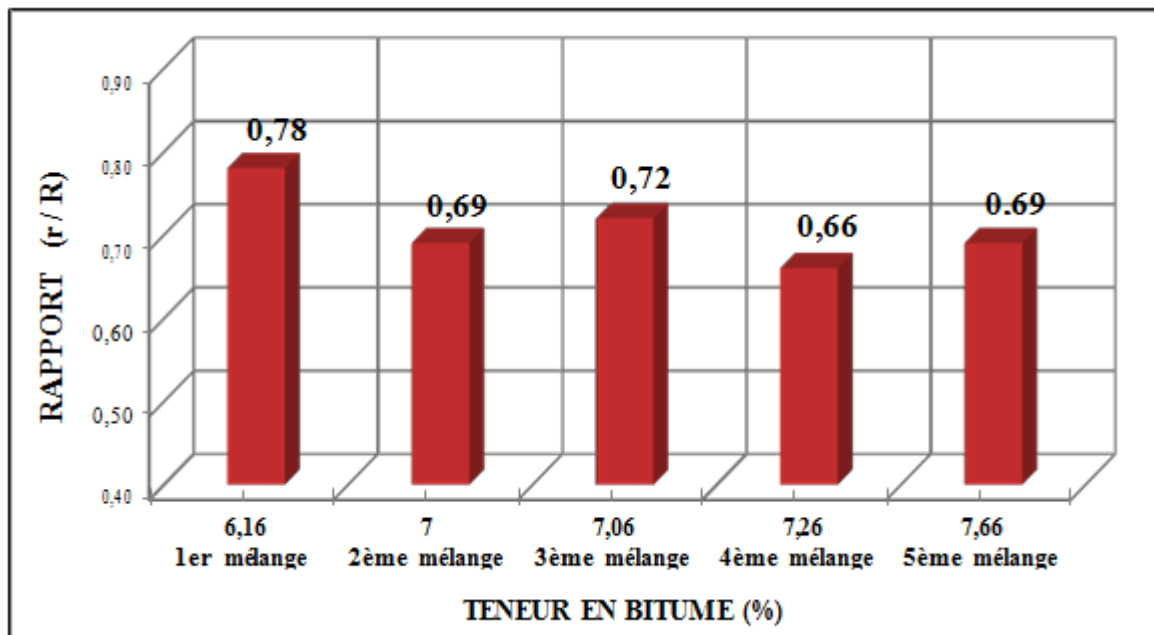


Figure (V.6): Variation du rapport (r/R) en fonction des teneurs en bitume optimales

D'après la figure (V.6) ci-dessus, on remarque une légère variation du rapport (r/R) et elle est bien observée dans le 1^{er} et 3^{ème} mélange qui atteinte 0,78 et 0,72 respectivement. Par contre on trouve les valeurs de rapport (r/R) dans le 2^{ème}, 3^{ème} et 5^{ème} mélange d'une manière générale sont proches les unes des autres.

Après comparaison entre les résultats obtenus et les spécifications de CTPP ($r/R > 0,45$ concerne la zone III pour un trafic PL.MJA ≥ 150), on trouve que ces résultats remplissent les conditions par contre ces résultats sont insuffisants après leurs comparaisons avec les performances de LCPC (valeur recommandée $r/R > 0,8$).

Le rapport r/R appelé rapport immersion-compression traduit la tenue à l'eau de l'enrobé. C'est un moyen d'apprécier de façon indirecte l'adhésivité du bitume aux granulats. A la lumière de cette définition on trouve que la meilleure résistance au désestrobage enregistré est dans le 1^{er} mélange c'est-à-dire on peut constater, suivant à notre avis, une bonne adhésion entre le sable de dunes et le bitume.

V.3.3 Pourcentage d'imbibition " W " :

Le tableau (V.8) présente la variation de pourcentage d'imbibition des éprouvettes de Duriez immergées dans un bain thermostatique durant 7 jours :

Tableau (V.8) : Variation du pourcentage d'imbibition des éprouvettes Duriez

N° de mélange	1 ^{er} mélange	2 ^{ème} mélange	3 ^{ème} mélange	4 ^{ème} mélange	5 ^{ème} mélange
Teneur en bitume (%)	6,16	7,00	7,06	7,26	7,66
W (%)	3,10	2,25	2,07	2,51	1,74

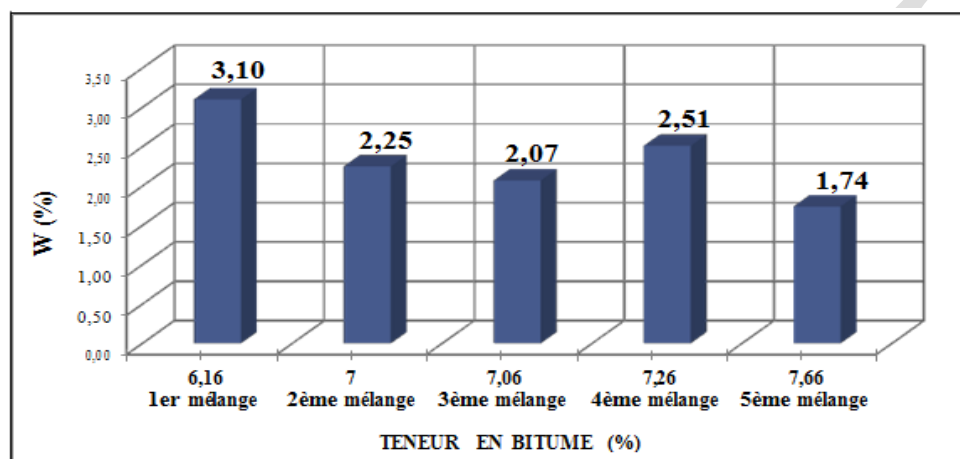


Figure (V.7): Variation du pourcentage d'imbibition en fonction des teneurs en bitume optimales selon chaque mélange

Les résultats sur la figure (V.7) ci-dessus présentent des variations de pourcentage d'imbibition remarquables. La plus haute valeur observée est située dans le 1^{er} mélange 100% sable de dunes, les éprouvettes confectionnées de 100% sable de dunes ont été gonflantes après immersion, à notre avis, le sable de dunes peut être contenir des impuretés. Le moins d'absorption se fait dans le 5^{ème} mélange. Tant que les autres mélanges possèdent des mêmes valeurs de pourcentage d'imbibition, la variation se fait dans les chiffres après la virgule, qui sont égales 2,25% ; 2,07 ; 2,51% pour le 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} mélange respectivement.

D'après les valeurs trouvées, on peut expliquer ces résultats, à notre avis, par les pourcentages des vides existant dans les mélanges de sable bitume.

Le but de l'essai Duriez est de déterminer, pour une température et un compactage donnés, la tenue d'eau dans un mélange hydrocarboné à chaud, à partir du rapport des résistances en compression avant et après immersion des éprouvettes.

Les résultats obtenus pour tous les mélanges dénotent des insuffisances en termes de résistances que ce soit à l'air libre ou après immersion comparativement aux spécifications.

LCPC relatives aux bétons bitumineux 0/14 destiné à la couche de roulement. Cette insuffisance est logique à cause des grains de sable, relativement fins, forment un corps moins rigide que celui des matériaux nobles comme les cailloux crée un frottement très fort et une certaine rigidité. Par contre ils sont dans les normes Algérienne (CTTP) c'est-à-dire les mélanges sable + bitume à base de sable de dunes ayant des résistances avant et après immersion acceptables

Conclusion :

Cette étude nous a permis de mettre en valeur la technique de sable bitume dans les ouvrages routiers et de préciser un certain nombre de point:

- Les pourcentages des vides pour les cinq mélanges sont élevés à cause des propriétés physiques des sables comme nous savons que les sables naturels sont des sables poreux donc ces sables absorbent beaucoup du bitume.
- Nous constatons d'après les résultats obtenus sur la compacité, que la compacité augmente avec l'augmentation des teneurs en bitumes jusqu'à valeur puis elle décroît. Quand on fait une comparaison entre les meilleures valeurs de compacités trouvées et les normes de LCPC et CTTP pour un BB 0/14, on les trouve insuffisantes sauf dans le 5^{ème} mélange qui remplit les conditions de norme de LCPC pour un trafic "T" inférieur de 1000 v/j.
- les stabilités Marshall trouvés sont insuffisantes en comparaison avec un béton bitumineux 0/14 destiné en couche de roulement, la différence était en pourcentage pour le 1^{er} mélange (100% sable de dunes) 93% relatif à la norme de LCPC et 92% suivant la norme de CTTP, on trouve aussi la différence entre 49% et 65% pour les autres mélanges en comparaison par les normes de LCPC et entre 39% et 58% pour les autres mélanges aussi. Selon la norme de CTTP pour un BB 0/14, on trouve que cette différence peut atteindre presque la moitié et ceci est logique puisque le squelette granulaire reprend la majorité des charges et bien sûr on sait que le gravier et le sable sont différents du côté propriétés intrinsèques ou peut être dû à une granulométrie défectueuse, des frottements internes insuffisants, dans l'emploi d'un bitume trop mou, ou à une adhésivité insuffisante. Par contre la stabilité Marshall pour les derniers quatre mélanges sont admissible en comparaison avec la norme de LCPC pour un sand asphalt de trafic "T" inférieur au 1000 v/j.
- la stabilité dans le 2^{ème} et 5^{ème} mélange est le plus satisfaisant par rapport aux Autres mélanges.
- Le fluage trouvé pour les cinq mélanges est conforme à la norme soit la norme de LCPC ou la norme de CTTP

- Pour les résultats de l'essai Duriez, on trouve que la résistance à la compression avant immersion pour les cinq mélange est insuffisante suivant les normes de LCPC concernant un BB 0/14, le défaut peut être dû à une adhésivité insuffisante, par contre on trouve des résistances conformes à la norme Algérienne pour un BB 0/14 et LCPC pour un sand asphalt de trafic "T" inférieur de 1000 v/j.
- Les sables traités au bitume conservent généralement une teneur en vides importante les rendant capables d'absorber beaucoup d'eau à l'état imbibé.
- Quand on veut choisir le mélange le plus performant qui répond aux exigences des normes, alors, premièrement si on choisit selon la stabilité Marshall on trouve la meilleur stabilité est située dans le 2^{ème} mélange, deuxièmement si on choisit suivant le fluage Marshall on trouve le meilleur fluage qui est situé dans le 2^{ème} mélange, troisièmement si on choisit selon la compacité on trouve la meilleure compacité est située dans le 5^{ème} mélange, quatrièmement si on choisit suivant la résistance à la compression avant immersion on trouve la meilleure résistance est située dans le 4^{ème} mélange, cinquièmement si on choisit suivant la résistance à la compression après immersion on trouve la meilleur résistance est située dans le 4^{ème} mélange, sixièmement si on choisit selon le rapport r/R on trouve la meilleur tenue à l'eau est situé dans le 1^{er} mélange donc on peut dire que le groupement de ces propriétés dans un seul mélange est difficile par conséquent le choix de meilleur mélange entre ces caractéristiques est difficile.

Conclusion générale

La tendance actuelle est d'adapter la technique routière à l'emploi des matériaux locaux notamment les sables et particulièrement les sables de dunes.

Cette étude a mis en évidence la possibilité de valorisation du sable de dunes qui représente 60% des matériaux locaux du Sud Algérien. Nous avons résolu ainsi un double problème environnemental, diminuer les zones d'ensablement, et économique, parce que le coût du transport des agrégats nécessaires à la réalisation des projets routiers intervient de manière très significative dans la construction du prix de revient final des ouvrages.

Les sables de dunes constituent un cas particulier pour lequel les directives et recommandations ne peuvent pas être appliquées sans études spécifiques

À notre avis, c'est vrai le CTTP a fait des recherches sur le sable bitume et il a montré que l'utilisation de sable bitume sera juste dans la couche de base pour le réseau principale RP2 (trafic inférieur à 1500 véhicule /jour) mais le CTTP ne fait pas des recherches approfondies (surtout le comportement du sable bitume à long terme) pour mettre des spécifications juste sur le sable bitume à base de sable des dunes. C'est pour cette raison on fait cette étude, si vous voulez, un pas vers la valorisation de sable de dunes dans le corps de chaussée.

Dans le cadre du programme expérimental, les essais normalisés sont effectués dans des conditions bien définies de températures et de sollicitations. Cette recherche montre la variabilité des résultats obtenus nous qui a permis de conclure que:

- ❖ Les performances mécaniques du sable bitume à base de sable de dunes uniquement s'avèrent très faibles en égard aux spécifications pour sand asphalt, ceci est montré par l'essai de stabilité Marshall ainsi que l'essai de compression Duriez.
- ❖ La faiblesse enregistrée au niveau des performances est due, en premier lieu, à la granulométrie serrée des grains et leur forme arrondie ce qui ne mobilise pas de frottement suffisant pour résister aux efforts. La composition essentiellement siliceuse du sable de dunes possède une incidence négative vue que le bitume adhère mieux avec les agrégats calcaires.
- ❖ La correction de sable des dunes par l'ajout de sable concassé et le sable alluvionnaire se traduit par l'amélioration de stabilité Marshall par rapport les autres recherches faites dans se stade, elle atteint jusqu'à 50% par rapport la meilleur stabilité trouvée dans les cinq mélanges.
- ❖ Cette correction elle indique aussi des fluages Marshall acceptables mais des compacités

un peu convenables aux normes de LCPC sauf dans un seul mélange qui répond aux exigences de celles-ci.

❖ Elle donne aussi des résistances de compression avant et après immersion remplies les conditions de normes ; et le rapport entre les deux, on peut dire, est satisfaisant c'est à dire la différence n'est pas très remarquable

❖ Suivant notre avis on peut dire que l'influence du bitume sur les squelettes granulaires des sables n'est pas très remarquée

❖ Plus la granulométrie est étalée plus le réarrangement des grains se fait facilement en assurant la cohésion et par conséquent apporte une meilleure stabilité et un meilleur comportement au fluage.

- Le sable bitume nécessite pas mal des vides en effet la présence de vides est essentielle pour pallier aux phénomènes d'expansion liés aux propriétés spécifiques du bitume (dilatation thermique) surtout comme on sait que le sable bitume ayant un dosage de bitume élevé et le sud Algérien ayant une température élevée dans l'été.

- Le choix de compacité à obtenir sera en fonction de sa sensibilité à l'eau et de la perméabilité de la couche sous-jacente, ainsi que du résultat obtenu.

- les sables ronds (sable alluvionnaire) sont favorables à la maniabilité du mélange. La forte proportion des particules arrondis baisse le niveau de contact entre les particules (le frottement sera faible).

- L'influence de l'ajout de sable concassé est très remarquée dans les performances du sable bitume surtout dans la résistance à la compression, l'augmentation de sable concassé c'est-à-dire l'augmentation des éléments anguleux et le pourcentage des fines.

- L'Algérie, et malgré l'immensité de ses zones désertiques, ne dispose toujours pas de normes spécifiques concernant l'utilisation de sable bitume en couche de roulement.

- **Domaine d'utilisation : le sable bitume est envisageable en couche de roulement ou en couche de base pour un trafic inférieur de 1000 v/j.**

Références bibliographiques

- [1] - **T.B.NGUYEN, (2008)** : « Valorisation des sédiments de dragage traités par le procédé NOVOSOL® dans des matériaux d'assises de chaussée - Comportement mécanique et environnemental », Thèse Doct. Délivrer par Université Paul Sabatier. L'université de Toulouse. PP 67-68
- [2]- **D.JEUFFROY, R.SAUTEREY** :«Dimensionnement des chaussées», Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 2^{ème} édition, 1991.
- [3] - **D.T.NGUYEN, (2006)**:«Prédiction des déformations permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses», Thèse Doct. L'école nationale des ponts et chaussées, Spécialité : Structures et Matériaux.
- [4] - **A. Junod, A.-G. Dumont** : « Formulation et optimisation des formules d'enrobés», Rapport l'Office fédéral des routes N° UNTERHALT 2000.Décembre 2004.
- [5] - **Y.LEFEUVRE, (2001)**: «Contribution à l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux, Etude de l'allongement des éprouvettes comme manifestation de l'endommagement diffus, Expérimentation - Modélisation», Thèse Doct. L'école nationale des ponts et chaussées, Spécialité : Structures et Matériaux.
- [6] - **B.J.CARLOZZO**: « **Bituminous Coatings** », **MNL17-EB/Jun. 1995**, Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Thu Dec 29 05:20:15 EST 2011, www.astm.org.
- [9] - **J. BERTHIER (Professeur à l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Président du BCEOM)** : « Granulats et liants routiers », Techniques de l'Ingénieur, traité Construction 13/05/2007, [www. Techniques de l'Ingénieur.com](http://www.Techniques de l'Ingénieur.com)
- [10]- **Magazine:bitume•info** Bitume.info • Revue périodique éditée par le Groupement Professionnel des Bitumes et destinée à faire connaître les réalisations routières, industrielles, hydrauliques ou autres dans lesquelles le bitume joue un rôle important. www.bitume.info / Mél : contact@bitume.info.
- [11] - **L.EL BEZE, (2008)**: «Recyclage à chaud des agrégats d'enrobes bitumineux, identification de traceurs d'homogénéité du mélange entre bitume vieilli et bitume neuf d'apport », Thèse Doct. Université Paul CÉZANNE AIX-MARSEILLE III, Faculté des Sciences et Techniques
- [12] - **F.S. ROSTLER, R.M. WHITE**: «Influence of chemical composition of asphalts on; performance, particularly durability», **STP 277- EB/Sep. 1960**, Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Thu Dec 29 05:18:18 EST 2011, www.astm.org.
- [14] - **R. Dupain, R. Lanchon, JC. Saint-Arroman**: « GRANULAT, SOL, CIMENTS ET BETONS. Caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoire », 2^{ème} édition ; édition CASTEILLA ; EL educalivre ; janvier 2000.
- [15] - **O.SOLOMATNIKOVA, (1998)**:«Comportement rhéologique et propriétés cohésives et adhésives des liants bitumineux», Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc), Faculté des études supérieures de l'université Laval.

[18] - **G.JEUFFROY, R.SAUTEREY** :« Couches de roulement », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 1985.

[19] - [www.google.com/enrobés bitumineux/pdf](http://www.google.com/enrobés_bitumineux/pdf); « les enrobés bitumineux», les éditions le griffon d'argile, mise à jour 2002.PP117

[21] - **J.ARRAMBIDE, M.DURIEZ** : « Liants routiers et enrobés, matériaux de protection; plâtre - agglomérés - bois », les manuels de l'ingénieur et de technicien de bâtiment et de travaux publics, édition du moniteur des travaux publics, Paris 1959.

[26] - **M.H.BEN DHIA**, «Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien », Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées - 213 - janvier- février 1998 - réf. 4159 - pp33-42.

[27] - **A.BENTATA, (2004)** : «étude expérimentale d'un béton avec le sable de dune», thèse de magister, université de Ouargla, faculté des sciences et sciences de l'ingénieur, département de l'hydraulique et génie civil.

[29] - Ministère des transports, direction des routes en collaboration avec SETRA et LCPC : « mémento des spécifications françaises Chaussée », Avril 1987 p38.

[30] - Ministère de l'aménagement du territoire, de l'équipement, du logement et du tourisme en collaboration avec SETRA et LCPC : « Directive pour la réalisation des assises de chaussées en graves-bitume et sables-bitume », Septembre 1972 P10.

[33] - **T.KERROUM, M.FERHI, (1991)** :« Sable bitume en couche de roulement, étude et formulation », mémoire de fin d'étude, école nationale des travaux public pp 11 à 17.

[34] - **L.MESTAR, M.BENCHEIKHE, (2000)**: «Etude d'un sable bitume», projet de fin d'étude, Ecole nationale polytechnique, département de génie civil, Alger.

[35] - **H.KACI, (1997)**: «sable bitume en couche de roulement : étude et formulation», projet de fin d'étude, Ecole nationale polytechnique, département de génie civil, Alger.

[36] - **A.S.BOUKHALKHAL, K.BOUKHALFA, (2001)**: « le sable bitume : étude comparative à froid et à chaud», projet de fin d'étude, Ecole nationale polytechnique, département de génie civil, Alger.

[38] - **M. Morsli, J.M.Bali A Fleureau, (2003)** : « Particularités de la Technique Routière Saharienne », 3^{ème} congrès algérien de la route.

[41] - **J.Zhang, E. R. Brown, P.S. Kandhal, R.West, (2005)**:« An Overview of Fundamental and Simulative Performance Tests for Hot Mix Asphalt», Journal of ASTM International,