

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA



Faculté des Sciences Appliquées

Département De Génie Civil et Hydraulique

**THÈSE EN VUE DE L'OBTENTION D'UN DIPLOME DE
DOCTORAT (LMD)**

Spécialité : Travaux Publics

Option : Voies et Ouvrages d'Art

Présenté par

SACI Ahmed

Thème

**EVALUATION DES PERFORMANCES
RHEOLOGIQUES DES BETONS BITUMINEUX A BASE
DE SABLE DE DUNES ET BITUME MODIFIE**

Soutenu publiquement le **24/04/2025**

Devant le jury composé de :

ABANI Said	Maître de Conf A	UKM-Ouargla	Président
KEBAILI Nabil	Maître de Conf A	UKM-Ouargla	Rapporteur
ABIMOULOUD Youcef	Maître de Conf A	UKM-Ouargla	Examineur
BELFERRAG Allaoua	Maître de Conf A	UKM-Ouargla	Examineur
KAAB Mohamed Zohaïr	Maître de Conf A	UHL - El Oued	Examineur
DJEDID Tarek	Maître de Conf A	UHL - El Oued	Examineur
ZERROUKI Moussa	Maître de Conf A	UKM-Ouargla	Co-Encadreur

على غرار المناطق الصحراوية الأخرى، يفتقر الجنوب الجزائري إلى الحصى ذات الجودة اللازمة للطرق المرورية. لذي أصبح استغلال المواد المحلية ضروريا نظرا للتكلفة والتأثير البيئي. تتمثل الدراسة الحالية أساسا في التقييم السلوكي والميكانيكي للخلطات الإسفلتية بواسطة الزفت 50/40 والتي تحوي على نسب متزايدة (5%، 10%، 15%، 20%) من رمل الكثبان بالإضافة للبوليمر Lucobit 1210A بنسبة 3%.

وقد تم فحص كل من الثبات، التدفق، مقاومة الضغط، قابلية التحدد، وتوزيع الفراغ في الخلطات الإسفلتية من خلال اختبارات مارشال، دوريز، التحدد و اختبار ضغط القص الدوراني. أفطت الدراسة المخبرية إلى أن مزج رمل الكثبان المحلية في الخلطة الإسفلتية يؤدي إلى إحداث تحسينات ميكانيكية محسوسة، حيث يقفز التدفق بنسبة 32% في حين تظهر زيادة بنسبة 17% في مقاومة التآكل عند نسبة 15% من الرمل، كما سجلنا تطورا إيجابيا على مستوى الثبات مما يجعلها صالحة للطرق المتوسطة الحركة.

في الأخير، تمهد النتائج المتحصلة عليها لتبني هذا المركب الزفتي في المشاريع الطرقية خصوصا في المناطق الصحراوية الغنية برمال الكثبان مما يمهد لبروز جيل جديد من الطرق الذي ينسق بين التميز التقني وتطلعات الاستدامة.

الكلمات المفتاحية: الخليط الزفتي، زفت معدل، الأداء الميكانيكي، مارشال، الكثبان الرملية

Abstract

Like other desert regions, southern Algeria does not have the quality gravel necessary for road traffic. The exploitation of local materials has therefore become necessary due to the cost and environmental impact. The present study mainly consists of a behavioral and mechanical evaluation of bituminous mixes using 40/50 bitumen, which contain increasing percentages (5%, 10%, 15%, 20%) of dune sand in addition to the 3% Lucobit 1210A polymer.

Stability, flow, compressive strength, rutting capacity and void distribution in asphalt mixtures were examined using Marshall, Duriez, rutting and rotational shear tests. The laboratory study found that mixing local dune sand into the asphalt mixture results in significant mechanical improvements, as flow rate increases by 32%, while a 17% increase in abrasion resistance appears at 15% of sand. We also recorded a positive evolution in the sand level stability, making it suitable for roads with medium traffic .

Finally, the results obtained pave the way for the adoption of this asphalt compound in road projects, especially in desert areas rich in dune sand, which paves the way for the emergence of a new generation of roads that coordinates technical excellence with sustainability aspirations.

Keywords: Asphalt mixture, Bitumen modified, Mechanical performance, Marshall, Dune sand

Résumé

A l'instar des autres régions désertiques, le sud algérien ne dispose pas de gravier de qualité nécessaire à la circulation routière. L'exploitation de matériaux locaux est devenue nécessaire en raison du coût et de l'impact environnemental.

La présente étude consiste principalement en une évaluation comportementale et mécanique d'enrobés bitumineux utilisant du bitume 40/50, qui contiennent des pourcentages croissants (5%, 10%, 15%, 20%) de sable de dunes en plus du polymère Lucobit 1210A à 3 %.

La stabilité, l'écoulement, la résistance à la compression, la capacité à l'orniérage et la teneur en vides dans les mélanges asphaltiques ont été examinés au moyen d'essais Marshall, Duriez, orniérage et de cisaillement rotationnel. L'étude en laboratoire a révélé que le mélange de sable de dunes dans le mélange entraîne des améliorations mécaniques significatives, puisque le débit augmente de 32%, tandis qu'une augmentation de 17% de la résistance à l'abrasion apparaît à 15% de sable.

Nous avons également enregistré une évolution positive du niveau de la stabilité, ce qui le rend adapté aux routes à trafic moyen. Enfin, les résultats obtenus ouvrent la voie à l'adoption de ce composé dans les projets routiers, notamment en zones désertiques riches en sable dunaire, ce qui ouvre la voie à l'émergence d'une nouvelle génération de routes qui allie l'excellence technique aux aspirations de durabilité.

Mots clés: Mélange bitumineux, Bitume modifié, Performances mécaniques, Marshall, Sable de dune

Remerciements

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé et soutenu tout au long de ce parcours académique.

Tout d'abord, je tiens à remercier chaleureusement mon superviseur, le Dr **NABIL KEBAILI**, qui a été une source d'inspiration et de guidance tout au long de la préparation de cette thèse. J'ai énormément bénéficié de ses conseils précieux et de son soutien constant.

Je tiens également à exprimer ma profonde reconnaissance à mon ami, le Professeur **HACINI SLIMANE**, pour son soutien et son encouragement continus.

Je remercie Madame **SOUAD CHERIF** (Directrice de l'institution Lucobit en Algérie, pour son soutien et sa coopération.

Je souhaite également remercier l'ingénieur **BENCHIKHE WAHID** (Chef de l'Unité de Suivi et d'Étude des Routes à Sétif) pour son soutien et ses conseils.

Je remercie tous les cadres et professeurs de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Ouargla (en particulier **KRIKER ABDELOUAHED**) pour leur soutien et leur coopération tout au long de ma carrière académique.

À ma chère famille, ma femme (ma fille) mes frères et sœurs, je vous remercie pour votre patience, votre compréhension et votre soutien constant. Vous avez toujours été ma force et ma motivation pour accomplir cet exploit.

Je n'oublie pas de remercier tous ceux qui ont cru en moi et m'ont apporté leur soutien, que ce soit par un mot aimable ou un conseil sage.

Dédicaces

À la mémoire de mon cher père, **AMARA**, qui m'a appris la valeur du travail acharné et de la persévérance.

À ma chère mère, **HALIMA**, qui m'a soutenu et m'a donné la force de réaliser cet accomplissement.

À ma chère épouse, **AMEL**, qui a été mon soutien et mon pilier à chaque étape de ce parcours académique.

À mes frères et sœurs, qui ont toujours été à mes côtés et m'ont encouragé à atteindre cet objectif.

À ma fille unique, **HALIMA**, qui est la lumière de ma vie et ma plus grande motivation pour réussir.

À tous les hommes et femmes libres du monde, qui luttent pour la liberté et la dignité,

je vous dédie cet humble travail

TABLE DE MATIERES

ملخص.....	i
Abstract	i
Résumé.....	i
Remerciements.....	iii
Dédicaces.....	iv
TABLE DE MATIERES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES SYMBOLES.....	xiii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1

PARTIE A: PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1: GÉNÉRALITES SUR LES BB À BASE DE SABLES ET BITUME MODIFIE

I.1 INTRODUCTION.....	6
I.2 LES BETONS BITUMINEUX.....	6
I.2.1 Types des bétons bitumineux.....	7
I.2.2 Composition des enrobés bitumineux.....	7
I.2.2.1 Liants hydrocarbonés.....	7
I.2.2.2 Les bitumes.....	7
I.2.2.3 Comportement rhéologique du bitume.....	8
I.2.2.4 Essais de caractérisation des bitumes.....	9
I.2.2.5 Granulats.....	9
I.2.2.6 La granularité.....	11
I.2.3 Essais de caractérisation des granulats.....	11
I.2.3.1 Analyse granulométrique (NF EN 933-1).....	11
I.2.3.2 Essai d'aplatissement (NF EN 933-3).....	12
I.2.3.3 Propreté superficielle (NF P18-591).....	13
I.2.3.4 Equivalent de sable (NF EN 933-8).....	13
I.3 MODIFICATION DES ENROBES BITUMINEUX.....	13
I.4 LES SABLES.....	14
I.4.1 Définition.....	14
I.4.2 Classification des sables :.....	14
I.4.2.1 Granulométrie :.....	15
I.4.2.2 Propreté :.....	16
I.4.2.3 Nature minéralogique :.....	16
I.4.3 Différents types de sable.....	16
I.4.3.1 Les sables naturels.....	16

I.4.3.2	Les sables artificiels	17
I.5	LES SABLES DE DUNES.....	17
I.5.1	Définition du sable de dunes.....	17
I.5.2	Identification des sables de dunes du Sahara.....	17
I.5.2.1	Composition chimique :	17
I.5.2.2	Analyses minéralogiques.....	18
I.5.2.3	Composition minéralogique	18
I.5.2.4	Propriété.....	19
I.5.2.5	Comportement mécanique.....	19
I.5.3	Utilisation du sable de dunes en technique routière	20
I.6	ETUDE DE FORMULATION.....	20
I.6.1	Objectif de l'étude de formulation.....	20
I.6.2	Méthode de formulation	20
I.6.3	Etapas de formulation.....	21
I.6.3.1	Sélection et Notification des constitutions.....	21
I.6.3.2	Composition théorique d'un béton bitumineux.....	22
I.6.3.3	Détermination du mélange minéral.....	22
I.6.3.4	Détermination du dosage en liant	22
I.6.3.5	Epreuve de formulation.....	23
I.7	ETAT DE L'ART SUR LES BB A BASE DE SABLES	23
I.8	CONCLUSION.....	26

CHAPITRE 2: REVUE SUR LES ESSAIS DE PERFORMANCES MECANIQUES

II.1	INTRODUCTION.....	28
II.2	LES ESSAIS DE PERFORMANCE MECANIQUE.....	28
II.2.1	Essai Marshall [NF EN 12697-34].....	28
II.2.1.1	Définition.....	28
II.2.1.2	But de l'essai	28
II.2.1.3	Domaine d'application.....	28
II.2.1.4	Appareillage.....	29
II.2.1.5	Mode opératoire.....	29
II.2.2	Essai Duriez (Essai de compression simple type LCPC).....	31
II.2.2.1	Définition.....	31
II.2.2.2	Principe.....	32
II.2.2.3	Remplissage des moules.....	32
II.2.3	Essai de Fatigue.....	33
II.2.3.1	Définition.....	33
II.2.3.2	Principe.....	33
II.2.3.3	Réalisation d'essai de fatigue.....	35
II.2.3.4	Expression des résultats d'essai de fatigue	35

II.2.4 Essais de rigidité.....	36
II.2.4.1 Définition.....	36
II.2.4.2 Essais de rigidité normalisés pour les enrobés bitumineux.....	36
II.2.4.3 Essai de compression diamétrale IT-CY.....	36
II.2.4.4 Appareillage :.....	37
II.2.4.5 Mode opératoire.....	37
II.2.4.6 Condition de stockage.....	38
II.2.5 Essai d'orniérage.....	38
II.2.5.1 Définition.....	38
II.2.5.2 Principe et mode opératoire.....	39
II.2.5.3 Types d'ornières.....	39
II.2.5.4 Réalisation d'essai d'orniérage.....	40
II.2.5.5 Expression des résultats d'orniérage.....	40
II.2.6 Essai de la Presse à cisaillement Giratoire (PCG).....	41
II.2.6.1 Principe d'essai PCG.....	41
II.2.6.2 Réalisation d'essai PCG.....	42
II.2.6.3 Type des compacteurs giratoires.....	42
II.2.6.4 Expression des résultats de PCG.....	44
II.3 CONCLUSION.....	44

PARTIE B : PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 3: CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION

III.1 INTRODUCTION.....	47
III.2 CARACTERISTIQUES DES SABLES DE DUNES UTILISES.....	47
III.2.1 Origine.....	47
III.2.2 Caractéristiques principales des sables.....	47
III.2.2.1 Granulométrie et Classification des sables.....	47
III.2.2.1.1 Module de finesse d'un sable (Mf).....	48
III.2.2.1.2 La Masse Volumique.....	48
III.2.2.1.3 Equivalent de sable.....	49
III.2.2.2 Caractéristiques chimiques.....	49
III.3 CARACTERISTIQUES DES BITUMES UTILISES.....	49
III.3.1 Bitume pur.....	49
III.3.2 Bitume modifié.....	50
III.3.3 Lucobit 1210 A.....	50
III.3.3.1 Provenance.....	50
III.3.3.2 Composition de base du Lucobit 1210A.....	51
III.3.3.3 Comportement chimique et physique.....	51
III.3.3.4 Caractéristiques de Lucobit 1012A.....	51

III.3.3.5 Raisons du choix du Lucobit1210A.....	52
III.3.4 Méthode de modification du bitume.....	52
III.4 CARACTERISTIQUES DES AGREGATS UTILISÉS.....	53
III.4.1 Provenance des matériaux granulaires.....	53
III.4.2 Identification des constituants granulaires.....	53
III.4.2.1 Caractéristiques de fabrication des granulats.....	54
III.4.2.2 Analyse chimique :	55
III.5 FORMULATION ET DETERMINATION DES PARAMETRES OPTIMUMS.....	55
III.5.1 Étapes de formulation.....	55
III.5.1.1 Courbe granulométrique du mélange.....	56
III.5.1.2 Détermination de la teneur en liant.....	57
III.5.2 Détermination de la teneur en bitume optimale.....	58
III.5.2.1 Essai de stabilité Marshall (NF EN 12697-34+A1).....	58
III.5.2.2 Essai Duriez.....	60
III.5.2.3 Teneurs en bitume pur optimal.....	61
III.6 CONCLUSION.....	62

CHAPITRE 4: INFLUENCE DE L'AJOUT DE SABLES SUR LES PERFORMANCES DU BB MODIFIE PAR LUCOBIT 1210A

IV.1 INTRODUCTION.....	64
IV.2 METHODOLOGIE DE TRAVAIL.....	64
IV.3 PREPARATION DU BITUME MODIFIE.....	65
I.3.1 Bitume modifié par Lucobit 1210A.....	65
I.3.2 Présentation du Matériel.....	66
I.3.3 Résultats et discussion.....	66
IV.4 PREPARATION DES MELANGES BB.....	67
IV.5 PROCEDURE D'AJOUT DE SABLES DE DUNES.....	68
IV.6 DETERMINATION DES PERFORMANCES DES MELANGES.....	69
IV.6.1 Essai Marshall.....	69
IV.6.1.1 Densités apparente et Absolue.....	70
IV.6.1.2 Pourcentage des vides.....	70
IV.6.1.3 La compacité.....	71
IV.6.1.4 Stabilité Marshall et le Fluage.....	71
IV.6.1.4.1 Stabilité Marshall (SM) : [2].....	71
IV.6.1.4.2 Fluage de Marshall.....	72
IV.6.1.4.3 Quotient Marshall (Qm) :	73
IV.6.1.5 Performances rhéologiques à la stabilité Marshall.....	74
IV.6.2 Essai Duriez.....	75
IV.6.2.1 Résistance à la compression.....	76

IV.6.2.2	Pourcentage des vides.....	77
IV.6.2.3	Performances rhéologiques à travers l'essai Duriez.....	77
IV.6.3	L'essai d'Omierage.....	78
IV.6.3.1	Exécution de l'essai.....	78
IV.6.3.2	Performances rhéologiques à travers l'essai d'omierage.....	81
IV.6.4	L'essai PCG.....	81
IV.6.4.1	Pourcentage de vides.....	82
IV.6.4.2	La compacité.....	84
IV.6.4.3	Performances rhéologiques à travers l'essai PCG.....	85
IV.7	COMPARAISON ENTRE ENROBE ORDINAIRE ET MODIFIE.....	85
IV.8	CONCLUSION.....	86
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	88
	RECOMMANDATIONS.....	90
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	93
	ANNEXES	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1: Les différents types de BB.....	7
Tableau I.2: Spécifications des granulats.....	12
Tableau I.3: Principaux agents modifiants des bitumes.....	14
Tableau I.4: Classification des sables selon la granulométrie.....	15
Tableau I.5: Catégories de sables.....	15
Tableau I.6: Compositions chimiques des sables du sud.....	18
Tableau I.7: Quelques travaux de recherche sur les constructions routières à base de sables et le bitumes modifié.....	25
Tableau II.1: Dimensions des bandes de chargement.....	37
Tableau III.1: Masse volumique absolue et apparente des agrégats utilisés.....	48
Tableau III. 2 : la Fiche technique chimique du sable.....	49
Tableau III.3: Propriétés physique du bitume utilisé.....	49
Tableau III.4: Caractéristiques de Lucobit 1012A	51
Tableau III.5: Méthodes de mélange du bitume basées sur la vitesse et le temps.....	52
Tableau III.6: Caractéristiques intrinsèques des granulats.....	53
Tableau III.7: Caractéristiques de fabrication des agrégats.....	54
Tableau III. 8: Résultats de l'analyse chimique des agrégats.....	54
Tableau III.9: Valeurs usuelles du module de richesse pour les enrobés.....	57
Tableau III.10 : Teneur en liant du béton bitumineux.....	58
Tableau III.11: Les résultats de l'essai Duriez.....	60
Tableau IV.1: Caractéristiques techniques du bitume modifié à 3% de Lucobit.....	67
Tableau IV.2 : Composition globale du BB avec modificateur de bitume.....	68
Tableau IV.3: Proportions de combinaisons des formules étudiées.....	68
Tableau IV. 4: Les résultats des essais Marshall.....	69
Tableau IV.5: Résultats Duriez.....	75

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Aspects de coupe et de surface du béton bitumineux de type Semi-Grenu (BBSG) 0/14 selon la norme NF EN 13108-1[4]	6
Figure I.2: Comportement du bitume en fonction de $ \epsilon $ et T [9]	9
Figure I.3: Pénétromètre à aiguille.....	9
Figure I. 4: Principe de ramollissement	10
Figure I.5: Appareil de mesure du Point d'éclair.....	10
Figure I. 6: Dimensions d'un granulat	12
Figure I.7: le sable de dune	17
Figure I. 8: Courbe DRX du sable de dune.....	18
Figure I. 9: Courbes granulométriques de sept sables de dunes	19
Figure I.10: Méthode française de formulation des enrobés bitumineux	21
Figure I.11: Niveaux d'épreuve de formulation	23
Figure II.1 : Machine d'essai Marshall.....	29
Figure II.2 : Principe de l'essai Marshal.....	30
Figure II.3 : Appareil DURIEZ.....	32
Figure II.4 : Principe de l'essai Duriez.....	32
Figure II.5 : Dispositif de l'essai Duriez.....	33
Figure II.6 : Critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie Nf.....	33
Figure II.7 : Essai de flexion 2 points sur éprouvette trapézoïdale.	34
Figure II.8 : Appareil d'essai de flexion 4 points.....	34
Figure II.9 : Signal de déplacement symétrique imposé à la petite base de l'éprouvette ..	35
Figure II.10 : Courbe de Wöhler.....	35
Figure II.11 : Principes d'essais de rigidité	36
Figure II.12 : Principe de l'essai de compression diamétrale	37
Figure II.13 : Forme de l'impulsion de chargement.....	38
Figure II.14 : Essai d'orniérage	38
Figure II.15 : Principe de l'essai d'orniérage.....	39
Figure II.16 : Types d'ornières	39
Figure II.17 : Préparation de plaque sur la table de compactage.....	40
Figure II.18 : Profondeur d'ornière proportionnelle / nombre de cycles.	41
Figure II.29 : Machine La Presse Cisaillement à Giratoire.	41
Figure II.20 : Principe de Cisaillement Giratoire	42
Figure II.21 : Mécanisme La Presse à Cisaillement Giratoire de Vicksburg	43
Figure II.22 : Mécanisme à l'appareil français des Ponts et Chaussées.....	43
Figure II.23 : Présentation des résultats d'essai PCG.....	44
Figure III.1 : Sable de dunes de Sidi Khouiled.....	47
Figure III.2: Localisation de la dune de sable.....	47
Figure III.3 : Courbe granulométrique du sable de dune utilisé	48
Figure III.4 : Forme granulaire de Lucobit 1210 A	50

Figure III.5 : Structure du polymère EBA	51
Figure III.6 : Fractions granulaires 3/8 et 0/3	53
Figure III.7 : Granulométrie des fractions granulaires.	54
Figure III.8 : Étapes de formulation.....	55
Figure III.9 : Courbe granulométrique de mélange BB ordinaire	56
Figure III.10 : Composition granulaire du mélange.	56
Figure III.11 : Appareil Marshall (écrasement d'éprouvette)	58
Figure III.12 : Stabilité Marshall	59
Figure III.13 : Fluage Marshall.....	59
Figure III.14 : Résistance à la compression (Essais Duriez)	60
Figure III.15 : Rapport R/r	61
Figure IV.1 : Méthodologie de travail suivie.....	65
Figure IV.2 : Influence de la teneur en Lucobit sur le ramollissement du bitume	66
Figure IV.3 : Influence de la teneur en Lucobit sur la pénétration du bitume.....	67
Figure IV.4: Courbes granulométriques des différents mélanges	68
Figure IV.5 : Éprouvettes de l'essai Marshall	69
Figure IV.6 : Variation des densités selon les dosages en sable de dunes.....	70
Figure IV.7: Variation de vide pour les différents mélanges.....	70
Figure IV.8 : Variation de la compacité pour différents mélanges.....	71
Figure IV.9 : Variation de la stabilité en fonction de la teneur en sable de dunes SD	71
Figure IV.10 : Variation du fluage en fonction de la teneur en sable de dune SD	72
Figure IV.11 : Variation du Quotient Marshall selon les teneurs en sable.....	73
Figure IV.12 : Variation de la stabilité et du fluage en fonction de l'effet des SD	74
Figure IV.13 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en sable de dunes...	76
Figure IV.14 : Rapport d'immersion r/R en fonction de la teneur en sable des dunes....	76
Figure IV.15 : la variation de pourcentage de vide.....	77
Figure IV.16 : Mesure de la profondeur d'orniérage.....	78
Figure IV.17 : Le pourcentage d'orniérage en fonction du nombre de cycles	79
Figure IV.18 : La différence entre l'orniérage par rapport au bitume ordinaire	80
Figure IV.19 : Valeurs d'orniérage par rapport au bitume ordinaire	80
Figure IV.20 : Appareillages d'essai (Moule d'éprouvette b et Machine de PCG)	82
Figure IV.21 : Variation du volume moyen des vides (PCG)	82
Figure IV.22 : Pourcentage d'indice de vide initial et final	83
Figure IV.23 : Différences de taux de vide (%).....	84
Figure IV.24 : Evolution de nombre de girations en fonction de la compacité.....	84

LISTE DES SYMBOLES

A	Coefficient d'aplatissement
BB	Béton Bitumineux
BBDR	Bétons bitumineux drainants Excellente adhérence
BBM	Bétons bitumineux minces
BBME	Bétons bitumineux à modules élevés
BBS	Bétons bitumineux souples
BBSD	Béton Bitumineux à base de sable de dune
BBSG	Bétons bitumineux semi-grenus.
BBTM	Bétons bitumineux très minces
C_c	Coefficient de courbure
C_u	Coefficient d'uniformité
C_r	Degré de compaction à 0,1% près
D	Plus grande des dimensions granulaires
d	Plus petite des dimensions granulaires
d/D	Classe granulaires (mm)
D_n	Déflexion normalisée
D_a	Déflexion auscultée
E	Distance minimale du deux plans parallèles tangents au granulat.
e	Ecartement de grilles à fentes (mm)
EBC	Copolymères d'éthylène Butylacrylate
EBA	Groupe Ethylène Butylacrylate
EP	Propreté superficielle
Esp	Equivalent de sable piston
f	Pourcentage d'éléments < 0.08 mm
F_a	Force appliquée
F_m	Valeur du fluage de l'échantillon en mm
F_n	Force de référence
FS	Friabilité du sable
G	Dimension de la maille carrée minimale du tamis qui laisse passer le granulat
g	Pourcentage d'éléments > 6,3 mm
h	Epaisseur de l'éprouvette, en millimètres (mm)
IVR	Indice des vides rigden
K	Module de richesse
K	Compactibilité (pour la méthode utilisant un compacteur giratoire)
L	Distance minimale du deux plans parallèles tangents aux extrémités du granulat.
LA	Los Angeles
M	Masse initiale de l'échantillon testé
M	Masse des fines < 1 mm
MDE	Micro Deval

MEB	Microscope électronique à balayage
M_{ei}	Masse de la classe granulaire d/D
Mf	Module de finesse
Mgi	Masse passant à travers le tamis à fentes d'écartement
M_1	Masse sèche de l'éprouvette
M_2	Masse sous eau de l'éprouvette
M_3	Masse saturée surface sèche de l'éprouvette
M_4	Tare du pycnomètre (g) bouchon compris
M_5	Masse du pycnomètre contenant l'échantillon (g) bouchon compris
M_6	Masse du pycnomètre contenant l'échantillon et l'eau à la température choisie (g) bouchon compris;
m_{ij}	Déformation locale, en millimètres (mm)
m_{0j}	Mesure initiale à l'emplacement j
n	Nombre de girations.
P	Propreté de gravillons
P_i	Pourcentage de profondeur d'ornière mesurée (%)
P_m	Valeur de la stabilité de l'échantillon en KN
PS	Propreté du sable à 10% de fines
PmB	Pré mélange avec le bitume
Q_m	Quotient Marshall
S	Pourcentage d'éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm
s	Pourcentage d'éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm
SD	Sable de dunes
T	Température
V_a	Volume apparente de l'échantillon (cm ³)
VBR	Valeur de bleu des fines
V_s	Volume absolu de l'échantillon (cm ³)
V_p	Pourcentage de vides pour un nombre de girations, exprimé en pour cent (%)
$V(n)$	Volume du pycnomètre (m ³)
V1	Pourcentage de vides calculé pour une giration
α	Coefficient correcteur tenant compte de la masse volumique des granulats
γ_s	Masse volumique absolue (g/cm ³)
γ_a	Masse volumique apparente (g/cm ³)
ρ_b	Masse volumique apparente en kg/m ³
ρ_r	Teneur en bitume en %
ρ_w	Masse volumique de l'eau en kg/m ³
ρ_b	Masse volumique apparente à 1 kg/m ³ près
ρ_{mv}	Masse volumique réelle de l'éprouvette
$\underline{\Sigma}$	Surface spécifique exprimée en m ² /Kg,
Σ	Masse volumique de référence en kg/m ³

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En raison de l'épuisement progressif et rapide des ressources traditionnelles utilisées dans la construction routière, notamment dans les régions désertiques où les matériaux locaux sont rares et difficiles à exploiter, la recherche de solutions alternatives durables devient impérative. Parmi les matériaux disponibles en grande quantité dans ces zones arides, le sable de dunes se distingue par son accessibilité, sa disponibilité quasi illimitée et son faible coût d'extraction, ce qui en fait un candidat de substitution particulièrement intéressant [1-4].

Plusieurs études antérieures ont mis en évidence le potentiel de ce matériau dans diverses applications routières, notamment dans la formulation des enrobés bitumineux. En effet, selon de nombreux chercheurs [5-7], l'incorporation du sable de dunes dans les mélanges bitumineux ne présente pas uniquement des avantages économiques et environnementaux liés à la valorisation d'un matériau localement abondant, mais contribue également à l'amélioration de certaines propriétés mécaniques et du comportement rhéologique des enrobés [2,8-9]. Ces observations encouragent à approfondir les recherches sur les mécanismes d'interaction entre le sable de dunes et le liant bitumineux, ainsi que sur les conditions optimales de formulation pour garantir la performance à long terme des structures routières dans les environnements contraignants.

Un nombre considérable de recherches a été consacré à l'incorporation du sable de dunes dans les mélanges bitumineux [6,10-11], avec un intérêt particulier pour la détermination du taux d'ajout optimal permettant d'obtenir un compromis satisfaisant entre performance et durabilité. Ces études s'intéressent non seulement aux propriétés mécaniques des enrobés, mais également à l'influence des conditions climatiques extrêmes, notamment dans les régions à climat chaud ou sujettes à des variations thermiques rapides [12]. Par ailleurs, des travaux récents ont exploré l'effet de la modification du liant bitumineux par l'ajout de polymères, notamment le Lucobit 1210A, dans le but d'améliorer les performances globales des enrobés [10,13-14]. Ce polymère, constitué d'un copolymère d'éthylène-butylacrylate (EBC), joue un rôle clé dans l'amélioration de la cohésion entre les particules d'asphalte, renforçant ainsi l'adhérence au sein de la matrice bitumineuse et augmentant sa résistance aux déformations permanentes. Les résultats obtenus à travers ces études sont généralement encourageants et confirment le potentiel de cette approche pour optimiser le comportement des mélanges, en particulier dans les contextes climatiques exigeants.

L'étude portant sur l'évaluation des performances rhéologiques des bétons bitumineux incorporant du sable de dunes et modifiés par l'ajout de Lucobit 1210A [15-16] s'inscrit dans une dynamique de recherche orientée vers l'optimisation des

matériaux routiers à base de ressources locales. Elle vise à examiner de manière approfondie l'effet combiné de ces deux composantes le sable de dunes, utilisé comme granulats de substitution, et le polymère Lucobit 1210A, introduit comme modifiant du liant — sur les propriétés mécaniques et rhéologiques des enrobés bitumineux.

Cette démarche s'insère dans une vision de développement durable et de valorisation des matériaux abondants et sous-exploités dans les régions désertiques, où les contraintes climatiques et l'indisponibilité des matériaux conventionnels imposent une adaptation des techniques de construction routière. En analysant l'interaction entre ces matériaux et leur influence sur le comportement global du mélange bitumineux, cette recherche ambitionne de proposer des solutions techniques fiables, adaptées aux milieux arides, tout en répondant aux exigences de performance et de durabilité des infrastructures routières modernes.

Le béton bitumineux constitue l'un des matériaux les plus couramment utilisés dans la construction des infrastructures routières, en raison de ses excellentes propriétés mécaniques, notamment sa résistance, sa durabilité et sa flexibilité face aux sollicitations du trafic [17-19]. Dans un contexte marqué par l'augmentation constante des charges de trafic, en particulier celles liées aux véhicules lourds, il devient essentiel d'adapter et d'améliorer les formulations traditionnelles pour garantir la performance à long terme des chaussées.

À cet égard, l'incorporation du sable de dunes matériau naturel abondant dans certaines régions arides associée à l'utilisation du polymère modifiant Lucobit 1210A, apparaît comme une stratégie prometteuse. Cette combinaison vise à renforcer les propriétés mécaniques et rhéologiques des enrobés bitumineux, tout en répondant aux exigences croissantes de durabilité, de résilience climatique et d'optimisation des ressources local

Le but de cette recherche est de déterminer l'effet de l'ajout de sable de dunes sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons bitumineux modifiés par Lucobit 1210A. L'objectif est d'évaluer l'influence de différentes proportions de sable de dunes jusqu'à 20% en substitution au sable concassé (0/3) sur les performances du matériau, notamment en termes d'orniérage, de stabilité, d'écoulement et autres.

A cet effet, différents tests comprenant des mesures de stabilité, de déformation, de résistance à l'orniérage et de fluage ont été réalisés pour évaluer la qualité et la durabilité des enrobés bitumineux modifiés.

Les résultats obtenus permettent de déterminer l'effet de ces modifications sur la résistance, la cohésion, la déformation et la maniabilité des mélanges bitumineux, offrant ainsi des perspectives pour l'optimisation des formulations et la mise en œuvre de solutions innovantes dans le domaine de la construction routière.

Pour réaliser cette étude nous avons effectué une série de tests dans trois (03) laboratoires qui possèdent l'équipement nécessaire pour effectuer les essais demandés :

- Laboratoire de recherche en Génie civil, de l'université Kasdi Merbah (UKMO), Ouargla ;
- Laboratoire de la Société d'Etudes Techniques de Setif /SETS ;
- Laboratoire des travaux publics du Sud LTPS- El-oued.

Le manuscrit de la thèse est composé de quatre chapitres, une conclusion générale et des annexes, qui sont organisés comme suit :

Le premier chapitre aborde une introduction générale sur les bétons bitumineux, en définissant ces matériaux largement utilisés dans la construction routière. Il traite des composants principaux tels que le bitume et les granulats, ainsi que des propriétés physiques et chimiques du sable de dunes et du bitume modifié.

Le deuxième Chapitre se concentre sur les méthodes expérimentales spéciales pour évaluer les propriétés mécaniques et comportementales du béton bitumineux. Il présente des essais tels que Marshall, Duriez, orniérage et essai PCG, visant à évaluer diverses propriétés mécaniques des enrobés bitumineux pour optimiser leur composition et assurer une chaussée flexible durable et résistante.

Le troisième chapitre se focalise sur la caractérisation des matériaux utilisés dans les bétons bitumineux à base de sable de dunes. Il aborde la composition granulaire du mélange et la formulation des enrobés, mettant en lumière l'importance de ces aspects pour garantir les performances rhéologiques optimales.

Le quatrième chapitre explore spécifiquement l'impact de l'ajout de sables sur les performances des bétons bitumineux modifiés par le polymère Lucobit 1210A. Ce chapitre se penche sur les effets de l'incorporation de sables dans la composition des enrobés bitumineux, en mettant en évidence les changements résultant au niveau des propriétés rhéologiques et mécaniques du matériau.

Le but de cette recherche est de déterminer l'impact de l'ajout de différentes proportions de sable de dune sur les caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux. L'objectif principal est d'identifier une composition optimale en étudiant les effets de l'ajout de sable de dune sur des propriétés telles que le fluage Marshall, les résistances à l'eau et à l'air, la teneur en bitume, la compacité et la résistance mécanique du mélange. Cette étude vise également à évaluer les économies de coûts potentielles tout en maintenant des propriétés mécaniques acceptables.

PARTIE A

PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE 1:

GÉNÉRALITES SUR LES BB A BASE DE SABLES ET BITUME MODIFIE

CHAP I

GÉNÉRALITÉS SUR LES BBÀ BASE DE SABLES ET DE BITUME MODIFIÉ

I.1 INTRODUCTION

Ce chapitre se concentre sur une exploration des enrobés bitumineux, des matériaux largement utilisés dans la construction des routes, des autoroutes et des infrastructures de transport. Nous débuterons par une définition des enrobés bitumineux et une brève description de leurs composants principaux, à savoir le bitume et les granulats. Nous aborderons également les propriétés physico-chimiques des dunes de sable et du bitume modifié.

Par la suite, nous examinerons en revue différents types de bétons bitumineux, tels que les bétons bitumineux semi-grenus, souples, minces et drainants, en mettant l'accent sur leurs caractéristiques distinctives et leurs applications respectives.

Enfin, nous examinerons la formulation des enrobés, en tenant compte de paramètres tels que la teneur en bitume pur et modifié, la mise en œuvre et la durabilité sont influencés par la dureté du bitume et la taille des granulats. Nous aborderons également les principales expériences de caractérisation effectuées afin d'obtenir le mélange choisi en fonction des exigences particulières. [20-21]

I.2 LES BETONS BITUMINEUX

Le béton bitumineux est un enrobé riche en bitume constitué d'un mélange de granulats (sable, gravier et fines), utilisé couramment sur l'ensemble du réseau routier, il représente la majeure partie des enrobés pour couche de roulement.[22]

Les bétons bitumineux sont classés en fonction de leur granulométrie. On applique toujours des couches minces sur une couche de base en matériaux hydrocarbonés ou recouverts d'un liant hydraulique, ou sur une couche de liaison en enrobés.[23]

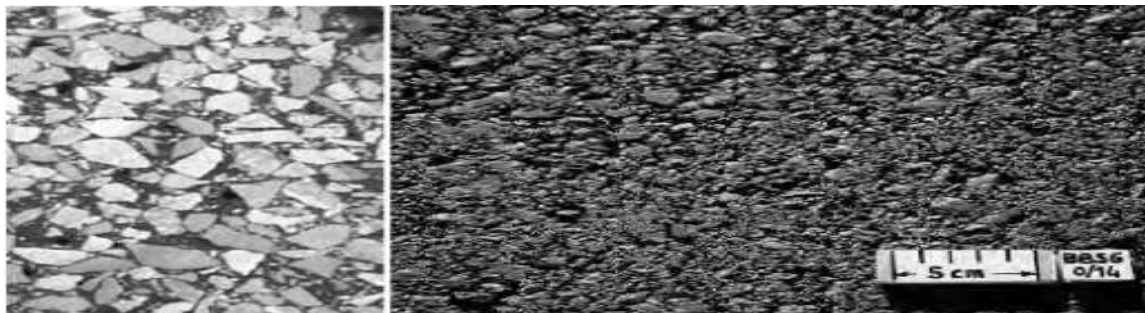


Figure I.1:Aspects de coupe et de surface du béton bitumineux de type Semi-Grenu (BBSG) 0/14 selon la norme NF EN 13108-1[24]

I.2.1 Types des bétons bitumineux

Dans le domaine routier, il existe plusieurs types de béton bitumineux, en fonction de l'utilisation que l'on souhaite en faire. Le tableau ci-dessous récapitule les différentes sortes de BB :

Tableau I.1: Les différentes types de BB[25]

Appellations abrégées de bétons bitumineux	Caractéristiques	Exemples d'utilisation
BBSG : bétons bitumineux semi-grenus	Couches allant de 5 à 10 cm. Empêche les problèmes d'ornièrre. Résistance élevée face aux efforts.	Utilisation fréquente en trafic réduit
BBME : bétons bitumineux à modules élevés		
BBS : bétons bitumineux souples		
BBM : bétons bitumineux minces	Excellente adhérence. Imperméabilise la chaussée	Utilisation fréquente pour routes nationales
BBDR : bétons bitumineux drainants Excellente adhérence.	Excellente adhérence. Baisse significative du bruit de roulement. Excellente adhérence par temps de pluie	Utilisation fréquente pour Autoroute, Voies express, ...etc.
BBTM : bétons bitumineux très minces	Couche de 2 à 3 cm	Chaussée à trafic important et rapide

I.2.2 Composition des enrobés bitumineux

I.2.2.1 Liants hydrocarbonés

Les liants hydrocarbonés sont des substances composées essentiellement d'atomes de carbone et d'hydrogène en contact avec des particules solides telles que les agrégats créant ainsi une adhérence et une cohésion qui assurent une certaine rigidité, et résistance à la traction, compression, déformation et cisaillement.[6]

En générale il existe trois types de liants hydrocarbonés:

- **Les liants naturels:** qui se trouvent dans la nature et qui sont utilisés depuis des temps très anciens. C'est une roche asphaltique telle qu'elle se présente dans le gisement et qui, après broyage est dénommée asphalte.
- **Les bitumes de pétrole:** qui sont obtenus par raffinage des pétroles bruts et des résidus pétroliers.
- **Les goudrons,** qui proviennent de la pyrogénéation à l'abri de l'air, du lignite et de la tourbe et du bois.

Principalement pour des raisons économiques ou environnementales, le goudron de houille n'est presque jamais utilisé dans les travaux routiers. [26]

I.2.2.2 Les bitumes

Le bitume est le produit de base de la majorité des techniques employées dans le domaine de la construction routière moderne où ses qualités font l'unanimité est un

matériau d'étanchéité adhésif et non-volatil, qui provient des résidus de pétrole brut. Il est choisi pour sa haute teneur en asphaltène, il est totalement ou presque soluble dans le toluène.

C'est un liant hydrocarboné adhésif, noir, visqueux, composé d'hydrocarbures. Il contient du carbone et de l'hydrogène avec de faibles proportions d'azote, d'oxygène et de soufre ainsi que des métaux à l'état de traces.[27]

➤ Provenance

Le bitume, corps plus au moins viscoélastique, de par sa complexité, il est illusoire de vouloir identifier la totalité de ses composants. De ce fait, le fractionnement des bitumes en familles chimiques est apparu comme l'approche la plus efficace.

➤ Composition du bitume

Le bitume est constitué d'hydrocarbures de grande masse moléculaire, principalement des groupes asphaltique et naphthénique.[27]

À une température normale, les bitumes apparaissent comme des substances visqueuses ou solides qui peuvent s'échapper sous leur poids propre.[27]

Grâce à l'utilisation d'un solvant, il est possible de séparer les bitumes en Maltènes et asphaltènes.

Les asphaltènes: Les bitumes contiennent entre 10 et 30% d'asphaltènes, qui sont la partie insoluble des bitumes dans les solvants de type n-alcanes. Ils apparaissent comme un solide dur et malléable d'un noir brunâtre qui rehausse grandement la couleur noire de l'asphalte.

Les maltènes: Les maltènes sont des composés solubles qui sont associés aux résines et aux huiles. Les résines jouent un rôle crucial dans la stabilité colloïdale du bitume, tandis que les huiles représentent entre 40 et 60 % du bitume

I.2.2.3 Comportement rhéologique du bitume

Les propriétés demandées aux bitumes pour garantir des chaussées durables sont essentiellement basées sur leurs propriétés rhéologiques. La caractéristique principale du bitume est la très large et progressive plage de variation de sa consistance avec la température, appelée susceptibilité thermique. Il peut se présenter alors sous les trois formes suivante.[28]

Apparaît comme un solide dur, cassant et cassant à basse température et pendant des temps de chargement courts. On est alors dans la zone dite élastique, où l'asphalte est trop fragile dans la plupart des applications pour résister aux contraintes mécaniques sans se fissurer. Dans cette région, il n'y a pas de déphasage entre la contrainte appliquée et la déformation résultante. [29]

- Liquides à haute température et temps de charge prolongé. C'est la région fluide, parfois même la région newtonienne. Elle correspond à la température à laquelle le mélange est réalisé, mis en place et compacté. Dans cette région, il existe un déphasage entre la contrainte et la déformation.

- Ni liquide ni solide à température et temps de charge moyens. Cette zone est appelée zone viscoélastique et correspond à la température à laquelle le revêtement sera utilisé sur la chaussée. De même, il existe un déphasage entre le stress et la déformation

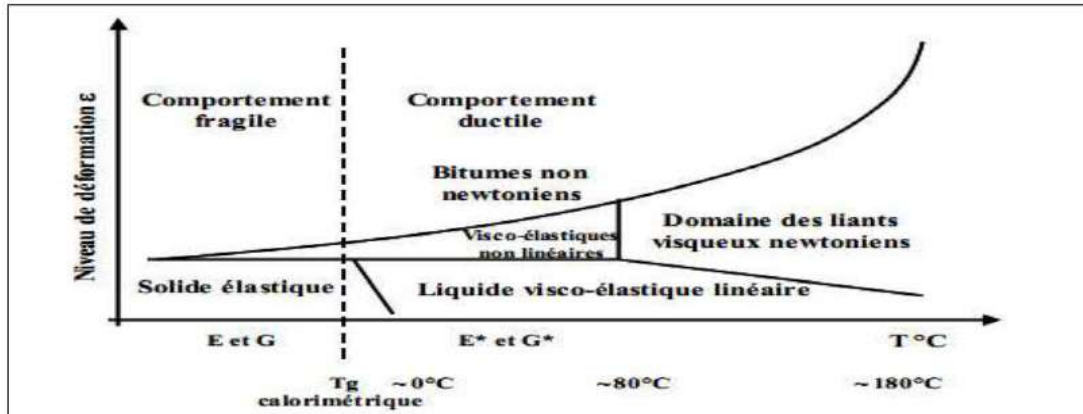


Figure I.2: Comportement du bitume en fonction de T et $|\epsilon|$ [30]

I.2.2.4 Essais de caractérisation des bitumes

a) **pénétrabilité à l'aiguille** : est une méthode utilisée pour déterminer la consistance du bitume et des liants à base de bitume à 25°C. La consistance d'un liant bitumineux s'exprime par la profondeur de pénétration, qui est de dixièmes de millimètre (notée dmm) et représente la profondeur verticale d'une aiguille dans un échantillon du matériau, dans des conditions de température, de charge et de durée d'application du charge spécifique au matériau. [31]

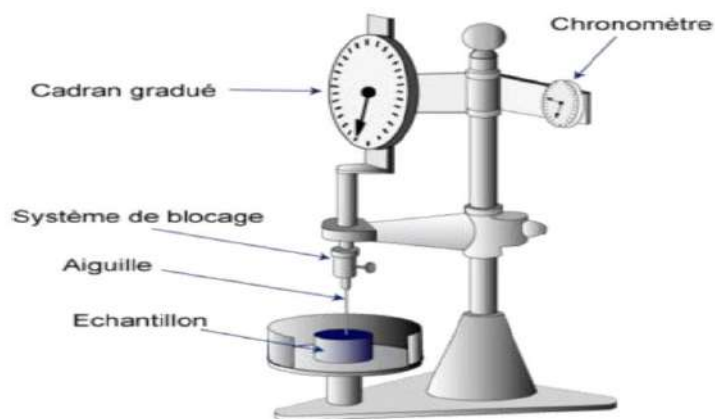


Figure I.3: Pénétromètre à aiguille

b) **Température de ramollissement bille-anneau** : Température de ramollissement des billes : Le procédé est généralement utilisé pour les liants dont la température de ramollissement est comprise entre 28 et 150 degrés Celsius. Une fois que l'aiguille a réussi à percer le plastique, la deuxième méthode la plus ancienne pour ramollir les bitumes est utilisée. C'est la

température à laquelle un échantillon de bitume chauffé placé dans un cercle présente une déformation de $25 \pm 0,4$ mm provoquée par une bille.

La pénétrabilité et la température de la bille augmentent ou diminuent en même temps. Une autre mesure, la détermination du point de Frass, permet de déterminer le comportement du bitume à basse température. Il s'agit de la température exprimée en degrés Celsius, à laquelle un film de liant bitumineux spécifique et d'épaisseur uniforme se brisera sous une charge définie. [32]

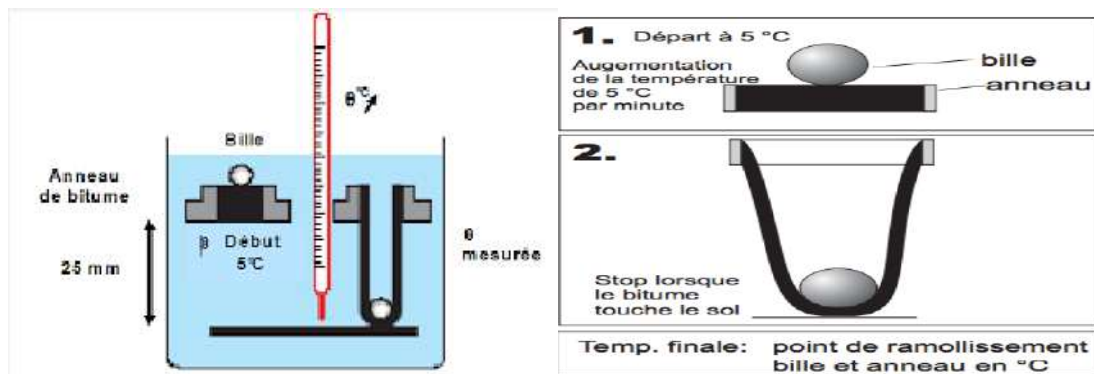


Figure I.4: Principe de ramollissement

c) **Point d'éclair ASTM D 56** : Le point d'éclair correspond à la température minimale à laquelle un liquide peut se transformer en un mélange inflammable dans l'air près de sa surface, une fois qu'une source d'inflammation a été identifiée. Plus le point d'éclair est bas, plus la combustion du matériau est facile. La température critique à laquelle et au-dessus de laquelle il est nécessaire de prendre des précautions adéquates pour éviter le risque d'incendie lors du chauffage est indiquée par le point.[33]



Figure I.5: Appareil de mesure du Point d'éclair

I.2.2.5 Granulats

On appelle «granulat» un ensemble de particules dont la taille est comprise entre 0 et 80 mm. Le matériau granulaire constitue environ 95% de la masse d'asphalte

(80 à 85% en volume). Cette importance quantitative de la composition minérale a un impact sur les propriétés mécaniques et les performances des matériaux bitumineux.[26]

I.2.2.6 Granularité

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires dans les matériaux étudiés. [26]

I.2.3 Essais de caractérisation des granulats

I.2.3.1 L'analyse granulométrique (NF EN 933-1)

L'analyse granulométrique par tamisage peut utiliser une série de tamis à mailles carrées pour déterminer la taille des particules de l'agrégat. Comme on ne peut pas compter les particules présentes dans chaque fraction, on mesure la masse des particules qui ont traversé le tamis supérieur mais restent sur le tamis inférieur.[34]

➤ Notions dérivées des analyses granulométriques

❖ **Diamètre effectif** : Le diamètre correspondant au pourcentage de tamisage cumulé égal à la quantité placée comme indicateur. Le diamètre effectif est utilisé pour calculer divers paramètres d'interprétation et établir les exigences.[34]

❖ **Coefficient d'uniformité** : Le coefficient d'uniformité C_u d'un matériau caractérise quantitativement et qualitativement l'étalement de sa courbe granulométrique. Il est égal au rapport:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (I.1)$$

❖ **Coefficient de courbure** : Le coefficient de courbure est égal au rapport suivant :

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (I.2)$$

La distribution des particules dans une courbe granulométrique est mesurée par le coefficient de courbure.

❖ **Module de finesse** :notée M_f , celui-ci caractérise la granulométrie des sables pour béton. [34]

❖ Spécifications des granulats

Au cours de la durée de vie de la chaussée, les couches bitumineuses sont soumises à diverses sollicitations telles que la répétition des charges des routes exercées par les véhicules et les effets climatique.

Nous présentons dans le tableau I.2. les exigences auxquelles doivent satisfaire les granulats des enrobés bitumineux à chaud [35].

Tableau I.2: Spécifications des granulats

Caractéristique	Normes	Trafic (PL.MJA)<150	Trafic (PL.MJA)>150
LA	P 18 573	≤30	≤25
MDE	P 18 572	≤25	≤20
Aplatissement (A)	P 18 561	≤ 30	≤ 25
Propreté de gravillons(P)	P 18 591	≤3	≤ 2
Indice des vides rigden (IVR)	P 18 565	≤ 40	≤ 40
Valeur de bleu des fines (VBR)	Pr EN 933 9	≤ 10	≤10
Friabilité des sables (FS)	P 18 576	≤ 40	≤35
Propreté dessable à 10% de fines(PS)	P 18 597	≥75%	≥75%

I.2.3.2 Essai d'aplatissement (NF EN 933-3)

Le granulat est caractérisé par trois dimensions géométriques

- L: représente la distance minimale entre les deux plans parallèles qui sont tangents aux extrémités du granulat.
- E: La distance minimale entre les deux plans parallèles tangents
- G : taille minimale de la maille carrée du tamis qui permet de passer le granulat.

Le coefficient d'aplatissement A d'un groupe de granulats correspond au pourcentage pondéral des éléments impliqués dans la relation suivante.

$$\frac{G}{A} > 1.58$$

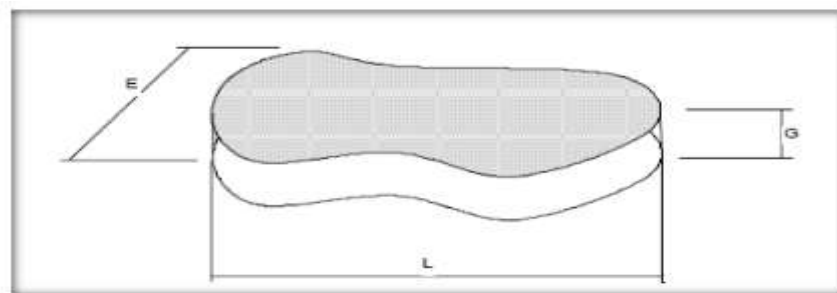


Figure I.6: Dimensions d'un granulat

Le processus d'essai implique deux étapes de tamisage :

Le tamisage traditionnel sur une colonne de tamis normalisés à mailles carrées pour séparer les granulats en une série de classes granulaires d/D avec des dimensions de $D = 1,25d$.

Les différentes classes granulaires d/D sont isolées et tamisées sur une grille à fentes parallèles d'écartement $e=d/1,58$ (coïncidant également avec $E=d/2$).

En effectuant une double analyse granulométrique, on obtient le coefficient d'aplatissement en utilisant successivement et pour le même échantillon de granulat. Un ensemble de tamis standardisés avec des mailles carrées. Une collection de tamis avec des fentes de largeur standardisée :

I.2.3.3 La propreté superficielle (NF P18-591).

La valeur de la propreté superficielle est appréciée, c'est-à-dire le pourcentage de particules fines (< 1 mm) présentes dans un échantillon de gravillons.

I.2.3.4 L'équivalent de sable (NF EN 933-8).

L'essai permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible ou d'éléments argileux dans les sols ou agrégats fins. Pour un béton, ces fines risquent d'inhiber l'hydratation du liant et gênent l'adhérence avec les agrégats.

I.3 MODIFICATION DES ENROBES BITUMINEUX

La modification des enrobés bitumineuse avec des polymères compatibles peut s'avérer bénéfique. La modification peut s'opérer de deux manières, la première étant la modification du bitume (procédé humide) et la deuxième consiste en l'ajout direct du modifiant lors de l'opération de malaxage de l'enrobé (procédé sec) [35].

Les additifs ou les polymères généralement à base de pétrole ou ses dérivés lourds sont destinés à améliorer les propriétés de l'enrobé (enrobé à module élevé). Ils peuvent être introduits soit dans le mélange au moment du malaxage soit directement dans la cuve bitume. Les polymères thermoplastiques constituent la famille d'agents modifiants chimiques la plus utilisée pour la modification des bitumes.

Ils sont subdivisés en deux familles : les élastomères et les plastomères qui se distinguent, aux températures d'usage, par des comportements différents du point de vue rigidité, déformabilité et résilience.

Pour les plastomères, la déformation élastique s'accompagne d'une déformation permanente qui peut être relativement importante.

Une liste des principaux agents modifiants des bitumes employés en technique routière classés par catégorie est donnée dans le Tableau I.3.

Tableau I.3: Principaux agents modifiants des bitumes.

Polymères thermoplastiques élastomères	
SBS	Copolymère styrène-butadiène-styrène
SIS	Copolymère styrène-isoprène-styrène
SB	Styrène-butadiène
SBR	Copolymère statistique styrène-butadiène Polymères
Polymères thermoplastiques plastomères	
EVA	Copolymère éthylène-acétate de vinyle
EMA	Copolymère éthylène-acrylate de méthyle
EBA	Copolymère éthylène-acrylate de butyle
PIB	Polyisobutylène Latex
Latex	
CR	Polychloroprène
SBR	Caoutchouc styrène-butadiène
NR	Caoutchouc naturel
NBR	Acrylonitrile butadiène rubber

Il a été démontré que d'autres additifs contribuent plus ou moins avantageusement au comportement rhéologique du bitume, il s'agit en l'occurrence de la lignine, le noir de carbone, le soufre et la résine époxyde et les déchets plastiques alimentaires ou industrielles.

I.4 LES SABLES

I.4.1 Définition : Le sable est défini comme des particules avec des dimensions comprises entre 80mm et 05mm. Ce sont aussi des matériaux de diamètre maximal inférieur à 6,3 mm et un taux de fines inférieures à 80 µm ne dépasse pas 30%. [36-37]

En fait, la définition de la granulométrie du sable est plus compliquée, selon différents pays et destinations.

I.4.2 Classification des sables : La classification a pour but de rassembler en familles les matériaux qui ont des similitudes soit dès leur origine, soit dans leur comportement lié à un usage spécifique.

Quant à l'utilisation des sables dans la construction routière, ils sont plus couramment utilisés dans :

- Les assises de chaussées traitées au liant
- Les terrassements, couche de forme, et assises non traitées..

La classification utilisée dans le domaine du terrassement et de couche de forme est basée sur la sensibilité à l'eau des matériaux, sur leur état naturel et sur la taille des gros éléments qui les constituent.

On peut classer les sables en fonction de divers critères ; une classification simplifiée a été choisie pour les sables traités, qui repose principalement sur deux critères : la granulométrie et la propreté.

I.4.2.1 **Granulométrie:** On distingue trois catégories de sable (Tableau I.4 et I.5).

- **Sable grossier** : Plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,5 et 5mm. Ces sables ont des propriétés qui se rapprochent des graves.
- **Sable moyen** : Moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 μ m sont compris entre 0,2 et 2mm.
- **Sable fin** : Plus de 75% des éléments supérieurs à 80 μ m, sont inférieurs à 0,5mm. Ces sables doivent être notablement corrigés pour acquérir des propriétés comparables à celles des graves.

Tableau I. 4: Classification des sables selon la granulométrie [36-37]

	Nature et dimension en mm		% Fines
	Matériaux de base	Sable fin 0/0,3	
Sable fin 0/0,2			2
Sable moyen 0/0,4			1
Sable fin 0/0,2			30
Sable de dessablage (grossier) 0/6			1
Sable de dessablage (moyen) 0/4			1
Sable de carrière (grossier) 0/5			4
Matériaux d'apport (correcteurs)	Sable riche en fines carrière 0/5		15
	Sable riche en fines carrière 0/5		30
	Sable riche en fines carrière 0/4		15
	Sable riche en fines alluvionnaires 0/2		15
	Fines 0/0,3		90
	Sable riche en fines 0/4		12

Tableau I. 5: Catégories de sables [36-37]

Granulométrie classe	< 2mm	0,5+5mm	02+2mm	<0,5mm	<80 μ m
Fin	-	-	-	>75% de (100-f)	-
Moyen	>20%	-	>50% de (100-f)	-	< 35%
Grossier	>20%	> 50% de (100-f)	-	-	-

I.4.2.2 **Propreté** : La propreté du sable est une caractéristique décisive et elle peut être confirmée par des essais d'Equivalent de sable ou par la valeur du bleu de méthylène [38]. Le résultat obtenu doit être exprimé en grammes de bleu pour 100g de sable [39].

Dans cette classification, les quatre catégories suivantes sont définies :

- $VBS < 0,2$: sable propre.
- $0,2 < VBS < 0,5$: sable légèrement pollué.
- $0,5 < VBS < 1$: sable pollué.
- $VBS > 1$:sable très pollué.

I.4.2.3 **Nature minéralogique** :En général, les sables peuvent être classés comme suit :

- Sables siliceux.
- Sables silico-calcaires.
- Sable calcaires.

I.4.3 Différents types de sable

Les sables se différencient par un grand nombre de paramètres et on peut distinguer les deux types de sables : Les sables naturels et Sables du Sahara.

I.4.3.1 Les sables naturels

Ce sont des matériaux qui existent, dans certaines régions, en abondance dans la nature. Ils sont le résultat d'un processus complexe d'érosion et de sédimentation. Leur formation s'effectue en trois étapes successives : la décomposition sur place des différentes roches suivie d'un transport qui les amène à un dépôt où ils demeurent sous différentes formes. Les plus rencontrés et les plus connus sont :

- Les sables marins.
- Les sables marins littoraux.
- Les sables fluviaux.
- Les sables éoliens.
- Sables du Sahara.
- Sables éoliens.
- Sables de regs.
- Sables géologiques en place.
- Sables gypseux.
- Sables gypso-calcaires.

I.4.3.2 Les sables artificiels

Il s'agit de matériaux produits dans la chaîne de production de granulats qui peuvent être en excès par rapport à la production requise (gravier ou pierre concassée), ils peuvent être :

- Le sable roulé le sable de dessablage produit à partir du criblage primaire du minerai brut.
- Le sable concassé est généralement un résidu de la production de carrières ou de ballasts, ces dernières étant de plus en plus utilisées dans la technologie routière dans la région d'Ouargla.

I.5 LES SABLES DE DUNES

I.5.1 Définition du sable de dunes

Le sable des dunes a plusieurs définitions que nous utilisons le plus souvent ; il est le résultat de l'érosion et du dépôt de différentes roches, suivi du transport par le vent. La plupart des formations de sable sont constituées de quartz. Il se caractérise par un grain fin et très serré.[40] voir Figure I.7

Il s'agit d'un dépôt clastique lâche, totalement dépourvu de ciment, constitué de particules adjacentes mais libres, généralement de moins de 2 mm de taille. [41]

C'est un matériau granulaire composé de petites particules produites par la désintégration d'autres roches, dont la taille varie entre 0,063 (limon) et 2mm. [42-43]

D'un point de vue géologique, le matériau granulaire peut contenir jusqu'à 180 minéraux (quartz, mica, feldspath, etc.) ainsi que des coquilles calcaires et des coraux.[41,44]



Figure I.7: le sable de dune [45]

I.5.2 Identification des sables de dunes du Sahara

I.5.2.1 Composition chimique :

Les sables de dune se distinguent par une concentration **relativement élevée de silice** (SiO₂).Le tableau I.8 présente les résultats des analyses chimiques :

Tableau I. 6: Compositions chimiques des sables du sud[37]

Région	El Golea	El Oued	Biskra	Hassi Bahbah	Ain Safra
SiO ₂	94-88	86.85	67.90	94.50	96.86
Al ₂ O ₃	1.28	1.15	0.65	1.67	0.89
Fe ₂ O ₃	0.54	0.40	0.50	0.25	0.39
CaO	0.97	5.81	15.88	1.43	0.66
MgO	0.63	0.30	0.60	0.10	0.09
SO ₃	0.52	0.24	0.79	0.65	0.29
K ₂ O	0.25	0.37	0.16	0.22	0.32
Na ₂ O	0.14	0.08	0.09	0.23	0.02
TiO ₂	0.12	-	-	-	0.08
MnO	0.04	-	-	-	0.05
Cl	0.04	0.004	-	-	-
P-F	1.00	4.60	13.33	1.43	-

I.5.2.2 Analyses minéralogiques

L'analyse XRD des sables de dune sa révélé la présence de dioxyde de silicium (SiO₂) en quantité notable. Les autres valeurs de pourcentage atomique ont détectés également quelques traces de calcium et de magnésium dans le spectre. (Figure I.8) [46].

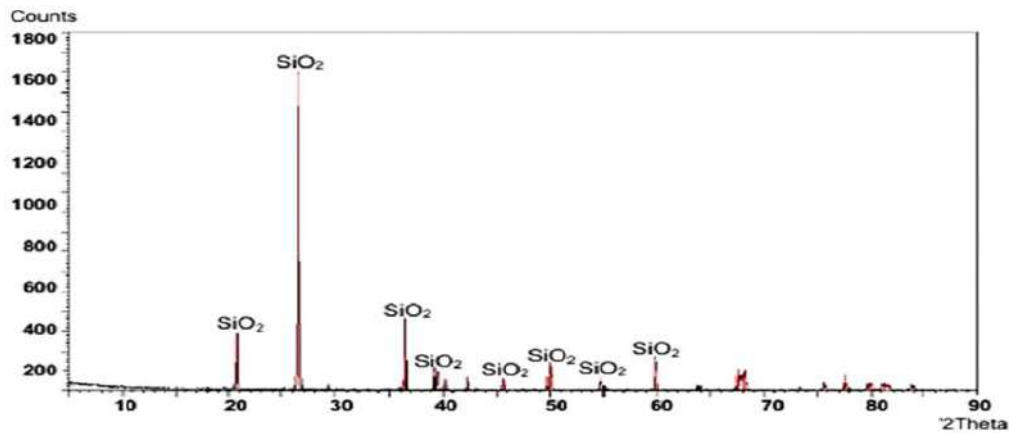


Figure I.8: Courbe DRX du sable de dune [47]

I.5.2.3 Composition minéralogique

Des essais effectués sur la composition minéralogique des sables des différentes régions ont permis de constater que :

- Le quartz forme plus de 85% du sable ; les grains sont généralement arrondis et parfois anguleux.
- La calcite se manifeste par des grains de différentes variantes autour de 5% ; ils ne passent en aucun cas les 10%.
- Le gypse se trouve sous forme de grains de couleur blanchâtre avec des pourcentages ne dépassant pas 2 à 3%.

- On peut également trouver dans certains gisements du son pourcentage ne dépassant pas les 4 %. [48]

I.5.2.4 Propriété

Le plus grand élément d'une dune saharienne mesure environ 0,5 mm de diamètre. Il est le plus grand au point le plus proche de la roche mère et diminue avec la distance de la roche mère. Les particules sont également devenues de plus en plus rondes. L'élément le plus fin à un diamètre d'environ 0,04mm. Le coefficient d'uniformité ($C_u = D_{60} / D_{10}$) est de l'ordre de 1.8 et le coefficient de courbure ($C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$) est de l'ordre de 10. Sable calibré. Figure I.19 montre deux courbes granulométriques de sables de dunes prélevés dans sept zones sahariennes différentes en Algérie Naama [45] et Ouargla (Sidi-khouiled) [40] (El Golea, El-Oued, Biskra, Hassi Bahbah, Ain Safra).[45]

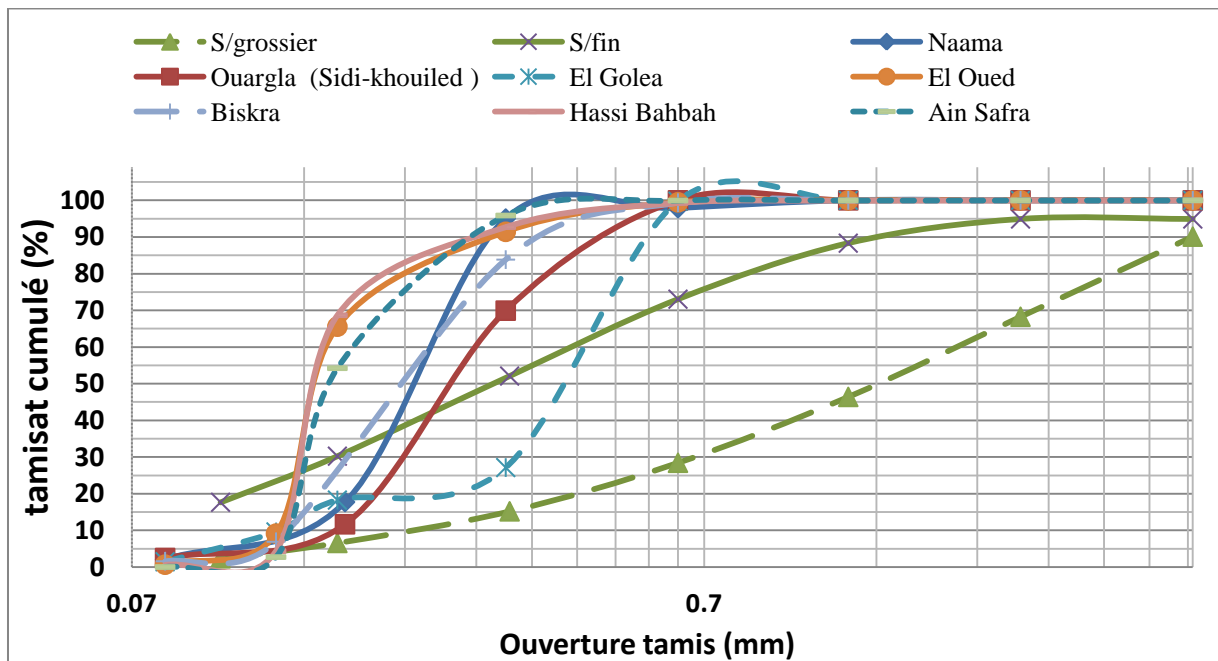


Figure I.9: Courbes granulométriques de quelques sables de dunes [37,40,45]

I.5.2.5 Comportement mécanique

D'après des essais réalisés sur le compactage et le cisaillement direct sur le sable de dunes [46,49], les principaux résultats trouvés sont :

- La faible teneur en eau (0-6%), n'a pas d'impact significatif sur le compactage.
- La cohésion est très faible, d'environ 5 kPa.
- Selon la densité du sable, l'angle de frottement interne peut varier de 30° à 35°.
- Un indice CBR faible avec une teneur en humidité optimale modifiée par Proctor. Environ 10 %. Cela évite notamment toute utilisation de ces sables seuls dans le corps principal de la route.

I.5.3 Utilisation du sable de dunes en technique routière

L'utilisation du sable dans les travaux routiers n'est pas nouvelle. Il peut être associé aux graviers, tufs gypso-calcaires ou à l'argile, compte tenu des matériaux disponibles au Sahara. Les avantages de cette combinaison se situent à la fois au niveau technique et économique.[50]

- **Les aspects économiques :** De toute évidence, le sable dans les dunes est assez économique pour transporter les matériaux en raison de ses réserves inépuisables, comme il peut être facilement mélangé avec d'autres matériaux sur place.[50]
- **Les intérêts techniques :** Le sable aide à densifier le matériau et à améliorer ses propriétés géotechniques en augmentant le frottement interne et la capacité portante.[50]

I.6 ETUDE DE FORMULATION

I.6.1 Objectif de l'étude de formulation

L'étude de formulation d'un béton bitumineux a pour objectifs de déterminer les caractéristiques de l'enrobé, telles que le pourcentage de vides, la résistance à l'eau et les performances mécaniques :

De plus, la formulation établit les paramètres suivants :

- La taille et la nature des granulats
- La composition et la quantité de fines
- Le genre et la teneur en liant

I.6.2 Méthode de formulation

Sur le plan général, il y a différentes méthodes de formulation qui dépendent de l'histoire, du contexte technique et de la méthodologie de dimensionnement. À cet égard, nous ne mentionnerons que la méthode française qui est la plus courante en Algérie.

Le but de cette approche est de déterminer les quantités des différents éléments qui peuvent atteindre et garantir, tout au long de la durée de vie de l'ouvrage réalisé, le maintien à un niveau adéquat des caractéristiques d'utilisation.

La méthodologie de la méthode française est résumée dans la figure I.10.

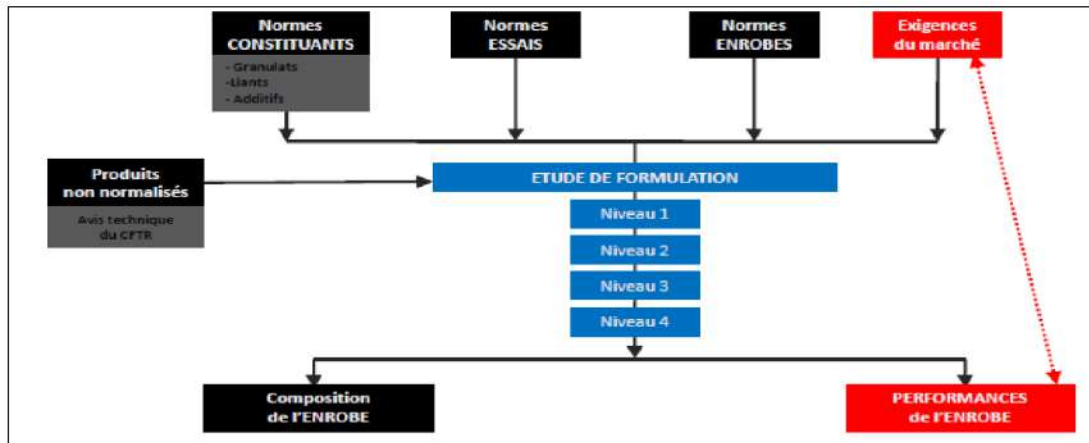


Figure I.10: Méthode française de formulation des enrobés bitumineux

On peut donc classer chronologiquement l'action de la formulation de mélanges hydrocarbonés en trois phases principales :

- Le choix et la diffusion des constitutions,
- La mise au point du mélange (Composition théorique d'un béton bitumineux)
- L'épreuve de formulation

I.6.3 Etapes de formulation

I.6.3.1 Sélection et notification des constitutions

On sélectionne les granulats de manière à garantir la granularité du béton bitumineux étudié. Ils doivent d'abord passer avec succès les tests d'approbation. Lorsqu'il est nécessaire d'ajouter des classes granulaires lors de l'étude de formulation, ces classes doivent également être approuvées.

Les essais d'agrément doivent être complétés par la mesure de la masse volumique réelle de chacune des classes granulaires choisies pour pouvoir déterminer par la suite, la compacité de l'enrobé étudié.

Le liant à choisir est le même que celui qui sera utilisé pour la fabrication de l'enrobé sur chantier. Il sera choisi en fonction des conditions climatiques (en particulier la température) de la zone où est situé le projet ainsi que les conditions de sollicitations définies essentiellement par le volume de trafic.

Il est intéressant, avant de lancer l'étude de formulation de l'enrobé, de procéder à des essais d'adhésivité pour vérifier la compatibilité du liant utilisé avec la nature minéralogique des granulats à enrober. En cas de problèmes d'adhésivité, il est nécessaire de traiter le bitume avec un dope approprié. L'étude de formulation devra alors être conduite avec le bitume dopé.

Lorsque les fractions granulaires proposées pour la réalisation de l'étude de formulation de l'enrobé montrent un manque de fines (éléments < 0.08mm), le

recours à des fines d'apport est nécessaire afin de garantir une compacité suffisante de l'enrobé étudié. Ces fines doivent être non plastiques.

I.6.3.2 Composition théorique d'un béton bitumineux

La détermination de la composition théorique d'un béton bitumineux comporte deux phases principales :

- Détermination de la courbe granulométrique du mélange minéral. On pourra, éventuellement, déterminer plusieurs mélanges possibles ;
- Déterminer les teneurs en bitume possibles pour chacun des mélanges granulaires fixés.

I.6.3.3 Détermination du mélange minéral

En utilisant les courbes granulométriques moyennes des différentes classes granulaires sélectionnées, on crée un mélange minéral dont la courbe granulométrique est alignée dans les limites du fuseau spécifié. Différentes techniques sont employées afin de calculer les courbes de mélanges, L'une des méthodes les plus simples et les plus rapides sera examinée dans la suite.

I.6.3.4 Détermination du dosage en liant

Le module de richesse K et la surface spécifique du mélange minéral choisi détermineront les teneurs en bitumes utilisées pour réaliser l'étude de formulation :

- ✓ Le module de richesse K symbolise l'épaisseur du film de bitume qui enrobe les granulats. il est cerné par les spécifications dans une fourchette de 3.45 à 3.90.
- ✓ La surface spécifique désigne l'ensemble de la surface créée par les grains qui composent le mélange minéral. On la calcule en utilisant la courbe granulométrique en utilisant la relation suivante :

$$\Sigma = 0.2 g + 2.2 S + 12 s + 135 f \quad (I.3)$$

Σ : La surface spécifique exprimée en m²/Kg,

g : pourcentage d'éléments supérieurs à 6,3 mm.

S : pourcentage d'éléments mesurant entre 6,3 et 0,315 mm

s : pourcentage d'éléments mesurant entre 0,315 et 0,08 mm

f : moins de 0,08 mm d'éléments.

La relation liant la teneur en bitume de l'enrobé à la surface spécifique du mélange minéral est traduite par la formule suivante :

$$TL = K\alpha^5\sqrt{\Sigma} \quad (I.4)$$

avec :

Σ : teneur en bitume en %

K : le module de richesse.

α : coefficient correcteur tenant compte de la masse volumique des granulats

$$\alpha = \frac{2.65}{MVR_g} \quad (I.5)$$

$$\text{Avec : } MVR_g = 100 / \left[\frac{\% 0/3}{Mva 0/3} + \frac{\% 3/8}{Mva 3/8} + \frac{\% 8/15}{Mva 8/15} \right] \quad (I.6)$$

I.6.3.5 L'épreuve de formulation

L'objectif de l'épreuve de formulation est de déterminer les propriétés obtenues sur un mélange hydrocarboné identifié. Après une séquence d'essais bien définie, il est possible de distinguer quatre niveaux d'épreuve de formulation. (Figure I.11)

- NIVEAU 1 : Pourcentage de vides à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG), Tenue à l'eau du mélange (DURIEZ)
 - Suffisant pour les trafics faibles
 - Permet de contrôler l'évolution dans le temps d'une formule.
- NIVEAU 2 : niveau 1 + Essai d'orniérage
 - Chaussée à trafic élève
 - Chaussée à forte épaisseur
- NIVEAU 3 : niveau 2 + Module de Rigidité
- NIVEAU 4 : niveau 3 + Résistance à la fatigue

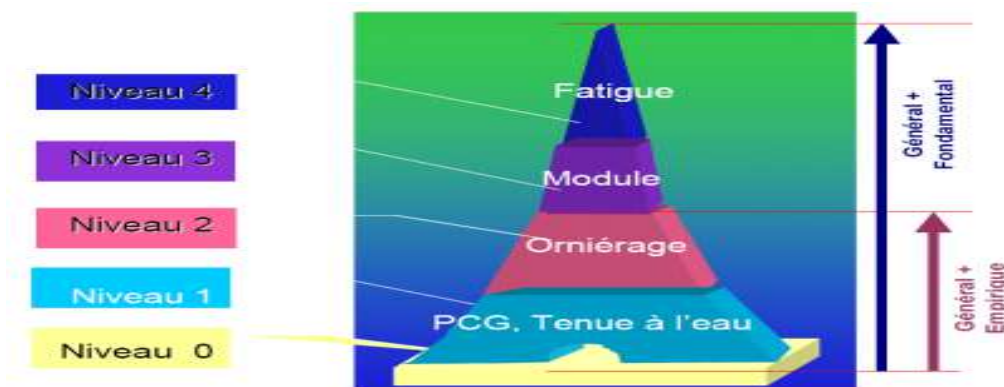


Figure I.11: Niveaux d'épreuve de formulation

I.7 ETAT DE L'ART SUR LES BB A BASE DE SABLES

Les bétons bitumineux à base de sable, également connus sous le nom d'enrobés bitumineux ou de revêtements bitumineux, sont largement utilisés dans la construction des routes, des autoroutes et des infrastructures de transport. Ces matériaux offrent une combinaison de résistance mécanique, de durabilité et de performance routière, ce qui en fait un choix populaire pour les revêtements de chaussées. Voici un aperçu de l'état de l'art dans ce domaine :

L'étude menée par Akacem Mustapha en 2015 examine l'impact de substitution de la fraction 0/3 (sable concassé) par du sable de dunes dans les bétons bitumineux avec des proportions allant de 10 à 40% de granulats.

Les résultats indiquent que pour la formulation du béton bitumineux 0/14, un taux de sable de dunes jusqu'à 20% est recommandé pour maintenir des performances optimales, contribuant à l'amélioration de la résistance à la

compression et à une meilleure tenue à l'eau. Cependant, au-delà de 20%, les performances peuvent commencer à se dégrader en raison d'une densité trop élevée[7].

- L'étude menée par Siala Ahmed, El Saloua Khay et EuchNeji en 2015 [8] se concentre sur l'utilisation du sable de dunes dans les bétons bitumineux. L'objectif principal est de déterminer l'impact de l'ajout de différentes proportions de sable de dunes sur les caractéristiques mécaniques du béton bitumineux afin d'identifier une composition optimale. Les résultats indiquent que l'ajout de 10% de sable de dunes améliore significativement diverses caractéristiques, notamment le fluage Marshall et les résistances à l'eau et à l'air. De plus, une réduction de 0,6% de la teneur en bitume, conjuguée à l'ajout optimal de sable de dunes, permet d'économiser environ 15% tout en maintenant des propriétés mécaniques acceptables. Les résultats suggèrent également qu'une teneur en bitume de 4,7% est suffisante, et que l'ajout de sable de dune favorise la compacité et la résistance mécanique du mélange.
- Les études menées par Mohammad Reza Moghaddam Nayyeri et Mustapha Akacem fournissent des perspectives intéressantes sur l'utilisation du sable des dunes dans les enrobés bitumineux[5].

Nayyeri examine l'effet du remplacement des granulats fins par du sable de dunes sur la déformation permanente des enrobés bitumineux. Les résultats montrent que l'incorporation de sable des dunes n'affecte pas significativement la stabilité Marshall des enrobés, mais réduit le vide des spécimens compacts. Cependant, une augmentation de la déformation permanente est observée, indiquant un impact sur la durabilité à long terme.

D'autre part, Akacem se concentre sur l'effet de l'ajout de sable des dunes sur les caractéristiques mécaniques et la résistance au glissement des enrobés bitumineux en Algérie. L'ajout de 10 à 20% de sable de dunes améliore la résistance au glissement en créant une micro texture artificielle qui génère des forces de friction. Les tests de Duriez, Marshall, Polished Stone Value (PSV) et Friction After Polishing (FAP) montrent des améliorations significatives de la résistance au glissement avec l'incorporation de sable des dunes.

En résumé, les deux études mettent en évidence les avantages et les défis de l'utilisation du sable des dunes dans les enrobés bitumineux, soulignant ses effets sur la déformation permanente, la stabilité et la résistance au glissement

- Les résultats obtenus par (N. FATANI ET H.A. SULTAN 1982) ont également indiqué une diminution significative de la teneur optimale en asphalte dans le mélange de 6,4% à 5,0%.

L'utilisation de sable de dunes améliore considérablement les propriétés techniques du revêtement, tout en réduisant l'épaisseur de route requise sous charge.[4]

D'autres recherches dans ce domaine sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau I. 7: Quelques travaux de recherche sur les constructions routières à base de sables et le bitumes modifié

Auteur(journal / Conférence)	Année	Matériaux utilisés	Essais réalisés	Résultats
Akacem Mustapha[51] Séminaire international	2018	béton bitumineux semi-grenu BBSG sable de dunes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Essai Duriez ▪ la stabilité de Marshall 	20% de sable dunes maximum (trafic moyen)
Zeddoun, A., Touati, F., & Messahel [52] Tobacco Regulatory Scienc	2023	Sable de dunes, bitume modifié	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hubbard-Field ▪ essais non destructifs 	Amélioration de la stabilité des mélanges
Bensalem, S., & Bouzidi, M. [53] Journal of Development and Engineering Research	2023	Sable de dunes, tuf	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proctor, CBR ▪ compression 	Incorporation de 33 % de sable de dunes permet l'utilisation de matériaux traités pour les chaussées à faible trafic
Fathi S. Almadwi[11] Construction and Building Materials	2019	bitumes bitumineux PG 70-10 et B60/70 Sable Naturel Sable concassé	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Essai de module complexe ▪ Essai stabilité de Marshall ▪ Test d'orniérage 	Mélange optimal avec 30 % de sable de dunes et 70 % de tuf stabilisé par 4 % de ciment répond aux normes de portance
Fathi S. Almadwi [55] Construction and Building Materials	2021	bitumes bitumineux PG 70-10 et B60/70 Sable de dunes Naturel Sable concassé	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Essai de module complexe ▪ test (IAPST) ▪ Test d'orniérage ▪ Essai stabilité de Marshall 	L'utilisation du NDS, ne modifie pas sensiblement la qualité du HMA.
Elhadj Guesmia Daheur[56] Construction and Building Materials	2023	Tuff Sand dunes TD Sop (liants hydrauliques)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Résistance à la compression non confinée ▪ Capacité portante (CBR) ▪ Sensibilité à l'eau 	mélange de TD Sopt + 65 % de tuf, 35 % de sable dunaire et 4 % de liants est la recette qui répond à la fois aux critères techniques
Akacem, M., Saighi, O., & Meddour, D. [57] Journal of Engineering and Exact Sciences	2024	Sable de dunes, bitume	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marshall ▪ résistance à l'eau 	Amélioration de la durabilité et de la portance
Berriache, A., Mahammed, M., & Kerrouche, A. [58] Journal of Engineering and Exact Sciences	2023	Sable de dunes, bitume	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Marshall ▪ Duriez 	Bonne tenue en climat chaud et sec
Smaida, A., Belasri, A., & Zerzouri, F [59] Journal of Building Materials and Structures	2022	Sable de dunes, liants hydrauliques	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proctor CBR, ▪ compression 	Résistance adéquate pour couches de base

I.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre dédié aux revêtements bitumineux, nous avons eu l'occasion de voir :

- Les différentes propriétés mécaniques des matériaux bitumineux avec leurs différents composés et sources et comment les exploiter pour atteindre les meilleures conditions d'exploitation.
- Portée des essais liés aux mélanges bitumineux. Ces essais, classiques et spéciaux, ont tout pour plaire L'objectif principal est de comprendre le comportement mécanique des revêtements bitumineux

Afin de pouvoir développer des stratégies liées à la structure routière.

L'étude de formulation de BB comprend (04) niveaux, nous permettant de développer toutes les offres d'enduit bitumineux pour nous permettre de décider de la qualité et de la durabilité de l'enduit. Reste à noter que, pour ce qui est de notre pays, seuls les essais classiques (Marshall et Duriez) sont utilisés pour la formulation des enrobés bitumineux.

Un aperçu complet du sable de dunes, de ses propriétés physiques et chimiques et des zones où il est abondant, En plus d'une synthèse des recherches antérieures qui ont tenté d'étudier l'effet de l'efficacité du sable de dune sur les performances rhéologiques soit des enrobés bitumineux en particulier, soit des structures routières en général.

CHAPITRE 2:

REVUE SUR LES ESSAIS DE PERFORMANCES MECANIKES

CHAP II

REVUE SUR LES ESSAIS DE PERFORMANCES MECANIQUES

II.1 INTRODUCTION

Les performances mécaniques des enrobés bitumineux jouent un rôle essentiel dans l'industrie de la construction routière, qui visent la qualité, la durabilité et la résistance des revêtements bitumineux sujets à des contraintes environnementales et de trafic sévères. Il comprend différentes propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, à la flexion, à la compression et à la fatigue du bitume, qui contribuent toutes à fournir une route sûre et durable. [60-63]

Dans ce chapitre, on explorera les expériences les plus importantes pour les essais de performances mécaniques, c'est-à-dire les essais les plus significatifs tels que l'essai Marshall (pour le fluage et la stabilité), la Presse à Cisaillement Giratoire, l'essai Duriez, l'essai d'Orniérage, ... etc.

L'objectif principal de ces essais est d'optimiser la structure de l'enrobé bitumineux pour garantir que la chaussée soit souple, durable et résistante aux contraintes environnementales et à la circulation.

II.2 LES ESSAIS DE PERFORMANCE MECANIQUE

Les essais sur les propriétés mécaniques du béton bitumineux sont conçus pour déterminer les performances de mélanges d'hydrocarbures spécifiques.

II.2.1 Essai Marshall [NF EN 12697-34]

II.2.1.1 Définition

Le test de stabilité Marshall est un test effectué le long d'un générateur d'échantillons cylindriques semi-congelés [64]. Cette compression est appliquée aux échantillons après immersion dans l'eau pendant 1/2 heure à 60°C et à une vitesse de 0,846 mm/s. Nous appelons cela la charge Marshall «stabilité» (en kg) atteinte lors de la rupture de l'échantillon.

Le pourcentage de vide occupé par le liant est calculé. La proportion de vides occupés par le liant est le pourcentage en volume de vides dans l'agrégat rempli de liant. [65].

II.2.1.2 But de l'essai

Ces tests et déterminations sont effectués, d'une part, pour réaliser des études préliminaires sur les meilleures compositions pour la fabrication de revêtements hydrocarbonés ou de bétons, et d'autre part, Surveiller les variables du produit tout au long du processus de production.

II.2.1.3 Le domaine d'application

Les essais Marshall peuvent être effectués sur tous revêtements bitumineux. Il existe une limite à la taille maximale des granulats, qui doivent tous passer par le module 45

(tamis $\Phi 25\text{mm}$ ou filtre 31 mm). La nature du liant doit également être prise en compte lors de la réalisation des éprouvettes, et cette procédure n'est décrite que pour les matériaux enrobés bitumineux avec du bitume pur.

II.2.1.4 Appareillage

La machine Marshall comprend une presse de 2 tonnes avec une précision de 0,846 mm/s, un dispositif de compactage, un indicateur de fluage et des modules de stabilité. Les éprouvettes sont compactées à l'aide d'un marteau de 4,5 kg chutant de 45 cm pour assurer une répartition uniforme de l'impact. Des mâchoires semi-cylindriques guidées permettent un bon alignement des éprouvettes (écart de 19,1 mm), et un bassin thermostatique à 60 °C peut contenir 2 appareils de stabilité et 4 éprouvettes. Voir Figure II.1.



Figure II.1 : Machine d'essai Marshall[66].

II.2.1.5 Mode opératoire

Parce que l'essai est dispersé, il faudra au moins quatre éprouvettes pour chaque formule étudiée.

a) Préparation des éprouvettes

Tout d'abord, pour préparer les éprouvettes, nous devons disposer de 3 moules de compactage de tailles spécifiques, chaque moule étant équipé de composants essentiels tels que la base, le corps du moule, la colonne montante, le piston d'extraction et le bain à température constante. Assurons-nous que la température de préparation du mélange est maintenue à 160°C, et que chaque moule reçoive une masse de 1200g. Après avoir placé l'assiette en carton au fond du moule et ajouté le mélange, tapotons légèrement sur le matériau avec un pilon entre 50 et 75 fois, pendant une durée maximale de 3 minutes. Ensuite, laissons le moule à température ambiante pendant au moins 1 heure avant de le démouler à l'aide d'un piston d'extraction. Enfin, numérotant les spécimens, pesons-les et mesurons leurs dimensions dans différentes zones.

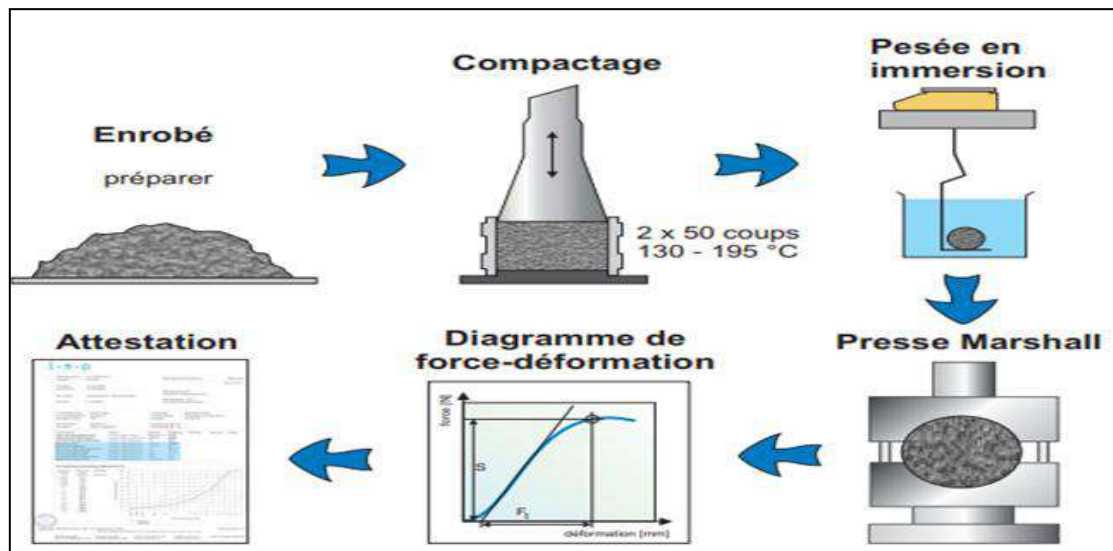


Figure II.2 : Principe de l'essai Marshall[67]

b) Détermination de la densité apparente

Après refroidissement, mesurer les dimensions de l'échantillon au 1/10ème de mm près (au moins 6 hauteurs et 3 diamètres) et peser au 5dg près. Le rapport poids/volume donne la densité apparente. Si la surface est irrégulière, il est recommandé d'utiliser une balance hydrostatique pour évaluer la densité apparente (peser à l'air et à l'eau sans cirer l'éprouvette). Cependant, cette méthode peut ne pas fonctionner si la surface est poreuse.

c) Essai de stabilité et de déformation

Après refroidissement, les dimensions de l'échantillon sont mesurées avec précision (1/10 mm pour 6 hauteurs et 3 diamètres), et le poids à 0,05 g près pour calculer la densité apparente. Il est crucial de tester la stabilité dans les 30 secondes suivant le retrait du bain-marie. Les échantillons sont alors placés entre les mâchoires de l'appareil, puis sur la presse C.B.R., en assurant un bon contact avec la bille à l'aide du comparateur de l'anneau dynamométrique..

- On règle le comparateur à zéro et positionne l'indicateur de fluage sur la tige de guidage en contact avec les mâchoires supérieures. Deux opérateurs sont nécessaires : l'un actionne la presse, l'autre surveille la charge et la déformation. À la rupture (valeur maximale indiquée par le comparateur), on convertit cette charge en kg à l'aide de la courbe d'étalonnage, puis on l'ajuste avec un coefficient de corrélation selon la hauteur de l'éprouvette.

- **La compacité C_r**

$$C_r = \frac{100 \times \rho_b}{\rho_r} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

C_r représentant le degré de compaction à 0,1% près, ρ_b désignant la masse volumique apparente en kg/m³ et ρ_r indiquant la masse volumique de référence en kg/m³.

- **La déflexion de la route**

$$D_n = \left(\frac{D_a}{F_a} \right) \times F_n \quad (\text{II.2})$$

Avec :

D_n Représentant de la déflexion normalisée, D_a désignant la déflexion auscultée, F_a et F_n indiquant la force appliquée et de référence.

- **Détermination de la masse volumique réelle**

$$\rho_{mv} = \frac{M_5 - M_4}{1000 \times V_P - \left(\frac{M_6 - M_5}{\rho_w} \right)} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

La masse volumique réelle de l'éprouvette (ρ_{mv}) est calculée à partir du volume du pycnomètre (V_P en m^3), de la tare du pycnomètre (M_4 en g, bouchon compris), de la masse du pycnomètre contenant l'échantillon (M_5 en g, bouchon compris), de la masse du pycnomètre contenant l'échantillon et l'eau à la température choisie (M_6 en g, bouchon compris), et de la masse volumique de l'eau (ρ_w en kg/m^3).

- **Détermination de la masse volumique apparente**

$$\rho_b = \frac{M_1 \times \rho_w}{M_3 - M_2} \quad (\text{II.4})$$

La masse volumique apparente (ρ_b) à 1 kg/m^3 près est déterminée à partir de la masse sèche de l'éprouvette (M_1), de la masse sous eau de l'éprouvette (M_2), de la masse saturée en surface sèche de l'éprouvette (M_3), et de la masse volumique de l'eau (ρ_w en kg/m^3).

- **Le quotient Marshall**

Q_m : quotient Marshall en N/mm pour chaque éprouvette, avec une précision de 10 N/mm :

$$Q_m = \frac{P_m}{F_m} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

Le quotient Marshall (Q_m) est défini comme la valeur de la stabilité de l'échantillon (P_m) en KN divisée par la valeur du fluage de l'échantillon (F_m) en mm.

Ce rapport permet d'évaluer la proportion de vides présents dans le mélange bitumineux. Il est possible de lire les valeurs de stabilité et de fluage en utilisant le cadran du fluo-mètre de l'unité Marshall.

II.2.2 Essai Duriez (Essai de compression simple type LCPC)

II.2.2.1 Définition

Cet essai vise à déterminer la résistance à la compression d'une éprouvette d'enrobé selon son poids, sa section et son mode de compactage. Il permet aussi d'évaluer la sensibilité à l'eau en comparant la résistance avant et après immersion dans un bain thermostatique. L'essai s'applique aussi bien aux enrobés à chaud (bitume) qu'à froid (émulsion), avec des consignes spécifiques pour chaque cas. [68].



Figure II.3 : Appareil DURIEZ.

II.2.2.2 Principe

Un moule cylindrique est utilisé pour comprimer le mélange hydrocarboné en utilisant une pression statique à double effet. Une partie des échantillons est stockée à température (18 °C) et hygrométrie régulées, tandis que l'autre partie est stockée immergée. Tous les groupes d'échantillons sont écrasés.

- Bitume 20/30: 180 °C + 5°C
- Bitume 50/70: 150 °C + 5°C
- Bitume 40/50: 160 °C + 5°C
- Bitume 70/100: 140 °C + 5°C

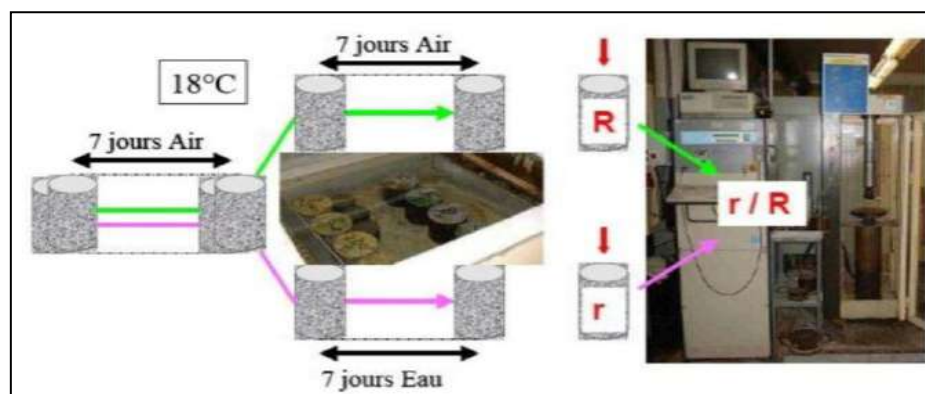


Figure II.4 : Principe de l'essai Duriez.

II.2.2.3 Remplissage des moules

Les échantillons pèsent 1000 g (diamètre < 14 mm) ou 3500 g (> 14 mm). Après avoir introduit le mélange dans un moule enduit d'oléate de soude glycéro, les moules sont placés en étuve à température de référence durant 30 minutes à 2 heures. Le compactage se fait par un piston supérieur. Une charge de 60 kN est appliquée pour les petits diamètres et 180 kN pour les grands, à atteindre en 5 à 60 s. Les échantillons restent ensuite 4 heures dans le moule avant démoulage (Figure II.5).



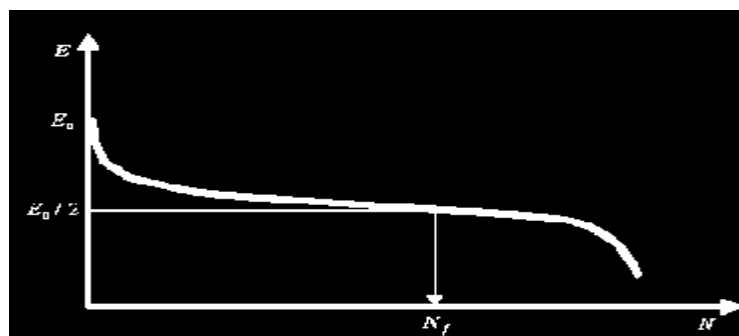
Figure II.5 : Dispositif de l'essai Duriez.

II.2.3 Essai de fatigue

II.2.3.1 Définition

La fatigue d'un matériau est le phénomène où il se rompt après avoir été soumis à un grand nombre de sollicitations dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture instantanée du matériau.

Lorsque le module de l'éprouvette atteint la moitié de sa valeur initiale mesurée lors du premier cycle de chargement dans les mêmes conditions d'essai (température et fréquence), on considère qu'elle est fatiguée. La durée de vie N_f d'une éprouvette est donc le nombre de cycles correspondant à un module de rigidité égal à la moitié du module initial d'une éprouvette (Figure II.)[69].

Figure II.6 : Critère classique de fatigue et détermination de la durée de vie N_f

Ce critère de fatigue traditionnel fait partie des plus couramment utilisés. La durée de vie N_f calculée sert au dimensionnement des chaussées.

II.2.3.2 Principe

Dans la méthode de dimensionnement française, la chaussée est représentée comme la superposition de couches élastiques, linéaires, homogènes, isotropes et infinies en plan. Chaque couche est caractérisée par son coefficient de Poisson, épaisseur et son module d'élasticité E .

Une fois que la charge appliquée a été modélisée, les contraintes et les déformations dans ce modèle multicouches sont calculées en utilisant le modèle de Burmister [70].

❖ Essai de flexion 2 points

Il s'agit du genre de test de fatigue standardisé en France [71] pour le calcul des chaussées en France. Il s'agit, comme tous les essais de flexion, d'un essai non homogène. La grande base de l'éprouvette trapézoïdale est encastrée et sollicitée à son sommet. Il est possible d'exercer les sollicitations de manière physique ou en se déplaçant. Le choix de la forme trapézoïdale de l'éprouvette vise à maximiser la déformation en dehors de la zone d'encastrement de l'échantillon sollicité dans la poutre console. En général, la rupture se produit autour de 1/5 de la hauteur totale (h) de l'éprouvette.



Figure II.7 : Essai de flexion 2 points sur éprouvette trapézoïdale.

❖ Essai de flexion 4 points

Ce test est couramment employé aux États Unis. Le programme SHRP a été sélectionné pour étudier la fatigue des enrobés bitumineux. L'objectif est d'éviter la concentration des dégâts au centre de la poutre observée lors de l'essai de flexion à trois points. La pression est appliquée à deux points symétriques qui divisent l'éprouvette en trois chambres. La zone maximale de sollicitation se situe entre les points de chargement. L'avantage de l'appareil illustré dans la Figure II. réside dans sa capacité à opérer des compressions ou des tractions [70].



Figure II.8 : Appareil d'essai de flexion 4 points.

II.2.3.3 Réalisation d'essai de fatigue

Il est nécessaire que l'essai couvre au moins une plage de déformations allant d'environ $100\mu\epsilon$ à $400\mu\epsilon$. Il est nécessaire de tester les éprouvettes à 03 niveaux de contraintes, avec au minimum trois échantillons à chaque étape. À 10°C , un signal de déplacement sinusoïdal à 25 Hz est généralement appliqué à la petite base de l'éprouvette (Figure II.).

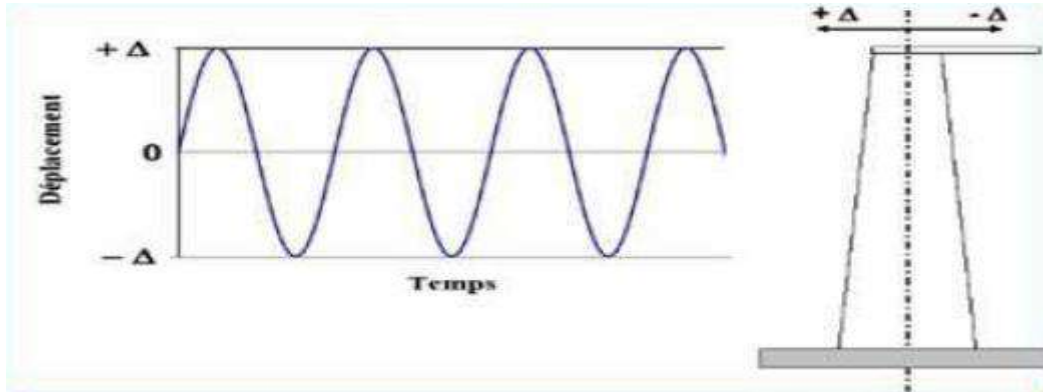


Figure II.9 :Signal de déplacement symétrique imposé à la petite base de l'éprouvette

II.2.3.4 Expression des résultats d'essai de fatigue

L'essai traditionnel, utilisé pour évaluer le phénomène de fatigue, consiste à exposer un échantillon de matériau à des sollicitations répétées et à mesurer le nombre de cycles qui entraînent la rupture de l'échantillon, connu sous le nom de "durée de vie".

La courbe de fatigue (courbe de Wöhler) est une représentation traditionnelle des résultats de l'essai de fatigue (Figure II.). Dans cette courbe, une durée de vie est associée à la sollicitation exercée, qui peut être une contrainte ou une déformation encourue [72].

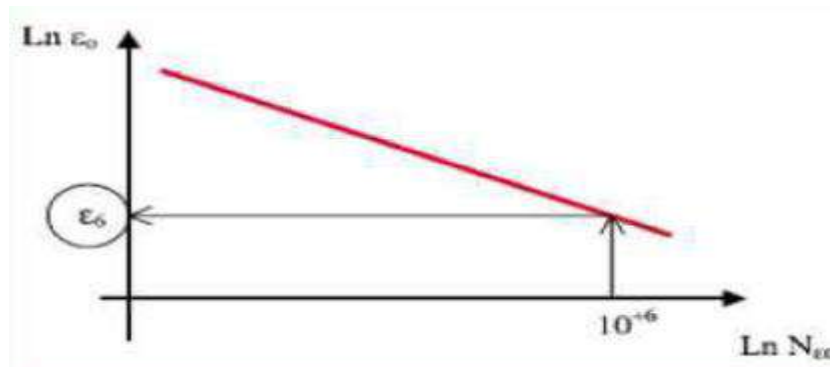


Figure II.10 : Courbe de Wöhler [70].

L'une des deux relations suivantes est utilisée pour décrire cette courbe : $S = a \cdot N^{-b}$ pour une représentation linéaire en coordonnées logarithmiques, ou $S = \alpha \cdot \beta \cdot \log(N)$ pour une représentation linéaire en repère semi-logarithmique, où S est la sollicitation imposée (contrainte ou déformation imposée) et N est la durée de vie correspondante, avec (a, b) et (α, β) comme constantes de la relation.

II.2.4 Essai de rigidité

II.2.4.1 Définition

La rigidité d'un matériau est déterminée par la pente de sa courbe contrainte-déformation, utilisée pour évaluer le module de rigidité des enrobés bitumineux et leur performance sous trafic. Cette rigidité dépend de nombreux facteurs : température, vitesse de chargement, humidité, type de matériau, granulats, vides, âge, et additifs. À température élevée et sous charge lente, l'enrobé se déforme progressivement ; sous forte contrainte, il devient plus rigide, avec un risque de rupture.

II.2.4.2 Essais de rigidité normalisés pour les enrobés bitumineux

Différentes méthodes de détermination du module de rigidité des enrobés bitumineux sont acceptées par la norme européenne [73], comme illustré dans la Figure II.. Il s'agit de l'essai de flexion en deux points sur des éprouvettes trapézoïdales (2PB-TR) ou prismatiques (2PB-PR), de l'essai de flexion en trois points sur des éprouvettes prismatiques (3PB-PR), de l'essai de traction indirecte sur des éprouvettes cylindriques (IT-CY), de l'essai de traction-compression directe sur des éprouvettes cylindriques (DTC-CY) et de l'essai de traction directe sur des éprouvettes cylindriques (DT-CY) ou prismatiques (DT-PR). L'essai de flexion en deux points 2PB-TR, l'essai de traction directe DT-CY et l'essai de traction indirecte IT-CY sont les essais les plus fréquemment employés en Algérie.

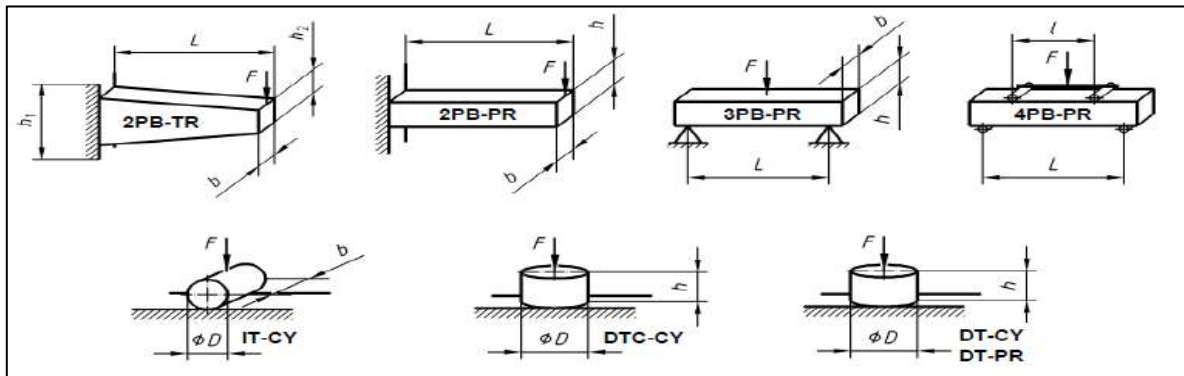
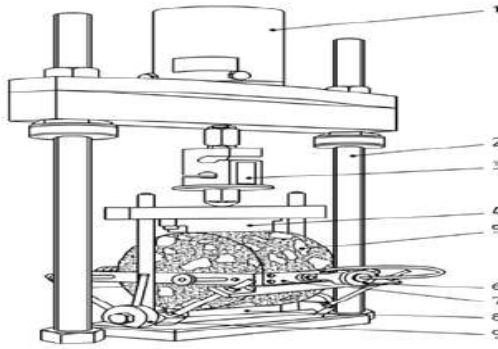


Figure II.11 : Principes d'essais de rigidité [EN 12697-26, 2012]

II.2.4.3 Essai de compression diamétrale IT-CY

- Principe de l'essai IT-CY

Le test de rigidité en compression diamétrale ou traction indirecte (IT-CY) implique l'application d'une charge le long du diamètre vertical d'une éprouvette cylindrique, puis la mesure de la déformation diamétrale horizontale transitoire de l'éprouvette pendant cette application. Un capteur de déformation de type LVDT est utilisé pour mesurer la déformation, qui est positionné autour de l'éprouvette et fixé à l'aide de deux bandes de chargement en acier[74]. Le concept de l'essai est illustré par la Figure II..



- Légende**
- 1- Vérin de chargement pneumatique
 - 2- Cadre de chargement en acier
 - 3- peson
 - 4- Platine de chargement supérieur
 - 5- Epreuve soumise a essai
 - 6- Réglage LVDT
 - 7- Châssis de chargement LVDT
 - 8- Platine de chargement inférieure
 - 9- Châssis d'alignement LV

Figure II.12 : Principe de l'essai de compression diamétrale[73]

II.2.4.4 Appareillage :

- **Thermomètre en platine ou capteur à résistance :** est un appareil de mesure approprié qui peut mesurer la température de l'échantillon ainsi que les conditions de stockage et de test avec une plage de mesure de $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$.
- **Règle en acier :** équipée de niveaux de 1 mm
- **Pieds externes à coulisse :** avec une capacité de mesure de $\pm 0,1\text{mm}$.
- **Plaque d'acier ou de verre:** En cas de planéité de la surface supérieure de la plaque, elle ne dépasse pas une tolérance de 0.05 mm sur la largeur de celle-ci.
- **Support:** Possédant la capacité de tenir un cylindre du matériau d'essai lors de la section des séquences.
- **Scie:** apte à découper et à ajuster des échantillons aux dimensions nécessaires.
- **Cadre de chargement en acier**
- **Deux Bandes de chargement:** Les spécifications exigent que le système de chargement soit fabriqué en acier inoxydable, avec une face concave en contact avec l'éprouvette, des bords arrondis pour éviter les marques, et une connexion articulée entre la platine supérieure et le système de chargement.

Tableau II.1:Dimensions des bandes de chargement.

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

II.2.4.5 Mode opératoire [75]

Les échantillons cylindriques doivent avoir une épaisseur de 30 à 75 mm et un diamètre nominal de 80 à 200 mm, choisis selon la taille maximale du mélange. Deux diamètres perpendiculaires ($\pm 10^{\circ}$) sont tracés sur une face plane et repérés. Le test consiste à appliquer au moins 10 impulsions de charge avec repos entre chaque, en respectant un temps de montée en charge de 124 ± 4 ms selon les normes européennes .[73]

Il est nécessaire de mesurer la charge appliquée en utilisant un peson avec une précision de 2%. Il est nécessaire que la durée de répétition des impulsions (Figure II.) soit de $(3,0 \pm 0,1)$ s.

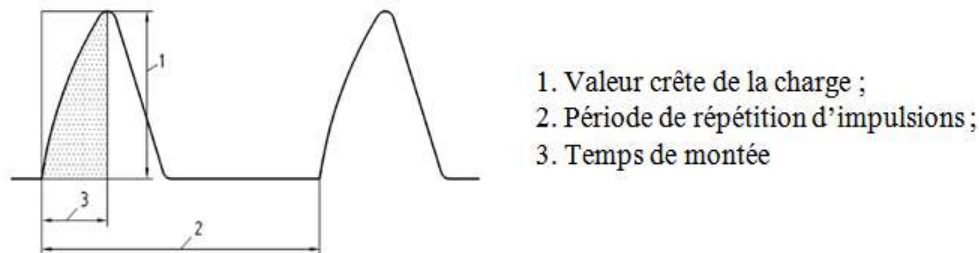


Figure II.13 : Forme de l'impulsion de chargement

II.2.4.6 Condition de stockage

Lorsque la durée de stockage est inférieure à 4 jours, il est important de maintenir une température de stockage inférieure à 25 °C. Le stockage doit être effectué pendant plus de 4 jours à une température inférieure à 15°C. Il est nécessaire de noter les températures et les périodes de stockage. Il est important de conserver les éprouvettes sur une surface plane et de ne pas les empiler.[73]

II.2.5 Essai d'orniérage

II.2.5.1 Définition

Selon la norme Française [76], les étapes à suivre pour évaluer le comportement de déformation des matériaux bitumineux en présence de charges roulantes sont précisées. Ce test s'applique aux mélanges dont les granulométries les plus grosses ne dépassent pas 32mm On peut effectuer les procédures sur des échantillons prélevés en laboratoire ou sur le terrain, placés dans un moule de façon à ce que leur surface s'accroche à la partie supérieure du moule. L'orniérage est un phénomène de détérioration de la chaussée qui peut être mesuré et visible en surface. Des traces permanentes et creusées dans la chaussée apparaissent après les passages répétés des véhicules lourds (Figure II.).



Figure II.14 : Essai d'orniérage [76]

II.2.5.2 Principe et mode opératoire

On utilise comme corps d'épreuve une plaque parallélépipédique d'une épaisseur de 5 ou 10cm, en fonction de l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé, qui peut être inférieure ou supérieure à 5cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique à haute température (60 °C) avec une fréquence de 1 Hz, une charge de 5 KN et une pression de 6 bars.[77-78].

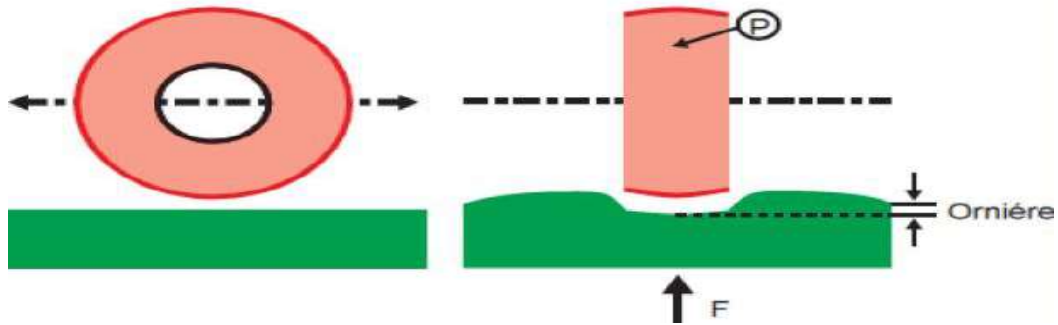


Figure II.15 : Principe de l'essai d'orniéage

II.2.5.3 Types d'ornières

Les essais à grandes déformations sur des enrobés bitumineux révèlent la présence d'une déformation permanente irréversible, une déformation viscoplastique du point de vue de la microstructure [79].

En général, on distingue trois catégories d'ornières, comme illustré dans la Figure II.:

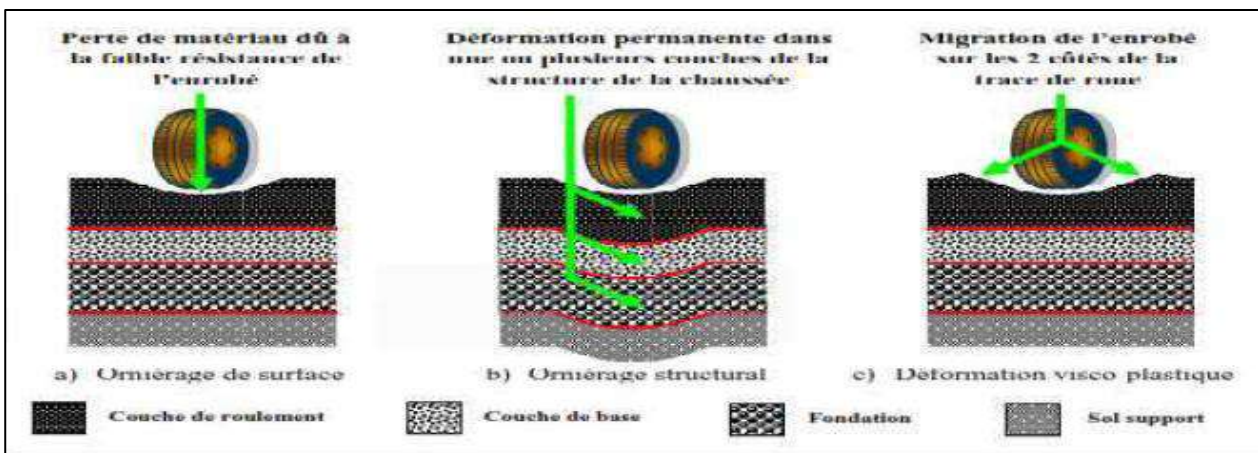


Figure II.16 : Types d'ornières

Dans les équipements de laboratoire, deux catégories d'ornière sont définies en fonction de leurs dimensions et de leur capacité, à savoir :

- ❖ Équipement de grande taille. Une roue dotée d'un pneu libre de 400 × 8 et d'une largeur de trace de (80 ± 5) mm. Au début de l'essai, la pression du pneumatique doit être de 600 ± 30 Kpa. Moules Un groupe de moules ayant des dimensions intérieures de (500 × 180 × 50) mm³ ou (500 × 180 × 100) mm³, avec une marge de variation de ± 2 mm³, qui peuvent faire face sans gauchissement aux conditions de l'essai[60].

❖ Dispositif extra-large

Une roue équipée d'un pneu sans sculpture 6.00-R9 et d'une largeur de trace de (110 ± 5) mm, ainsi qu'un ou plusieurs moules de dimensions intérieures (700×500) mm, à ± 5 mm près, qui peuvent faire face sans gauchissement aux conditions de l'assainissement.

Les moules ont une hauteur qui correspond à l'épaisseur nominale des éprouvettes aux extrémités, plus ou moins de 20 mm au maximum.

Des détecteurs laser pour évaluer la déformation locale à une distance de $\pm 0,2$ mm. Il est nécessaire que les capteurs laser puissent mesurer la profondeur d'une ornière avec un pas maximal de 2 mm et sur au moins 3 profils en travers [76].

II.2.5.4 Réalisation d'essai d'orniérage

Les moules sont préparées à l'aide d'un compacteur spécifique (

Figure II.3) afin de prendre des plaques enrobées avec une tâche de compacité bien datée et minière.



Figure II.3 : Préparation de plaque sur la table de compactage.

La machine doit fonctionner jusqu'à ce que l'éprouvette soit chargée 1 000 fois, avec une température de l'enceinte maintenue entre $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. La profondeur est mesurée dans des conditions ambiantes. La température de l'enceinte est réglée à celle de l'essai, et celle de l'air est vérifiée à l'aide d'une sonde sur la paroi du récipient. Si la température d'essai est $\leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, celle de l'air ne doit pas dépasser $75\text{ }^{\circ}\text{C}$; si elle est $> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, elle ne doit pas excéder $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. L'éprouvette est exposée à ces températures pendant 12 à 16 heures avant le test (خطأ! لم يتم العثور على مصدر المرجع).

Après l'arrêt de la machine, la profondeur de l'ornière est mesurée à 15 emplacements prédéfinis. Les essais sont effectués après 1 000, 3 000, 10 000 et 30 000 cycles, pouvant aller jusqu'à 100 000 cycles, hors cycles de conditionnement [76].

II.2.5.5 Expression des résultats d'orniérage

La profondeur d'ornière évolue en fonction du nombre de cycles ; la régression appliquée est une forme de régression :

$$P_i(\%) = 100 - \sum_{i=1}^{15} \frac{(m_{ij} - m_{0j})}{(15 \times h)} \quad (\text{II.6})$$

P_i représente le pourcentage de profondeur d'ornièrè mesurée (%), m_{ij} représente la déformation locale, en millimètres (mm), m_{0j} représente la mesure initiale à l'emplacement j , h représente l'épaisseur de l'analyse, en millimètres (mm).

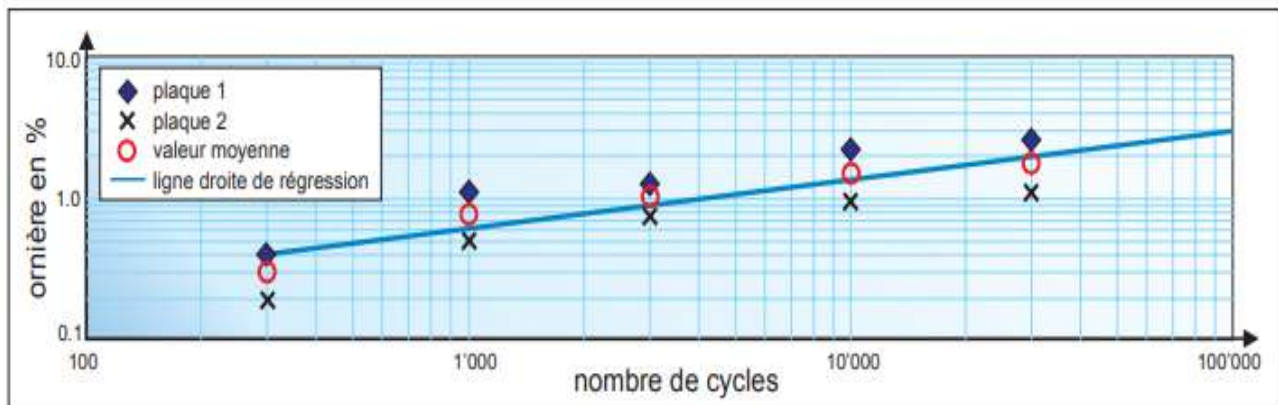


Figure II.18 : Profondeur d'ornièrè proportionnelle / nombre de cycles.

II.2.6 Essai de la Presse à cisaillement Giratoire (PCG)

En technologie routièrè, le compactage des mélanges bitumineux revêt une importance capitale, car il garantit la longévité du revêtement et a un impact sur ses caractéristiques mécaniques et sa résistance aux agents physiques extérieurs [80]. Les méthodes de compactage les plus courantes et les plus simples, cependant, ne sont que de mauvaises représentations de ce qui se passe sur le chantier. La méthode Marshall de compactage par chocs repose sur une approche différente de celle utilisée sur le chantier. Le squelette minéral des éprouvettes obtenues est généralement bloqué lors du compactage par arc-boutement des particules granulaires[78-79].



Figure II.19 : Machine La Presse Cisaillement à Giratoire.

II.2.6.1 Principe d'essai PCG

Les mélanges d'hydrocarbures préparés en laboratoire sont placés dans des moules cylindriques de 100, 150 mm ou 160 mm de diamètre (Figure II.), mélangés et portés à la

température d'essai (environ 130°C à 160°C). Le sommet de l'éprouvette subit une pression verticale de 0,6 MPa.

Pour évaluer la compactibilité, il existe une norme qui évalue la capacité de compactage d'un matériau. Deux méthodes peuvent être utilisées. Avant de mesurer la densité apparente, au moins deux échantillons ont été compactés à différents niveaux d'énergie de compactage. Dans la deuxième variante, un seul échantillon est utilisé pour évaluer l'augmentation de densité en fonction de la réduction d'épaisseur à chaque étape de compactage[81-82].

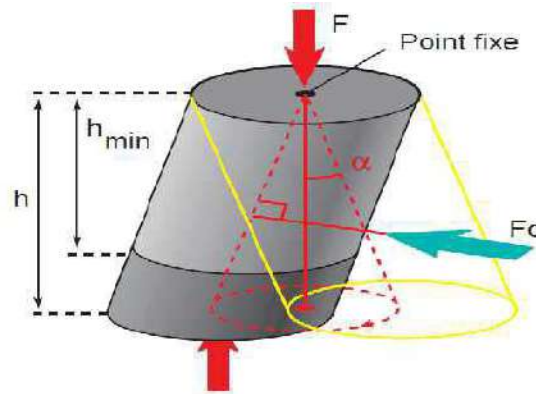


Figure II.20 :Principe de Cisaillement Giratoire

Les variables sont telles que définies : h_{\min} est la hauteur minimale pour 0 % de vide, h est la hauteur apparente pour N rotations, F est la force axiale, F_c est la force de cisaillement et α est l'angle d'inclinaison.

II.2.6.2 Réalisation d'essai PCG

Les granulats préchauffés et le bitume chaud sont mélangés dans une étuve pour obtenir une température homogène. Le mélange est brassé jusqu'à un enrobage uniforme, puis versé dans un moule préchauffé pour compactage. Celui-ci débute à la température recommandée, sous une pression de 0,6 MPa et avec une inclinaison de 0,82° pour un résultat régulier. Après chaque rotation, la hauteur est mesurée pour contrôler la densité du mélange compacté.

II.2.6.3 Type des compacteurs giratoires

a) La presse a compactage giratoire de Vicksburg :

Le premier appareil commercialisé est ce compacteur, dont le prototype remonte à la fin des années cinquante, comme le montre la Figure II..

Le moule A, maintenu à température par une enceinte chauffante, est fixé dans un mandrin roulant sur des galets C et D. Les vérins E et F appliquent une pression constante, tandis qu'un moteur fait tourner la partie supérieure à 10 RPM. Les galets génèrent un couple ajustable par l'angle du galet inférieur. La plaque G permet un mouvement horizontal stabilisant l'échantillon durant le cisaillement. L'appareil mesure la hauteur, l'angle et les tours pour évaluer le compactage, affichés sur un manomètre.

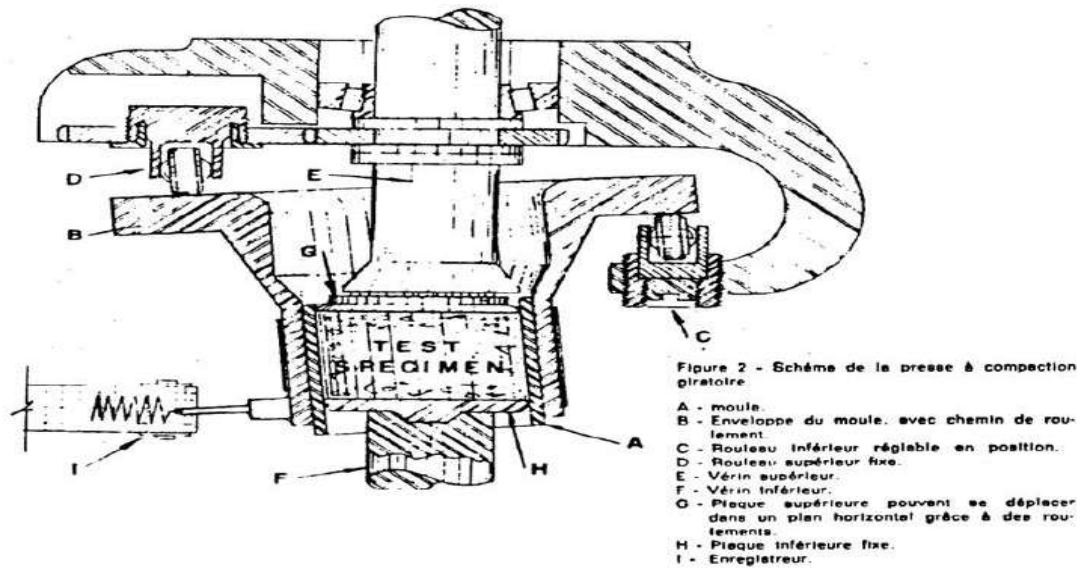


Figure II.21 :Mécanisme La Presse à Cisaillement Giratoire de Vicksburg [83].

b) L'appareil français des Ponts et Chaussées

Commercialisé vers 1974 (Fig. II.25), cet appareil comprend un moule chauffant thermostat avec thermocouples pour l'enrobé. La presse intègre :

- Un système d'inclinaison du cylindre pour la rotation de l'éprouvette,
- Un entraînement par couronne dentée,
- Un piston supérieur fixe assurant la pression statique.

Le vérin d'inclinaison permet deux modes de fonctionnement :

1. Angle fixe : maintien d'une inclinaison constante dans un plan spécifique
2. Pression constante : variation contrôlée de l'angle d'inclinaison

L'appareil applique une force F vers le haut via le vérin, faisant pivoter l'éprouvette verticalement selon l'angle programmé [83].(Figure II.)

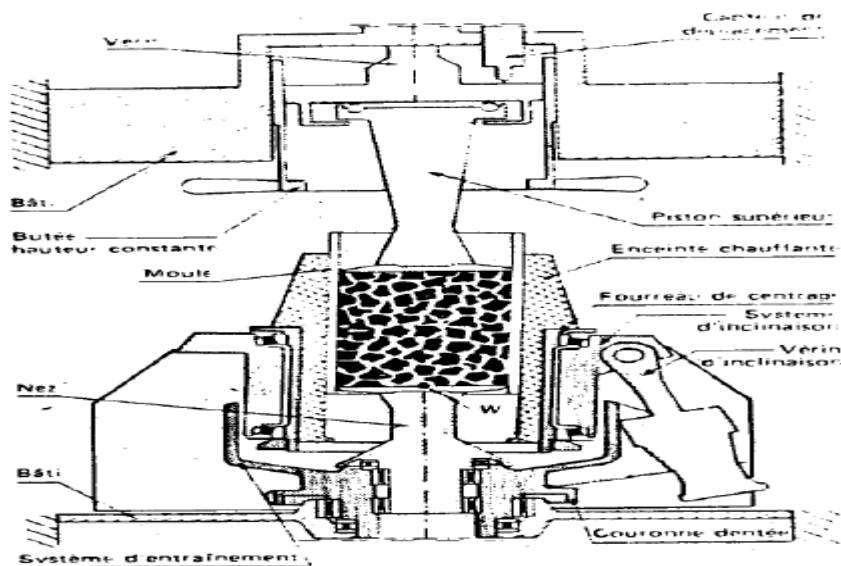


Figure II. 22: Mécanisme à l'appareil français des Ponts et Chaussées[83]

II.2.6.4 Expression des résultats de PCG

C'est en fait un essai réalisé dans le cadre des recherches sur la formulation des enrobés bitumineux. Entre 1973 et 1977, de nombreuses compositions granulométriques ont été étudiées à la PCG [62-63], ce qui a conduit à la corrélation entre la compacité du mélange et le nombre de girations :

$$V(n) = V_1 - k \cdot \ln(n) \quad (\text{II.6})$$

$V(n)$: le pourcentage de vides pour un nombre de girations, V_1 : est le pourcentage de vides calculé pour une giration ; k : est la compacité (pour la méthode utilisant un compacteur giratoire) ; n : est le nombre de girations.

Les deux paramètres de l'équation, K , sont calculés par la méthode des moindres carrés sur des données expérimentales pour un nombre de cycles supérieur ou égal à 20 avec une régression linéaire dans laquelle le net $V(n)$ est respectivement pour les variables indépendantes et dépendantes [71].

Pour exprimer le pourcentage de vides, il y a un nombre après la virgule et le résultat serre présente sous forme on courbe.

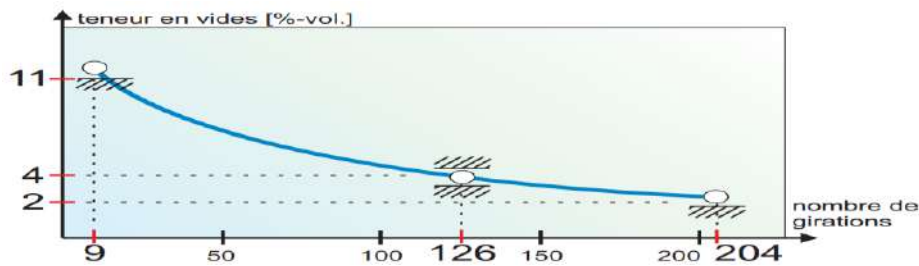


Figure II. 23 : Présentation des résultats d'essai PCG [84]

II.3 CONCLUSION

Le deuxième chapitre présente principalement des méthodes expérimentales spéciales pour évaluer les propriétés mécaniques et les propriétés statiques du béton bitumineux, qui sont similaires à des essais tels que l'essai Marshall, l'essai Duriez, l'essai d'orniérage et l'essai PCG. Ces tests visent à évaluer diverses propriétés mécaniques et performantes des enrobés bitumineux afin d'optimiser leur composition et de garantir une chaussée flexible durable et résistante à l'usure.

Ce chapitre souligne l'importance et la nécessité de tester les propriétés mécaniques de l'asphalte dans l'industrie de la construction routière. De plus, ce chapitre encourage l'innovation et le développement dans le domaine des essais de propriétés mécaniques des asphaltes, contribuant ainsi au développement de nouvelles technologies et à l'amélioration des pratiques de l'industrie de la construction routière.

Dans l'ensemble, ce chapitre souligne l'importance d'améliorer la qualité et les performances de l'asphalte grâce à des essais mécaniques spécialisés et souligne l'importance de la recherche et du développement dans ce domaine pour garantir une infrastructure adéquate pour des routes durables et sûres.

PARTIE B

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 3:

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISES ET FORMULATION

CHAP III

CARACTERISATION DES MATERIAUX UTILISÉS ET FORMULATION

III.1 INTRODUCTION

Ce troisième chapitre décrit la provenance des matériaux utilisés et la formulation adoptée. La caractérisation des matériaux comprend l'évaluation de leurs propriétés physico-chimiques, mécaniques ainsi que leur comportement sous différentes sollicitations.

Les essais ordinaires d'identification telle que la granulométrie, analyse chimique et mesure de densités sont abordés en priorité avant les essais mécaniques tels que Los Anglos et Micro-Deval. Le bitume modifié au Lucobit 1210A est également identifié par l'intermédiaire des essais de pénétrabilité et de ramollissement.

III.2 CARACTERISTIQUES DES SABLES DE DUNES UTILISES

III.2.1 Origine

Le sable de dunes utilisé dans cette étude est un sable fin identifié comme un additif pour le béton bitumineux,. Des échantillons ont été prélevés dans une zone située dans la ville de Sidi Khouiled (Ouargla, Algérie) comme montré en Figures III.1 et III.2. Les coordonnées de la zone d'emprunt sont (31.9743780, 5.4055270).



Figure III.1 : Sable de dunes de Sidi Khouiled

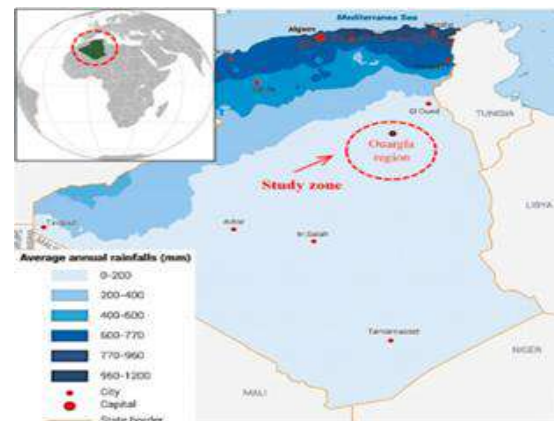


Figure III.2: Localisation de la dune de sable

III.2.2 Caractéristiques principales des sables

III.2.2.1 Granulométrie et Classification des sables

La figure III.3 montre la courbe granulométrique du sable de dune de Sidi Khouiled. Il présente une granulométrie assez fine 0-0.6 mm, Sa courbe

granulométrique est presque verticale ce qui témoigne une granularité serrée. Il est riche en fines.

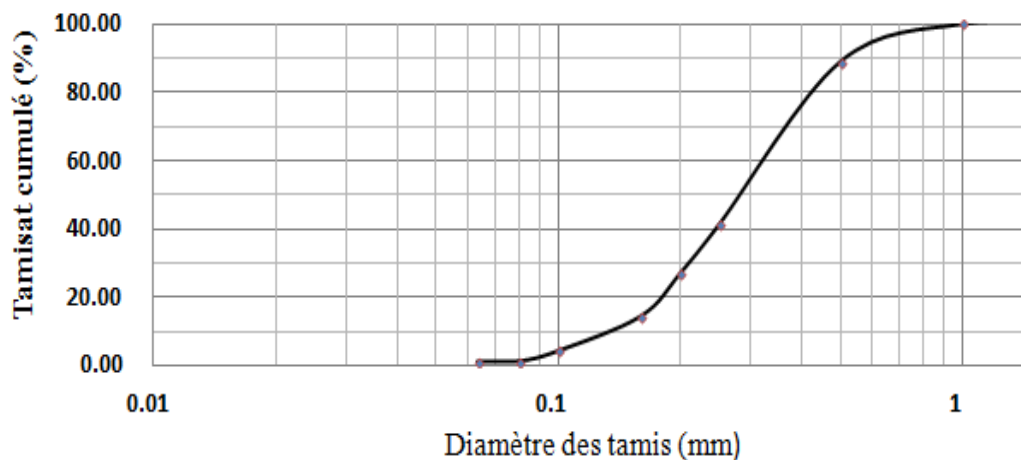


Figure III. 3 : Courbe granulométrique du sable de dune de de Sidi Khouiled utilisé

Les facteurs de la courbe granulométrique sont :

- Le coefficient de courbure : $C_c = (D_{30})^2 / [D_{10} \times D_{60}]$ est de l'ordre 1.04
- Le coefficient d'uniformité : $C_u = D_{60} / D_{10}$ est de l'ordre 2.35

D'après les coefficients ci-dessus on peut dire que le sable utilisé est **propre** et possède une granulométrie **très serrée et mal graduée**.

III.2.2.1.1 Module de finesse du sable (Mf)

Ce paramètre est en particulier utilisé pour évaluer la finesse du sable en question, il est exprimé comme suit ;

$$Mf = 1/100 \sum \text{refus des tamis (0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5, 5)}$$

$$Mf (\text{Sable de dune}) = 1.27$$

Selon les calculs, le module de finesse trouvé est de 1.27, ce qui reflète un sable **fin**.

III.2.2.1.2 La Masse Volumique

- Selon la norme NF P18-554, la masse volumique absolue est la masse par unité de volume du matériau qui compose le sable des dunes, sans tenir compte des vides inter granulaires
- Selon NFP 94-064, la masse volumique apparente est la masse M divisée par le volume brute Va qu'il occupe :

Le tableau ci-dessous résume les résultats pour le sable utilisé :

Tableau III. 1: Masse volumique absolue et apparente des agrégats utilisés

γ_s (g/cm ³)	γ_a (g/cm ³)
2.68	1.61

III.2.2.1.3 Équivalent de sable

Pour évaluer la propreté du sable de Sidi Khouiled, on a utilisé l'essai d'équivalent sable qui a donné comme résultat de l'ordre de **90% qui est supérieur à 80** ce qui qualifie ce sable de **très propre**.

III.2.2.2 Caractéristiques chimiques

A travers les analyses chimiques du sable des dunes de Sidi Khouiled a Ouargla par l'analyse par diffraction des rayons (XRD), nous avons obtenu la fiche technique chimique du sable on Tableau III.2 :

Tableau III. 2 : Fiche technique chimique du sable

Élément	Formule	%
Silice Totale	SiO ₂	96.30
Oxyde d'aluminium	Al ₂ O ₃	0.84
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	0.30
Oxyde de calcium	CaO	0.59
Oxyde de Magnésium	MgO	0.69
Oxyde de potassium	K ₂ O	0.48
Oxyde de sodium	Na ₂ O	0.10
Oxyde de titane	TiO ₂	0.05
Oxyde de chrome	Cr ₂ O ₃	0.038
Oxyde de manganèse	MnO	0.01
Anhydride phosphorique	P ₂ O ₅	0.085
Anhydride sulfurique	SO ₃	0.51

L'analyse chimique a montré que notre sable est constitué quasi-totalement d'éléments siliceux avec des traces des autres oxydes

III.3 CARACTERISATION DES BITUMES UTILISÉS

III.3.1 Bitume pur

Le bitume utilisé est de classe 40/50 **provenant de la station de stockage TOTAL Bitumes à Ouargla**, sa densité spécifique est de 1.04 t/m³. Des essais de pénétrabilité et du point de ramollissement ont été réalisés selon les normes en vigueur avant et après RTFOT. Les résultats sont donnés dans le tableau III.3.

Tableau III. 3: Propriétés physiques du bitume utilisé

Essai	Norme	Résultat	Exigence
Pénétrabilité (1/10mm)	NF EN 12591	40.2	35 à 50
Point de ramollissement (°C)	NE EF13305	55	50 a 58
Point d'éclair (°C)		262	>240
Densité relative à 25°C	NF EN 15326	1.05	1.00 à 1.10

Ces résultats confirment que le liant le liant correspond à un bitume pur de classe 40/50.

III.3.2 Bitume modifié

Dans cette étude, nous allons modifier le bitume 40/50 avec du Lucobit 1210 A afin d'améliorer ses performances rhéologiques lorsqu'il est ajouté au mélange bitumineux, qui est l'un des meilleurs types d'additifs dans les mélanges bitumineux.

III.3.3 Lucobit 1210 A

Le polymère Lucobit est un produit qui se présente en forme de granulés à base de substance pétrochimique additionné à copolymère spécial, il est enregistré comme sous la nomination DIN 16729 selon la norme allemande.

Les caractéristiques polymériques du Lucobit 1210A provoquent sa combinaison rapide avec le bitume [14-85]. Grâce à sa viscosité élevée et son élasticité, il peut tolérer, sans dommage structurel, une chaleur jusqu'à 300 °C et une froideur de -20 °C.

Ces thermoplastiques peuvent être ajoutés directement au bitume ou à l'enrobé à chaud [11,86].



Figure III. 4 : Forme granulaire de Lucobit 1210 A

III.3.3.1 Provenance

Le Lucobit 1210A est produit par la société allemande (LUCOBIT Aktiengesellschaft-Basell Polyolefine Gmb H / Bruhler Str.60 B100). Des échantillons ont été ramenés à partir de sa filiale en Algérie, (chemin doudou Mokhtar, Hydra, Alger).

III.3.3.2 Composition de base du Lucobit 1210A

Le Lucobit 1210A est un matériau synthétique thermoplastique granulaire composé d'un copolymère de polyéthylène de haute qualité et d'un bitume spécial (EBC : copolymère d'éthylène butylacrylate). La figure III.4 montre la structure du bitume pur incorporé de manière homogène dans la matrice polymère.

Lucobit 1210A peut être mélangé avec des surfaces asphaltiques courantes telles que le béton bitumineux, le béton bitumineux à haute teneur en mortier ou l'asphalte coulé en le pré mélangent avec l'asphalte (PmB) ou simplement en l'ajoutant au mélange pendant le processus de malaxage (PmB) [87-89].

III.3.3.3 Comportement chimique et physique

Le polymère du Lucobit 1210A appartient au groupe Ethylène Butylacrylate Copolymère (EBC) dans la classe des matériaux thermoplastiques semi-cristallins. Contrairement au polypropylène ou HDPE thermoplastiques recyclés, l'EBA de LUCOBIT fond dans un vaste intervalle de 80 à 120 °C et se solidifie dans l'intervalle de 96 à 70 °C. [87]

Les composants du Lucobit utilisé sont le **acrylate de butyle** et du polymère **vinyle**. Lucobit définit les avantages des deux. Non seulement a une excellente stabilité chimique, mais aussi les propriétés mécaniques, la résistance à la traction, la propriété de résistance aux intempéries, la résistance au fluage et la résistance aux chocs se sont grandement améliorées [90]. La figure III.4 montre la structure du polymère EBA, Ce polymère appartient au groupe Ethylène Butylacrylate Copolymère (EBC) dans la classe des matériaux thermoplastiques semi - cristallins [87,90].La partie fondamentale de cette substance pétrochimique est un PE (copolymère) spécial qui a été enregistré sous la norme **DIN 16729** en granulés dans la norme allemande.

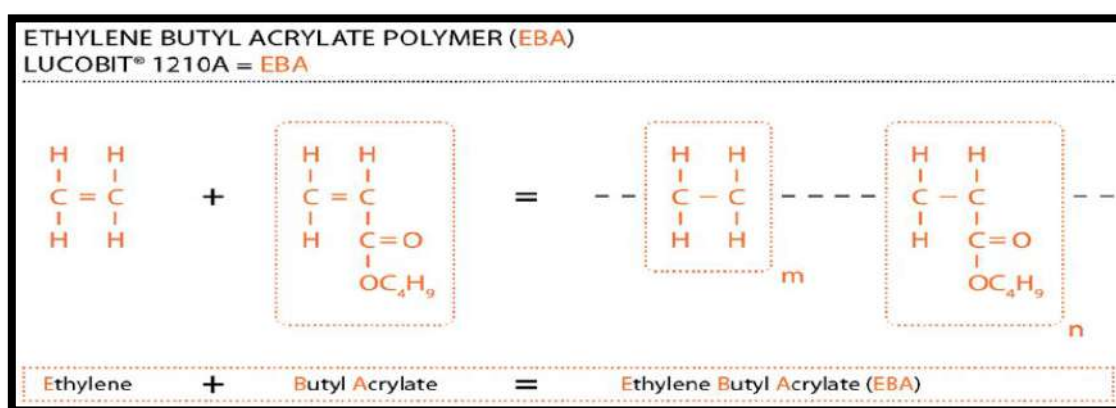


Figure III.5 : Structure du polymère EBA

III.3.3.4 Caractéristiques de Lucobit 1012A

Comme tous les autres additifs, la Lucobit 1210A possède des caractéristiques qui contribuent de manière significative à son inclusion en tant que composant

supplémentaire pour améliorer la qualité du bitume. Les principales caractéristiques du Lucobit sont regroupées en tableau III.4.

Tableau III. 4: Caractéristiques de Lucobit 1012A [82-84]

Caractéristiques techniques	Unité	Résultat
Densité (23°C)	g/cm ³	0.97
Allongement a la rupture (23°C)	%	700-800
Module d'élasticité	Mpa	17
Intervalle de ramollissement	°C	80-100
plage de porosité	°C	<-30

III.3.3.5 Raisons du choix du Lucobit1210A

Le Lucobit 1210A, qui est un agent modificateur bitumineux pour améliorer les couches d'asphalte, possède plusieurs avantages qui peuvent être identifiés ;

- Améliore l'adhésivité aux granulats ;
- Améliore la résistance au vieillissement ;
- Améliore la flexibilité à basse température ;
- Améliore la résistance à l'orniérage ;
- Améliore la résistance à la fatigue.





Le choix du type de modificateur se base principalement sur :

- La compatibilité thermique du produit avec la température de fabrication et de mise en œuvre de l'enrobé ;
- Les propriétés de fusion et de cristallisation du produit à partir de sa courbe calorimétrique ;
- L'homogénéité et l'absence d'impuretés.

III.3.4 Méthode de modification du bitume

Le tableau III.5 présente la méthode optimale pour mélanger le Lucobit1210A avec le bitume, en déterminant la vitesse de mélange appropriée pendant le temps suffisant à une température spécifique pour obtenir un mélange plus homogène.

Tableau III. 5: Méthodes de mélange du bitume basées sur la vitesse et le temps de malaxage

Type de malaxeur	Unité	Norme	Bitume	Bitume modifié			
				Agitateur centrifuge	Disperseur à 3 hélices	Disperseur à 4 hélices	Disperseur à grand cisaillement
Fabricant	-	-	-	IKA	IKA RW 28	IKA RW 47	IKA, Turax
tr/min	-	-	-	250-1500	240-1400	275-1300	500-10000
Photo de malaxeur	-	-	-				
Durée de malaxage	min	-	-	30	15	8	2
durée de séchage	h	-	-	24	16	8	2
bitume	-	-	50/70	50/70	50/70	50/70	50/70
teneur en Lucobit 1210A	%	-	0	5%	5%	5%	5%
pénétration 25 °C	0.1 mm	EN 1426	50/70	25 à 55	25 à 55	25 à 55	25 à 55
point de ramollissement	°C	EN 1427	46/54	≥ 55	≥ 55	≥ 55	≥ 55
force ductilité (5 °C)	J/cm ³	EN 13589	N,R	≥ 3	≥ 3	≥ 3	≥ 3
point de rupture FRAASS	°C	EN 12593	≤ -8	≤ -10	≤ -10	≤ -10	≤ -10
retour élastique (25 °C)	%	EN 13398	N,R	≥ 50	≥ 50	≥ 50	≥ 50
stabilité de stockage/écart point de ramollissement	°C	EN 13399	N,R	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 5

III.4 CARACTERISTIQUES DES AGREGATS UTILISÉS

III.4.1 Provenance des matériaux granulaires

Les agrégat utilisés sont prélevés au niveau de la station de concassage de Benhamouda, au niveau de la Wilaya de Ghardaia, Algérie.

Les agrégats sont classés en trois classes granulaires, sable concassé 0/3, gravier de classe 8/15 et 3/8. L'utilité de ses classes est de formuler un enrobé semi-grenu de classe granulaire 0-14 suivant le fuseau proposé par l'organisme national de Contrôle Technique de Travaux Publics Algérien « CTTT » (Fig. III.6).



Figure III. 6 : Fractions granulaires 3/8 et 0/3

III.4.2 Identification des constituants granulaires

Les caractéristiques intrinsèques ont concerné :

- La résistance au choc : Essai Los Angeles (NF EN 1097-2) [91].
- La résistance à l'usure en présence d'eau : Essai Micro-Deval (NF EN 1097-1) [92].
- La masse volumique (NF EN 1097-6) [93].

Les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableau III.6 :

Tableau III. 6: Caractéristiques intrinsèques des granulats.

Essais	0/3	3/8	8/15	spécification
Masse volumique apparent [g/cm ³]	1.5	1.18	1.16	/
Masse volumique apparent [g/cm ³]	2.77	2.64	2.61	/
LA (%)	-	32	30	≤25
MDE (%)	-	20	22	≤20

Les résultats du tableau indiquent que les deux fractions 3/8 et 8/15 ont des caractéristiques intrinsèques mécaniques relativement moyennes à bonnes.

III.4.2.1 Caractéristiques de fabrication des granulats

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

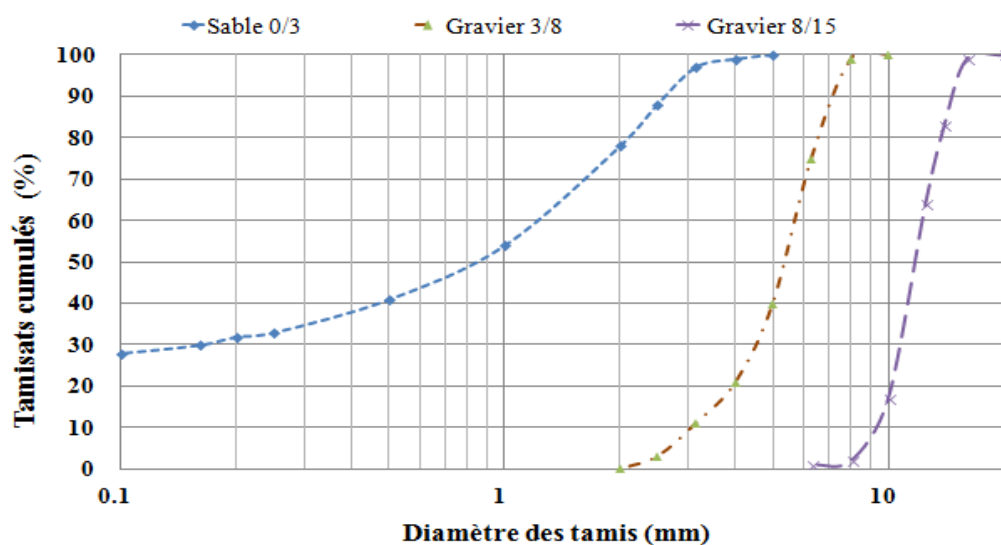
- L'essai d'aplatissement (NF EN 933-3)[94],
- L'équivalent de sable (NF EN 933-8)[95].
- L'analyse granulométrique (NF EN 933 -1)[96],

Les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableau III.7 et la figure III.7.

Tableau III. 7: Caractéristiques de fabrication des agrégats

Essais	Résultats			Spécifications
	8/15	3/8	0/3	
Aplatissement [%]	15.43	16.62	-	≤ 25
ES à 10% de fines [%]	-	-	63	≥ 60

La Figure III. présente les courbes granulométriques des différentes classes 0/3, 3/8 et 8/15.



On remarque que les trois fractions présentent des granularités continues, Les résultats du tableau III.7 indiquent que le sable 0/3 est propre. La forme des gravillons est en générale cubique et le coefficient d'aplatissement est conforme aux exigences des normes.

III.4.2.2 **Analyse chimique** :L'analyse chimique sommaire du gravier utilisé est fournie dans le Tableau III.8.

Tableau III. 8: Analyse chimique des agrégats

Granulat		Sable 0/3	Gravier 3/8 et 8/15
Carbonates (CaCO ₃)	%	95.08	94.5
Insolubles (SiO ₂ + silicate)	%	5.14	7.2
Oxyde de fer et d'Al (Fe ₂ O ₃ + Al ₂ O ₃)	%	1.48	2.4
Gypse (CaSO ₄)		Traces	Traces
Chlorures (Na Cl)	%	0.19	0.23
Anhydride carbonique (CO ₂)	%	41	43
perte au fer (PF)	%	41.7	42.09
Eau de constitution	%	0.27	0.5

Les agrégats concassés sont de type calcaire donc d'une forte teneur en carbonates (CaCO₃).

D'après les résultats des essais Los Angeles, Micro-Deval et l'analyse chimique on peut dire que les agrégats utilisés présentes de moyennes performances en terme de dureté.

III.5 FORMULATION ET DETERMINATION DES PARAMETRES OPTIMUMS

Le béton étudié concerne un béton bitumineux ordinaire (témoin) de classe 0/14, constitué des fractions 0/3, 3/8 et 8/15.

III.5.1 Étapes de formulation

Les essais mécaniques des bétons bitumineux sont expérimentés au moyen des deux essais mécaniques traditionnels ; essai Marshall et essai Duriez. Ces derniers sont conçus pour juger de l'efficacité des mélanges préalablement sélectionnés en déterminant les propriétés mécaniques de chaque mélange. L'organigramme de la recherche de formules est présenté ci-dessous :

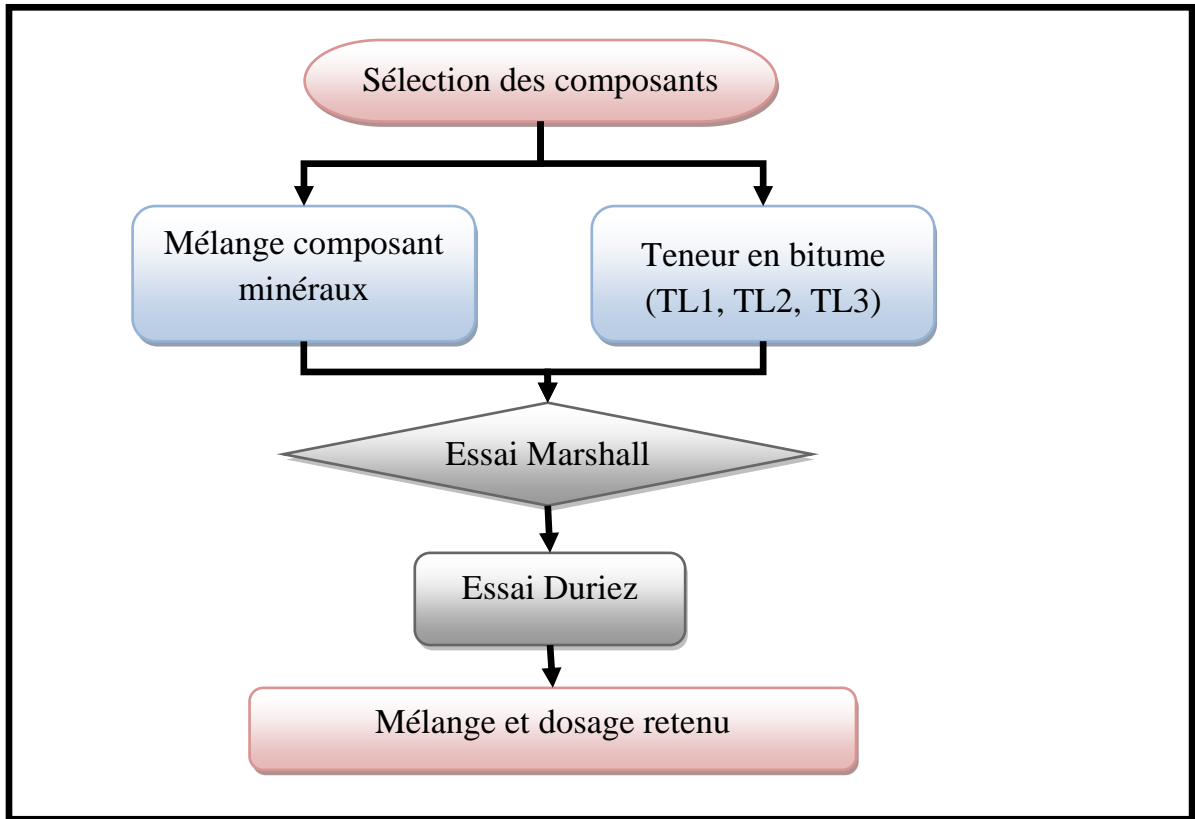


Figure III. 8 : Étapes de formulation

III.5.1.1 Courbe granulométrique du mélange

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

Le tableau ci-dessous présente la granulométrie du béton bitumineux 0/14 adopté conformément au fuseau de référence.

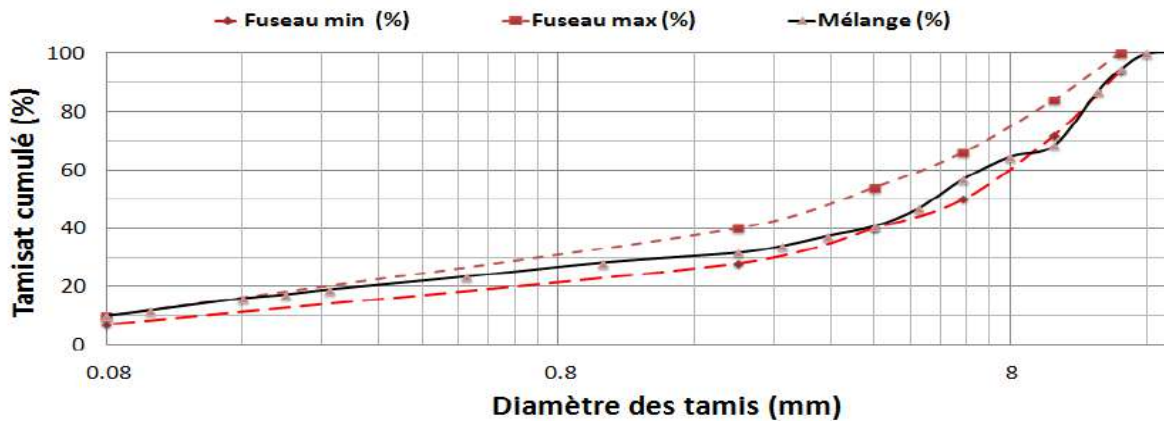


Figure III. 9 : Courbe granulométrique de mélange BB ordinaire

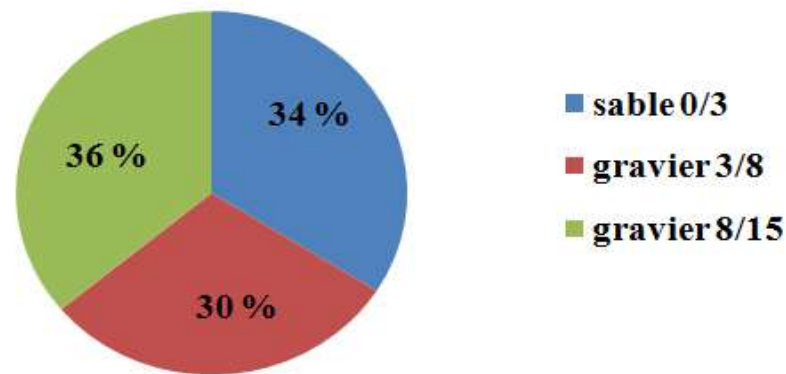


Figure III. 10 : Composition granulaire du mélange.

III.5.1.2 Détermination de la teneur en liant

Afin de déterminer la teneur optimale en liant, on introduit la notion de surface spécifique des granulats, représentée par Σ , exprimée en m^2/kg , puis le coefficient de correction α . Pour le béton bitumineux, la plage des modules de richesse est comprise entre 3,3 à 3,5. La teneur en asphalte est déterminée par la formule suivante :

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

La surface spécifique des agrégats Σ est comme suit ;

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

Avec :

G : pourcentage des éléments supérieurs à 6,3 mm ;

S : pourcentage des éléments compris entre 6,3 mm et 0,25 mm ;

s : pourcentage des éléments compris entre 0,25 mm et 0,063 mm ;

f : pourcentage des éléments inférieurs à 0,063 mm ;

D'où :

$$\Sigma = 16,28 \text{ mm}^2$$

❖ Module de richesse [97]

Le module de richesse K (tel que défini dans la norme (NF P 98-149) reflète l'épaisseur conventionnelle du film de colle enrobant le granulat. Cela affecte donc directement la résistance à l'eau et la durabilité du revêtement.

Pour améliorer le jugement sur les performances des mélanges proposés, il est recommandé aux porteurs de projets d'exiger l'enregistrement des valeurs du module de richesse du mélange lors des tests de formulation.

Pour certaines conditions d'utilisation ou opérations spécifiques, la spécification des valeurs du module de richesse peut être envisagée sur la base des valeurs couramment utilisées identifiées dans le tableau III.12 ci-dessous.

Tableau III. 9: Valeurs usuelles du module de richesse pour les enrobés [97]

type d'enrobés	Classes granulaires		
	0/6	0/10	0/14
BBSG	-	$K \geq 3.4$	$K \geq 3.2$
BBME	-	$K \geq 3.5$	$K \geq 3.3$
BBM	-	$K \geq 3.3$	$K \geq 3.2$
BBTM	$K \geq 3,5$	$K \geq 3.4$	--

α : Coefficient correcteur, destiné à tenir compte de la masse volumique réelle des granulats si elle diffère de 2,65G/cm³.

$$\alpha = \frac{2,65}{MVR_g}$$

Avec : MVR_g = masse volumique réelle

$$MVR_g = 100 \div \left[\frac{\%(0/3)}{MVR(0/3)} + \frac{\%(3/8)}{MVR(3/8)} + \frac{\%(8/15)}{MVR(8/15)} \right]$$

$$MVR_g = 100 \div \left[\frac{34}{2,77} + \frac{30}{2,64} + \frac{36}{2,61} \right] = 2.714$$

$$\alpha = 0,991$$

Trois mélanges ont été préparé avec des modules de richesse différents, (Tableau III.10) présente les valeurs de module de richesse et la teneur en liant que nous avons obtenu.

Tableau III. 10 : Teneur en liant du béton bitumineux.

$TL = k \sqrt[5]{\Sigma} \alpha$	TL1	TL2	TL3
Module de richesse	3,3	3.4	3.5
Teneur en liant (%)	5,74	5,91	6,09

III.5.2 Détermination de la teneur en bitume optimale

III.5.2.1 Essai de stabilité Marshall (NF EN 12697-34+A1)

Le bitume optimal pour les échantillons BB compactés a été déterminé selon le test Marshall [64]. Trois échantillons de teneurs différentes en bitume ont été préparés. Les propriétés volumétriques suivantes des échantillons représentent la moyenne de trois échantillons déterminées à partir des tests du Tableau III. 11 : densité γ (kg/cm³), compacité (%), stabilité (KN), fluage (mm) [40].

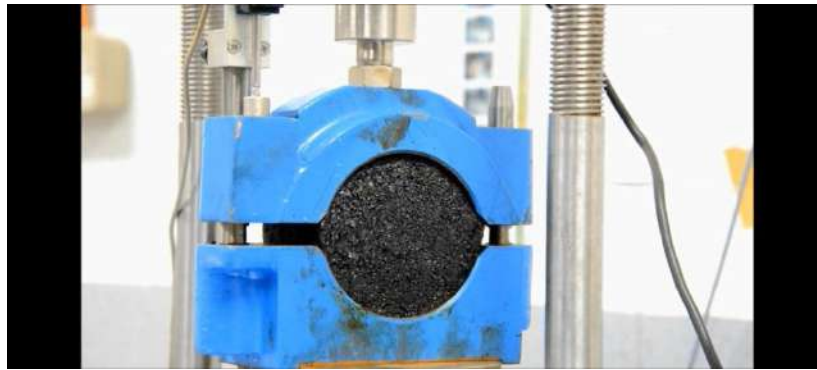


Figure III. 5 : Appareil Marshall (écrasement d'éprouvette)

Figure III. 5 représente un écrasement équipé d'un enregistreur force-déformation. L'éprouvette a été maintenue dans un bain-marie chauffé à l'air à une température de 60°C pendant 30 minutes, puis écrasé à une vitesse de 0,850 mm/s.

Les résultats obtenus sont présentés dans les Figure III. 6 et Figure III. 7 représentent respectivement la stabilité et le fluage de Marshall.

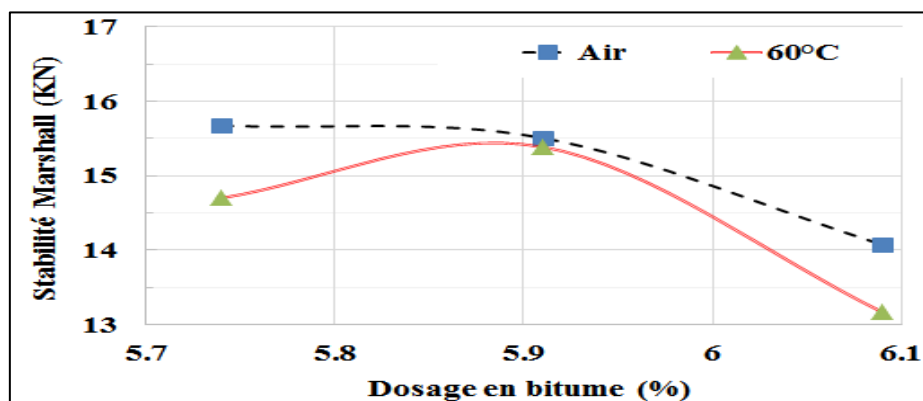


Figure III. 6 : Stabilité Marshall

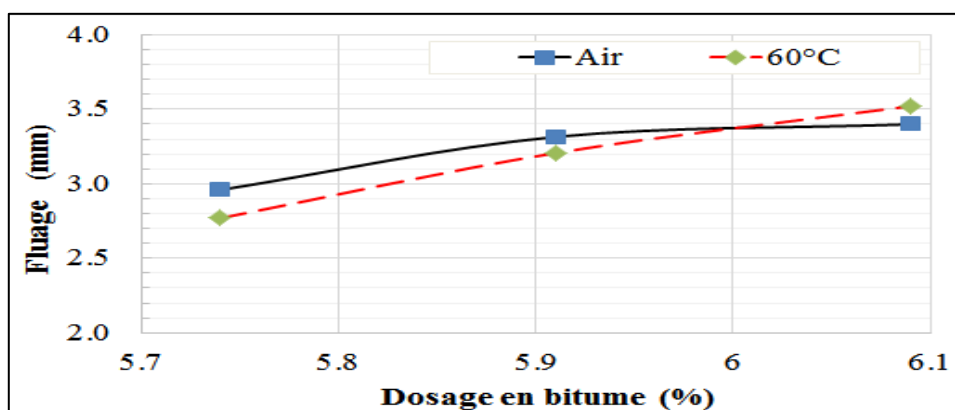


Figure III. 7 : Fluage Marshall

Comme montré en Figure III. 6, à température ambiante et à 60°C. Nous avons remarqué que le taux de stabilité de l'échantillon dans l'air était supérieur à 60°C,

ce qui était dû à l'effet de la température sur la stabilité à la pression du mélange. Le pourcentage optimal d'asphalte était en moyenne de 5,91%.

Pour le fluage, comme le montre la Figure III. 7 ce la nous montre qu'à mesure que le pourcentage de bitume augmente, le taux de fluage s'aggrave, tant dans l'air qu'à une température de 60, ce qui se produit tous les deux. Ceci montre l'effet du pourcentage de bitume sur la viscosité du mélange.

Le fluage est également égal à la proportion de bitume de 6%, après quoi l'influence de la chaleur supplémentaire change. Il convient également de noter que le point d'inflexion des deux courbes est d'environ 5,91%, ce qui est également la valeur moyenne pour tous les mélanges.

III.5.2.2 Essai Duriez

L'essai Duriez est réalisé sur des éprouvettes contenant des composants asphaltiques. résultats de ce test sont rassemblés dans le tableau 11.

Tableau III. 12: Les résultats de l'essai Duriez

Essais		Résultats			Recommandations BB 0/14
		BB 0/14			
		A	C	D	
Teneur en liant	%	5.74	5.91	6.09	-
Densité théorique	g/cm ³	2.46	2.45	2.45	-
L'essai de tenue à l'eau « DURIEZ »					
Résistance de compression a l'air (R)	Kg/cm ²	139.05	137.40	123.90	≥ 70
Résistance de compression à l'eau (r)	Kg/cm ²	114.00	117.00	99.45	-
Tenue à l'eau (r/R)	-	0.82	0.85	0.80	≥ 0. 80
Densité apparente	g/cm ³	2.31	2.33	2.32	-
Compacité	%	92.88	93.17	92.15	92 à 95

Le graphique de la Figure III. 8 représente la résistance à la compression avant et après immersion dans l'eau et Figure III. 9 représente le rapport R/r.

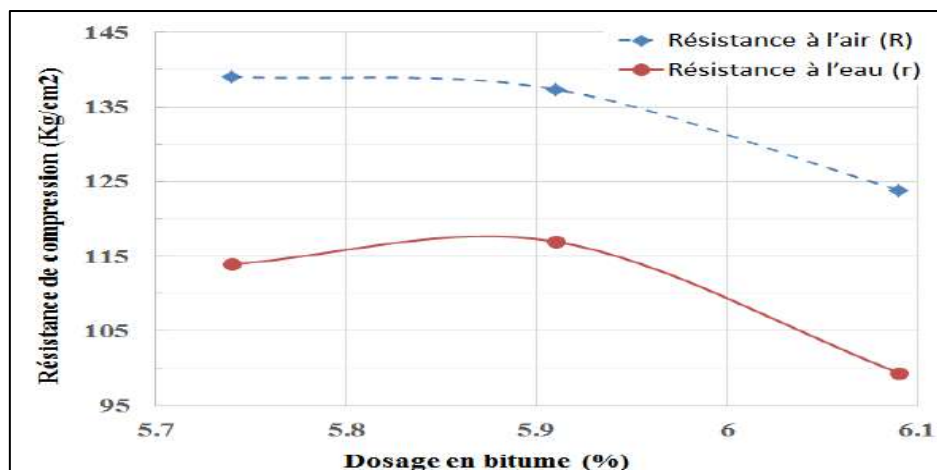


Figure III. 8 : Résistance à la compression (Essais Duriez)

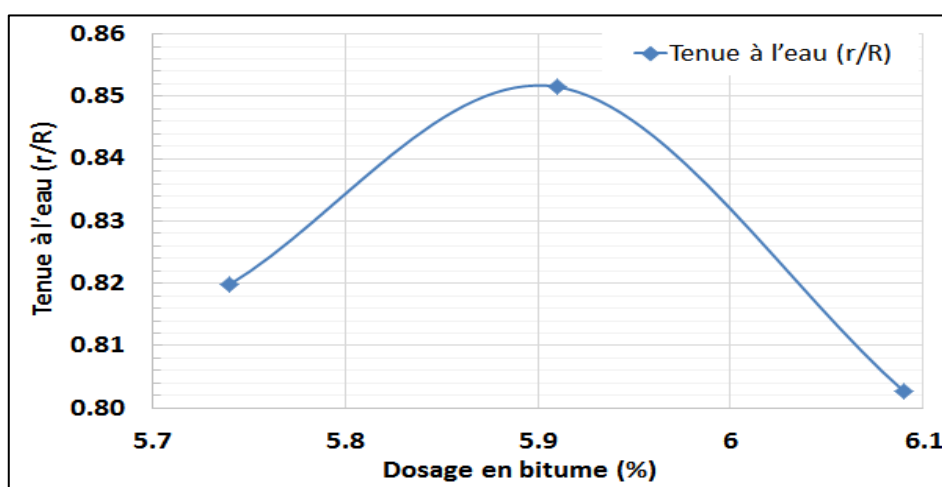


Figure III. 9 : Rapport R/r

Grâce à la figure III.14 il apparaît La résistance à la compression des doses dans l'air est supérieure à celle du bitume immergé dans l'eau, avec son niveau à la valeur moyenne de 5,91% de bitume et sa diminution à la valeur de 6,01% et cela est dû au changement du pourcentage de bitume affectant la force de cohésion entre les composants du mélange.

Quant au rapport R/r (Figure III. 9), on observe que la valeur de $i/c \geq 0,8$ dans tous les échantillons sont des résultats acceptables pour le rapport (normes européennes $i/c \geq 0,8$), On remarque que la force de pression de la dose 5.91 dans l'air est la plus élevée dans cette valeur. Ceci est dû au rapport bitume optimal qui procure plus d'efforts de cohésion, mais au contact La résistance à l'eau est encore réduite par rapport à 5,74 % et 6.09 %.

III.5.2.3 Teneurs en bitume pur optimal

Grâce aux tests de stabilité Marshall et Duriez et en fonction du dosage du bitume, nous avons conclu que la valeur optimale pour le bitume est de **5,91%** et selon les normes utilisées dans la conception de béton bitumineux nous considérons

cette valeur comme plus stable et acceptable pour le fluage. Nous nous appuyerons donc sur le pourcentage bitume de **5,91%** dans les tests restants pour déterminer les performances mécaniques du béton bitumineux.

III.6 CONCLUSION

A partir de ce chapitre qui traite les propriétés des matériaux utilisés et les formulations adoptées, ainsi que les additifs modificateurs pour aboutir à la composition optimale, on peut émettre les conclusions suivantes ;

- Le sable de dunes de Sidi khouiled est essentiellement composé de quartz et se caractérise par une dureté élevée et une granularité serrée comprise entre 0 et 0,6 mm. Son module de richesse moyen est d'environ 3,01.
- Les trois fractions granulaires ; 0/3, 3/8 et 8/15 présentent des granulométries comprises en général dans les fuseaux de référence, mais des précautions lors de la formulation du mélange sont nécessaires afin de garantir l'homogénéité exigée .
- Les graviers 3/8 et 8/15 comportent moins d'éléments plats et présentent une bonne résistance à l'usure et aux chocs.

Grâce aux expériences Marshall et Duriez, la composition optimale du mélange bitumineux a été déterminée. Dans l'ensemble, notre gamme de produits répond aux normes requises en termes de rapidité de fabrication et de qualité des matériaux.

CHAPITRE 4:

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAP IV

RESULTATS ET DISCUSSION

IV.1 INTRODUCTION

Ce chapitre englobe l'ensemble des résultats de différents essais réalisés sur les échantillons de bétons bitumineux de référence et leurs modifications dans le but d'évaluer la proportion de sable de dunes ajoutée en substitution au gravier 0/3. Elle concerne le comportement d'un béton bitumineux semi-grenu 0/14 modifié (bitume modifié au Lucobit 1210A).

L'objectif principal est d'évaluer et de comparer les propriétés rhéologiques et mécaniques du béton bitumineux modifié avec différentes proportions de sable de dunes (0, 5, 10, 15, 20%) en remplaçant partiellement le gravier. Le but de cette étude étant de déterminer la composition optimale donnant les propriétés mécaniques et rhéologiques du béton bitumineux les meilleures.

IV.2 METHODOLOGIE DE TRAVAIL

La méthode de travail comprend l'ajout de bitume modifié au Lucobit 1210A au mélange afin d'évaluer son impact sur les propriétés mécaniques. En plus d'ajouter différentes proportions de sable de dune, l'incorporation d'asphalte modifié a pour but d'étudier les propriétés mécano-rhéologiques influencées par cette modification affecte.

Les propriétés de ces mélanges sont évaluées par une série de tests visant la mesure de la stabilité, l'écoulement, la densité, la compacité, la teneur en vides, le fluage Marshall et d'autres paramètres pertinents.

L'analyse des données obtenues à partir de ces tests a permis de déterminer l'effet combiné de l'ajout de sable de dunes et de bitume modifié sur les propriétés du béton bitumineux et la formulation optimale qui donne les meilleures propriétés mécaniques et rhéologiques pour atteindre une efficacité élevée.

La figure IV.1 explique la méthodologie suivie au cours de ce chapitre et les étapes parcourues.

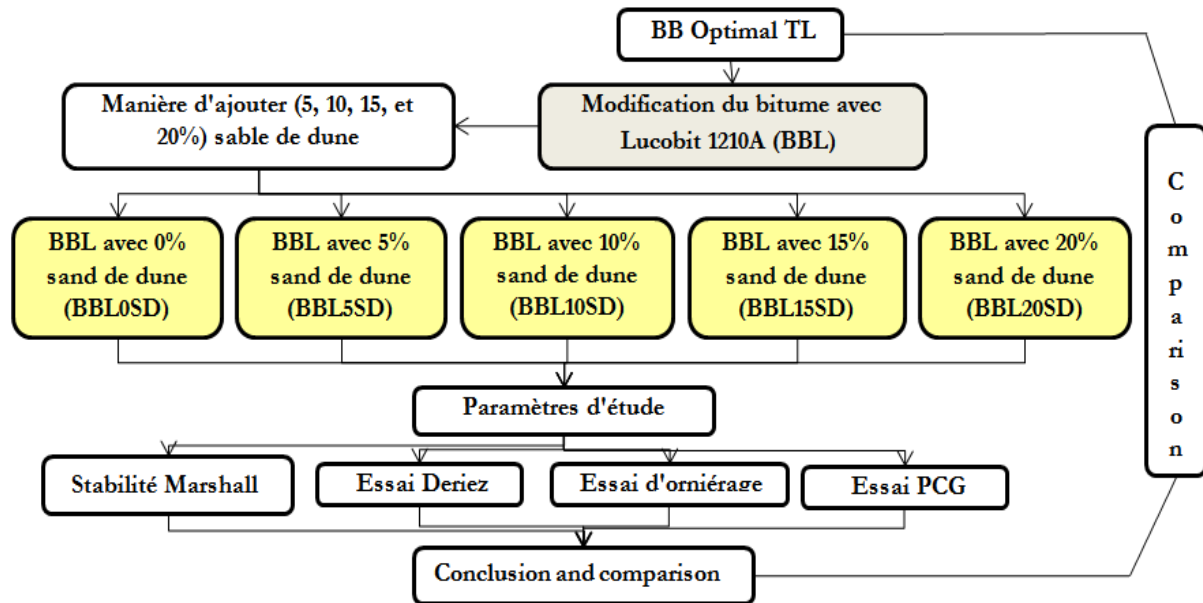


Figure IV.1 : Méthodologie de travail suivie

IV.3 PREPARATION DU BITUME MODIFIE

Avant de débiter l'étude expérimentale sur les enrobés, des tentatives ont été faites pour améliorer les propriétés du bitume en utilisant l'additif «Lucobit 1210 A».

L'objectif de la modification est de produire un liant ayant des propriétés meilleures, à savoir une cohésivité et une adhésivité améliorée avec une susceptibilité thermique faible dans toute la plage de températures d'utilisation.

Le liant bitumineux est modifié dans ses propriétés à l'aide d'un agent Lucobit 1210A introduit dont la base bitumineuse, modifiant sa structure chimique et/ou ses propriétés rhéologiques et mécaniques.

IV.3.1 Bitume modifié par Lucobit 1210A

La modification du bitume pur 40/50 a été faite par ajout de pourcentages croissants du modificateur Lucobit 1210A, les taux ajoutés sont de 1, 2, 3, 4 et 5% du mélange ceci dans le but de cerner le pourcentage de Lucobit idéal. La température de malaxage lors de la modification est de 160-180°C, le temps de malaxage est 30min. La vitesse de malaxage est de 1000 tr/min.

Comme décrit dans la littérature, le test de pénétrabilité réalisé selon la norme ASTM-D5 montre une augmentation de la rigidité relative du bitume modifié qui a révélé une rigidification du bitume à température normale. A cet effet, la polymère améliore les propriétés du bitume[98].

IV.3.2 Présentation du Matériel

La modification a été réalisée au niveau du laboratoire de la Société d'Etudes Techniques (SETS-Setif). L'appareillage utilisé est le suivant :

- agitateur électrique à hélice muni d'un variateur de vitesse de rotation (vitesse Max = 2200 t/min) ;
- plaque chauffante réglable de capacité 400 °C ;
- thermomètre allant de -50 °C à 400 °C ;
- récipient de modification, ce dernier est équipé d'un couvercle hermétique pour empêcher l'évaporation des huiles du bitume lors du chauffage.

IV.3.3 Résultats et discussion

Les résultats des tests sont présentés sous forme de graphes montrant l'évaluation de l'impact des polymères sur l'amélioration des propriétés de bitume 40/50.

Comme le montre le Figure IV.2, l'ajout de ce polymère au bitume augmente son point de ramollissement.

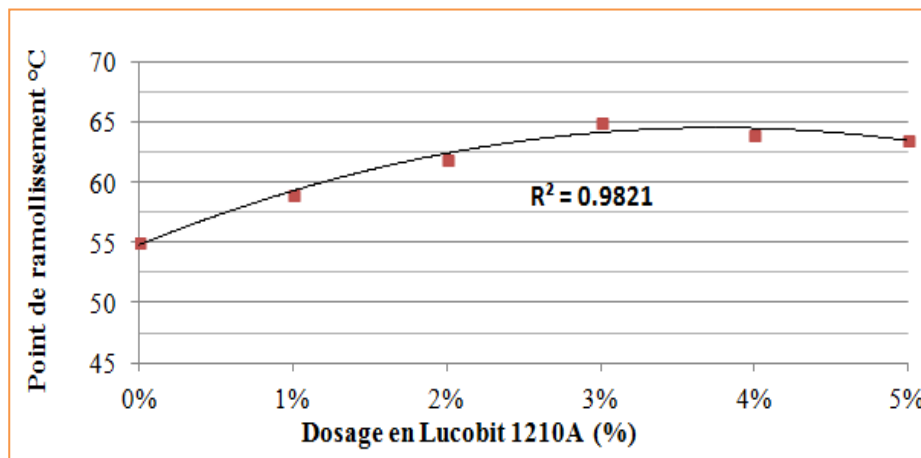


Figure IV.3 : Influence de la teneur en Lucobit sur le ramollissement du bitume

La figure IV.2 montre clairement le point de ramollissement du polymère. L'asphalte a une consistance différente de celle de l'asphalte modifié. Ces valeurs élevées indiquent que l'ajout de polymère Lucobit rend le matériau plus rigide et que la liaison maintient la même déformation accrue. Sur le côté pratique, une teneur en polymère de 3% semble la meilleure.

De plus, la valeur du coefficient de corrélation qui est supérieur à 0,98 reflète une très bonne corrélation entre les résultats.

Les résultats des valeurs de pénétration du bitume modifié sont présentés sur la figure IV.3, celles-ci montrent clairement l'augmentation de la dureté du bitume avec l'augmentation du pourcentage en polymère.

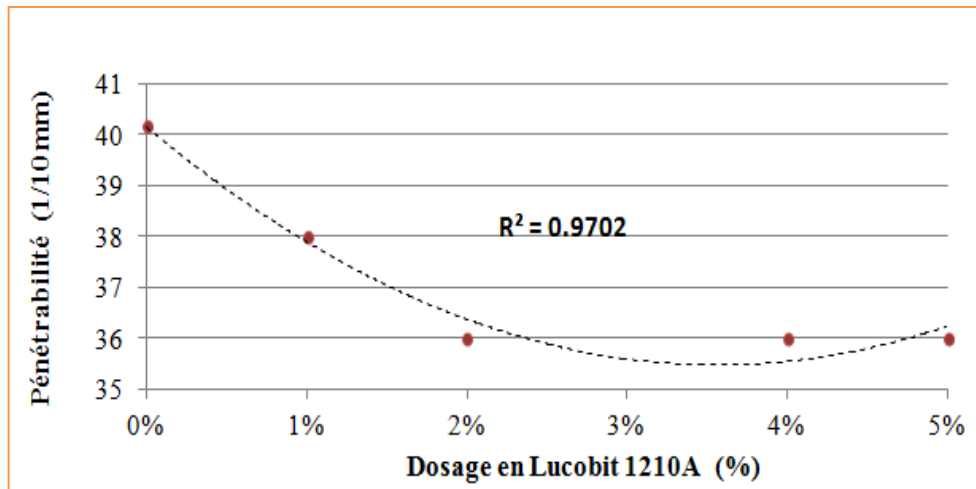


Figure IV. 4 : Influence de la teneur en Lucobit sur la pénétration du bitume

Les pénétrabilités s'améliorent à mesure que le dosage en polymère croît notamment dans l'intervalle 3-4%. Cela montre que la modification réduit la sensibilité thermique du bitume.

Le tableau IV.1 résume les caractéristiques majeures du bitume modifié avec 3%.

Tableau IV. 1: Caractéristiques techniques du bitume modifié à 3% de Lucobit

Caractéristiques techniques	Unité	Bitume modifié	normatives
Densité (23 °C)	g/cm ³	1.01	1,1 - 1,0
Pénétration	mm	37	25 - 55
Point de ramollissement	°C	65	>= 55

IV.4 PREPARATION DES MELANGES BB

Pour les mélanges on a adopté un pourcentage en bitume précédemment obtenu (teneur en bitume optimale **5.91%**) avec ajout de 3% Lucobit1210A en gardant toutes les compositions des autres granulats constantes.

Deux mélanges ont été confectionnés, il s'agit du mélange témoin avec le bitume pur et le mélange avec le bitume modifié. Le tableau IV.2 montre les pourcentages de répartition des éléments dans le mélange bitumineux.

Tableau IV.2 : Composition globale du mélange BB avec modificateur de bitume

Fraction	Dosage apparent (%)	dosage réel (%)	Mva (g/cm ³)
sable 0/3	34	32.06	2.65
gravier 3/8	30	28.28	2.74
gravier 8/15	36	33.94	2.76
bitume 40/50	5.61	5.55	1.04
Lucobit 1210 A	3	2.8	0.97

IV.5 PROCEDURE D'AJOUT DE SABLES DE DUNES

L'ajout de sable de dunes s'est fait selon les pourcentages : 5, 10, 15 et 20% par rapport au sable concassé (0/3), sans changement dans les autres fractions. La teneur en bitume modifié varie légèrement selon le pourcentage en sable de dunes.

Cinq (5) formules de BB avec différents pourcentages de sable de dunes désignées respectivement par BBL, BBL10SD, BBL15SD, BB et 20SD ont été préparées.

Le tableau IV.3 donne le pourcentage de chaque constituant pour les différentes formules testées.

Tableau IV. 3: Combinaisons des formules étudiées.

Composition	BB	BBL	BBL5SD	BBL10SD	BBL0SD	BBL20SD
Sable de dunes (%)	0	0	5	10	15	20
Sable 0/3 (%)	34	34	29	24	19	14
Gravier 3/8 (%)	30	30	30	30	30	30
Gravier 8/15 (%)	36	36	36	36	36	36
Bitume 40/50 (%)	5.91	5.61	5.61	5.61	5.61	5.61
Lucobit 1210A (%)	0	3	3	3	3	3

La figure IV.4 donne les courbes granulométriques relatives chaque mélange

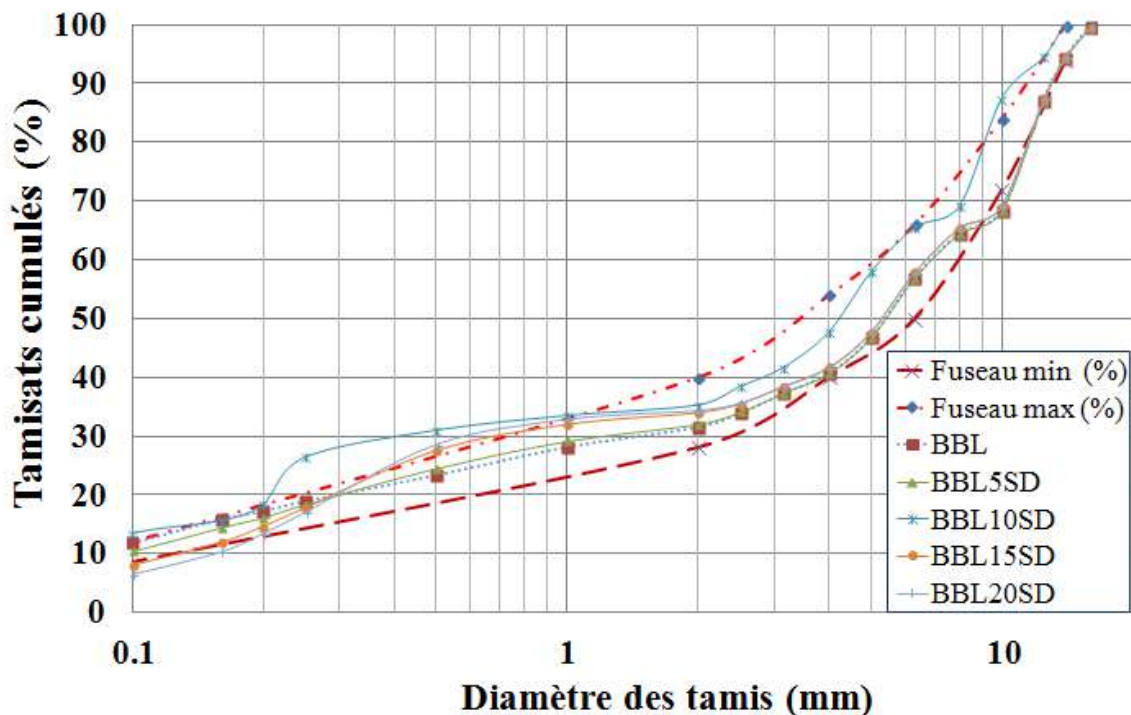


Figure IV. 5: Courbes granulométriques des différents mélanges

À partir de la figure IV.4, on remarque que les courbes granulométriques relatives aux pourcentages de sable 15 et 20% s'intègrent parfaitement dans le fuseau de référence, ce qui conduit à prendre la teneur 20% de sable de dune comme optimale.

IV.6 DETERMINATION DES PERFORMANCES DES MELANGES

IV.6.1 Essai Marshall

Les essais Marshall ont été réalisés conformément à la norme française (NF EN 12697-34+A1). Chaque valeur a fait l'objet de trois (03) mesures dont la valeur moyenne de chaque composition a été retenue.

Les résultats des essais Marshall pour les cinq formules (BBL, BBL5SD, BBL10SD, BBL15SD et BBL20SD), ainsi que les résultats relatifs à la formule témoin (BB sans sable dunaire), sont présentés dans le tableau IV.5.



Figure IV. 6 : Éprouvettes de l'essai Marshall

Tableau IV. 4: Résultats des essais Marshall

	BB	Teneur en sable de dune SD (%)				
		BBL	BBL5SD	BBL10SD	BBL15SD	BBL20SD
		0.00	5.00	10.00	15.00	20.00
Compacité (%)	93.12	91.31	92.84	90.17	89.78	89.14
Densité apparente (g/cm ³)	2.30	2.28	2.33	2.24	2.26	2.26
Stabilité Marshall (KN)	15.40	16.49	14.54	13.99	13.63	10.37
Fluage Marshall (mm)	3.21	2.11	2.32	2.76	3.09	4.03
MVR (g/cm ³)	2.49	2.50	2.51	2.52	2.53	2.53

IV.6.1.1 Densité apparente et Absolue

La densité absolue et apparente varie en fonction des différents dosages du SD pour chaque mélange, comme illustré dans la figure VI.6 :

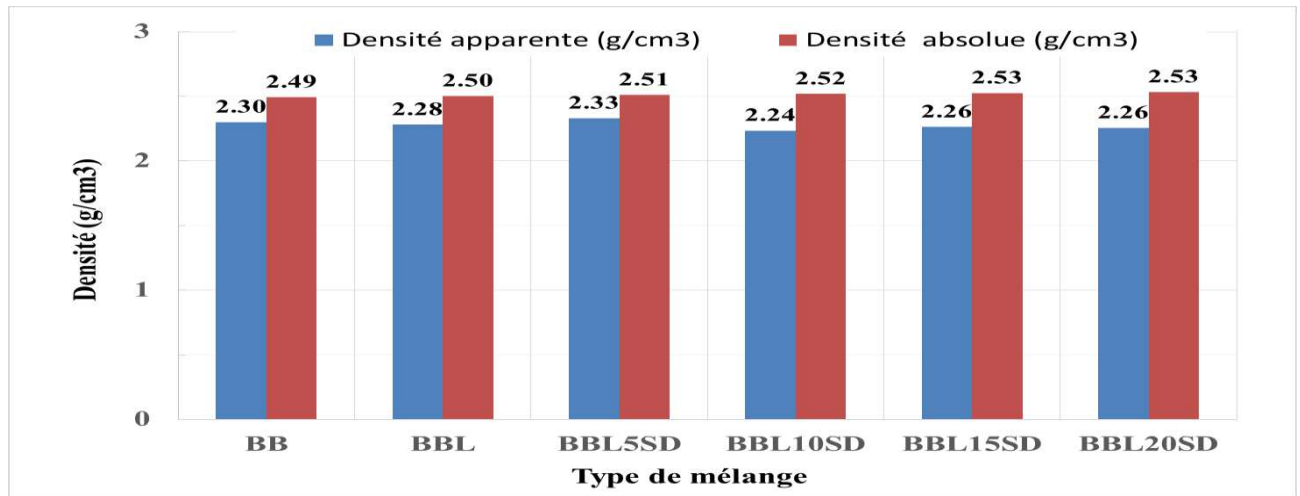


Figure IV. 7 : Variation des densités selon les dosages en sable de dunes

On remarque que les densités des bétons bitumineux avec les sable de dunes dans les bétons bitumineux ordinaires est quasiment constante en fonction de la différence de sable de dunes malgré la modification du bitume avec l'additif Lucobit 1210A. Par conséquent, nous ne pouvons pas évaluer l'ajout de sable de dunes sur la densité du mélange car la quantité ajoutée influe l'égerment.

IV.6.1.2 Pourcentage des vides

La Figure IV.7 présente la variation de pourcentage de vide en fonction des différents dosages du SD pour chaque mélange :

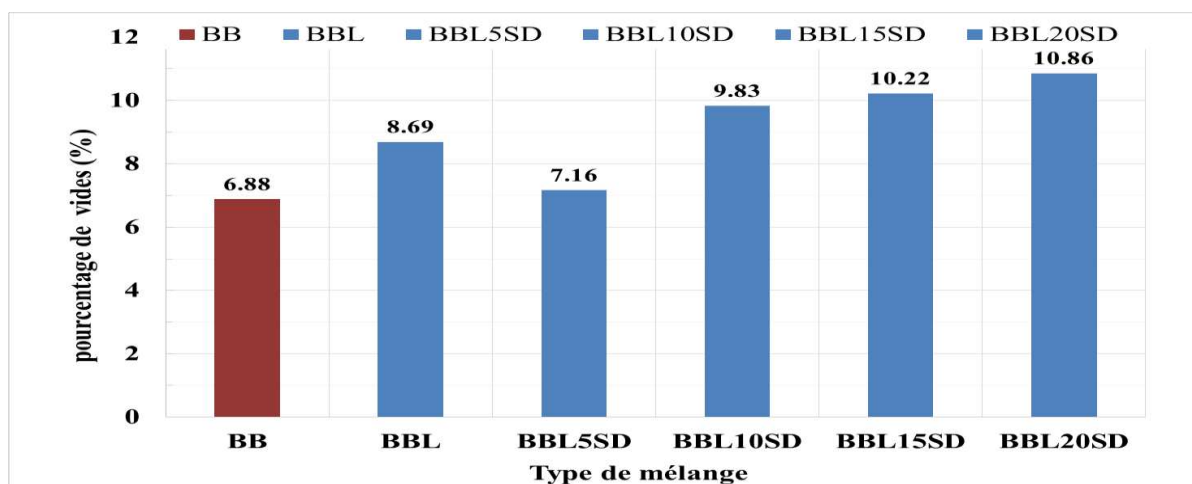


Figure IV. 8: Variation de vide pour les différents mélanges

D'après la figure IV.7, on peut conclure que l'ajout de sable de dunes jusqu'à 20% du gravier 0/3 augmente le pourcentage en vide de l'ordre de 17%, l'effet du

taux de bitume n'apparaît pas clairement dans les résultats car son effet sur les performances rhéologiques est minime.

IV.6.1.3 La compacité

Les compacités des différents mélanges selon le pourcentage en sable de dunes sont représentées en figure IV.8. Celles-ci montrent que la variation de la compacité n'est pas la meilleure valeur observée sur la figure est de 93,12% dans le mélange ordinaire, tandis que la stabilité de la compacité avec des doses croissantes de sable des dunes apparaît clairement dans toutes les valeurs, avec une légère variation dans certaines valeurs. La valeur la plus faible était de 89,14 en BBL20SD avec un pourcentage de sable de 20%.

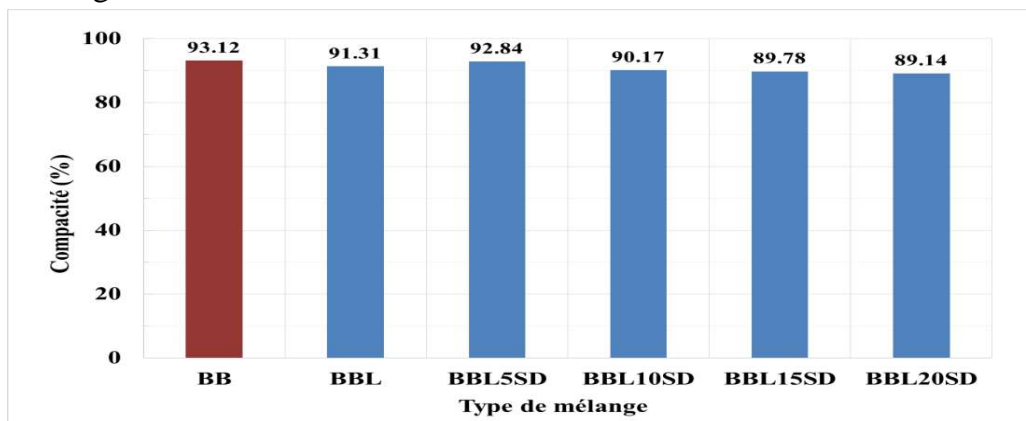


Figure IV. 9 : Variation de la compacité pour différents mélanges

IV.6.1.4 Stabilité Marshall et le Fluage

IV.6.1.4.1 Stabilité Marshall (SM) :

La figure suivante présente la variation de la stabilité Marshall en fonction du dosage de sable de dunes pour chaque mélange et bitume modifié :

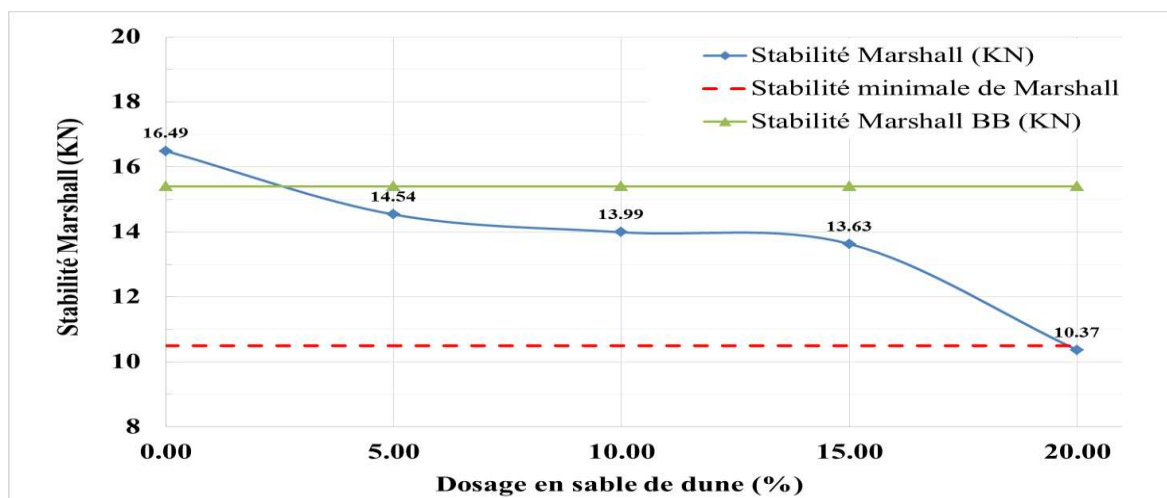


Figure IV. 10 : Variation de la stabilité en fonction de la teneur en sable de dunes SD

Sur la base des résultats Marshall obtenus, on peut dire :

- La stabilité Marshall du BB témoin (BBL) qui est de 15,40 KN est la plus importante parmi les stabilités.
- La stabilité la plus faible est enregistrée à la teneur en sable de dunes la plus importante qui est de 20%.
- À mesure que le pourcentage en sable de dunes augmente, la stabilité diminue, allant de plus 16 KN pour le béton témoin à 10KN.

En général, l'ajout de Lucobit 1210A au bitume de base n'a pas d'effet significatif sur la stabilité, par conséquent, l'ajout de pourcentages élevés de sable de dune (10%, 15% et 20%) a un impact négatif sur la stabilité et l'écoulement.

A cet effet, le pourcentage optimal de sable de dunes donnant les meilleures performances mécaniques est estimé à 5%. L'ajout de Lucobit 1210A semble améliorer la stabilité dans une certaine mesure mais n'a pas un impact significatif sur le comportement à l'écoulement.

Le remplacement d'une quantité granulats fins par du sable de dunes ne modifie pas de manière significative les normes Marshall. Au-delà de 20%, la diminution des résultats Marshall est significative. [99]

IV.6.1.4.2 Fluage Marshall

La figure IV.10 présente la variation du Fluage Marshall (FM) des spécimens en fonction de la variation du pourcentage de sable dunaire pour chaque mélange.

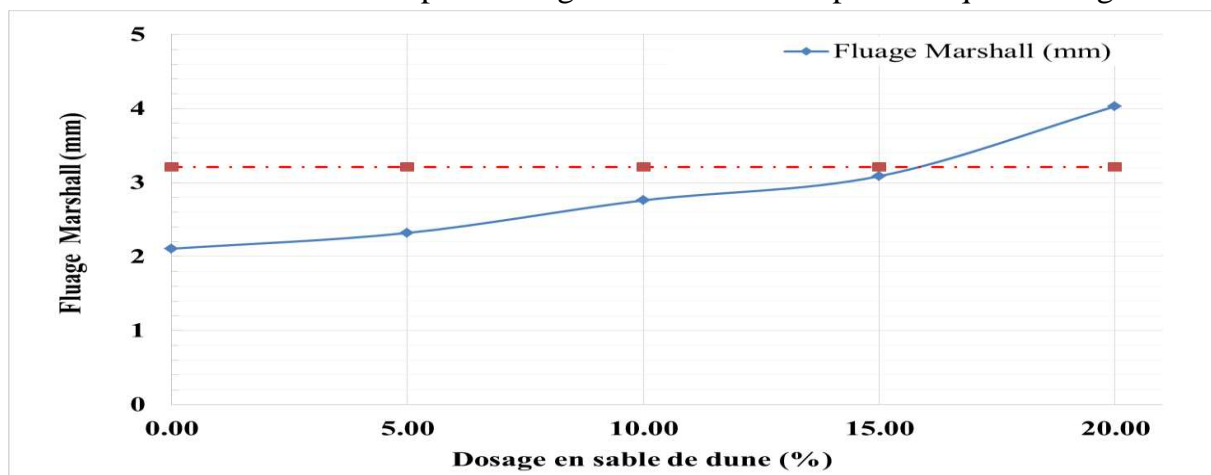


Figure IV. 11 : Variation du fluage en fonction de la teneur en sable de dune SD

À partir de la figure IV.10, ce qui suit peut être observé est :

- Le béton bitumineux avec Lucobit 1210A ni sable de dunes BBL, présente un fluage de 3,21 mm. L'ajout de 5% de sable de dunes dans le BBL5SD entraîne une valeur d'écoulement réduite de 2,10 mm, indiquant une meilleure résistance à la déformation. Cependant, la nouvelle augmentation du pourcentage de sable des

dunes dans BBL10SD, BBL15SD et BBL20SD entraîne une augmentation des valeurs de débit de 2,32 mm, 2,76 mm et 4,03 mm, respectivement.

Cela signifie que l'incorporation de Lucobit 1210A et l'utilisation de jusqu'à 15 % de sable de dunes dans le mélange peuvent améliorer les propriétés d'écoulement de l'asphalte, ce qui se traduit par une meilleure maniabilité pendant la construction. Un écoulement amélioré peut faciliter la mise en place et le compactage de l'asphalte, réduisant potentiellement le temps et les ressources nécessaires à la construction de la route. Par conséquent, l'utilisation du Lucobit 1210A avec un pourcentage optimal de sable de dunes peut contribuer à des économies de coûts dans les projets de construction routière. Le débit augmente à chaque fois que la quantité de sable dans les dunes augmente. C'est un résultat logique et prévu car la quantité de visqueux dans le mélange a augmenté, comme le montre la figure IV.10. Cependant, il est important de noter que tous les résultats obtenus restent conformes aux normes ASTM D6927. Ces résultats montrent que le polymère utilisé contribue à améliorer les performances du mélange en affectant le bitume et les granulats [100-101].

IV.6.1.4.3 Quotient Marshall (Q_m)

le quotient Marshall donne une indication de la capacité d'un mélange d'enrobés bitumineux à résister aux contraintes et aux déformations sous charge. Plus le quotient Marshall est élevé, plus le mélange est considéré comme stable et résistant. Ce paramètre est largement utilisé dans l'industrie routière pour évaluer la qualité des mélanges d'enrobés bitumineux et pour garantir des performances adéquates des revêtements de chaussées.

Le Quotient Marshall (Q_m) est le rapport entre deux grandeurs (SM/FM) et fournit une indication directe sur la performance du mélange :

$$Q_m = (SM/FM)$$

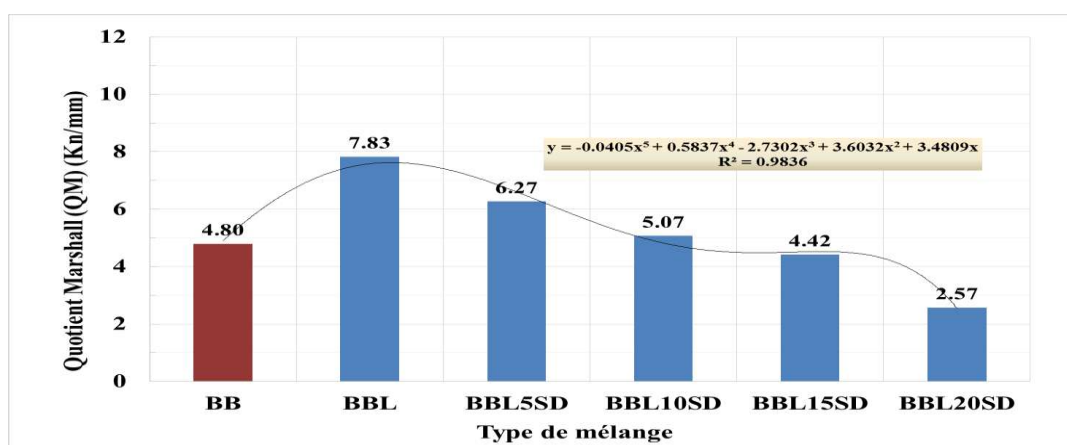


Figure IV. 12 : Variation du Quotient Marshall selon les teneurs en sable

La figure IV.11 montre le quotient de Marshall (Q_m) pour chacun des échantillons de BB, le mélange de bitume modifié au de sable de dunes, de BB modifié et de proportions variables de sable de dunes.

Le remplacement de gravier 0/3 par des proportions de sable de dunes SD. Dans le mélange semble entraîner un Q_m inférieur. Par rapport au mélange normal de BB, nous notons que le facteur Q_m a diminué de 7,83 kN/mm en baril à 2,75 kN/mm à un rapport de sable de 20%. La diminution plus faible des valeurs Q_m pour les mélanges de barils avec des rapports de sable pourrait être due au débit élevé qu'ils provoquent. Le mouvement des grains de sable pendant l'essai en raison de leur faible frottement, ce qui affaiblit leur valeur et leur valeur de stabilité.

Comme l'a souligné Nishant et al. [102- 103], les mélanges de revêtement avec des valeurs Q_m comprises entre 2 et 5 kN/mm indiquent des résistances satisfaisantes à la déformation et au fluage.

Pendant, les mélanges contenant jusqu'à 3% de teneur en Lucobit ont des valeurs Q_m supérieures à 2,0 KN/mm. Cela indique que ces mélanges ont la capacité de résister à l'orniérage et à la déformation par fluage similaire à celle des mélanges courants ordinaires, bien que ces mélanges aient une stabilité Marshall inférieure à celle des mélanges de référence.

IV.6.1.5 Performances rhéologiques à travers la stabilité Marshall

Avec les résultats Marshall précédents liés à la densité, à la compacité, à l'indice de vide, à la stabilité et au fluage, nous pouvons résumer tous les résultats pour suivre les performances rhéologiques du béton lors de l'ajout de sable de dunes et de modification du bitume.

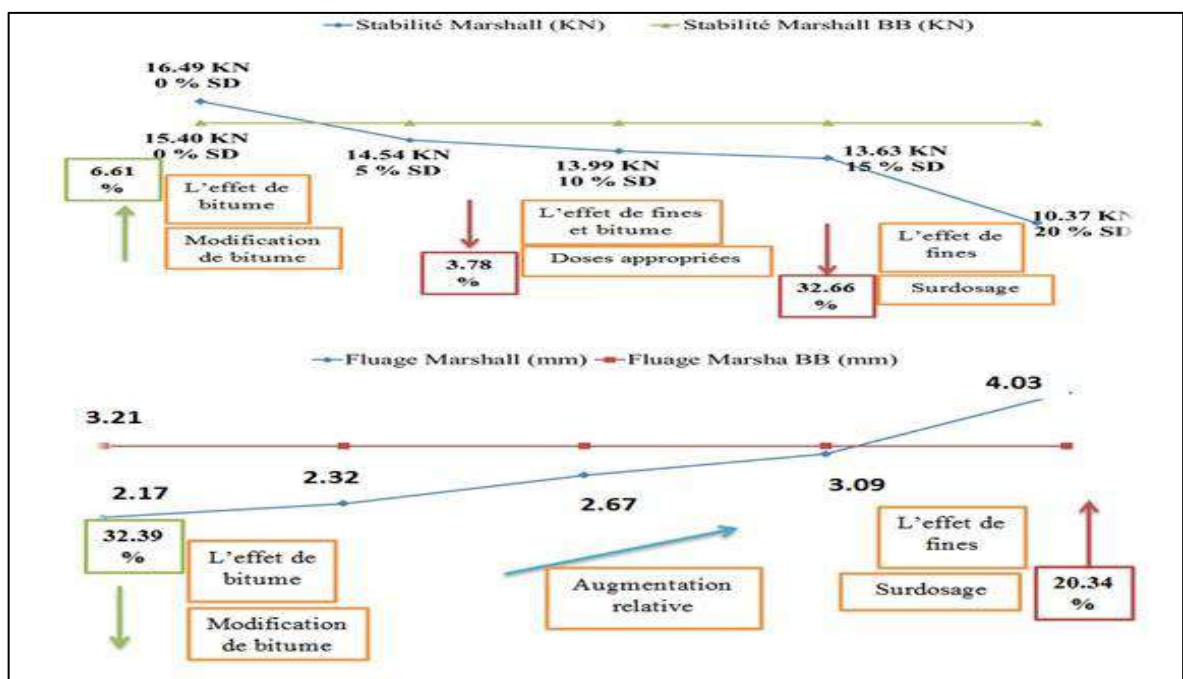


Figure IV. 13 : Variation de la stabilité et du fluage en fonction de l'effet des SD

Il ressort de la figure IV.12 que le sable dunaire contenant du bitume modifié est moins stable que l'enduit de référence (à partir de 5% de sable dunaire).

La meilleure stabilité a été enregistrée avec un pourcentage de sable des dunes de 15%, puis à mesure que le pourcentage de sable augmente, la stabilité diminue en raison du manque de liaison entre le sable des dunes et le bitume.

Concernant le fluage, l'effet du grenat sur la modification du bitume dans les sables dunaires de 0% à 15% est dû à la diminution du pourcentage de fines (pourcentage de bitume modifié par Lucobit). Une poudre fine suffit, ce qui entraîne une réduction du mastic bitumineux.

Pour l'intervalle 15-20 % de teneur en sable dunaire, l'augmentation du fluage est due à une augmentation de la fraction volumique de sable dans le mélange (excès de sable dunaire), réduisant ainsi l'adhésion.

IV.6.2 Essai Duriez

Nous avons réalisé des essais Duriez selon la norme française (NF EN 12697-12). Ces essais reposent sur la mesure de la résistance à la compression d'échantillons sans les immerger dans l'eau avec d'autres échantillons immergés dans l'eau pendant une durée de 7 jours. Il s'agit de différents échantillons de mélanges bitumineux qui contiennent des compositions différentes de sable de 0 à 20%. Chaque type a été soumis à trois (03) tests, dont a été extraite la valeur moyenne de chaque groupe.

Les résultats Duriez pour les cinq formules avec différentes concentrations de sable dunaire, ainsi que les résultats de la formule témoin (BB sans sable de dune) sont présentés en tableau IV.5 suivi des valeurs de résistance à la compression et du rapport d'air

Tableau IV. 5: Résultats Duriez

	BB	BBL	BBL5SD	BBL10SD	BBL15SD	BBL20SD
		Teneur de sable de dune SD (%)				
		0,00	5,00	10,00	15,00	20,00
Résistance de compression à l'air R (kg/cm ²)	137,40	130,48	128,30	126,50	122,02	120,05
Résistance de compression à l'eau (r) (kg/cm ²)	117,00	107,00	106,67	107,00	101,67	94,85
Tenue à l'eau (r/R)	0,85	0,82	0,83	0,85	0,83	0,79
Densité apparente (g/cm ³)	2,328	2,293	2,293	2,295	2,261	2,266
Compacité (%)	93,347	92,437	92,437	92,696	92,696	91,962

IV.6.2.1 Résistance à la compression

Les résultats de Résistance à la compression obtenus pour les cinq formules ainsi que pour le béton témoin (BB sans sable dunaire) sont repris dans les Figure IV.13 et Figure IV.14.

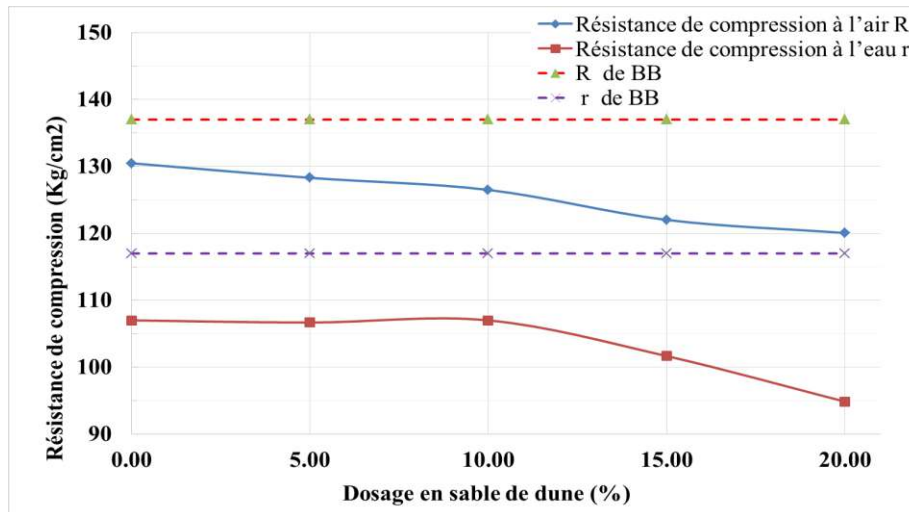


Figure IV.14 : Résistance à la compression en fonction de la teneur en sable de dunes

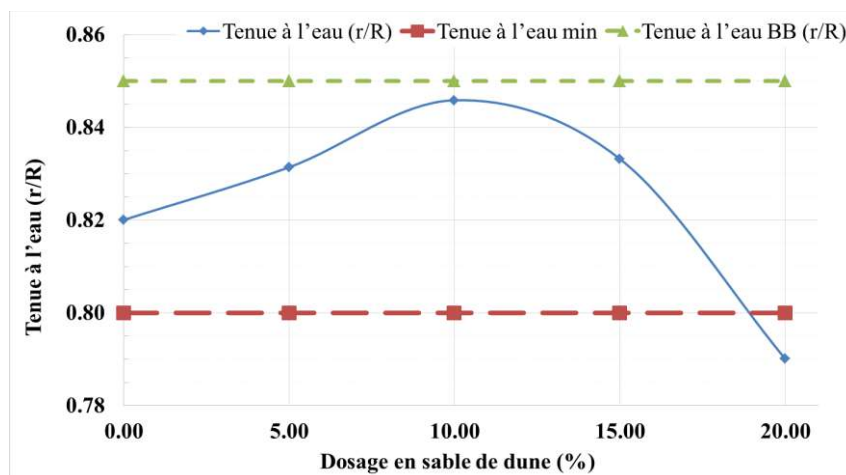


Figure IV. 15 : Rapport d'immersion r/R en fonction de la teneur en sable des dunes

Les essais de caractérisation mécanique Duriez des enrobés ont montré que l'ajout de sable de dunes modifie les performances tout en restant dans les exigences normatives algériennes. Les résultats ont été acceptables dans une large mesure concernant le Tableau IV.5 et les valeurs plus faibles pour les matières sèches et immergées (respectivement 120,05 et 94,85 kg/cm²). De plus, le bitume modifié a eu un impact significatif sur ces résultats, ce qui est en concordance avec d'autres recherches[8,104] qui avancent que l'ajout de seulement 10% de sable de dunes améliore la résistance à l'eau et le comportement en compression.

De la même manière, en ce qui concerne la résistance à l'eau définie par le rapport immersion/compression, elle montre une amélioration prometteuse allant jusqu'à 20% en ajoutant du sable de dune, comme illustré dans la Figure IV.13. Cela peut être expliqué par le fait que l'incorporation de sable à ces taux permet de diminuer les vides tout en augmentant la densité réelle de l'enrobé bitumineux. En dépassant cette limite (20% du sable des dunes), l'impact devient défavorable et les performances mécaniques ont tendance à se dégrader.

Généralement, l'augmentation des pourcentages de sable de dunes seul affecte négativement les performances rhéologiques des enrobés bitumineux (Marshall et Duriez), ceci est dû à l'absence de frottement inter granulaire dû à la forme circulaire des grains. Cela a été prouvé par de nombreux chercheurs [105-106].

IV.6.2.2 Pourcentage des vides

La figure IV.15 présente la variation de pourcentage de vide en fonction des différents dosages du SD selon chaque mélange.

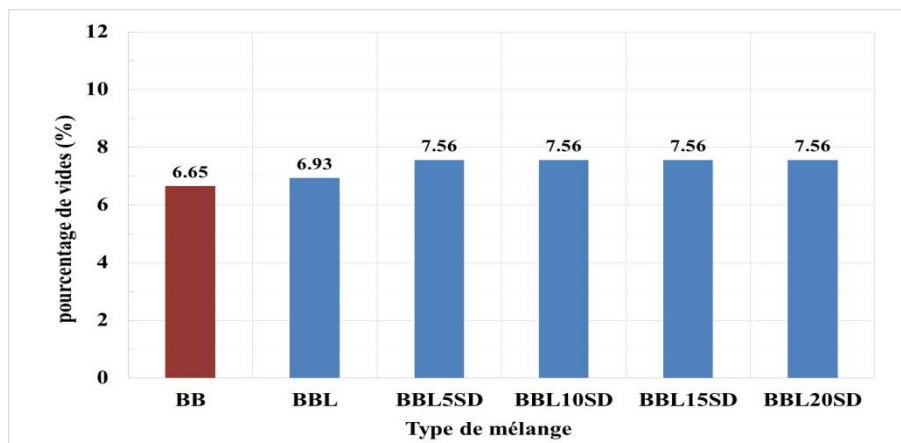


Figure IV. 16 : la variation de pourcentage de vide

Nous avons remarqué une régularité dans les valeurs optimales de l'indice de vide pour les cinq mélanges par rapport au mélange de référence. Même comparé à l'enrobé de référence, l'enrobé BBL est le meilleur mais presque négligeable.

IV.6.2.3 Performances rhéologiques à travers l'essai Duriez

Dans l'essai Duriez, les effets rhéologiques peuvent être observés via plusieurs paramètres mesurés, tels que la résistance à la pression à l'air et dans l'eau, la résistance à l'eau (rapport r/R), la densité apparente et la compacité. Ces mesures évaluent la capacité d'un mélange bitumineux à résister aux contraintes mécaniques et à maintenir ses propriétés structurelles dans des conditions spécifiques.

En analysant les résultats Duriez, il est possible d'observer comment l'incorporation de différentes concentrations de sable de dune affecte la résistance à la compression de l'enrobé. Les changements dans la résistance à la compression de

l'air et de l'eau peuvent indiquer comment le sable des dunes modifie les propriétés du mélange, notamment en termes de cohésion et de résistance aux contraintes.

De plus, le paramètre de résistance à l'eau (r/R) peut fournir des informations sur la capacité d'un mélange à conserver sa résistance à la compression après exposition à l'eau, ce qui est crucial pour évaluer la durabilité des matériaux dans différentes conditions environnementales.

IV.6.3 Essai d'Orniérage

IV.6.3.1 Exécution de l'essai

L'essai d'orniérage a été réalisé conformément à la norme NF EN 12697-22+A1.

Les conditions de réalisation de l'essai d'orniérage sont les suivantes ;

- Dimensions des échantillons : L500x1180xH100mm.
- Température de l'essai : 60 °C.
- Pression de gonflage des pneus : 0,6 Mpa
- Charge de la roue/ 5000 N.

La pression du moule d'essai a été contrôlée à l'aide d'un manomètre, qui a atteint 98% de la pression requise.

La norme française précise un nombre de 30000 cycles avec un taux de déformation inférieur ou égal à 5%. Les résultats des tests pour tous les échantillons sont reportés en Figure IV.16 et Figure IV.17.



Figure IV. 17 : Mesure de la profondeur d'orniérage

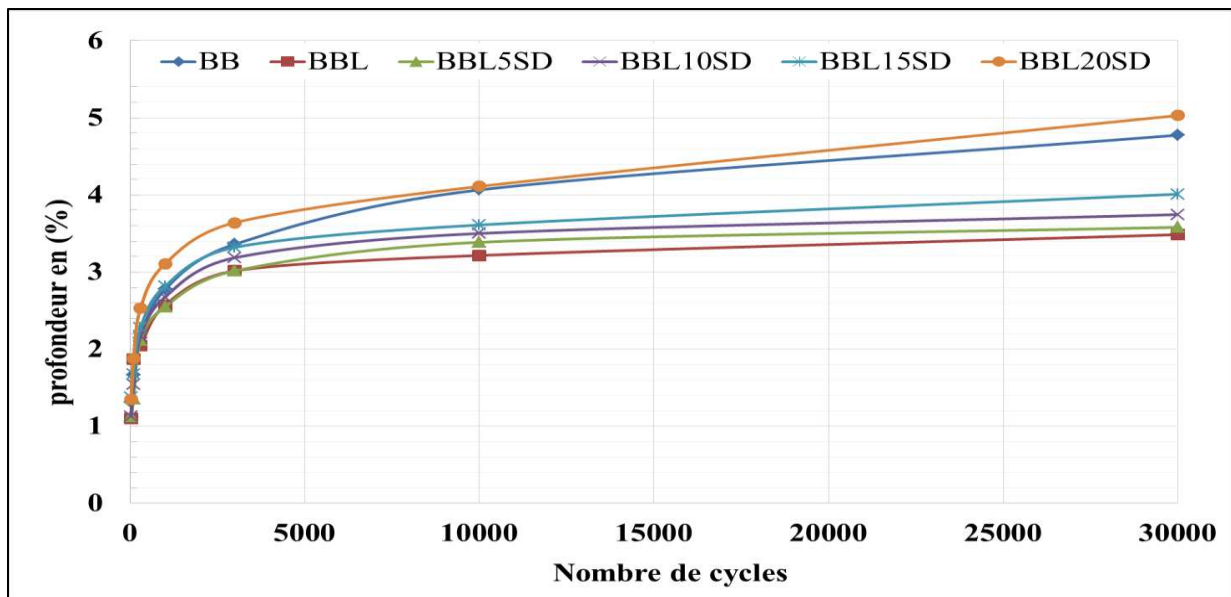


Figure IV. 18 : Le pourcentage d'orniérage en fonction du nombre de cycles (moyennes)

L'essai d'orniérage a évalué les performances de six mélanges d'asphalte avec différentes concentrations de sable de dunes. Les résultats ont indiqué que le taux d'orniérage augmente généralement avec le nombre de cycles pour tous les échantillons. Cependant, la spécification acceptable pour le taux d'orniérage à 30000 cycles était $\leq 5\%$. Voici un résumé des résultats :

- BB (0% Lucobit 1210A) : Le taux d'orniérage s'est rapproché de la spécification acceptable à 30 000 cycles, indiquant de mauvaises performances.
- BBL (3% Lucobit 1210A) : Le taux d'orniérage à 30 000 cycles répondait aux spécifications acceptables, suggérant des performances améliorées par rapport au BB.
- BBL5SD, BBL10SD, BBL15SD et BBL20SD (3% de Lucobit 1210A avec une teneur croissante en sable de dunes) : ces échantillons ont démontré des taux d'orniérage à 30 000 cycles qui se situaient dans les spécifications acceptables.

Parmi les échantillons contenant du sable de dunes, le BBL10SD (10% de sable de dunes) a donné les meilleures performances, répondant aux spécifications acceptables à 30 000 cycles.

Les résultats démontrent clairement que les mélanges bitumineux contenant des doses de 5%, 10% et 15% de sable de dune présentent une profondeur d'orniérage inférieure à celle du bitume ordinaire, ce qui indique une déformation réduite et une résistance accrue. Cette résistance accrue à l'orniérage a été documentée dans diverses sources telles que [107-109]. Il convient toutefois de noter qu'une dose excessive de sable a un impact négatif sur la résistance de béton bitumineux à la fissuration. Des doses plus élevées de sable de dunes de haute qualité sont plus sujettes au fluage, attribué à la forme de grains de sable circulaires avec un

frottement minimal, qui amplifie le fluage du mélange. Ce phénomène est évident dans le cas d'une dose de 20 % de sable de dune.

Pour visualiser le contraste entre le bitume ordinaire et le bitume modifié avec ajout de sable de dune, se référer aux Figure IV.18 et IV.19.

En résumé, les résultats soulignent que des doses spécifiques de sable de dunes, en combinaison avec Lucobit 1210A, peuvent améliorer la résistance à l'orniérage et les performances globales du mélange bitumineux. Cependant, des doses excessives de sable doivent être évitées pour éviter des effets néfastes sur la résistance à la fissuration de l'adjuvant.

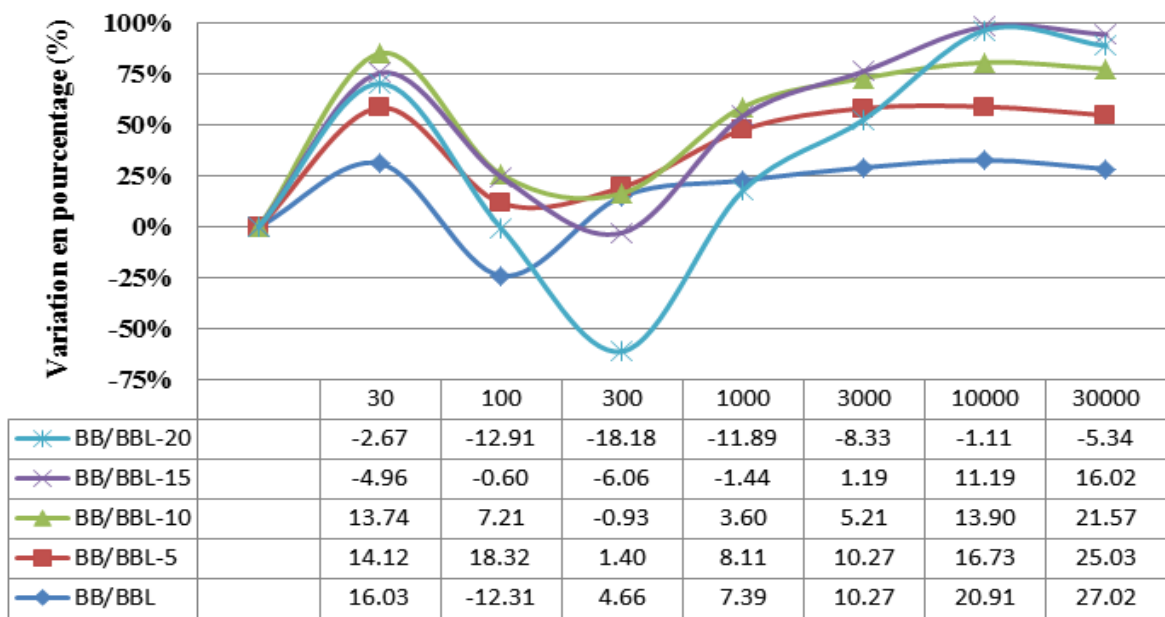


Figure IV. 19 : variation le taux d'orniérage par rapport au béton ordinaire

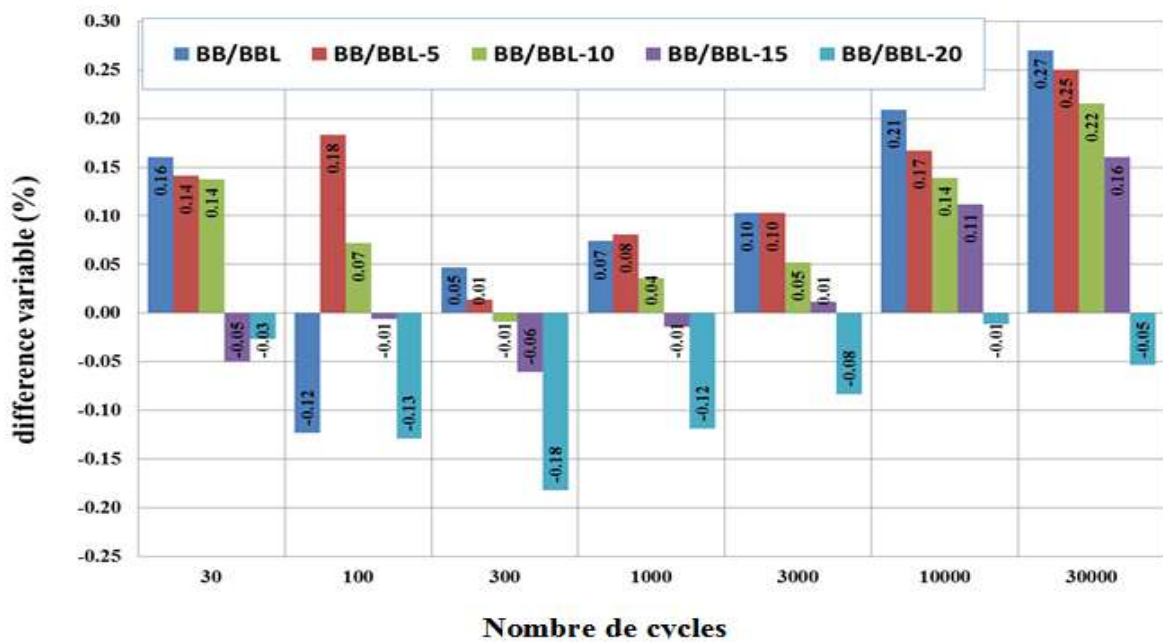


Figure IV. 20 : Valeurs d'orniérage par rapport au bitume ordinaire

Les résultats obtenus lors des essais d'orniérage indiquent des améliorations significatives de la résistance à l'orniérage avec l'ajout de 3% de Lucobit 1210A aux mélanges bitumineux. Par rapport au BB ordinaire (considéré comme seuil normatif), la profondeur de l'orniérage diminue d'environ 27% à 30 000 cycles pour BB + 3% Lucobit. Celle-ci diminue d'environ 17% à 15% de sable de dunes.

Les effets de teneurs en sables de dunes varient, un pourcentage plus élevé de sable de dunes entraîne des profondeurs d'orniérage plus faibles par rapport au BB ordinaire[110].

Il est important de noter qu'une dose excessive en sable affecte négativement la résistance du mélange à la fissuration en raison d'un fluage accru. Ceci est particulièrement évident avec des doses en sables supérieures à 20%.

Parmi les échantillons testés, le BBL-10, a présenté les meilleures performances en termes de taux d'orniérage à 30 000 cycles. Cela suggère qu'une proportion spécifique de sable de dune, ainsi que 3 % de Lucobit 1210A, peuvent contribuer à améliorer la résistance à l'orniérage.

En conclusion, ces résultats ont des implications pratiques pour la construction de routes, car ils peuvent guider la sélection de mélanges d'asphalte avec des proportions appropriées de sable de dunes et de Lucobit 1210A. En incorporant ces matériaux, la durabilité des routes et la résistance aux déformations de l'orniérage peuvent être améliorées.

IV.6.3.2 Performances rhéologiques à travers l'essai d'orniérage

Dans les essais d'orniérage, les effets rhéologiques sont observés en mesurant la résistance des enrobés bitumineux à la déformation sous des charges répétées simulant le trafic routier. Les résultats de ce test évaluent la capacité d'un matériau à résister à une déformation permanente et à conserver ses propriétés structurelles dans le temps.

En analysant les données des tests d'orniérage, l'effet de Lucobit 1210A et de sable de dunes sur la résistance à la déformation du mélange bitumineux peuvent être observés. La mesure de la profondeur des ornières sous différents cycles de charge permet d'évaluer la stabilité d'un matériau et sa capacité à conserver sa forme sous contraintes.

La réduction de la profondeur des ornières avec l'augmentation du nombre de cycles peut indiquer une augmentation de la capacité du matériau à résister à la déformation, ce qui est essentiel pour garantir la durabilité et la qualité de la chaussée.

IV.6.4 Essai PCG

Les différents échantillons d'asphalte ont été soumis au test PCG après préparation des éprouvettes cylindriques $\Phi 100\text{mm} \times H 150\text{mm}$. La température initiale du test est fixée à 150°C.

Conformément à la norme NF P 98 252, les échantillons ont subi plusieurs cycles ; 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60 et 80. Trois échantillons identiques ont été testés pour chaque nombre de cycles, la valeur moyenne est exprimée les valeurs moyennes ont été calculées à partir des résultats PCG.



Figure IV. 21 : Appareillage PCG : Moule d'éprouvette (a) et Machine de PCG (b)

IV.6.4.1 Pourcentage de vides

Les résultats du test, illustré à la figure IV.21, indiquent le pourcentage de vides pour chaque nombre de girations selon chaque mélange.

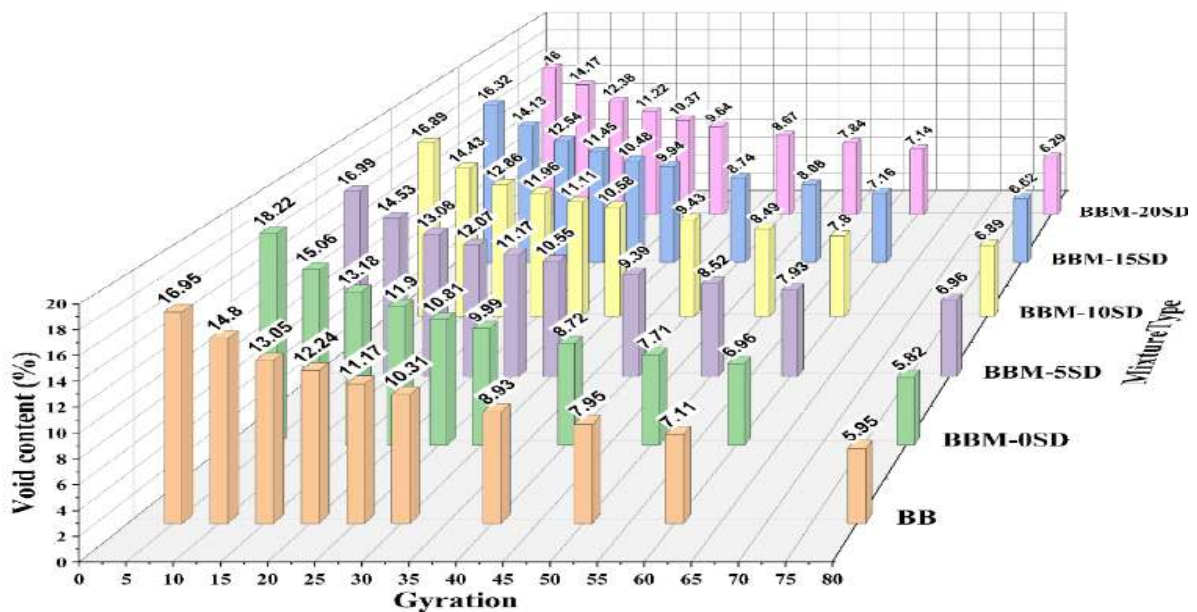


Figure IV. 22 : Variation du volume moyen des vides (PCG)

Pour analyser l'effet de la proportion de sable sur l'indice de vide et comparer l'échantillon BB avec les autres échantillons, on se réfère aux données de la figure IV.22. Les valeurs de l'indice de vide peuvent être comparées entre BB et les autres échantillons à chaque niveau de giration.

Pour examiner plus en détail les données, nous pouvons analyser les pourcentages d'indices de vide initial et final pour chaque échantillon, comme le montre la figure IV.22.

Les taux de vide finaux varient de 6% à 6,3% pour tous les échantillons, ce qui suggère que les différentes proportions de sable des dunes n'ont pas eu d'impact significatif sur les taux de vide finaux après 80 cycles. Cette faible influence peut être attribuée aux quantités relativement faibles de sable utilisées, qui n'étaient pas suffisamment importantes pour provoquer des variations notables.

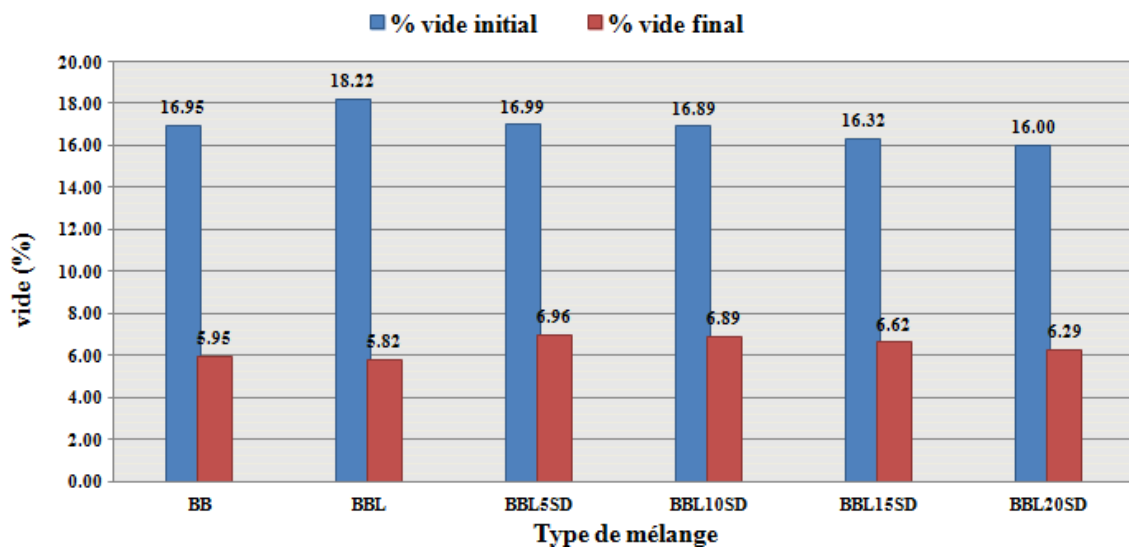


Figure IV. 23 : Pourcentage d'indice de vide initial et final

La figure IV.23 fournit une comparaison entre BB et les autres échantillons pour déterminer les différences. Il met en évidence l'effet de l'augmentation du pourcentage de sable des dunes. La différence en pourcentage entre BB et BBL a diminué de 1,27 % dans le cas initial à -0,95 % et a augmenté de -0,13 à 0,33 dans le cas final. Cependant, même avec ces changements, les variations des pourcentages de vides restent minimales. Cela indique que le changement dans les ratios de sable des dunes n'a pas affecté de manière significative les pourcentages de vides .[111-112]

En résumé, l'analyse des indices de vide montre que les différentes proportions de sable des dunes ont eu un impact limité sur les pourcentages de vide, les indices de vide finaux étant relativement similaires, ceci peut être attribué aux petites

quantités de sable utilisées, qui n'ont pas provoqué de variations substantielles des indices de vide.

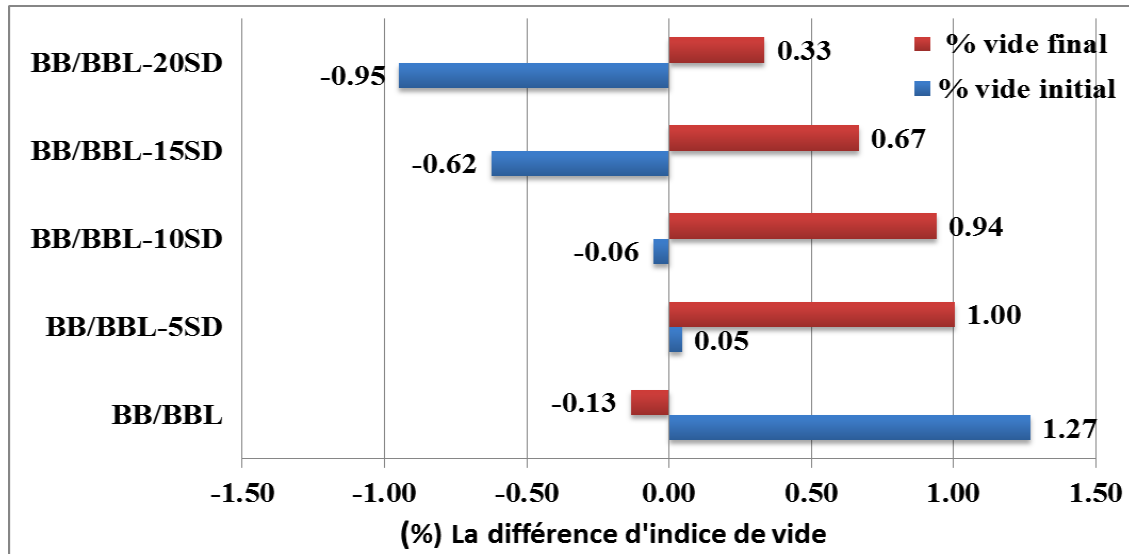


Figure IV. 24 : Différences de taux de vide (%)

IV.6.4.2 La compacité

Les compacités des différents échantillons pour chaque giration lors de l'essai PCG sont données en figure IV.24.

Note: nombre de giration dans la figure x1000

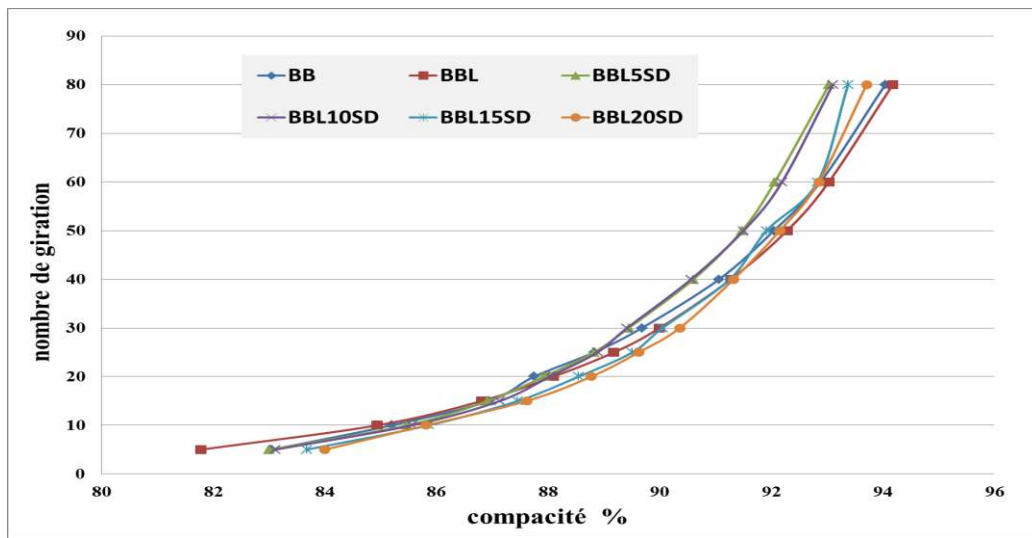


Figure IV. 25 : Evolution de nombre de girations en fonction de la compacité.

À partir de la figure IV.24, on peut avancer

- ✓ La superposition des courbes en début d'essai ne montre aucun changement dans le dosage du sable de dune modifié avec le bitume Lucobit 1210A. Cela

n'a pas d'effet significatif sur le taux d'énergie de compression de notre mélange.

- ✓ Mais progressivement cet effet devient important et affecte le taux de pression auquel on observe à la fin de l'essai la quantité d'énergie qui doit être appliquée à l'échantillon pour atteindre la densité requise.
- ✓ On remarque également que les courbes des mélanges contenant 15 et 20% de sable de dunes (BBL15SD, BBL20SD) sont les plus proches de La compacité était de 95 %, avec la compacité la plus faible aux doses de 5% et 10% SD.
- ✓ Nous n'avons pas non plus pu déterminer l'effet de l'additif au Lucobit 1210A à travers les résultats de densité en raison de la proximité des résultats d'une part et du léger changement par rapport au mélange ordinaire d'autre part

IV.6.4.3 Performances rhéologiques à travers l'essai PCG

Lors des essais PCG, les effets rhéologiques peuvent être observés en mesurant la cohésion des mélanges bitumineux. Ce test évalue la capacité d'un matériau à maintenir son intégrité structurelle sous pression en mesurant la force nécessaire pour séparer une goutte de matériau du reste de l'échantillon.

En analysant les résultats du test PCG, nous pouvons observer comment l'ajout de sable de dunes affecte l'adhérence du mélange bitumineux. Une augmentation de la cohésion peut indiquer une amélioration de la capacité du matériau à résister aux contraintes mécaniques et à maintenir son intégrité sous charge.

Les données de l'essai PCG permettent d'évaluer l'effet rhéologique du sable de dunes sur les propriétés de cohésion du mélange bitumineux, offrant des informations précieuses sur la résistance du matériau à la fissuration et à la déformation. Une cohésion accrue peut contribuer à améliorer la durabilité et la performance du revêtement routier dans des conditions de trafic variées.

IV.7 COMPARAISON ENTRE ENROBE ORDINAIRE ET MODIFIE

La comparaison entre l'enrobé bitumineux ordinaire (BB) et l'enrobé modifié au Lucobit 1210A en mettant l'accent sur le rôle du sable de dune, reflète plusieurs points clés pouvant être soulignés :

1- Stabilité et fluage

- ✓ l'ajout de sable de dunes au mélange d'un bitume modifié Lucobit 1210A a un impact significatif sur la stabilité du mélange. En raison du manque de liaison entre le sable des dunes et le bitume, la stabilité diminue à mesure que le pourcentage de sable des dunes augmente.
- ✓ Cependant, l'ajout de Lucobit 1210A et l'utilisation jusqu'à 15 % de sable de dunes ont montré une meilleure fluidité des mélanges d'un bitume modifiés par rapport aux mélanges ordinaire conventionnels. Cela pourrait faciliter la pose et le compactage de BB, réduisant potentiellement le temps et les ressources nécessaires à la construction des routes.

2- Résistance à l'orniérage

- ✓ L'ajout de sable de dunes, en combinaison avec Lucobit 1210A, a montré des performances améliorées en termes de résistance à l'orniérage par rapport aux enrobés bitumineux ordinaires. Des proportions spécifiques de sable de dunes ont contribué à réduire la profondeur de l'orniérage, indiquant une déformation réduite et une résistance accrue.

En résumé, l'ajout de sable de dunes dans les enrobés bitumineux modifiés par Lucobit 1210A a un impact significatif sur les propriétés mécaniques et rhéologiques des mélanges. Il peut améliorer la stabilité, l'écoulement et la résistance à l'orniérage, offrant ainsi des avantages potentiels pour la construction routière.

IV.8 CONCLUSION

A travers l'étude, les propriétés rhéologiques et mécaniques du BBL 0/14 ont été évaluées et comparées à travers des tests spécifiques sur des bétons bitumineux modifiés avec différentes formules. Ces essais comprennent des mesures de résistance à l'orniérage, de déformation, de stabilité et de fluage.

Les performances du BB 0/14 ont été comparées à celles de formulations contenant différentes proportions de sable de dunes, notamment BBL5SD, BBL10SD, BBL15SD et BBL20SD. Les résultats de ces essais ont permis de déterminer l'effet de l'ajout de sable de dune sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du béton bitumineux modifié.

L'analyse de ces données obtenues, les performances du BB 0/14 peuvent être comparées à celles des formulations modifiées pour déterminer les forces et les faiblesses de chaque composition en termes de résistance, de déformation, de stabilité et d'autres propriétés essentielles. Matériel.

Selon les résultats de la recherche, la teneur optimale de sable de dunes recommandée pour préparer le béton bitumineux ordinaire avec les meilleures performances est de 15%. Le mélange BBL-15SD contenant 15% de sable a montré la meilleure combinaison de stabilité et de fluidité parmi les différentes formulations testées. Cette proportion de sable de dune présente une résistance accrue à la déformation tout en conservant des propriétés mécaniques et rhéologiques satisfaisantes du béton bitumineux modifié.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les recherches sur l'utilisation du sable de dunes et du Lucobit 1210A dans les enrobés bitumineux ont montré que des proportions spécifiques de sable de dunes peuvent réduire la profondeur de l'ornièrre, augmentant ainsi la résistance du mélange. L'ajout de 3 % Lucobit 1210A et jusqu'à 15 % de sable de dunes améliore la fluidité des mélanges de bitume modifié par rapport aux mélanges conventionnels. Les échantillons d'essai contenaient jusqu'à 15% de sable de dunes, démontraient des performances satisfaisantes et répondaient aux normes de qualité.

Les essais mécaniques spécialisés, tels que les tests Marshall, d'ornièrage et PCG, sont essentiels pour évaluer et garantir la durabilité et la résistance à l'usure des chaussées flexibles. L'ajout de 10% de sable de dunes améliore significativement diverses caractéristiques du béton bitumineux, y compris la résistance au fluage, à l'eau et à l'air. Une réduction de 0,6 % de la teneur en bitume, combinée à l'ajout optimal de sable de dunes, permet des économies de coûts d'environ 15% tout en maintenant des propriétés mécaniques acceptables.

L'étude conclut que l'incorporation de sable de dunes et de Lucobit 1210A renforce la stabilité, l'écoulement et les performances globales des enrobés bitumineux. Ces résultats permettent de guider les efforts futurs vers l'amélioration des formulations des enrobés pour des performances supérieures et durables en construction routière, contribuant ainsi à une infrastructure routière de meilleure qualité et plus durable.

Sur la base des résultats obtenus, des efforts peuvent être dirigés vers l'amélioration des formulations des enrobés bitumineux pour atteindre une performance supérieure et durable dans la construction routière. Cette étude peut également servir de base pour des recherches futures visant à développer des matériaux de construction et à améliorer les techniques de construction pour garantir la durabilité environnementale et économique de l'industrie routière. Dans l'ensemble, cette étude représente une avancée significative dans le développement de techniques de construction routière plus efficaces et durables, contribuant à améliorer la qualité de l'infrastructure routière et à mieux répondre aux besoins des utilisateurs.

En conclusion, l'étude menée sur l'effet de l'ajout de sable de dunes sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des bétons bitumineux modifiés par Lucobit 1210A a montré que :

1. L'incorporation de différentes proportions de sable de dunes peut améliorer la stabilité et l'écoulement du mélange bitumineux.

2. La résistance du béton bitumineux aux fissures et à la corrosion a été améliorée avec l'ajout de Lucobit 1210A et des pourcentages spécifiques de sable de dunes.
3. Des économies de coûts peuvent être réalisées tout en améliorant les performances mécaniques des bétons bitumineux en remplaçant le sable traditionnel par du sable de dunes.
4. Dans le cadre de l'amélioration des performances des bétons bitumineux destinés aux applications routières, il s'avère nécessaire d'atteindre un équilibre optimal entre les propriétés mécaniques et rhéologiques. À cet effet, des investigations approfondies sont requises pour définir la composition idéale susceptible de garantir des performances mécaniques et fonctionnelles optimales.

RECOMMANDATIONS

Sur la base des conclusions tirées de l'étude sur l'effet de l'ajout de sable de dunes sur les bétons bitumineux modifiés par Lucobit 1210A, voici quelques recommandations :

1. Continuer à explorer les effets de différentes proportions de sable de dunes et de Lucobit 1210A sur les propriétés des bétons bitumineux pour optimiser les performances mécaniques et rhéologiques.
2. Réaliser des études approfondies pour déterminer la composition idéale des mélanges bitumineux en fonction des conditions spécifiques de chaque projet routier.
3. Mettre en place des essais mécaniques spécialisés réguliers pour évaluer la qualité des enrobés bitumineux et assurer une durabilité optimale des chaussées.
4. Collaborer avec des experts du domaine pour développer des normes et des recommandations spécifiques concernant l'utilisation de sable de dunes dans les bétons bitumineux.
5. Encourager la mise en œuvre de technologies innovantes pour améliorer la durabilité, la résistance et la performance des infrastructures routières à base de béton bitumineux.

Ces recommandations visent à optimiser l'utilisation du sable de dunes et du Lucobit 1210A dans les bétons bitumineux, en vue d'améliorer la qualité des routes et des chaussées tout en garantissant des économies de coûts et une durabilité accrue.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Djouhri, M., Bentebba, M.T., Kebaili, N. Influence des milieux de conservation sur les propriétés physico-mécaniques de béton de sable de dunes. 2019. (1).
2. Mohammad Reza Moghaddam Nayyeri, Yunus Niazi, Morteza Jalili Qazizade, A.M. The Effect of Dune Sands on Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Journal*. 2018. 1. Pp. 25–31. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2004.05.004. URL: <http://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1990/1269/1269-019.pdf>.
3. Saoula, S., Soudani, K., Haddadi, S. The optimization of the formulation of sand dunes for road use. *AIP Conference Proceedings*. 2013. 1569(April 2013). Pp. 216–219. DOI:10.1063/1.4849262.
4. Fatani, M.N., Sultan, H.A. Dune Sand-Aggregate Mixes and Dune Sand-Sulfur Mixes for Asphalt Concrete Pavements. *Transportation Research Record*. 1982. 843. Pp. 72–79.
5. Reza, M., Nayyeri, M., Niazi, Y., Jalili, M. L'effet des sables des dunes sur la déformation permanente Caractéristiques des mélanges d'asphalte. 2011. 1. Pp. 47–59.
6. Ghrieb, A., Mitiche-Kettab, R., Bali, A. Stabilization and utilization of dune sand in road engineering. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2012. 39(3). Pp. 1517–1529. DOI:10.1007/s13369-013-0721-z.
7. Akacem, M., Bouteldja, M., Cerezo, V., Hachichi, A. A method to use local low performances aggregates in asphalt pavements – An Algerian case study. *Construction and Building Materials*. 2016. 125. Pp. 290–298. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.08.035. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.035> (date of application: 24.03.2022).
8. SIALA, A., EL EUCH KHAY, S., NEJI, J., Gornet, L. Etude de l'apport de l'ajout du sable de dune et du fraisat routier sur le béton bitumineux. *Revue des composites et des matériaux avancés*. 2017. 27(1–2). Pp. 191–208. DOI:10.3166/rcma.27.191-208.
9. Berriache, A., Bensoula, M., Zaoui, M., & Kadri, T. (2023). Study and Valorization of a New Bituminous Concrete Based on Natural Dune Sand for Hot and Arid Environments. *The Journal of Engineering and Exact Sciences*, 9(12), 17791.
10. Neji, J., Siala, A., El Euch Khay, S., Loulizi, A. Reduction of Bitumen Content and Production Temperature of Hot-Mix Asphalt Incorporating RAP Using Dune Sand and Lime. *RILEM Bookseries*. 2020. 27. Pp. 1527–1533. DOI:10.1007/978-3-030-46455-4_194. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-46455-4_194 (date of

- application: 24.03.2022).
11. Almadwi, F.S., Assaf, G.J. Effects of asphalt binders on pavement mixtures using an optimal balance of desert sand. *Construction and Building Materials*. 2019. 220. Pp. 415–425. DOI:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.06.040.
 12. Neji, J., Siala, A., El Euch Khay, S., & Loulizi, A. (2022). Reduction of Bitumen Content and Production Temperature of Hot-Mix Asphalt Incorporating RAP Using Dune Sand and Lime. RILEM Book series, Proceedings of the RILEM International Symposium on Bituminous Materials, pp. 1527–1533.
 13. Lv, S., Ma, W., Zhao, Z., Guo, S. Improvement on the high-temperature stability and anti-aging performance of the rubberized asphalt binder with the Lucobit additive. *Construction and Building Materials*. 2021. 299(February). Pp. 124304. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.124304. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124304>.
 14. Khaki, A.M., Baladehi, S.H.S., Akbari, T., Enayati, A. The Investigation of the Impact of Lucobit Polymer on Bitumen Performance. *International Journal of Scientific Research in Knowledge*. 2013. 1(12). Pp. 570–579. DOI:10.12983/ijsrk-2013-p570-579.
 15. Bekhiti, M., Ghrieb, A., & Rebih, Z. (2023). *Valorisation du sable de dunes traité à la chaux et à la poudre de caoutchouc de pneus usagés comme matériau de fondation routière*. *Journal of Materials and Engineering Structures*, 10(1).
 16. Saci, A., Kebaili, N., & Zerrouki, M. (2024). Asphalt Mixture Performance through Dune Sand Incorporation and Lucobit 1210A Bitumen Modification for Sustainable Road Construction. *Tobacco Regulatory Science*, 10(1).
 17. Imaninasab, R. Effect of granular polymers on rutting performance of SMA with respect to modification process. *Construction and Building Materials*. 2017. 130. Pp. 64–72. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.025. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.025>.
 18. CHINOUN MADANI. INFLUENCE DE L'ASSOCIATION EVA-NBR SUR LE BITUME MODIFIÉ ET LES ENROBES BITUMINEUX MODIFIÉS. 0. UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE, 2012. 76 p.
 19. Ahmed, W., & Kadhim, M. (2022). Evaluation of performance and aging of bituminous concrete under traffic and climate impact. *Construction and Building Materials*, 340, 127767. DOI : 10.1016/j.conbuildmat.2022.127767
 20. Oussama, B.B., Kenza, A. Formulation et Caractéristique d'un Béton Bitumineux à base des Matériaux d'Adrar2019.
 21. KHENGAOUI SAFIA. valorisation du sable de dunes en couche de roulement

- sable – bitume. UKM ouregla, 2013.
22. T Bachand, A. (2018). Formulation d'enrobés bitumineux de type ESG10 et GB20 avec incorporation de particules de verre (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
 23. Guide de bonnes pratiques La mise en œuvre des enrobés Guide de bonnes pratiques La mise en œuvre des enrobés. ISBN:9782923714004.
 24. Di Benedetto, H., Corté, J.F. Matériaux routiers bitumineux 2. Hermès Lavoisier editions. 2005.
 25. H.Helil, N.K. Étude d'un béton bitumineux à base de sables de dunes. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017.
 26. NGUYEN, M.L. Etude de la Fissuration et de la Fatigue des Enrobés Bitumineux. (juin)2009. 314 p.
 27. Guessabi, N. ETUDE DE L'INFLUENCE DU DECHET PLASTIQUE SUR LE COMPORTEMENT A LA TRACTION INDIRECTE DES ENROBES BITUMINEUX MODIFIES. Université Des Sciences Et De La Technologie Houari Boumediene, 2011.
 28. Chebil, S. Étude des liants bitumineux modifiés par le noir de carbone et le charbon de bois pyrolytiques, sous-produits de la décomposition thermique sous vide des pneus et du bois hors d'usage. Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec) Canada, 1996. ISBN:0612265560.
 29. Di Benedetto, H., & Corté, J.F. (2004). Matériaux routiers bitumineux 1 : description et propriétés des constituants (1ère édition). Paris: Hermes Science.
 30. Di Benedetto, H., Corté, J.-F. Matériaux routiers bitumineux 2: constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges. Coll.«Mécanique et Ingénierie des Matériaux». Paris: Hermes Science. 2005.
 31. Bensaada, S., & Belhadri, M. (2022). Caractérisation rhéologique des liants bitumineux modifiés : étude comparative des méthodes d'essai classiques et modernes. *Revue des Sciences et de la Technologie*, (54), Université de Constantine
 32. EUROPÉENNE, N. Bitumes et liants bitumineux - Détermination du point de ramollissement - Méthode Bille et Anneau Bitumen.EN 1427 Mars 2007.
 33. Mechaala Zahra; Tolba Amina. Suivi de la qualité de trois carburants de la raffinerie RA1K et modélisation QSPR de quelque propriétés physique et thermodynamique des hydrocarbures aliphatiques. Université 8 Mai 1945 Guelma, 2023. 110 p.
 34. Maurice, P.-C.A.F.G.G.J.Y. Technologie des granulats. 4th ed.2018. ISBN:9782897321086.

35. Khadidja, B., Amina, M., Hadjira, O. Étude du comportement mécanique des enrobés bitumineux modifiés par de fibre végétale de l'alfa (Essai : Marshall et presse à cisaillement giratoire PCG). UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA, 2020.
36. Chauvin, J.J. Bétons spéciaux: Les bétons de sable. LRPC de Bordeaux. 1987.
37. Kettab Mitiche, R. Contribution à la valorisation du sable de dunes. ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE Département, 2007.
38. Ali, S. Contribution à la valorisation des matériaux locaux dans les couches d'assises routières. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, 2019. 21 p.
39. Essai au bleu de méthylène — Wikipédia. URL: https://fr.wikipedia.org/wiki/Essai_au_bleu_de_méthylène (date of application: 5.05.2022).
40. Kebaili, N., Kebaili, M., Djouhri, M. Etude des propriétés d' un nouveau béton bitumineux à base de sable de dunes pour les routes du sud d ' Algérie. 2018. (November).
41. Leghrieb, Y., Mitiche, R., Bentebba, M.T., Djouhri, M., Kriker, A. The Manufacture of Raw Brick from the Saharan Sand-Based Mortar of Ouargla (Located in the Septentrional Sahara, Algeria) for use in Arid Regions. Arabian Journal for Science and Engineering. 2012. 37(8). Pp. 2149–2161. DOI:10.1007/s13369-012-0305-3.
42. BENTATA, A. Etude Expérimentale d'un Béton avec le Sable Dunes. Université Kasdi Merbah, Ouargla., 2004.
43. Qu'est ce que le sable ? | Eurêkoi. URL: <https://www.eurekoi.org/quest-ce-que-le-sable/> (date of application: 4.05.2022).
44. Sable — Wikipédia. URL: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Sable> (date of application: 4.05.2022).
45. Balhachemi, S., Berrafa, F.I. La valorisation de sable de dune (sable de Naama) Durabilité et comportement mécanique. 2017.
46. Hakim, B. ouakhir A. Utilisation du sable de dunes en technique routière Etude bibliographique. Université Mohamed Khider-Biskra Faculté, 2015.
47. Gueddouda MK. Comportement hydro-mécanique des sols compactés : Application à la conception d ' une barrière ouvragée « sable de dune – bentonite ». Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2011.
48. Sous, R.F. Étude sédimentologique des sables cortiqués de l ' Holocène tardif dans la Rade de Genève (Suisse). université de genève, 2011.
49. HAVARD, H., LABORATOIRES, C.V.-B.D.L. DES, 1995, undefined.

- TERRASSEMENTS ROUTIERS DANS LES SABLES DE DUNES DE MAURITANIE. trid.trb.org. URL: <https://trid.trb.org/view/1001578> (date of application: 6.05.2022).
50. KETTAB Ratiba, BALI Abderrahim, F.J.M. SABLE ENROBE: ETUDE ET FORMULATION. 2002. Pp. 1–11.
 51. Akacem, M., Abbou, M., Mustapha, A., Hassan, M.O., Mohamed, A., Hamid, K., Développement, L. De, Draïa, U.A. Amélioration des performances mécaniques du béton bitumineux semi-grenu BBSG par ajout de sable de dunes. 2018. (November). Pp. 1–12.
 52. Zeddoun, A., Touati, F., & Messahel, A. (2023). Influence du sable de dunes sur les propriétés des enrobés bitumineux. *Tobacco Regulatory Science Science de la réglementation du tabac*, 9(2), 201–210.
 53. Akacem, M., Saighi, O., & Meddour, D. (2024). Étude comparative entre sable concassé et sable de dunes dans les mélanges bitumineux. *Studies in Engineering and Exact Sciences Etudes en ingénierie et en sciences exactes*, 5(1), 14–26.
 54. Ahmed, N.Y. Effect of Natural Sand Percentages on Fatigue Life of Asphalt Concrete Mixture. 2016. (1). Pp. 258–265.
 55. Almadwi, F.S., Assaf, G.J. Determination of the permanent deformation of hot mix asphalt with natural desert sand. *Construction and Building Materials*. 2021. 269. Pp. 121255. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.121255. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121255>.
 56. Guesmia, E., Li, Z., Demdoun, A., Taibi, S., Goual, I. Valorisation of dune sand-tuff for Saharan pavement design. *Construction and Building Materials*. 2023. 366(December 2022). Pp. 130239. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2022.130239. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130239>.
 57. Berriache, A., Mahammed, M., & Kerrouche, A. (2023). Étude de la performance d'un enrobé à base de sable de dunes. *Journal of Engineering and Exact Sciences*, 9(3), e202309. *Journal de l'ingénierie et des sciences exactes*, 9(3), e202309. <https://doi.org/10.18540/jcecvl9iss3pp202309>
 58. Smaida, A., Belasri, A., & Zerzouri, F. (2022). Caractérisation mécanique du sable de dunes stabilisé par des liants hydrauliques. *Journal of Building Materials and Structures*, 9(1), 95–104.
 59. Bensalem, S., & Bouzidi, M. (2023). Stabilisation d'un mélange de tuf et de sable de dunes pour une utilisation en technique routière. *Journal of Development and Engineering Research*, 4(2), 45–56. <https://ojs.southfloridapublishing.com/ojs/index.php/jdev/article/view/4866>.

60. Zhou, F., Scullion, T., & Hu, S. (2020). Characterization of asphalt mixtures for mechanistic–empirical pavement design: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 258, 120368. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120368
61. Al-Mansoori, M., Al Nageim, H., & Atherton, W. (2021). Effect of aging on the mechanical performance of asphalt mixtures under environmental loading. *Transportation Geotechnics*, 26, 100418. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100418
62. Zhou, X., Li, H., & Zhang, Y. (2023). Fatigue performance and damage mechanism of modified asphalt mixtures under repeated loading. *International Journal of Pavement Engineering*, 24(4), 567–578. DOI: 10.1080/10298436.2021.2001280
63. Hagos, E. T., & van de Ven, M. F. C. (2022). Laboratory evaluation of the mechanical properties of asphalt concrete using different performance tests. *Road Materials and Pavement Design*, 23(3), 615–632. DOI: 10.1080/14680629.2020.1851075
64. Norme Française. Méthode d'essai mélange bitumineux hydrocarbonés à chaud. essai Marshall. NF EN 12697-34+A1. septembre 2007.
65. Anagonou, A.L.L.T. Étude et valorisation des cendres de tailles micrométriques et nanométriques issues d'un réacteur de pyrolyse des coques d'anacarde: Application aux bétons hydraulique et bitumineux. 2020.
66. Machines d'essai Marshall - Novarent. URL: <https://www.novarent.fr/produit/machines-dessai-marshall/> (date of application: 3.05.2024).
67. Essai Marshall - IMP - Institut für Materialprüfung. URL: https://www.impbautest.ch/fr/essai-marshall-_content---1--1087.html (date of application: 3.05.2024).
68. Norme Française. Méthode d'essai mélange bitumineux hydrocarbonés à chaud. Essai Duriez NF EN 12697-12. avril 2004.
69. Ashayer Soltani, M.A. Comportement en fatigue des enrobés bitumeux. 1998.
70. Seignobos, E. Compréhension des mécanismes physiques de fatigue dans le polyamide vierge et renforcé de fibres de verre. Lyon, INSA, 2009.
71. Norme Française. Méthode d'essai mélange bitumineux hydrocarbonés à chaud. résistance à la fatigue. NF EN 12697-24. septembre 2007.
72. Benaboud, S., Takarli, M., Pouteau, B., Allou, F., Dubois, F., Horny, P., Nguyen, M.L. Fatigue damage monitoring and analysis of aged asphalt concrete using acoustic emission technique. *Road Materials and Pavement Design*. 2021. 22(sup1). Pp. S592–S603.

73. Norme Française. Essai Module de rigidité NF EN 12697-31. Décembre 2004.
74. Arsenie, I.M. Etude et modélisation des renforcements de chaussées à l'aide de grilles en fibre de verre sous sollicitations de fatigue. UNIVERSITÉ DE STRASBOURG, 2014.
75. Zahra, H. ETUDE DE L'INFLUENCE DE PEBD SUR LE MODULE DES BÉTON BITUMINEUX À BASE SABLE DE DUNES Présenté2008.
76. Norme Française. Méthode d'essai mélange bitumineux hydrocarbonés à chaud. essai d'orniérage. NF EN 12697-22+A1. septembre 2007.
77. Dongmo-Engeland, B.-J. Caractérisation des déformations d'orniérages des chaussées bitumeuses. Lyon, INSA, 2005.
78. Delorme, J.-L., De La Roche, C., Wendling, L. Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. 2007.
79. Meunier, M. Prédiction de l'orniérage lié aux déformations permanentes des enrobés bitumineux. École de technologie supérieure, 2012.
80. DELORME, J.-L., Chaussées-terrassement, G. Essai à la presse à cisaillement giratoire. Bulletin Liaison Ponts Chaussées. 1996. 211. Pp. 15–24.
81. Boudreau, S. Étude de la maniabilité et de la compactibilité d'enrobés bitumineux à l'aide de la presse à cisaillement giratoire. National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa, 2001. ISBN:0612559548.
82. Norme Française. Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG) NF P 98-252. juin 1999.
83. Jean-Claud Moreux. COMPACTEUR A CISAILLEMENT GIRATOIRE ET SIMULATEUR DE CIRCULATION (ORNIEREUR). LABORATOIR 1987. 8–10 p.
84. Presse à cisaillement giratoire PCG - IMP - Institut für Materialprüfung. URL: https://www.impbautest.ch/fr/presse-a-cisaillement-giratoire-pcg-_content---1--1088.html (date of application: 3.05.2024).
85. Salami, L.O., Ameen, I.O., Tijani, M.A. et al. A study of performance characteristics of combined waste polymer enhanced bitumen on hot and warm mix asphaltic concretes. *Discov Civ Eng* 2, 40 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44290-025-00177-0>
86. Lucobit Lucobit® 1210A Ethylene Copolymer Bitumen. URL: <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=a87579df8e464de4b73a92137f23bfb7&ckck=1> (date of application: 20.04.2024).
87. La, L.A.D.E., Aux, M. L ' Additif de la Modification aux Polymères de l ' Asphalte et du Bitume

88. Moutier, F. Utilisations et possibilités de la presse à cisaillement giratoire, BULL. LIAISON LAB. PONTS CHAUSS. 1977.
89. Goli, A., Aboutalebi, M., Amini, A., Latifi, A. Evaluating the Effect of Lucobit on Moisture Susceptibility and Mechanical Performance of Bitumen and Asphalt Mixtures. *International Journal of Transportation Engineering*. 2018. 6(2). Pp. 177–189.
90. Y. Zhang, M. Zheng, and K. Wang, “Research on mechanism and performance of Lucobit modifier,” 2015, no. Iccet, pp. 1623–1626. doi: 10.2991/iccet-15.2015.303..
91. Norme Française. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. Méthode pour la détermination de la résistance à la fragmentation. NF EN 1097-2A1. Novembre 2006.
92. Norme Française. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. détermination de la résistance à l’usure. NF EN 1097-1A1. Avril 2004.
93. Norme Française. Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats. détermination de la masse volumique réelle. NF EN 1097-6A1. Février 2006. Pp. 32.
94. Norme Française. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. coefficient d’aplatissement. NF EN 933-3. Mars 1997.
95. Norme Française. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. équivalent de sable . NF EN 933-8. Aout 1999.
96. Norme Française. Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats. analyse granulométrique par tamisage. NF EN 933-1. Décembre 1997.
97. Institut Des Routes, des R. et des I. pour la M. 2. Choix et mise en œuvre des couches de surface dans les zones soumises à des conditions climatiques hivernales rigoureuses. 2020.
98. Ziari, H., Akbari, T., Farahani, H., Goli, A. The effect of Lucobit polymer on bitumen performance. *Petroleum Science and Technology*. 2016. 34(6). Pp. 512–516. DOI:10.1080/10916466.2013.769572.
99. Assad Belabel, S.A. Etude expérimentale de la valorisation du sable de mine dans la formulation de béton bitumineux 2021. 107 p.
100. Zhang, Y.M., Wang, K. Mix Design and Performance Research on Asphalt Mixture of SUP-20 with Lucobit. *Applied Mechanics and Materials*. 2015. 713–715. Pp. 2765–2768. DOI:10.4028/www.scientific.net/amm.713-715.2765.
101. Hossain, M., Swamy, A.K., & Zaman, M. (2019). Evaluating Performance of Lucobit-Modified Asphalt Binders and Mixtures. *Conference Transportation Research Board (TRB) Annual Meeting*. 19-02345

102. Bhargava, N., Das, B.P., Siddagangaiah, A.K. Synergistic influence of aging and moisture on performance of warm mix asphalt. *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2018.
103. Rashed, A.M., Al-Hadidy, A.I. Comparative performance of DG mixes and SMA mixes with waste crumb rubber as aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*. 2023. 19. Pp. e02615.
104. Akacem, M., Mekerta, B., Zentar, R., Hassan, M.O., Mohamed, A. valorisatuion of fine dune sand in asphalt concrete. *I2SM Chiapas, Mexico 2018*. 2018. 1.
105. El Euch Khay, S., Neji, J., Loulizi, A. Compacted Sand Concrete in Pavement Construction: An Economical and Environmental Solution. *ACI Materials Journal*. 2010. 107(2).
106. Reza, M., Nayyeri, M., Niazi, Y., Jalili, M. The Effect of Dune Sands on Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Mixtures. *Transportation Research Journal*. 2011. 1(1). Pp. 47–59.
107. Özen, H. Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples. *Construction and Building Materials*. 2011. 25(2). Pp. 756–765. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.07.010.
108. Nassar, A.I., Mohamed, M.H., & Thom, N. (2016). Performance of Polymer Modified Asphalt Mixtures Using SBS and Crumb Rubber. *Construction and Building Materials*, Vol. 104, pp. 320–327. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.069
109. Jexembayeva, A.; Konkanov, M.; Aruova, L.; Kirgizbayev, A.; Zhaksylykova, L. Performance Optimization Approach of Polymer-Modified Asphalt Mixtures with PET and PE Waste. *Polymers* 2024, 16, 3308. <https://doi.org/10.3390/polym16233308>
110. Babagoli, R., Ameli, A., Shahriari, H. Laboratory evaluation of rutting performance of cold recycling asphalt mixtures containing SBS modified asphalt emulsion. *Petroleum Science and Technology*. 2016. 34(4). Pp. 309–313. DOI:10.1080/10916466.2015.1135168.
111. Boucherba, M. A method to use saharian sand dune in high modulus bituminous mixture. *International Conference on Materials, Patrimony and the Environment in Arid Zones ICMaPEAZAt: Adrar*. 2019. (February). Pp. 0–8.
112. Borcheni, I., Kraiem, T., Mondher, N., & Neji, J. (2023). Experimental and Numerical Studies of Viscoelastic Behavior of Bituminous Mixture with a High Rate of Reclaimed Asphalt Pavement, Dune Sand and Lime. In *International Journal of Engineering Research in Africa* (Vol. 64, pp. 17–34). Trans Tech Publications, Ltd. <https://doi.org/10.4028/p-684y63>

ANNEXE

Annexe (A) : Caractéristiques des matériaux

Tableau A.1 : caractéristiques de la courbe granulométrique de sable

Tamis (mm)	1	0.5	0.25	0.16	0.08	0.063
Tamisat (%)	100.00	89.00	41.12	26.75	14.25	4.12

Tableau A.2 : Résultats des Analyses granulométriques des agrégats utilisés

Tamis (mm)	Tamisât cumulés en (%)		
	sable 0/3	gravier 3/8	gravier 8/15
20	100	100	100
16	100	100	99
14	100	100	84
12.5	100	100	64
10	100	100	12
8	100	99	2
6.3	100	75	1
5	100	41	0.95
4	100	21	0
3.15	99	11	0
2.5	96	3	0
2	90	2	0
1	80	0	0
0.5	66	0	0
0.25	53	0	0
0.2	48	0	0
0.16	44	0	0
0.08	27	0	0
0.063	25	0	0

Tableau A.3: Pourcentages des agrégats utilisés (BB ordinaire)

Tamis	Pourcentage passant sable 0/3	Pourcentage Passant gravier 8/15	Pourcentage Passant gravier 8/15	Mélange
25	100	100.0	100	100
20	100	100	100	100
16	100	100	99	99.64
14	100	100	84	94.24
12.5	100	100	64	87.04
10	100	100	12	68.32
8	100	99	2	64.42
6.3	100	75	1	56.86
4	100	21	1.0	40.64
2	90	2	0	31.54
1	80	0	0	28.14
0.5	66	0	0	23.38
0.25	53.0	0	0	18.96
0.16	44.0	0	0	15.90
0.08	27	0	0	10.12
0.063	25.0	0	0	9.44

Tableau A.4:Les résultats du test Marshall

BITUME 40/50 ORDINAIRE (5,74%)													
Épr	Poids(g)	Poids eau (g)	Vol (cm ³)	H (mm)	Y (kg/cm ³)	Y moy (kg/cm ³)	Compacité (%)	MOY (%)	T(°C)	Stabilité (KN)	MOY (KN)	Fluage (mm)	MOY (mm)
1	1086.00	583.60	502.40	6.20	2.16		87.20		Air	15.85		3.14	
2	1195.00	676.39	518.61	6.40	2.30	2.24	92.95	90.48	Air	.9241	.3451	2.76	2.96
3	1192.00	665.29	526.71	6.50	2.26		91.29		Air	.2551		2.98	
7	1206.00	683.34	522.66	6.45	2.31		93.08		60	15.14		2.95	
8	1194.00	671.34	522.66	6.45	2.28	2.30	92.16	93.11	60	14.31	14.703	2.61	2.77
9	1191.00	672.39	518.61	6.40	2.30		92.64		60	14.66		2.75	
BITUME 40/50 ORDINAIRE (5,91%)													
1	1211.00	668.08	542.92	6.70	2.23		90.54		Air	14.69		3.45	
2	1212.00	669.08	542.92	6.70	2.23	2.24	90.61	90.97	Air	16.96	15.509	2.85	3.30
3	1209.00	674.19	534.81	6.60	2.26		91.76		Air	14.89		3.61	
7	1194.00	675.39	518.61	6.40	2.30		93.45		60	15.14		2.86	
8	1207.00	680.29	526.71	6.50	2.29	2.29	93.02	93.12	60	15.05	15.389	2.91	2.93
9	1187.00	668.39	518.61	6.40	2.29		92.90		60	15.98		3.01	
BITUME 40/50 ORDINAIRE(6.09%)													
1	1198.00	671.29	526.71	6.50	2.27		91.03		Air	13.005		3.62	
2	1197.00	662.19	534.81	6.60	2.24	2.25	89.57	90.08	Air	13.654	14.074	3.70	3.40
3	1198.00	663.19	534.81	6.60	2.24		89.65		Air	15.563		2.88	
7	1200.00	672.48	527.52	6.51	2.27		93.73		60	14.41		3.54	
8	1189.00	669.58	519.42	6.41	2.29	2.28	94.32	93.82	60	12.64	13.168	3.44	3.52
9	1198.00	669.67	528.33	6.52	2.27		93.43		60	12.45		3.58	

Les résultats du test Duriaz (formulation BB ordinaire)

1- Dosage en Bitume 5.61%

Essai sur lot sec		Essai de compression a 18°C			Essaisur lot humide				
Numero	masse	Diametrmoyen	Hauteur	MVA	Diametrmoyen	Hauteur	MVA (g/cm3)	Résistance de	Résistance de
EP01	3514	120	134,8	2,31					138,7
EP02	3489	120	134,2	2,30					139,4
EP03	3512				120	134,8	2,30	112	
EP04	3501				120	133,9	2,31	116	
Moyenne	3504	120	134,50	2,30	120	134,35	2,31	114,00	139,05
								Rapport i/c	81,98
								Specification NE EN 13108-1	80

Numero	Masse sèche	Masse	Masse paraffinée	Hauteur	MVA (t/m3)	CompacitéC	vides Vr %
EP05	3514,00	3520,00	1997,40	134,80	2,32	92,94	7,06
EP06	3489,00	3510,50	1994,60	134,20	2,35	94,07	5,93
Moyenne	3501,50	3515,25	1996,50	134,50	2,34	93,50	6,50

2- Dosage en Bitume 5.91%

Essai sur lot sec		Essai de compression a 18°C			Essaisur lot humide				
Numero	masse	Diametrmoyen	Hauteur	MVA	Diametrmoyen	Hauteur	MVA (g/cm3)	Résistance de	Résistance de
EP01	3514	120	134,8	2,31					138,7
EP02	3489	120	134,2	2,30					139,4
EP03	3512				120	134,8	2,30	112	
EP04	3501				120	133,9	2,31	116	
Moyenne	3504	120	134,50	2,30	120	134,35	2,31	114,00	139,05
								Rapport i/c	81,98
								Specification NE EN 13108-1	80

Numero	Masse sèche	Masse	Masse paraffinée	Hauteur	MVA (t/m3)	CompacitéC	vides Vr %
EP05	3514,00	3520,00	1997,40	134,80	2,32	92,94	7,06
EP06	3489,00	3510,50	1994,60	134,20	2,35	94,07	5,93
Moyenne	3501,50	3515,25	1996,50	134,50	2,34	93,50	6,50

Annexe (B) : Résultats du test Marshall

1- Etude de performances :

a- BBL (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A)

$TL = k\sqrt{(5\Sigma) \alpha}$	Module de richesse	Teneur en liant (%)	Lucobit 1210 (%)
TL2	3.40	5.61	0.30

ESSAIS		RESULTATS			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	-
Densité théorique	g/cm ³	2,5	2,5	2,5	-
Essai de Stabilité Marshall à 50 coups					
Stabilité Marshall	kN	17.240	15.450	132.40	≥ 10. 5
Fluage Marshall	mm	1.960	2.140	107.00	≤ 4
Densité apparente	g/cm ³	2.28	2.33	0.82	-
Compacité	%	91.51	93.48	2.31	≤ 97

b- BBL05SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 5% sable de dunes)

ESSAIS		RESULTATS			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	-
Densité théorique	g/cm ³	2,51	2,51	2,51	-
Essai de Stabilité Marshall à 50 coups					
Stabilité Marshall	kN	14.340	14.720	14.550	≥ 10. 5
Fluage Marshall	mm	2.250	2.040	2.670	≤ 4
Densité apparente	g/cm ³	2.3	2.33	2.36	-
Compacité	%	91.64	92.91	93.96	≤ 97

c- BBL10SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 10% sable de dunes)

ESSAIS		RESULTAT			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	-
Densité théorique	g/cm ³	2,52	2,52	2,52	-
Essai de Stabilité Marshall à 50 coups					
Stabilité Marshall	kN	13.270	14.250	14.450	≥ 10. 5
Fluage Marshall	mm	2.540	2.900	2.840	≤ 4
Densité apparente	g/cm ³	2.08	2.40	2.23	-
Compacité	%	83.94	96.67	89.91	≤ 97

d- BBL15SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 10% sable de dunes)

ESSAIS		RESULTAT			RECOMMANDATION S BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	
Densité théorique	g/cm	2,53	2,53	2,53	-
Essai Stabilité de Marshall à 50 coups					
Stabilité Marshall	kN	13.457	13.455	13.980	≥ 10.5
Fluage Marshall	mm	3.090	2.960	3.210	≤ 4
Densité apparente	g/cm ³	2.22	2.30	2.26	-
Compacité	%	88.08	91.46	89.81	≤ 97

e- BBL20SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 10% sand de dune)

ESSAIS		RESULTATS			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	
Densité théorique	g/cm ³	2,53	2,53	2,53	-
Essai Stabilité de Marshall à 50 coups					
Stabilité Marshall	kN	11.240	9.45	10.41	≥ 10.5
Fluage Marshall	mm	3.960	3.920	4.210	≤ 4
Densité apparente	g/cm ³	2.23	2.23	2.32	-
Compacité	%	87.95	87.95	91.53	≤ 97

Étapes de préparation d'éprouvettes pour l'essai Marshall



Opération de malaxage



Remplissage des moules



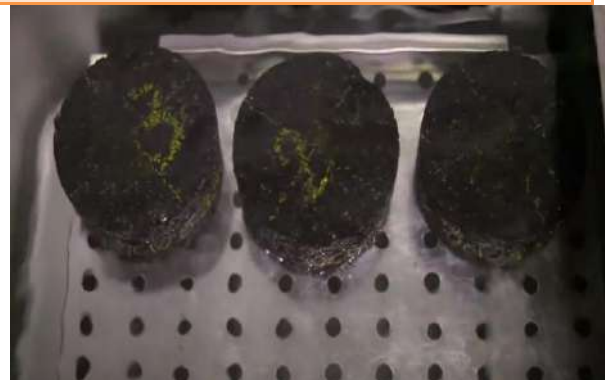
Compactage par impact



Refroidissement des moules



Démoulage des éprouvettes



Immersion dans l'eau



Préparation de la machine Marshall



Éprouvette soumise à l'écrasement

Annexe (C) : Les résultats de l'essai Duriaz1- Etude de formulation :**BB ordinaire (dosage en bitume 5.61%)**

Essai sur lot sec		Essai de compression a 18°C			Essai sur lot humide					
Numéro	masse sèche	Diamètre	Hauteur moyenne	MVA	Diamètre	Hauteur	MVA	Résistance de	Résistance de	
EP01	3514	120	134.8	2.31					138.7	
EP02	3489	120	134.2	2.30					139.4	
EP03	3512				120	134.8	2.30	112		
EP04	3501				120	133.9	2.31	116		
Moyenne	3504	120	134.50	2.30	120	134.35	2.31	114.00	139.05	
									Rapport i/c (%)	81.98
									spécification	80

Numéro	Masse sèche (g)	Masse	Masse paraffinée	Hauteur moyenne	MVA	compacite	Vides Vr%
EP05	3514.00	3520.00	1997.40	134.80	2.32	92.94	7.06
EP06	3489.00	3510.50	1994.60	134.20	2.35	94.07	5.93
moyenne	3501.50	3515.25	1996.50	134.50	2.34	93.50	6.50

BB ordinaire (dosage en bitume 5.91%)

Essai sur lot sec		Essai de compression a 18°C			Essai sur lot humide					
Numéro	masse sèche	Diamètre	Hauteur moyenne	MVA	Diamètre	Hauteur	MVA	Résistance de	Résistance de	
EP01	3520	120	134.9	2.31					138.7	
EP02	3509	120	134.1	2.31					136.1	
EP03	3526				120	134.4	2.32	118		
EP04	3519				120	133.3	2.34	116		
Moyenne	3518.5	120	134.50	2.31	120	133.85	2.33	117.00	137.40	
									Rapport i/c (%)	85.15
									spécification	80

Annexes

Numéro	Masse sèche (g)	Masse	Masse paraffinée	Hauteur moyenne	MVA	compacite	Vides Vr%
EP05	3515.00	3531.00	1996.10	134.90	2.32	93.30	6.70
EP06	3509.00	3527.00	1994.20	134.10	2.33	93.44	6.56
moyenne	3512.00	3529.00	1996.50	134.50	2.33	93.37	6.63

BB ordinaire (dosage en bitume 6.09 %)

Essai sur lot sec		Essai de compression a 18°C			Essai sur lot humide				
Numéro	masse sèche	Diamètre	Hauteur moyenne	MVA	Diamètre	Hauteur	MVA	Résistance de	Résistance de
EP01	3498	120	134.8	2.30					127.7
EP02	3489	120	134.2	2.30					120.1
EP03	3512				120	134.4	2.31	97.6	
EP04	3501				120	133.3	2.32	101.3	
Moyenne	3500	120	134.50	2.30	120	133.85	2.32	99.45	123.90
								Rapport i/c (%)	80.27
								spécification	80

Numéro	Masse sèche (g)	Masse	Masse paraffinée	Hauteur moyenne	MVA	compacite	Vides Vr%
EP05	3489.00	3520.00	1990.85	134.80	2.35	94.08	5.92
EP06	3495.00	3515.00	1992.60	134.20	2.34	93.68	6.32
moyenne	3492.00	3517.50	1996.50	134.50	2.34	93.88	6.12

2- Etude des performances :

a- BBL (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A)

ESSAIS		RESULTAT			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.74	5.91	6.09	-
Densité théorique	g/cm ³	2,460	2,450	2,450	-
L'essai Tenue à l'eau « DURIEZ » 7 jours					
Résistance de	(kg/cm ²)	139.05	137.40	123.90	≥ 70
Résistance de	(kg/cm ²)	114.00	117.00	99.45	-
Tenue à l'eau (r/R)	-	0.82	0.85	0.80	≥ 0.80
Densité apparente	g/cm ³	2.31	2.33	2.32	-
Compacité	%	93.50	93.37	93.88	
vides Vr	%	6.50	6.63	6.12	

ESSAIS		RESULTAT			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	-
Densité théorique	g/cm ³	2,5	2,5	2,5	-
L'essai Tenue à l'eau « DURIEZ » 7 jours					
Résistance de	(kg/cm ²)	128.65	130.40	132.40	≥ 70
Résistance de	(kg/cm ²)	106.50	107.50	107.00	-
Tenue à l'eau (r/R)	-	0.84	0.83	0.82	≥ 0.80
Densité apparente	g/cm ³	2.31	2.31	2.31	-
Compacité	%	93.23	93.35	92.63	
vides Vr	%	6.77	6.65	7.37	

b- BBL05SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 5 % sand de dune)

ESSAIS		RESULTATS			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	-
Densité théorique	g/cm ³	2,51	2,51	2,51	-
L'essai Tenue à l'eau « DURIEZ » 7 jours					
Résistance de	(kg/cm ²)	126.60	128.15	130.15	≥ 70
Résistance de	(kg/cm ²)	106.50	107.50	106.00	-
Tenue à l'eau (r/R)	-	0.84	0.84	0.81	≥ 0.80
Densité apparente	g/cm ³	2.29	2.29	2.30	-
Compacité	%	92.43	92.70	92.19	
vides Vr	%	7.57	7.30	7.81	

c- BBL10SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 10% sand de dune)

ESSAIS		RESULTATS			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	-
Densité théorique	g/cm ³	2,52	2,52	2,52	-
L'essai Tenue à l'eau « DURIEZ » 7 jours					
Résistance de	(kg/cm ²)	126.60	122.75	130.15	≥ 70
Résistance de	(kg/cm ²)	106.50	108.50	106.00	-
Tenue à l'eau (r/R)	-	0.84	0.88	0.81	≥ 0.80
Densité apparente	g/cm ³	2.30	2.30	2.29	-
Compacité	%	92.54	92.41	93.13	
vides Vr	%	7.57	7.59	6.87	

d- BBL15SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 10% sand de dune)

ESSAIS		RESULTATS			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	-
Densité théorique	g/cm ³	2,53	2,53	2,53	-
L'essai Tenue à l'eau « DURIEZ » 7 jours					
Résistance de	(kg/cm ²)	119.65	122.75	123.65	≥ 70
Résistance de	(kg/cm ²)	97.50	101.50	106.00	-
Tenue à l'eau (r/R)	-	0.81	0.83	0.86	≥ 0.80
Densité apparente	g/cm ³	2.26	2.26	2.26	-
Compacité	%	92.54	92.41	93.13	
vides Vr	%	7.57	7.59	6.87	

e- BBL15SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 10% sand de dune)

ESSAIS		RESULTATS			RECOMMANDATIONS BB 0/14
		BB 0/14			
		Mélange A	Mélange B	Mélange C	
Teneur en liant	%	5.61	5.61	5.61	-
Lucobit 1210	%	0.3	0.3	0.3	-
Densité théorique	g/cm ³	2,53	2,53	2,53	-
L'essai Tenue à l'eau « DURIEZ » 7 jours					
Résistance de	(kg/cm ²)	118.6	120.25	121.3	≥ 70
Résistance de	(kg/cm ²)	94.5	95.5	94.55	-
Tenue à l'eau (r/R)	-	0.80	0.79	0.78	≥ 0.80
Densité apparente	g/cm ³	2.27	2.27	2.25	-
Compacité	%	92.54	91.81	91.54	
vides Vr	%	7.57	8.19	8.46	



Malaxage



Remplissage des moules



Compactage par impact



Refroidissement



Démoulage



Conservation à l'Aire



Conservation en immersion



Essai de compression simple

Annexe (D) : Essais d'orniérage (EN 12697-22:2003+A1)

Tableau D.1: Pourcentage de contenu pour chaque mélange

FRACTION	PROPORTION (%)					
	BB	BBL-0	BBL-5	BBL-10	BBL-15	BBL-20
Sable dune	0.00	0.00	5.00	10.00	15.00	20.00
0/3	34.00	34.00	29.00	24.00	19.00	14.00
3/8	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00
8/15	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00	36.00
40/50	5.61	5.61	5.61	5.61	5.59	5.59
1210 A	0.00	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
MVRE (g/cm3)	2.50	2.49	2.49	2.49	2.50	2.50
MVRG (g/cm3)	2.77	2.78	2.78	10.00	2.78	2.78

Tableau D.2: Résultats de l'essai d'orniérage

Nombre de cycles		0	30	100	300	1000	3000	10000	30000
Densité théorique	Taux d'orniérage A	0	1.2	1,4	1,9	2,5	3,02	3,92	4,71
	Taux d'orniérage A	0	1.4	1,9	2,3	3,05	3,7	4,21	4,84
	Moyen	0	1.3	1,6	2,1	2,78	3,36	4,07	4,78
BBL-0	Taux d'orniérage A	0	0,8	1,5	1,6	2,12	2,61	2,84	3,21
	Taux d'orniérage A	0	1.3	2,2	2,4	3,02	3,42	3,59	3,76
	Moyen	0	1.1	1,8	2,0	2,57	3,02	3,22	3,49
BBL-5	Taux d'orniérage A	0	1.1	1,3	1,7	2,23	2,78	3,12	3,42
	Taux d'orniérage A	0	1.1	1,4	2,4	2,87	3,25	3,65	3,74
	Moyen	0	1.1	1,3	2,1	2,55	3,02	3,39	3,58
BBL-10	Taux d'orniérage A	0	1.1	1,4	1,8	2,35	2,89	3,21	3,6
	Taux d'orniérage A	0	1.1	1,6	2,4	3	3,48	3,79	3,89
	Moyen	0	1.1	1,5	2,1	2,68	3,19	3,50	3,75
BBL-15	Taux d'orniérage A	0	1.2	1,4	2,0	2,49	3,03	3,41	3,9
	Taux d'orniérage A	0	1,5	1,8	2,5	3,14	3,61	3,81	4,12
	Moyen	0	1,3	1,6	2,2	2,82	3,32	3,61	4,01
BBL-20	Taux d'orniérage A	0	1.1	1,5	2,4	2,86	3,41	3,87	4,94
	Taux d'orniérage A	0	1,5	2,1	2,6	3,35	3,87	4,35	5,12
	Moyen	0	1,3	1,8	2,5	3,11	3,64	4,11	5.03
spécification		$\leq 5\%$							

Annexe (E) : Résultats des essais PCG(NF P 98-252)

1- BB (Bitume bitumineux ordinaire)

Nombre de	Hauteur	Hauteur	Hauteur	Masse	Pourcentage	Spécification
5	122.98	121.50	122.24	2.08	16.95	
10	120.12	118.20	119.16	2.13	14.80	≥ 14
15	117.78	115.74	116.76	2.18	13.05	
20	116.79	114.59	115.69	2.20	12.24	
25	114.23	114.35	114.29	2.22	11.17	
30	113.22	113.18	113.20	2.24	10.31	
40	112.05	110.91	111.48	2.28	8.93	
50	110.85	109.73	110.29	2.30	7.95	
60	109.04	109.56	109.30	2.32	7.11	
80	107.77	108.13	107.95	2.35	5.95	4% - 9%

2- BBL(Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A)

Nombre de	Hauteur	Hauteur	Hauteur	Masse	Pourcentage	Spécification
5	124.41	124.75	124.58	2.04	18.22	
10	120.13	119.77	119.95	2.12	15.06	≥ 14
15	118.15	116.57	117.36	2.16	13.18	
20	116.04	115.26	115.65	2.20	11.90	
25	114.42	114.06	114.24	2.22	10.81	
30	114.01	112.39	113.20	2.24	9.99	
40	111.47	111.77	111.62	2.27	8.72	
50	110.95	109.85	110.40	2.30	7.71	
60	109.22	109.81	109.51	2.32	6.96	
80	108.64	107.72	108.18	2.35	5.82	4% - 9%

3- BBL5SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 5% sand de dune)

Nombre de	Hauteur	Hauteur	Hauteur	Masse	Pourcentage	Spécification
5	122.41	123.09	122.75	2.07	16.99	
10	120.14	118.28	119.21	2.13	14.53	≥ 14
15	118.25	116.19	117.22	2.17	13.08	
20	116.12	115.64	115.88	2.19	12.07	
25	114.25	115.17	114.71	2.21	11.17	
30	113.95	113.87	113.91	2.23	10.55	
40	113.11	111.79	112.45	2.26	9.39	
50	111.92	110.84	111.38	2.28	8.52	
60	110.95	110.39	110.67	2.29	7.93	
80	110.24	108.78	109.51	2.32	6.96	4% - 9%

Annexes

4- BBL10SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 10% sand de dune)

Nombre de	Hauteur	Hauteur	Hauteur	Masse	Pourcentage	Specification
5	123.10	121.98	122.54	2.07	16.89	
10	119.92	118.12	119.02	2.13	14.43	≥ 14
15	117.12	116.62	116.87	2.17	12.86	
20	115.62	115.74	115.68	2.19	11.96	
25	115.42	113.72	114.57	2.22	11.11	
30	114.74	113.04	113.89	2.23	10.58	
40	112.34	112.56	112.45	2.26	9.43	
50	110.94	111.64	111.29	2.28	8.49	
60	110.10	110.82	110.46	2.30	7.80	
80	108.84	109.92	109.38	2.32	6.89	4% - 9%

5- BBL15SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 15% sand de dune)

Nombre de	Hauteur	Hauteur	Hauteur	Masse	Pourcentage	Specification
5	122.12	120.98	121.55	2.09	16.32	
10	119.14	117.76	118.45	2.14	14.13	≥ 14
15	117.21	115.37	116.29	2.18	12.54	
20	115.05	114.67	114.86	2.21	11.45	
25	114.05	113.19	113.62	2.23	10.48	
30	113.21	112.67	112.94	2.25	9.94	
40	111.47	111.43	111.45	2.28	8.74	
50	110.35	110.95	110.65	2.29	8.08	
60	110.01	109.11	109.56	2.32	7.16	
80	109.11	108.73	108.92	2.33	6.62	4% - 9%

6- BBL20SD (Bitume bitumineux avec 0.3% Lucobit 1210A et 20% sand de dune)

Nombre de	Hauteur	Hauteur	Hauteur	Masse	Pourcentage	Specification
5	1993.06	121.95	120.09	2.10	16.00	
10	1993.06	118.54	118.36	2.14	14.17	≥ 14
15	1993.06	116.85	115.19	2.19	12.38	
20	1993.06	115.21	113.81	2.22	11.22	
25	1993.06	113.88	112.96	2.24	10.37	
30	1993.06	112.51	112.49	2.26	9.64	
40	1993.06	111.45	111.17	2.28	8.67	
50	1993.06	110.21	110.41	2.30	7.84	
60	1993.06	109.42	109.54	2.32	7.14	
80	1993.06	108.21	108.75	2.34	6.29	4% - 9%

Étapes de préparation d'éprouvettes pour l'essai PCG



Chauffer les matériaux



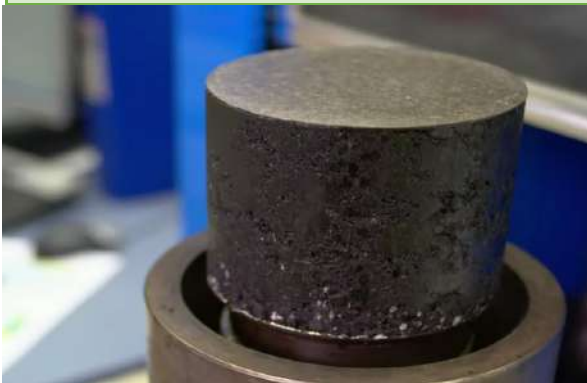
Malaxage



Remplissage des moules



Compaction automatique



Confectionner des éprouvettes

