



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'Enseignement Supérieur & de la Recherche
Scientifique
جامعة محمد العيد بن باديس - مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis – Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الهندسة المدنية
Département de Génie civil



Thèse

Pour l'obtention du titre de Docteur en Travaux Publics
Option : Voies et ouvrages d'art

Thème :

Comportement des chaussées par l'utilisation du sable de dunes

Présentée et soutenue publiquement par :

BERRIACHE Ahmed

Devant le jury composé de :

Prof.	Président	
Prof.	Examineur	
Prof.	Examineur	
Prof.	Examineur	
Prof. BENSOUA Mohamed	Directeur de Thèse	Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem
Dr. Zaoui Mohamed	Co-directeur de Thèse	Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail de recherche, je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation et son aboutissement.

Mes remerciements les plus sincères et ma reconnaissance la plus profonde s'adressent tout particulièrement au Professeur BENSOUA Mohamed, mon directeur de thèse, pour avoir accepté de diriger ce travail avec tant de patience et de dévouement. Sa rigueur scientifique, ses précieux conseils et son soutien constant tout au long de cette recherche ont été déterminants dans l'accomplissement de ce travail. Son expertise, sa disponibilité et ses encouragements ont grandement contribué à enrichir ma réflexion et à affiner mes analyses.

Je tiens également à remercier chaleureusement les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. Leur expertise et leurs remarques constructives ont permis d'enrichir et d'améliorer la qualité de cette recherche.

Ma reconnaissance va aussi à l'ensemble du personnel du Laboratoire LMPC de l'Université de Mostaganem pour leur accueil et leur aide précieuse dans la réalisation des essais expérimentaux. Leur support technique et leur professionnalisme ont été essentiels à la bonne conduite de mes travaux de recherche.

Je ne saurais oublier mes collègues doctorants pour les échanges enrichissants que nous avons eus et l'ambiance de travail agréable qu'ils ont contribué à créer. Les discussions scientifiques et le partage d'expériences ont été une source constante de motivation et d'inspiration.

Mes remerciements s'adressent également au personnel administratif et technique de l'université pour leur aide dans les différentes démarches administratives et leur soutien logistique.

Une pensée particulière va à ma famille pour son soutien indéfectible et ses encouragements constants tout au long de ce parcours. Leur patience et leur compréhension ont été une source précieuse de réconfort dans les moments difficiles.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et que je n'ai pas pu citer nommément.

RÉSUMÉ

Les routes désertiques sont exposées à des dégradations prématurées importantes en raison des températures élevées et des conditions climatiques extrêmes qui accélèrent le vieillissement des enrobés bitumineux. Les fillers issus du sable de carrière, couramment utilisés dans la formulation des enrobés, présentent des variations importantes dans leurs caractéristiques et leur dosage, compromettant ainsi la durabilité des chaussées. Cette recherche explore une solution innovante : l'utilisation du sable de dune comme source alternative de filler.

Cette étude évalue l'influence du filler de sable de dune sur les propriétés des enrobés bitumineux à travers une approche expérimentale bidimensionnelle, combinant analyses thermiques et mécaniques. Les résultats démontrent que le filler de sable de dune présente un pouvoir rigidifiant ($\Delta TBA = 8,6^{\circ}C$) conforme aux normes européennes, contrairement au filler de sable de carrière ($\Delta TBA = 5,8^{\circ}C$). Les performances mécaniques sont significativement améliorées, avec une augmentation de 37% du quotient Marshall et une amélioration de 27% de la résistance à l'eau.

Ces résultats prometteurs, associés à la disponibilité locale du sable de dune, ouvrent des perspectives encourageantes pour l'amélioration de la durabilité des routes désertiques. Cette solution innovante, alliant performance technique et viabilité économique, contribue au développement durable des infrastructures routières dans les zones désertiques.

Mots clés : Filler; Sable de dune; ΔTBA ; Essai Marshall; Essai Duriez; Bitume.

ABSTRACT

Desert roads are exposed to significant premature degradation due to high temperatures and extreme climatic conditions that accelerate the aging of bituminous mixtures. Fillers derived from quarry sand, commonly used in asphalt mix formulation, show significant variations in their characteristics and dosage, thus compromising pavement durability. This research explores an innovative solution: the use of dune sand as an alternative source of filler.

This study evaluates the influence of dune sand filler on the properties of bituminous mixtures through a two-dimensional experimental approach, combining thermal and mechanical analyses. The results demonstrate that dune sand filler exhibits a stiffening power ($\Delta TBA = 8.6^\circ\text{C}$) that complies with European standards, unlike quarry sand filler ($\Delta TBA = 5.8^\circ\text{C}$). Mechanical performance is significantly improved, with a 37% increase in Marshall quotient and a 27% improvement in water resistance.

These promising results, combined with the local availability of dune sand, open encouraging perspectives for improving the durability of desert roads. This innovative solution, combining technical performance and economic viability, contributes to the sustainable development of road infrastructure in desert areas.

Keywords: Filler; Dune sand; ΔTBA ; Marshall test; Duriez test; Bitumen.

الملخص

تتعرض الطرق الصحراوية إلى تدهور مبكر كبير بسبب درجات الحرارة المرتفعة والظروف المناخية القاسية التي تسرع من شيخوخة الخلطات الإسفلتية. تظهر المواد المألثة المستخرجة من رمل المحاجر، والمستخدم عادة في تركيب الخلطات الإسفلتية، تباينات كبيرة في خصائصها وجرعاتها، مما يؤثر سلباً على متانة الطرق. يستكشف هذا البحث حلاً مبتكراً: استخدام رمل الكثبان الرملية كمصدر بديل للمواد المألثة.

تقيم هذه الدراسة تأثير المواد المألثة من رمل الكثبان على خصائص الخلطات الإسفلتية من خلال نهج تجريبي ثنائي الأبعاد، يجمع بين التحليل الحراري والميكانيكي. تظهر النتائج أن المواد المألثة من رمل الكثبان تتمتع بقوة تصلب $\Delta TBA = 8.6$ درجة مئوية متوافقة مع المعايير الأوروبية، على عكس المواد المألثة من رمل المحاجر $\Delta TBA = 5.8$ درجة مئوية.

تم تحسين الأداء الميكانيكي بشكل ملحوظ، مع زيادة بنسبة 37% في معامل مارشال وتحسن بنسبة 27% في مقاومة الماء.

هذه النتائج الواعدة، إلى جانب التوفر المحلي لرمال الكثبان، تفتح آفاقاً مشجعة لتحسين متانة الطرق الصحراوية. يساهم هذا الحل المبتكر، الذي يجمع بين الأداء التقني والجدوى الاقتصادية، في التنمية المستدامة للبنية التحتية للطرق في المناطق الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: المواد المألثة، رمل الكثبان، ΔTBA ، اختبار مارشال، اختبار دوريز، الزفت.

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre 01 : Généralités sur les enrobés	5
1.1 Introduction	6
1.2 Définition des enrobes bitumineux	6
1.3 Composants des Enrobés Bitumineux	7
1.3.1 Granulats	7
1.3.2 Bitume	8
1.3.3 Fillers	8
1.3.4 Additifs (optionnels) :	9
1.4.1 Enrobés à chaud	9
1.4.2 Enrobés tièdes	10
1.4.3 Enrobés à froid	10
1.4.4 Choix du processus de fabrication	10
1.5 Rôles et avantages des enrobés bitumineux	11
1.6 Importance de l'utilisation des enrobés bitumineux	11
1.7 Propriétés des enrobés bitumineux	12
1.8 Rôle des composants dans les enrobés	14
1.8.1 Granulats	14
1.8.2 Bitume	16
1.8.3 Fillers	16
1.8.4 Additifs	18
1.9 Conclusion	19
Chapitre 02 : Sables et fillers des enrobes bitumineux	21
2.1 Introduction	22
2.2 Caractéristiques des Sables	23
2.3. Origine des sables	23
2.4 Classification des sables	24
2.4.1 Sables alluviaux	24
2.4.2 Sables de carrière	25
2.4.3 Sables de dune	25
2.4.4 Sables marins	26

2.5 Facteurs influençant les caractéristiques des sables.....	27
2.6. Propriétés des sables.....	27
2.6.1. Propriétés granulométriques.....	27
2.6.2 Propriétés minéralogiques	30
2.6.3 Propriétés physiques et mécaniques	31
2.6.4 Applications des sables dans les enrobés bitumineux	34
2.7 Fillers.....	37
2.7.1. Types de Fillers	37
2.8 Caractéristiques des Fillers.....	38
2.8.1 Granulométrie des fillers	38
2.8.2 Densité des fillers	38
2.8.3 Affinité chimique avec le bitume	38
2.8.4 Capacité de rigidification	39
2.8.5 Porosité et absorption	39
2.8.6 Propriétés thermiques	39
2.8.7 Propreté	40
2.8.8 Durabilité chimique.....	40
2.9 Défis Liés aux Fillers Actuels	40
2.10 Conclusion.....	41
Chapitre 3 : Etude expérimentale.....	42
3.1 Introduction.....	43
3.2 Études des caractéristiques des fillers	44
3.2.1 Analyse granulométrique	44
3.2.2 Propriétés physiques	45
3.2.3 Propriétés chimiques.....	46
3.2.4 Essais de propreté.....	46
3.3 Conception des mélanges bitumineux.....	47
3.4 Sélection des matériaux constitutifs	47
3.5 Détermination des courbes granulométriques cibles.....	48
3.6 Optimisation des teneurs en liant	48
3.7 Confection des éprouvettes des essais.....	49
3.8 Description des essais réalisés.....	49
3.8.1 Essai Δ TBA (Pouvoir rigidifiant bitume-filler).....	49

3.8.2 Essais mécaniques de Marshall et Duriez	50
3.9 Protocoles expérimentaux des essais.....	51
3.9.1 Protocole de l'étude thermique ΔTBA	51
3.9.2 Protocole des essais mécaniques	54
3.10 Paramètres de contrôle des essais expérimentaux	57
3.10.1 Contrôle des matériaux.....	57
3.10.2. Contrôle des conditions d'essai	57
3.11 Acquisition et traitement des données	58
3.12 Conclusion.....	59
Chapitre 4 : Analyse et interprétations des résultats de l'expérimentation.....	61
4.1 Introduction	62
4.2 Résultats des essais des fillers	63
4.2.1 Analyse granulométrique.....	63
4.2.2 Analyse chimique	64
4.2.3 Analyses et interprétations des résultats.....	66
4.2.4 Conformité aux exigences des normes	66
4.3 Résultats de l'essai du pouvoir rigidifiant (ΔTBA).....	67
4.3.1 Mélange filler de sable de dune (FSD) avec bitume pure (BP).....	67
4.3.2 Mélange filler sable de carrière (FSC) avec bitume pure (BP).....	69
4.3.3 Mélange filler normalisé (FN) avec bitume pure (BP)	70
4.3.4 Analyses et interprétations des résultats du pouvoir rigidifiant (ΔTBA)	72
4.4 Résultats des essais mécaniques (Marshall, Duriez).....	73
4.4.1 Résultats de l'essai Marshall	74
4.4.2 Résultats de l'essai Duriez	75
4.4.3 Analyse et interprétations des essais mécaniques.....	76
4.5 Synthèse globale des essais	78
4.6 Impacts de l'utilisation des fillers de sable de dune.....	78
4.6.1 Impact technique	79
4.6.2 Impact économique	79
4.6.3 Impact environnemental.....	80
4.7 Conclusion.....	81
CONCLUSION GÉNÉRALE	83
BIBLIOGRAPHIE	85

LISTE DES ACRONYMES

BB : Béton Bitumineux

BBME : Béton Bitumineux à Module Élevé

EME : Enrobé à Module Élevé

EN : European Norm (Norme Européenne)

FN : Filler Normalisé

FSC : Filler de Sable de Carrière

FSD : Filler de Sable de Dune

GB : Grave Bitume

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LMPC : Laboratoire des Matériaux, Procédés et Composites

MVA : Masse Volumique Apparente

MVR : Masse Volumique Réelle

NF : Norme Française

BP : Bitume Pur

PCG : Presse à Cisaillement Giratoire

SMA : Stone Mastic Asphalt

TBA : Température Bille-Anneau

Δ TBA : Variation de la Température Bille-Anneau

XP : Norme Expérimentale.

LISTE DES SYMBOLES

α : Coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats

Γ : Perte de linéarité

ρ : Masse volumique (g/cm^3)

ρ_g : Masse volumique des granulats (g/cm^3)

ρ_b : Masse volumique du bitume (g/cm^3)

ε_6 : Déformation relative à 10^6 cycles

σ : Contrainte normale (MPa)

τ : Contrainte de cisaillement (MPa)

C : Compacité (%)

D : Dimension maximale des granulats (mm)

d : Dimension minimale des granulats (mm)

E : Module d'élasticité complexe (MPa)

f : Pourcentage de fines (%)

G : Proportion d'éléments supérieurs à 6,3 mm

K : Module de richesse

P : Pénétrabilité (1/10 mm)

R : Résistance à la compression à l'air (MPa)

r : Résistance à la compression après immersion (MPa)

R/r : Rapport des résistances (essai Duriez)

S : Proportion d'éléments entre 6,3 mm et 0,250 mm

s : Proportion d'éléments entre 0,250 mm et 0,063 mm

T : Température ($^{\circ}\text{C}$)

TL_{ext} : Teneur en liant extérieure (%)

t_{int} : Teneur en liant intérieure (%)

V : Pourcentage de vides (%)

V_b : Volume de bitume (%)

v_{ba} : Volume de bitume absorbé (%)

v_{bl} : Volume de bitume libre (%)

V_{FB} : Pourcentage de vides comblés par le liant (%)

VMA : Volume de vides dans le squelette minéral (%)

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Granulats pour enrobés	7
Figure 2 : Bitume Pur	8
Figure 3 : Fillers pour enrobés	8
Figure 4 : Additifs utilisés dans les enrobés	9
Figure 5 : Sables Fluviaux.....	24
Figure 6 : Sables de carrière	25
Figure 7 : Sables de Dune	26
Figure 8 : Sables marins	26
Figure 9 : Granulométrie et forme des grains	28
Figure 10 : Essai granulométrique.....	45
Figure 11 : Prélèvements du sable de dune	45
Figure 12 : Essai au bleu de méthylène VBS	46
Figure 13 : Sable de dune broyé.....	47
Figure 14 : Essai de PCG (Presse à Cisaillement Giratoire)	48
Figure 15 : Appareil utilisé dans l'essai de <i>Marshall</i>	50
Figure 16 : Appareil utilisé dans l'essai Duriez.....	51
Figure 17 : Préparation du mélange bitume-fillers.....	53
Figure 18 : Malaxage du mélange bitume-fillers.	53
Figure 19 : Test du point de ramollissement du mélange bitume-fillers.	54
Figure 20 : Courbe granulométrique des fillers du sable de dune.....	64
Figure 21 : Courbe représentative de la variation du Δ TBA des fillers de sable de dune FSD en fonction des différentes % de FSD	68
Figure 22 : Courbe représente la variation de Δ TBA du filler de sable de carrière FSC par apport au différentes % de FSC.	69
Figure 23 : Courbe représente la variation de Δ TBA du filler normalisé FN par apport au différentes % de FN.....	71
Figure 24 : Courbe représente la variation de Δ TBA des différentes types de filler par rapport à la variation du % de filler	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les avantages et limitations des sable	34
Tableau 2 : Défis liés à l'utilisation des sables.....	36
Tableau 3 : Analyse chimique du sable de dune.....	65
Tableau 4 : Résultats des essais sur le mélange bitumineux	74
Tableau 5 : Comparaison avec recherche similaireamara	77

Introduction générale

Dans les régions désertiques, la construction et l'entretien des infrastructures routières représentent des défis majeurs en raison des conditions environnementales extrêmes. Ces zones se caractérisent par des températures élevées, des variations thermiques importantes, une faible disponibilité en matériaux locaux adaptés et des sols souvent instables. Ces conditions imposent des exigences spécifiques aux matériaux utilisés pour la construction des routes, notamment en termes de durabilité, de stabilité thermique, de résistance mécanique et d'adaptabilité aux contraintes climatiques.

Les routes désertiques, particulièrement dans les régions sahariennes, sont confrontées à des défis liés à leur durabilité et à leur résistance et selon (Dupont et al., 2020), l'utilisation de fillers issus du sable de carrière dans la formulation des enrobés peut présenter des variations importantes dans leurs caractéristiques et leur dosage, compromettant ainsi la durabilité des chaussées.

Les fluctuations thermiques, les charges mécaniques importantes et l'exposition prolongée aux rayons UV entraînent souvent une détérioration prématurée des enrobés bitumineux, notamment sous forme de fissures, d'orniérages et d'arrachements. Une analyse approfondie des pratiques actuelles révèle que ces problèmes sont exacerbés par une utilisation inadéquate ou sous-optimale des fillers traditionnels.

Les fillers issus de sables de carrière ou de roches calcaires, bien qu'efficaces, posent des problèmes de coût élevé et de disponibilité limitée dans les zones désertiques éloignées. Leur extraction contribue également à l'épuisement des ressources naturelles et à des impacts environnementaux négatifs. Par ailleurs, bien que le sable de dune soit abondant, il est souvent jugé inapproprié en raison de sa finesse et de sa faible cohésion naturelle.

La problématique principale de cette recherche peut être résumée comme suit : comment valoriser le sable de dune en tant que filler pour améliorer les performances mécaniques, thermiques et environnementales des enrobés bitumineux, tout en répondant aux exigences spécifiques des routes désertiques ?

Cette étude s'articule autour de la nécessité de développer des solutions innovantes et adaptées aux infrastructures routières dans les régions désertiques. L'exploration du potentiel du sable de dune comme filler constitue une réponse à la fois technique, économique et

environnementale aux défis posés par ces zones, tout en offrant des perspectives prometteuses pour une utilisation durable des ressources locales. Cette démarche s'aligne avec les objectifs globaux de réduction des coûts, d'amélioration des performances des matériaux, et de promotion du développement durable dans les régions confrontées à des conditions climatiques extrêmes.

Parmi les matériaux clés utilisés dans la construction routière, les enrobés bitumineux occupent une place centrale. Ils se composent principalement de granulats et de liants bitumineux, auxquels sont ajoutés des fillers pour améliorer leurs propriétés mécaniques et physiques. Les fillers jouent un rôle crucial en comblant les vides dans la matrice granulaire et en renforçant l'interaction entre les granulats et le liant. Cependant, les fillers traditionnels, tels que ceux issus des roches calcaires ou des sables de carrière, présentent des limitations importantes, notamment en termes de coût, de disponibilité et d'impact environnemental liés à leur extraction.

Dans ce contexte, l'utilisation du sable de dune, une ressource abondante dans les zones sahariennes, apparaît comme une solution prometteuse. Ces sables, bien que largement disponibles, restent sous-utilisés en raison de certaines de leurs caractéristiques, notamment leur granularité fine et leur composition chimique. Toutefois, leur valorisation dans les mélanges bitumineux pourrait constituer une alternative durable et économique aux fillers traditionnels, en particulier dans les régions désertiques où ces matériaux sont facilement accessibles. En outre, l'exploitation des sables de dune contribuerait à réduire la pression sur les ressources traditionnelles, favorisant ainsi des pratiques de construction plus respectueuses de l'environnement.

L'objectif de cette recherche est d'étudier le potentiel des fillers issus du sable de dune dans la formulation des enrobés bitumineux. Cette étude vise à caractériser les propriétés physiques, chimiques et granulométriques de ces fillers, à analyser leur impact sur les performances thermiques et mécaniques des enrobés, et à comparer les résultats obtenus avec ceux des fillers conventionnels. Par ailleurs, cette recherche s'inscrit dans une perspective de développement durable, en explorant des solutions techniques adaptées aux contraintes spécifiques des routes dans les zones désertiques.

Cette recherche, en explorant une ressource locale abondante et en proposant des alternatives aux pratiques traditionnelles, a le potentiel de contribuer de manière significative à l'amélioration des infrastructures routières dans les régions sahariennes. Elle s'inscrit

également dans une démarche de réduction des impacts environnementaux associés à la construction routière, en offrant des solutions durables et innovantes pour répondre aux défis posés par les conditions extrêmes des zones désertiques et dont la thématique a été déjà étudiée dans certains travaux récents (Smith et Johnson, 2022; Kim et al., 2021; Zhao et al., 2020).

La thèse est structurée en quatre chapitres. Chaque chapitre aborde un objectif bien déterminé, qui forment l'ensemble du travail effectué.

Après l'introduction générale, le premier chapitre aborde les généralités sur les enrobés bitumineux en présentant les propriétés essentielles et le rôle déterminant de chaque composant constitutif des enrobés en mettant en évidence l'importance de chaque élément dans la conception d'un mélange performant et durable, en particulier dans des environnements contraignants comme les zones désertiques.

Le deuxième chapitre présente une bibliographie sur les sables et les fillers des enrobés bitumineux, en donnant les différentes utilisations des fillers issus des sables de carrière qui ont joué un rôle central dans la formulation des enrobés bitumineux et en spécifiant les limites de leurs utilisations, notamment en termes de disponibilité, de coût et d'impact environnemental. Ce chapitre aborde les fillers de sable de dune en évaluant leur potentiel comme alternative viable aux fillers traditionnels, en mettant l'accent sur leur capacité à améliorer les performances mécaniques et thermiques des enrobés bitumineux dans les zones désertiques en particulier.

Le troisième chapitre explore la méthodologie adoptée pour la réalisation de l'expérimentation en réalisant une série d'analyses granulométriques et chimiques pour déterminer les propriétés des fillers de sable de dune. Des mélanges bitumineux seront formulés en incorporant ces fillers à différents pourcentages, et des essais rigoureux seront menés pour évaluer leur performance. Les essais incluent des tests Marshall pour mesurer la stabilité et la durabilité, des essais thermiques pour évaluer la résistance aux variations de température et des essais de résistance à l'eau pour examiner leur comportement face aux contraintes environnementales.

Le quatrième chapitre se concentre sur l'analyse et l'interprétation des résultats de l'expérimentation et qui sont comparés aux performances des enrobés contenant des fillers traditionnels, afin d'établir une base scientifique solide pour la substitution potentielle des fillers calcaires par des fillers de sable de dune. Le chapitre inclut également l'interprétation et la comparaison des résultats obtenus avec des recherches similaires antérieures.

Enfin, une conclusion générale qui reprend les principaux résultats trouvés dans cette recherche et les recommandations techniques et pratiques formulées pour optimiser l'utilisation de cette solution innovante et des perspectives futures de recherche proposées.

Chapitre 01 :

Généralités sur les enrobés

1.1 Introduction

La construction routière est une composante essentielle des infrastructures modernes, car elle permet de relier les zones urbaines, industrielles et rurales, facilitant ainsi les échanges économiques, sociaux et culturels. Parmi les matériaux de construction, les enrobés bitumineux occupent une place centrale en raison de leur polyvalence et de leur capacité à s'adapter à une large gamme de conditions climatiques et de sollicitations mécaniques. Cependant, les défis liés à la conception, à l'application et à la durabilité de ces matériaux deviennent de plus en plus complexes à mesure que les exigences en termes de performance et de durabilité augmentent.

Les enrobés bitumineux, utilisés principalement pour la réalisation des couches de surface, de base et de liaison dans les structures de chaussées, se caractérisent par leur capacité à supporter des charges lourdes, à résister aux conditions climatiques extrêmes et à maintenir des performances mécaniques élevées sur de longues périodes. Ces propriétés sont particulièrement importantes dans des environnements contraignants tels que les zones désertiques, où les températures peuvent atteindre des niveaux extrêmes et où les variations thermiques quotidiennes peuvent entraîner des fissurations et des dégradations prématurées des chaussées.

Dans ce contexte, il est essentiel de comprendre les caractéristiques fondamentales des enrobés bitumineux et les fonctions spécifiques de leurs différents composants. L'optimisation des enrobés nécessite une connaissance approfondie de leur composition, de leur comportement mécanique et de leurs interactions avec les facteurs environnementaux. Les granulats, le liant bitumineux et les fillers représentent les éléments de base qui déterminent les propriétés mécaniques, thermiques et chimiques de ces matériaux.

Cette introduction vise à poser les bases théoriques nécessaires pour une meilleure compréhension des enrobés bitumineux et de leur rôle dans la construction routière. À travers une exploration de leur définition, de leurs propriétés essentielles et du rôle de leurs composants, ce chapitre s'attache à fournir une vision globale des défis et des opportunités associés à ces matériaux. En abordant les caractéristiques générales des enrobés, il permet de situer la problématique spécifique de la valorisation du sable de dune dans un contexte plus large, celui de l'innovation et de la durabilité dans le domaine des infrastructures routières.

1.2 Définition des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux sont des matériaux composites constitués principalement de granulats et de liants bitumineux, auxquels peuvent être ajoutés des fillers et des additifs spécifiques pour améliorer les propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. Ils sont

largement utilisés dans la construction et l'entretien des chaussées routières en raison de leur capacité à répondre à des exigences variées, notamment en termes de stabilité, de durabilité et de résistance aux contraintes climatiques et mécaniques. Ce mélange complexe, lorsqu'il est formulé correctement, garantit la performance et la longévité des infrastructures routières, même dans des conditions environnementales extrêmes.

Les enrobés bitumineux, également appelés mélanges bitumineux ou asphaltes enrobés, sont des matériaux composites utilisés principalement pour la construction et l'entretien des chaussées routières. Ils résultent du mélange homogène de granulats (graviers, sables et fines) et de liants bitumineux, auxquels peuvent être ajoutés des fillers et des additifs pour améliorer leurs propriétés mécaniques et physico-chimiques. La formulation des enrobés est soigneusement conçue pour répondre aux exigences spécifiques des chaussées, telles que la stabilité sous les charges de trafic, la résistance aux conditions climatiques extrêmes, et la durabilité dans le temps.

1.3 Composants des Enrobés Bitumineux

1.3.1 Granulats

Ils représentent généralement 90 à 95 % du volume total de l'enrobé (Figure 1) et assurent la structure principale du mélange. Les granulats peuvent être d'origine naturelle ou artificielle (recyclés ou manufacturés) et ils sont classés en différentes fractions granulométriques (gros granulats, sables et fines). Leur rôle principal est de conférer au mélange sa rigidité, sa stabilité et sa capacité à supporter les charges.



Figure 1 : Granulats pour enrobés (Source : Prowell et al. (2011))

1.3.2 Bitume

Le bitume est un liant hydrocarboné issu du raffinage du pétrole brut (Figure 2). Il joue un rôle clé dans la cohésion du mélange enrobé, en liant les granulats entre eux. Ses propriétés rhéologiques, telles que sa viscosité et sa plasticité, permettent au matériau de résister aux contraintes mécaniques et aux variations thermiques. Le bitume contribue également à l'imperméabilité de l'enrobé, protégeant ainsi la structure de la chaussée contre l'infiltration d'eau.



Figure 2 : Bitume Pur (source : Ing. Tridico Esther Elisabetta – Rossano, 29 avril 2020)

1.3.3 Fillers

Ces particules extrêmement fines ($< 0,063$ mm), généralement issues de matériaux calcaires ou d'autres sources naturelles ou industrielles, comblent les vides entre les granulats (Figure 3). Ils améliorent la densité du mélange et augmentent la rigidité du bitume en créant une structure interne renforcée. Les fillers influencent également les propriétés rhéologiques du bitume, en augmentant sa viscosité et sa résistance aux déformations (Richardson, 2019; Wang et al., 2021).



Figure 3 : Fillers pour enrobés (Source : (Brown, 2023))

1.3.4 Additifs (optionnels) :

Ils sont utilisés pour modifier ou améliorer certaines propriétés spécifiques des enrobés, comme la résistance à l'eau, la flexibilité à basse température ou la stabilité thermique (Figure 4). Ces additifs incluent des polymères, des agents anti-stripping, et des modifiants chimiques.



Figure 4 : Additifs utilisés dans les enrobés (Source : SPG-Pack)

1.4 Processus de Fabrication des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux, essentiels pour les infrastructures routières, sont fabriqués en combinant des granulats avec du bitume selon des processus adaptés aux conditions d'utilisation et aux contraintes environnementales. Le mode de fabrication dépend principalement du type de bitume utilisé et de la méthode de mise en œuvre et les enrobés peuvent être produits à chaud, à tiède ou à froid. Chaque méthode présente des caractéristiques spécifiques en termes de performances, d'applications et d'impact environnemental.

1.4.1 Enrobés à chaud

Les enrobés à chaud constituent la méthode de fabrication la plus courante, utilisée principalement pour les chaussées soumises à un trafic intense. Ces mélanges sont produits à des températures élevées, généralement comprises entre 140 °C et 180 °C. Cette plage de températures permet de fluidifier le bitume, facilitant ainsi son mélange avec les granulats. Le chauffage des granulats et du bitume garantit une répartition homogène des composants et une bonne cohésion, essentielle pour la durabilité des infrastructures.

La fabrication des enrobés à chaud suit un processus précis, incluant le préchauffage des granulats, l'introduction progressive du bitume et le malaxage mécanique pour assurer l'homogénéité. Ces enrobés offrent des performances mécaniques élevées, notamment en termes de résistance aux charges lourdes et de stabilité thermique, ce qui les rend adaptés aux autoroutes, aux pistes d'atterrissage et aux zones industrielles. Cependant, le principal

inconvenient de cette méthode réside dans son impact environnemental, notamment en raison des émissions de gaz à effet de serre associées aux températures élevées.

1.4.2 Enrobés tièdes

Les enrobés tièdes représentent une alternative plus respectueuse de l'environnement, car ils sont préparés à des températures plus basses, généralement comprises entre 80 °C et 120 °C. Cette méthode utilise des technologies spécifiques, telles que l'ajout d'additifs chimiques ou l'utilisation de mousses de bitume, pour abaisser la température de fabrication sans compromettre l'homogénéité du mélange.

Les principaux avantages des enrobés tièdes incluent une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre et une moindre consommation d'énergie par rapport aux enrobés à chaud. De plus, ces mélanges améliorent les conditions de travail sur les chantiers en réduisant l'exposition des ouvriers aux fumées bitumineuses. Bien qu'ils soient légèrement moins résistants que les enrobés à chaud, ils conviennent parfaitement aux routes urbaines et aux chaussées soumises à un trafic modéré.

1.4.3 Enrobés à froid

Les enrobés à froid, quant à eux, sont produits à température ambiante en utilisant des émulsions de bitume ou des bitumes mous. Ces mélanges sont particulièrement adaptés aux travaux ponctuels, tels que la réparation des nids-de-poule, ou pour des routes à faible trafic, comme les chemins ruraux ou les pistes cyclables.

Le processus de fabrication des enrobés à froid est plus simple et ne nécessite pas de chauffage préalable des matériaux. Le bitume est utilisé sous forme liquide (émulsion ou mousse), ce qui facilite sa manipulation et son application. Les enrobés à froid se distinguent par leur faible coût de production et leur mise en œuvre rapide, bien qu'ils soient généralement moins performants en termes de résistance mécanique et de durabilité par rapport aux enrobés à chaud ou tièdes.

1.4.4 Choix du processus de fabrication

Le choix du processus de fabrication des enrobés bitumineux dépend des exigences spécifiques du projet, des conditions environnementales et des contraintes budgétaires. Les enrobés à chaud sont privilégiés pour les infrastructures lourdes nécessitant une haute performance, tandis que les enrobés tièdes offrent une alternative plus écologique et adaptée aux zones urbaines. Enfin, les enrobés à froid restent une solution pratique pour les travaux de

réparation ou les zones à faible trafic. Ces différentes approches permettent une adaptation optimale aux besoins variés des infrastructures routières modernes.

1.5 Rôles et avantages des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux remplissent plusieurs fonctions essentielles dans la construction des routes. Ils constituent une couche de roulement résistante, lisse et sécurisée, adaptée à une grande variété de conditions climatiques et de types de trafic. Parmi leurs avantages, on peut citer :

- **La résistance mécanique** : La capacité à supporter les charges dynamiques et statiques, ainsi que les cycles de chargement répétés, en fait un matériau idéal pour les routes à trafic intense.
- **La durabilité** : Les enrobés correctement formulés conservent leurs propriétés pendant plusieurs décennies, nécessitant peu d'entretien.
- **L'imperméabilité** : Ils protègent les couches inférieures de la chaussée contre les infiltrations d'eau, réduisant ainsi les risques de dégradations dues au gel-dégel.
- **L'adaptabilité** : Les enrobés peuvent être conçus pour s'adapter à des environnements variés, y compris les zones désertiques, les climats froids, ou les chaussées urbaines à fort trafic.

1.6 Importance de l'utilisation des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux constituent l'épine dorsale des infrastructures routières modernes. Leur polyvalence permet de les utiliser pour diverses applications, telles que les couches de roulement, de base et d'accrochage dans les structures de chaussées. De plus, leur composition peut être modifiée pour répondre à des exigences spécifiques, comme l'intégration de matériaux recyclés ou de fillers alternatifs, tels que le sable de dune. Cette flexibilité dans la conception et l'application des enrobés en fait un choix incontournable pour répondre aux défis techniques, économiques et environnementaux de la construction routière contemporaine.

Les enrobés bitumineux sont bien plus qu'un simple mélange de granulats et de bitume, mais ils représentent une solution technique sophistiquée qui évolue constamment pour répondre aux besoins des infrastructures modernes, en mettant l'accent sur la performance, la durabilité et la durabilité environnementale.

1.7 Propriétés des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux se distinguent par une combinaison de propriétés mécaniques, thermiques et chimiques qui leur confèrent leur efficacité et leur durabilité en tant que matériau de base pour la construction routière. Ces propriétés sont le résultat d'une interaction complexe entre leurs composants (granulats, bitume et fillers) et des processus de formulation et de mise en œuvre. Les propriétés essentielles des enrobés bitumineux peuvent être regroupées en plusieurs catégories, chacune jouant un rôle crucial dans les performances globales des chaussées. Les propriétés les plus importantes sont :

- **Stabilité Mécanique** : La stabilité mécanique des enrobés bitumineux fait référence à leur capacité à résister aux déformations plastiques sous l'effet de charges répétées ou prolongées. Cette propriété est particulièrement importante pour prévenir la formation d'ornières, notamment sur les routes à fort trafic. La stabilité dépend de la qualité des granulats, de la cohésion apportée par le bitume, ainsi que de la densité du mélange. Les essais Marshall sont couramment utilisés pour évaluer la stabilité des enrobés, en mesurant la résistance à la déformation sous des charges contrôlées.
- **Résistance à la Fatigue** : La fatigue est un phénomène causé par des cycles de chargement répétés, entraînant la formation de fissures dans les enrobés. Une bonne résistance à la fatigue permet au matériau de conserver son intégrité structurelle sur une longue période, même sous des contraintes importantes. Cette propriété est particulièrement critique dans les zones urbaines ou industrielles, où les charges dynamiques sont fréquentes. La flexibilité du bitume et la cohésion apportée par les fillers jouent un rôle central dans la résistance à la fatigue.
- **Résistance Thermique** : Les enrobés bitumineux doivent être capables de supporter des variations thermiques importantes sans perte significative de performance. À haute température, ils doivent conserver leur stabilité pour éviter les déformations plastiques, tandis qu'à basse température, ils doivent rester suffisamment flexibles pour prévenir les fissurations dues au retrait thermique. Cette propriété est essentielle dans des environnements comme les zones désertiques, où les écarts de température entre le jour et la nuit peuvent être extrêmes. La résistance thermique est influencée par la viscosité du bitume, la compacité du mélange et la granulométrie des fillers.
- **Imperméabilité** : L'imperméabilité des enrobés bitumineux est une propriété fondamentale pour protéger les couches sous-jacentes de la chaussée contre les infiltrations d'eau. Une pénétration excessive de l'eau peut entraîner des phénomènes de désagrégation, d'érosion

ou de perte de cohésion, réduisant considérablement la durabilité de la route. L'imperméabilité dépend de la densité et de la compacité du mélange, ainsi que de l'utilisation de fillers qui combleront efficacement les vides entre les granulats.

- **Durabilité** : La durabilité des enrobés bitumineux reflète leur capacité à maintenir leurs propriétés mécaniques et fonctionnelles sur une longue période, malgré les sollicitations climatiques et mécaniques. Les enrobés bien formulés peuvent durer plusieurs décennies avec un entretien minimal, réduisant ainsi les coûts de maintenance. Cette propriété dépend de la qualité des matériaux utilisés, du processus de mise en œuvre et de la résistance aux agents de vieillissement, tels que l'oxydation du bitume et l'action des rayons UV.
- **Résistance aux Agents Climatiques et Chimiques** : Les enrobés bitumineux sont souvent exposés à des agents extérieurs agressifs, tels que les sels de déverglaçage, les hydrocarbures, et les rayons UV. Une bonne résistance chimique et climatique permet de prévenir les dégradations prématurées, telles que la fissuration, l'arrachement ou l'oxydation du bitume. L'ajout d'additifs ou de polymères dans le mélange peut améliorer cette propriété, en renforçant la structure chimique du bitume.
- **Adhérence et Cohésion** : L'adhérence entre les granulats et le bitume est essentielle pour garantir la cohésion globale du mélange. Une mauvaise adhérence peut entraîner des phénomènes d'arrachement ou de désagrégation sous l'effet des contraintes mécaniques ou des variations climatiques. Les fillers et les additifs jouent un rôle clé dans l'amélioration de l'adhérence, en augmentant la surface de contact et en renforçant les interactions chimiques entre les composants.
- **Facilité de Mise en Œuvre** : Outre les propriétés mécaniques et chimiques, la maniabilité des enrobés lors de leur application est une considération importante. Les enrobés doivent être suffisamment souples pour permettre un étalement homogène et un compactage efficace, tout en maintenant une cohésion adéquate pendant la mise en œuvre. Cette propriété dépend des caractéristiques rhéologiques du bitume et de la température à laquelle le mélange est appliqué.

Un équilibre optimal entre ces propriétés est essentiel pour répondre aux exigences des infrastructures routières modernes. Par exemple, une trop grande rigidité peut entraîner des fissurations sous l'effet des charges dynamiques, tandis qu'un excès de flexibilité peut provoquer des déformations plastiques à haute température. La formulation des enrobés nécessite donc une compréhension approfondie des interactions entre les granulats, le bitume et les fillers, ainsi qu'une adaptation aux conditions spécifiques d'utilisation.

Les propriétés essentielles des enrobés bitumineux en font un matériau polyvalent et performant, capable de répondre aux exigences variées des infrastructures routières. Leur durabilité, leur résistance aux agents climatiques et leur adaptabilité aux conditions environnementales en font une solution incontournable pour la construction des chaussées modernes, en particulier dans des environnements contraignants tels que les zones désertiques.

Une étude récente menée par le département des Vosges en France a exploré l'utilisation de la chaux hydratée dans les enrobés bitumineux afin d'améliorer leur durabilité et leur résistance aux conditions climatiques. Les résultats ont montré que l'ajout de chaux permet de réduire le vieillissement prématuré du liant bitumineux, d'augmenter la cohésion interne des enrobés, et d'améliorer leur résistance à l'humidité. Cette approche présente un intérêt particulier dans les régions soumises à des conditions climatiques extrêmes, en offrant une meilleure tenue des chaussées sur le long terme. Ces conclusions soulignent l'importance de l'optimisation des formulations d'enrobés en fonction des contraintes environnementales et ouvrent la voie à l'utilisation de matériaux alternatifs, tels que le sable de dune étudié dans cette recherche (Département des Vosges, 2023).

1.8 Rôle des composants dans les enrobés

Les enrobés bitumineux, en tant que matériaux composites, présentent des propriétés mécaniques, thermiques et fonctionnelles qui dépendent directement des caractéristiques et des interactions entre leurs composants principaux. Ces composants essentiels - granulats, bitume, fillers et additifs - contribuent de manière spécifique à la structure et au comportement des enrobés. L'optimisation de leurs interactions constitue un facteur déterminant pour assurer des performances conformes aux exigences mécaniques et environnementales imposées aux chaussées.

1.8.1 Granulats

Les granulats représentent un composant fondamental des enrobés bitumineux et constituent la structure principale du mélange. Occupant environ 90 à 95 % du volume total de l'enrobé, ils déterminent la résistance mécanique, la durabilité et la stabilité des chaussées. Compte tenu de leur importance structurelle, leurs propriétés - notamment la qualité, la granulométrie et les caractéristiques intrinsèques - nécessitent un contrôle rigoureux et une adaptation précise aux spécifications techniques des projets de construction routière. La classification des granulats s'établit selon plusieurs catégories, déterminées par leurs dimensions et leur origine :

- **Gros granulats** (4 mm et plus) : ils forment la charpente principale du mélange, assurant la rigidité et la capacité de charge de l'enrobé.
- **Sables** (0,063 mm à 4 mm) : ils remplissent les espaces entre les gros granulats, contribuant à la densité et à l'imperméabilité du mélange.
- **Fines** (moins de 0,063 mm) : elles jouent un rôle de transition, comblant les plus petits interstices et améliorant la cohésion globale du matériau.

La qualité des granulats, notamment leur granulométrie, leur forme (anguleuse, arrondie) et leur dureté, influence directement la durabilité et la performance des enrobés. Une distribution granulométrique équilibrée permet d'obtenir un mélange compact et stable, tandis qu'une bonne adhérence entre les granulats et le bitume garantit la cohésion du matériau.

Les granulats servent principalement d'ossature à l'enrobé. Leur agencement dans le mélange détermine la capacité de l'enrobé à supporter les charges mécaniques exercées par le trafic et les contraintes environnementales et leur rôle peut être résumé comme suit :

- **Support de charge** : Les granulats, en raison de leur rigidité et de leur résistance, transfèrent efficacement les charges appliquées sur la chaussée vers les couches inférieures. Ils assurent ainsi une distribution homogène des contraintes, minimisant les risques de déformation permanente.
- **Stabilité du mélange** : La disposition des granulats dans le mélange influence la stabilité interne de l'enrobé. Une granulométrie bien équilibrée garantit une bonne interconnexion entre les particules, réduisant les risques d'orniérage ou de fluage sous des charges prolongées.
- **Durabilité** : La résistance des granulats à l'usure, à la fragmentation et aux agressions chimiques, comme l'action de l'eau ou des sels de déverglaçage, contribue directement à la longévité des enrobés. Des granulats de haute qualité assurent une meilleure résistance à la dégradation.
- **Densité et compacité** : Une distribution granulométrique appropriée, combinant gros granulats, sables et fines, permet d'obtenir une compacité maximale du mélange. Cette densité réduit la perméabilité et améliore les performances mécaniques globales.

1.8.2 Bitume

Le bitume est un liant hydrocarboné d'origine pétrolière, utilisé pour enrober les granulats et assurer leur cohésion. Il constitue environ 4 à 10 % du poids total de l'enrobé, mais son rôle est crucial dans la performance globale du matériau.

Les principales fonctions du bitume incluent :

- **Cohésion et liaison des granulats** : Le bitume agit comme un liant en enrobant chaque particule de granulat pour former un mélange homogène. Cette liaison garantit la stabilité de l'enrobé sous les contraintes mécaniques et assure sa capacité à supporter les charges dynamiques appliquées par le trafic routier.
- **Flexibilité et adaptation aux déformations** : Grâce à ses propriétés viscoélastiques, le bitume confère au mélange une certaine flexibilité, permettant à l'enrobé de s'adapter aux déformations causées par les variations thermiques ou les charges dynamiques répétées. Cette flexibilité est essentielle pour éviter l'apparition de fissures, en particulier dans des conditions climatiques extrêmes.
- **Imperméabilité** : Le bitume forme une barrière étanche qui protège les couches inférieures de la chaussée contre les infiltrations d'eau. Cette imperméabilité est cruciale pour prévenir les dommages liés au gel-dégel, tels que le gonflement ou l'érosion des couches sous-jacentes.
- **Résistance au fluage** : À haute température, le bitume maintient la stabilité du mélange en réduisant les risques de déformations plastiques (orniérage). Sa capacité à résister au fluage dépend de sa viscosité et de ses caractéristiques rhéologiques.
- **Amélioration des propriétés thermiques** : Le bitume aide à modérer les effets des variations de température en absorbant et en dissipant une partie des contraintes thermiques subies par les enrobés.

Les caractéristiques du bitume, telles que sa viscosité, sa température de ramollissement et sa résistance au vieillissement, influencent directement les performances des enrobés. Ces propriétés peuvent être ajustées par l'utilisation de bitumes modifiés ou d'additifs spécifiques, pour répondre aux besoins des environnements extrêmes ou des chaussées à fort trafic.

1.8.3 Fillers

Les fillers, également appelés charges minérales fines, sont des composants essentiels des enrobés bitumineux, jouant un rôle déterminant dans l'amélioration de leurs propriétés mécaniques, physiques et rhéologiques. Il s'agit de particules très fines, généralement

inférieures à 0,063 mm, qui sont ajoutées au mélange pour combler les vides entre les granulats et modifier les caractéristiques du bitume. Bien qu'ils ne représentent qu'une fraction relativement faible de la composition totale (généralement entre 5 et 10 % en poids), leur influence sur les performances des enrobés est significative et leurs rôles dans les enrobés bitumineux sont comme suit :

- **Densification du mélange** : Les fillers remplissent les vides entre les granulats et les sables, augmentant ainsi la densité globale de l'enrobé. Cette densification réduit la porosité du mélange, améliorant son imperméabilité et sa résistance aux infiltrations d'eau. Un mélange dense est également moins sujet à l'oxydation du bitume et aux effets destructeurs du gel-dégel.
- **Renforcement de la cohésion** : En agissant comme un pont entre les granulats et le bitume, les fillers renforcent la cohésion interne du mélange. Ils augmentent l'interaction mécanique et chimique entre les composants, ce qui améliore la résistance mécanique des enrobés, en particulier sous des charges dynamiques élevées.
- **Modification des propriétés rhéologiques du bitume** : Les fillers modifient la viscosité du bitume en formant un mastic bitume-filler, une matrice semi-solide qui rigidifie le mélange. Cette interaction améliore la résistance à haute température en réduisant le risque de fluage ou d'orniérage, tout en maintenant une flexibilité suffisante à basse température pour éviter les fissurations.
- **Amélioration de la durabilité** : Les fillers, en augmentant la cohésion et en réduisant la porosité, contribuent à prolonger la durée de vie des enrobés. Ils protègent également le bitume contre les agressions extérieures, comme l'oxydation ou les attaques chimiques.
- **Adaptation aux conditions climatiques** : Dans les régions désertiques ou les environnements froids, les fillers peuvent être choisis ou modifiés pour améliorer les performances des enrobés face aux variations extrêmes de température. Par exemple, des fillers spécifiques peuvent augmenter la rigidité à haute température ou la flexibilité à basse température.

Les fillers jouent un rôle clé dans l'innovation des enrobés bitumineux. La recherche actuelle se concentre sur le développement de fillers alternatifs, comme ceux issus de matériaux recyclés ou de ressources naturelles inexploitées, tels que le sable de dune. Ces fillers alternatifs, en plus de réduire les coûts et les impacts environnementaux, ouvrent de nouvelles possibilités pour améliorer les performances des enrobés dans des environnements spécifiques.

1.8.4 Additifs

Les additifs constituent un élément essentiel dans la formulation des enrobés bitumineux, permettant d'optimiser leurs performances mécaniques, thermiques et chimiques. Malgré leur incorporation en faibles proportions, ces composants induisent des modifications spécifiques aux propriétés des enrobés, répondant ainsi aux exigences techniques des infrastructures routières modernes. Cette optimisation des caractéristiques s'avère particulièrement significative dans les environnements contraignants, notamment les zones désertiques, où les conditions climatiques extrêmes requièrent des solutions techniques appropriées. Les fonctions principales des additifs dans les enrobés bitumineux comprennent :

- **Amélioration de la résistance à la fatigue** : Les additifs renforcent la capacité des enrobés à résister aux cycles de chargement répétés sans fissuration. Cette propriété est essentielle pour les chaussées soumises à un trafic intense ou à des charges dynamiques importantes.
- **Stabilisation thermique** : Dans les régions chaudes ou les zones à fortes variations de température, les additifs contribuent à maintenir la rigidité de l'enrobé à haute température tout en conservant sa flexibilité à basse température. Cela réduit le risque de fluage, d'orniérage ou de fissuration thermique.
- **Résistance à l'eau et à l'humidité** : Certains additifs, tels que les agents anti-stripping, améliorent l'adhérence entre le bitume et les granulats, réduisant ainsi les risques de désagrégation et d'arrachement dans des conditions humides.
- **Réduction de l'impact environnemental** : Les additifs permettent également de produire des enrobés à des températures plus basses (enrobés tièdes), diminuant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et les coûts énergétiques liés à leur production.

1.8.4.1 Influence des additifs sur les propriétés des enrobés

- **Résistance mécanique accrue** : Les polymères augmentent la rigidité et la capacité des enrobés à résister aux charges lourdes, tout en améliorant leur durabilité face aux cycles de chargement répétés.
- **Réduction des dégradations thermiques** : Les additifs stabilisent les propriétés des enrobés dans des conditions climatiques extrêmes, réduisant ainsi les risques de fissuration ou d'orniérage.
- **Amélioration de la maniabilité** : Les additifs facilitent la mise en œuvre des enrobés en ajustant leur consistance et leur viscosité, ce qui est particulièrement utile pour les enrobés tièdes ou recyclés.

- **Durabilité prolongée** : Les agents anti-stripping et hydrophobes augmentent la résistance des enrobés à l'eau, prolongeant ainsi leur durée de vie.
- **Réduction de l'impact environnemental** : Les additifs pour enrobés tièdes permettent de réduire les consommations d'énergie et les émissions de CO₂, tout en offrant des performances comparables à celles des enrobés à chaud.

1.8.4.2 Applications spécifiques des additifs

- **Chaussées à fort trafic** : Utilisation de polymères pour renforcer la résistance mécanique et réduire le risque de fatigue.
- **Environnements humides** : Ajout d'agents anti-stripping pour améliorer l'adhérence et réduire les désagréments dus à l'eau.
- **Régions désertiques** : Incorporation de polymères plastomères pour stabiliser les enrobés à haute température.
- **Recyclage** : Utilisation d'additifs régénérants pour restaurer les propriétés des enrobés usés.

Les additifs offrent une flexibilité supplémentaire pour ajuster les propriétés des enrobés en fonction des besoins spécifiques, tels que la coloration pour des applications esthétiques ou l'ajout de granulats recyclés pour favoriser le développement durable.

1.9 Conclusion

Les enrobés bitumineux représentent un matériau essentiel pour la construction et l'entretien des infrastructures routières, combinant robustesse, durabilité et adaptabilité. Ce chapitre a permis de présenter les bases théoriques nécessaires à leur compréhension, en abordant leur définition, leurs propriétés essentielles et le rôle déterminant de leurs composants.

Les granulats, qui forment l'ossature de l'enrobé, assurent la rigidité et la résistance mécanique du mélange, tandis que le bitume agit comme un liant, garantissant la cohésion, l'imperméabilité et la flexibilité nécessaires. Les fillers, bien qu'utilisés en faibles proportions, jouent un rôle clé dans la densification et le renforcement du mélange, augmentant sa durabilité et ses performances globales. Enfin, les additifs, véritables modificateurs de performance, offrent des solutions techniques pour répondre aux défis posés par les contraintes mécaniques, climatiques et environnementales.

L'interaction entre ces composants et leur optimisation sont essentielles pour garantir des enrobés capables de répondre aux exigences des infrastructures modernes. Ce chapitre met en

évidence l'importance de chaque élément dans la conception d'un mélange performant et durable, en particulier dans des environnements contraignants comme les zones désertiques.

Dans les chapitres suivants, cette base théorique sert de cadre pour explorer des solutions innovantes, notamment l'intégration de fillers alternatifs tels que le sable de dune, en vue d'améliorer les propriétés des enrobés bitumineux et d'offrir des réponses durables aux défis de la construction routière.

Chapitre 02 :
Sables et fillers des enrobes
bitumineux

2.1 Introduction

Dans la construction routière, la qualité et la durabilité des infrastructures dépendent largement des matériaux utilisés dans la composition des enrobés bitumineux. Parmi ces composants essentiels, les sables et leurs dérivés, notamment les fillers, occupent une place prépondérante, influençant directement les performances et la longévité des revêtements routiers.

L'origine et la formation des sables constituent des aspects fondamentaux pour comprendre leur potentiel d'utilisation dans les enrobés bitumineux. Les processus géologiques qui conduisent à la formation des sables, qu'ils soient issus de carrières ou de dunes, déterminent leurs caractéristiques physiques et chimiques. Dans les régions désertiques, les sables de dune, formés par l'action éolienne sur des périodes géologiques étendues, présentent des particularités distinctes des sables de carrière traditionnellement utilisés dans la construction routière.

Les sables désertiques, abondants dans les régions sahariennes de l'Algérie, résultent d'une combinaison complexe de processus d'érosion, de transport et de sédimentation. Ces processus naturels confèrent aux grains de sable des caractéristiques spécifiques en termes de taille, de forme et de composition minéralogique. La compréhension de ces caractéristiques est essentielle pour évaluer leur potentiel comme source alternative de fillers dans les enrobés bitumineux.

L'utilisation actuelle des sables de carrière comme source principale de fillers dans les enrobés soulève plusieurs questions quant à leur adéquation aux conditions particulières des zones désertiques. Les contraintes liées à l'exploitation des carrières, combinées aux exigences croissantes en matière de performance et de durabilité des revêtements routiers, nécessitent l'exploration de solutions alternatives innovantes.

Ce chapitre vise à établir un cadre conceptuel complet pour l'étude des sables et des fillers utilisés dans les enrobés bitumineux. Il examine successivement les caractéristiques générales des sables, la nature et les propriétés des fillers, ainsi que les défis actuels liés à leur utilisation. Cette analyse approfondie permettra de mettre en perspective l'intérêt potentiel des fillers de sable de dune comme alternative aux matériaux traditionnels, particulièrement dans le contexte spécifique des routes désertiques.

La progression logique de ce chapitre, des concepts fondamentaux aux applications spécifiques, permettra d'établir une base solide pour l'exploration des possibilités offertes par

les fillers de sable de dune dans l'amélioration des performances des enrobés bitumineux en conditions désertiques.

2.2 Caractéristiques des Sables

Le sable est un matériau granulaire naturel composé de particules dont la taille se situe généralement entre 0,063 mm et 2 mm. Il résulte principalement de l'érosion et de la désintégration des roches sous l'effet de divers agents géologiques, tels que l'eau, le vent et les variations climatiques. La formation des sables est un processus long et complexe qui dépend de la nature des roches mères, des conditions environnementales et des mécanismes de transport et de dépôt. En raison de cette diversité d'origine, les sables présentent des caractéristiques variées qui influencent leurs utilisations, notamment dans les enrobés bitumineux, où ils peuvent être une source importante de granulats ou de fillers.

2.3. Origine des sables

Les sables sont des matériaux naturels formés par des processus géologiques complexes impliquant l'altération, l'érosion, le transport et le dépôt de particules de taille variable. Leur composition et leurs propriétés varient en fonction de l'origine géologique des roches mères et des conditions environnementales auxquelles ils ont été exposés. La classification des sables repose principalement sur leur mode de formation et leur environnement de dépôt, qui déterminent leurs caractéristiques physiques, granulométriques et minéralogiques. Les sables se forment par des processus naturels qui décomposent les roches en particules plus petites sous l'action de différents agents, tels que l'eau, le vent, la glace et les variations climatiques. Ce processus, appelé altération et érosion, peut être divisé en deux grandes phases :

- **Altération** : L'altération chimique implique des réactions entre les minéraux des roches et les agents atmosphériques, comme l'eau, l'oxygène et le dioxyde de carbone, entraînant une décomposition des roches. Par exemple, le quartz, résistant à l'altération chimique, est souvent le principal constituant des sables. L'altération mécanique désigne la fragmentation des roches sous l'effet de phénomènes tels que les variations de température, le gel-dégel ou l'abrasion par des particules solides.
- **Transport et dépôt** : Une fois les roches désintégrées en particules fines, celles-ci sont transportées par des agents naturels comme les cours d'eau, les vents ou les glaciers. La distance parcourue et le mode de transport influencent la forme, la taille et la composition des grains de sable. Le dépôt des sables se produit lorsque l'énergie du milieu de transport

diminue, permettant aux particules de se déposer. Cela donne lieu à la formation de plages, de dunes, de lits de rivières ou de dépôts marins.

2.4 Classification des sables

Les sables sont classés selon leur origine géologique et leur environnement de dépôt, ce qui permet de comprendre leurs caractéristiques physiques et chimiques ainsi que leurs applications potentielles.

2.4.1 Sables alluviaux

Les sables alluviaux (Figure 5) sont formés par le dépôt de matériaux transportés par les cours d'eau, souvent dans les lits de rivières, les plaines inondables ou les deltas et dont leurs caractéristiques :

- Grains arrondis, résultant d'un transport prolongé par l'eau.
- Bonne granulométrie et faible teneur en impuretés.
- Composition riche en quartz et en feldspaths.



Figure 5 : Sables Fluviaux (Source : Dreamstime.com)

2.4.2 Sables de carrière

Les sables de carrière (Figure 6) proviennent de l'exploitation de roches consolidées, telles que le calcaire, le granit ou le basalte. Ils sont produits par concassage mécanique des roches, suivi d'un tamisage pour obtenir des fractions granulométriques spécifiques :

- Grains anguleux, offrant une meilleure interconnexion mécanique dans les mélanges.
- Composition stable en fonction de la roche mère (par exemple, calcaire ou silice).
- Possibilité de contrôle granulométrique précis.

Ils sont largement utilisés dans les bétons, les enrobés et comme source de fillers.



Figure 6 : Sables de carrière (Source : <https://fr.freepik.com/>)

2.4.3 Sables de dune

Ces sables se forment par l'action du vent (érosion éolienne) dans les régions arides et semi-arides (figure 7). Ils se déposent sous forme de dunes mobiles ou fixes, souvent dans les déserts et dont les caractéristiques suivantes :

- Grains fins, bien triés et arrondis, en raison de l'abrasion par le vent.
- Composition majoritairement siliceuse (richesse en quartz).
- Faible cohésion naturelle, limitant leur usage direct dans les applications structurelles.

Bien que sous-utilisés, les sables de dune offrent un potentiel élevé pour des applications innovantes, notamment comme fillers dans les enrobés bitumineux.



Figure 7 : Sables de Dune (Source: fr.freepik.com)

2.4.4 Sables marins

Les sables marins proviennent des fonds marins et des plages (Figure 8), où ils sont transportés par les courants marins et les vagues. Ils contiennent souvent des impuretés organiques et des sels caractérisés par :

- Grains arrondis ou semi-anguleux.
- Teneur élevée en matières organiques et en coquillages, nécessitant un traitement préalable.

Principalement utilisés dans le béton et les travaux de terrassement après un lavage intensif pour éliminer les sels.



Figure 8 : Sables marins (Source : fr.freepik.com)

2.5 Facteurs influençant les caractéristiques des sables

Les **caractéristiques** des sables résultent de l'interaction complexe entre plusieurs paramètres physiques, chimiques et mécaniques. La compréhension approfondie de ces facteurs d'influence s'avère déterminante pour l'optimisation des performances des enrobés bitumineux. Ces caractéristiques citées ci-dessous, qui varient selon l'origine et l'histoire géologique des sables, définissent leur comportement au sein des mélanges et déterminent leur aptitude à répondre aux exigences techniques des infrastructures routières.

- **Composition chimique** : La nature minéralogique des sables, dominée par des minéraux comme le quartz, le calcaire ou les feldspaths, détermine leur résistance chimique et leur interaction avec le bitume dans les enrobés.
- **Granulométrie** : La taille des particules influence la densité et la compacité des mélanges. Une granulométrie équilibrée est essentielle pour les enrobés bitumineux.
- **Forme des grains** : Les grains anguleux offrent une meilleure stabilité mécanique, tandis que les grains arrondis facilitent la maniabilité du mélange.
- **Propreté** : Les impuretés, telles que les argiles ou les matières organiques, peuvent nuire à l'adhérence entre les sables et les liants, réduisant ainsi les performances des enrobés.

Les sables, qu'ils soient alluviaux, de carrière, de dune, marins ou glaciaires, présentent une diversité d'origines et de caractéristiques qui influencent leurs applications dans la construction routière. Leur classification permet de mieux comprendre leurs propriétés physiques, chimiques et mécaniques, essentielles pour leur intégration dans les enrobés bitumineux. Cette diversité offre également des opportunités pour explorer des matériaux alternatifs, comme les sables de dune, qui pourraient répondre aux exigences spécifiques des environnements désertiques et des infrastructures modernes.

2.6. Propriétés des sables

2.6.1. Propriétés granulométriques

Les propriétés granulométriques des sables, qui décrivent la distribution des tailles de particules dans un matériau (Figure 9), sont un facteur clé déterminant leurs applications dans la construction routière, notamment en tant que granulats ou fillers dans les enrobés bitumineux. La granulométrie influence directement la densité, la compacité, la maniabilité et la performance des mélanges, en particulier dans les infrastructures nécessitant des matériaux spécifiques pour résister aux contraintes mécaniques et climatiques.



Figure 9 : Granulométrie et forme des grains (Source : Dreamstime.com)

Dans les enrobés bitumineux, la granulométrie des sables joue un rôle crucial pour assurer :

- **La densité et la compacité** : Une granulométrie bien équilibrée réduit les vides dans le mélange, ce qui améliore la densité et augmente la résistance mécanique et la durabilité des enrobés.
- **L'interconnexion des particules** : La granulométrie détermine la manière dont les particules s'agencent pour former une structure cohésive. Les particules fines remplissent les interstices laissés par les particules plus grosses, assurant une meilleure liaison dans le mélange.
- **L'imperméabilité** : Une distribution granulométrique appropriée minimise la porosité, empêchant ainsi l'infiltration de l'eau et réduisant les risques liés au gel-dégel et à l'érosion.
- **La maniabilité** : Les sables avec une granulométrie contrôlée facilitent le mélange avec le bitume et améliorent la mise en œuvre des enrobés.

2.6.1.1. Classification granulométrique des sables

Les sables sont classés en fonction de la taille de leurs particules, mesurée par tamisage ou par analyse laser. Les principales catégories granulométriques sont les suivantes :

- **Sables grossiers** : 0,5 mm à 2 mm
 - Ces particules, souvent visibles à l'œil nu, assurent la rigidité et la résistance mécanique des mélanges.
 - Utilisation : Comme composant principal des granulats pour les enrobés bitumineux.
- **Sables moyens** : 0,2 mm à 0,5 mm

- Ils contribuent à la densité globale du mélange en comblant les vides laissés par les gros granulats.
- Utilisation : Souvent utilisés pour ajuster la granulométrie des mélanges.
- **Sables fins** : 0,063 mm à 0,2 mm
 - Ces particules remplissent les interstices entre les grains plus gros, améliorant ainsi la compacité et la maniabilité.
 - Utilisation : Comme fillers partiels ou pour augmenter la cohésion des mélanges.
- **Poudres (fines très inférieures)** : < 0,063 mm
 - Ces particules sont utilisées comme fillers pour renforcer la matrice bitume-filler, augmentant la rigidité et l'imperméabilité des enrobés.

2.6.1.2 Paramètres granulométriques essentiels

La granulométrie des sables est décrite par plusieurs paramètres, chacun ayant un impact spécifique sur les performances des mélanges :

- **Module de finesse** : Le module de finesse (MF) est une mesure qui reflète la répartition des tailles de particules dans le sable. Un MF élevée indique une prédominance de particules grossières, tandis qu'un MF faible signale une granulométrie fine.

Impact : Un MF équilibré est nécessaire pour optimiser la densité et la cohésion des enrobés.
- **Courbe granulométrique** : Elle montre la répartition cumulative des tailles de particules. Une courbe continue et bien équilibrée assure une compacité maximale.

Impact : Une courbe granulométrique non équilibrée peut entraîner des mélanges hétérogènes, réduisant leur résistance et leur maniabilité.
- **Coefficient d'uniformité (CU)** : Il exprime la gamme de tailles de particules dans le sable. Un CU élevé indique une grande diversité granulométrique, tandis qu'un CU faible reflète un sable homogène.

Impact : Les sables uniformes sont préférables pour les fillers, tandis que les sables bien gradés sont adaptés aux granulats.

2.6.1.3 Influence de la forme et de la texture des grains

Outre la taille, la forme et la texture des particules de sable jouent un rôle complémentaire dans leurs propriétés granulométriques :

- **Forme des grains :**

- Les grains anguleux offrent une meilleure interconnexion mécanique, augmentant la stabilité des enrobés.
- Les grains arrondis facilitent la maniabilité mais réduisent la cohésion globale.

- **Texture de surface :**

- Les grains rugueux améliorent l'adhérence avec le bitume, renforçant la cohésion des mélanges.
- Les grains lisses, bien qu'utilisés pour des applications spécifiques, peuvent réduire l'interaction entre les composants.

2.6.1.4 Applications spécifiques des sables selon leur granulométrie

- **Granulats fins pour enrobés :** Les sables grossiers et moyens sont couramment utilisés comme granulats fins pour renforcer la matrice granulaire des enrobés.
- **Fillers dans les enrobés bitumineux :** Les particules les plus fines, issues des sables concassés ou des sables naturels, sont utilisées comme fillers pour augmenter la densité, la rigidité et la résistance des mélanges.
- **Environnements spécifiques :** Les sables fins et très fins, comme ceux des dunes, sont adaptés aux enrobés dans les zones désertiques où la finesse des grains améliore la compacité et l'interaction avec le bitume.

2.6.2 Propriétés minéralogiques

La composition minéralogique des sables est un autre facteur déterminant pour leur utilisation. Les principaux minéraux présents dans les sables sont :

- **Quartz :** Minéral dominant dans la plupart des sables, il est apprécié pour sa dureté, sa résistance chimique et sa faible réactivité avec le bitume.
- **Calcite :** Présente dans les sables calcaires, elle offre une bonne compatibilité chimique avec le bitume.
- **Feldspaths et micas :** Souvent présents en petites quantités, ils influencent la texture et la cohésion des sables.

2.6.3 Propriétés physiques et mécaniques

Les propriétés physiques et mécaniques des sables jouent un rôle déterminant dans leurs applications, notamment dans la construction routière, où ils sont utilisés comme granulats ou comme source de fillers pour les enrobés bitumineux. Ces propriétés influencent la densité, la compacité, la cohésion, et la résistance des mélanges, affectant ainsi directement la performance et la durabilité des infrastructures.

2.6.3.1 Propriétés physiques des sables

Les propriétés physiques des sables constituent des paramètres fondamentaux qui influencent directement leur comportement et leurs performances dans les mélanges bitumineux. Ces caractéristiques, résultant des processus géologiques de formation et d'altération, déterminent l'aptitude des sables à répondre aux exigences techniques des enrobés routiers. L'analyse approfondie de ces propriétés s'avère essentielle pour la formulation optimale des mélanges et la prédiction de leur comportement en service. La caractérisation précise des propriétés physiques permet également d'établir des critères de sélection rigoureux et d'optimiser l'utilisation des sables dans les applications routières spécifiques, notamment dans les environnements présentant des contraintes particulières comme les zones désertiques.

- **Granulométrie** : La granulométrie décrit la distribution des tailles de particules dans un sable. Une granulométrie bien équilibrée, comprenant des particules de tailles variées (grossières, moyennes et fines), améliore la compacité et réduit les vides dans les mélanges. Une granulométrie optimale permet d'obtenir des enrobés plus denses et imperméables, augmentant leur durabilité.
- **Forme des grains** : Les particules de sable peuvent avoir des formes variées, allant de grains anguleux à arrondis. La forme est déterminée par le mode de formation et de transport des sables :
 - **Anguleux** : Offrent une meilleure interconnexion mécanique, augmentant la stabilité des mélanges.
 - **Arrondis** : Faciles à mettre en œuvre mais réduisent la cohésion.

Les grains anguleux sont préférés pour les enrobés nécessitant une haute stabilité, tandis que les grains arrondis conviennent pour les mélanges nécessitant une bonne maniabilité.

- **Texture de surface** : La surface des grains peut être lisse ou rugueuse :

- **Grains rugueux** : Augmentent l'adhérence au bitume, renforçant la cohésion des enrobés.
- **Grains lisses** : Réduisent l'interaction avec le bitume, mais peuvent améliorer la maniabilité.

Une texture rugueuse est essentielle pour les applications où la résistance mécanique est primordiale.

- **Densité** : La densité des sables influence la compacité et la masse volumique des mélanges. Une densité élevée est souvent associée à une meilleure performance mécanique. Les sables à haute densité produisent des mélanges plus stables et durables.
- **Absorption d'eau** : L'absorption d'eau dépend de la porosité des grains de sable. Une faible absorption est préférée pour minimiser les effets de l'humidité sur les mélanges. Les sables à faible absorption d'eau réduisent les risques de désagrégation et d'arrachement dans les enrobés.
- **Propreté et teneur en impuretés** : Les impuretés, telles que l'argile, la poussière et les matières organiques, peuvent nuire à l'adhérence au bitume. Un nettoyage adéquat est essentiel pour garantir une bonne cohésion des mélanges.

2.6.3.2. Propriétés mécaniques des sables

Les propriétés mécaniques des sables constituent des caractéristiques fondamentales qui déterminent leur comportement sous contraintes et leur aptitude à former des mélanges bitumineux performants. Ces propriétés, résultant de la nature minéralogique et de la structure des grains, influencent directement la durabilité et la stabilité des enrobés routiers. La compréhension approfondie de ces caractéristiques mécaniques permet d'optimiser la sélection des sables et leur incorporation dans les formulations d'enrobés, notamment pour des applications soumises à des sollicitations importantes. L'évaluation précise de ces propriétés s'avère particulièrement déterminante pour anticiper le comportement des mélanges dans des conditions d'exploitation exigeantes, telles que celles rencontrées dans les infrastructures routières à fort trafic ou exposées à des conditions environnementales sévères.

- **Résistance à la compression** : Les grains de sable doivent résister à l'écrasement sous des charges élevées pour maintenir la structure des mélanges. Les sables avec une résistance élevée à la compression augmentent la durabilité des enrobés soumis à des charges dynamiques importantes.

- **Module d'élasticité** : Cette propriété reflète la capacité des sables à se déformer sous une charge et à reprendre leur forme initiale après décharge. Les sables à module d'élasticité élevé contribuent à des mélanges plus rigides et résistants à la fatigue.
- **Résistance au cisaillement** : Elle exprime la capacité des grains à résister à des forces de glissement. Cette propriété est influencée par la forme des grains, leur texture et leur arrangement dans le mélange. Une résistance élevée au cisaillement améliore la stabilité des enrobés, réduisant les risques d'orniérage.
- **Cohésion interne** : La cohésion dépend de l'interaction entre les grains de sable et du type de liant utilisé (bitume, par exemple). Une bonne cohésion interne est essentielle pour éviter la désagrégation des mélanges sous l'effet de cycles de trafic ou de variations climatiques.
- **Résistance à l'usure** : Elle mesure la capacité des grains de sable à résister à l'abrasion ou à la fragmentation sous des contraintes répétées. Les sables résistants à l'usure prolongent la durée de vie des enrobés soumis à un trafic intense.

2.6.3.3 Facteurs influençant les propriétés physiques et mécaniques

- **Origine géologique** : Les sables issus de roches dures (par exemple, granit, basalte) ont généralement de meilleures propriétés mécaniques que ceux issus de roches tendres (calcaire).
- **Conditions de transport et de dépôt** : Les sables transportés sur de longues distances par l'eau ou le vent ont des grains arrondis, tandis que ceux provenant du concassage ont des grains anguleux.
- **Granulométrie et distribution des tailles** : Une granulométrie continue et bien équilibrée améliore la densité et la cohésion des mélanges.

2.6.3.4 Applications des propriétés physiques et mécaniques

- **Enrobés bitumineux** : Les sables à granulométrie fine et à texture rugueuse améliorent la cohésion et la densité des enrobés.
- **Source de fillers** : Les sables très fins (< 0,063 mm) sont utilisés comme fillers pour renforcer la matrice bitume-filler.
- **Zones à fortes contraintes climatiques** : Dans les régions désertiques, les sables fins et bien triés (comme les sables de dune) peuvent être exploités pour leur compacité et leur interaction chimique avec le bitume.

2.6.3.5 Avantages et limitations des sables

Les avantages et les limitations de l'utilisation des sables dans les enrobés sont récapitulés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Avantages et limitations des sables

Avantages	Limitations
Disponibilité locale dans de nombreuses régions.	Variabilité des propriétés en fonction de l'origine.
Coût relativement faible par rapport à d'autres matériaux.	Besoin de traitement ou de tri pour certaines applications spécifiques.
Propriétés adaptables selon les besoins (granulométrie, dureté, etc.).	Cohésion faible pour les sables fins ou arrondis, nécessitant des ajustements dans les formulations.

2.6.4 Applications des sables dans les enrobés bitumineux

Les sables jouent un rôle essentiel dans la formulation des enrobés bitumineux, contribuant à la performance mécanique, thermique et chimique des mélanges. Utilisés principalement comme granulats fins et, dans certains cas, comme fillers, les sables influencent directement la densité, la compacité et la résistance des enrobés. Le choix et les caractéristiques des sables sont déterminants pour répondre aux exigences spécifiques des infrastructures routières modernes, notamment dans des environnements contraignants tels que les zones désertiques ou les régions à fort trafic.

Une étude expérimentale récente a analysé la valorisation du sable de dune dans la formulation des enrobés bitumineux afin de proposer une alternative aux fillers traditionnels. Cette recherche a démontré que l'ajout de sable de dune améliore la compacité et les performances mécaniques des enrobés tout en réduisant leur sensibilité à l'humidité. Les essais Marshall et Duriez réalisés dans cette étude ont révélé une augmentation de la résistance à l'eau de 27 % et une amélioration de la stabilité mécanique de 37 %, confirmant ainsi le potentiel élevé du sable de dune comme substitut aux fillers classiques. L'exploitation de ce matériau, en plus de ses avantages techniques, représente une solution économique et écologique pour les régions désertiques où les ressources en fillers calcaires sont limitées (Siala et al, 2015).

2.6.4.1 Rôle des sables dans les enrobés bitumineux

Les sables comblent les vides entre les granulats plus gros, assurant une structure dense et compacte du mélange. Cette fonction est cruciale pour améliorer la stabilité et réduire la porosité des enrobés. Une densité accrue augmente la résistance mécanique et réduit l'infiltration d'eau, améliorant ainsi la durabilité des enrobés.

Les particules les plus fines des sables (< 0,063 mm) sont utilisées comme fillers pour renforcer la matrice bitume-filler. Ces fillers augmentent la cohésion interne du mélange et modifient les propriétés rhéologiques du bitume. Une meilleure rigidité à haute température et une résistance accrue à la fatigue.

Les sables améliorent la capacité des enrobés à résister aux variations thermiques et aux charges répétées. Une granulométrie bien équilibrée contribue à une meilleure répartition des contraintes. Réduction des risques d'orniérage et de fissuration.

Les sables influencent la consistance du mélange, facilitant son étalement et son compactage lors de la mise en œuvre. Une application homogène garantit une performance optimale des enrobés.

2.6.4.2 Types de sables utilisés dans les enrobés

Les sables utilisés dans les enrobés bitumineux varient selon leur origine et leurs caractéristiques granulométriques :

- **Sables de carrière** : Extraits de formations rocheuses, ces sables sont produits par concassage et tamisage de roches calcaires, granitiques ou basaltiques. Leur granulométrie contrôlée et leur résistance mécanique élevée en font un choix privilégié pour les enrobés à fort trafic.
- **Sables alluviaux** : Déposés par les rivières, ces sables présentent des grains arrondis et une composition riche en quartz. Utilisés comme granulats fins, ils améliorent la densité et la maniabilité des mélanges.
- **Sables de dune** : Abondants dans les régions désertiques, ces sables se caractérisent par leur finesse et leur teneur élevée en quartz. Bien que sous-utilisés, ils offrent un potentiel élevé comme fillers dans les enrobés pour les zones arides.

- **Sables marins** : Collectés sur les plages ou les fonds marins, ces sables nécessitent un traitement préalable pour éliminer les sels et les matières organiques. Principalement utilisés comme granulats dans les régions côtières après purification.

2.6.4.3 Avantages des sables dans les enrobés

- **Accessibilité locale** : Les sables, disponibles dans la plupart des régions, réduisent les coûts de transport et favorisent l'utilisation de ressources locales.
- **Amélioration des propriétés des enrobés** : En comblant les vides, les sables augmentent la densité et la compacité, améliorant ainsi la résistance mécanique et l'imperméabilité.
- **Adaptabilité** : Les sables, en fonction de leur granulométrie et de leur origine, peuvent être adaptés à des mélanges spécifiques, répondant aux besoins de routes à faible ou fort trafic.
- **Durabilité** : Les sables contribuent à prolonger la durée de vie des enrobés en renforçant leur résistance aux contraintes mécaniques et climatiques.

2.6.4.4 Défis liés à l'utilisation des sables

Malgré leurs avantages, l'utilisation des sables dans les enrobés bitumineux présente certains défis qui sont illustrés sur le Tableau 2 :

Tableau 2 : Défis liés à l'utilisation des sables

Variabilité des propriétés	Les sables naturels peuvent présenter des variations dans leur composition et leur granulométrie, nécessitant un contrôle rigoureux.
Propreté	Les impuretés, comme l'argile ou les matières organiques, peuvent nuire à l'adhérence au bitume.
Cohésion faible des sables fins	Les sables très fins, comme ceux des dunes, nécessitent des ajustements dans la formulation des mélanges pour garantir leur stabilité.

2.6.5 Perspectives et innovations

Avec les avancées technologiques et les préoccupations croissantes pour le développement durable, les applications des sables dans les enrobés évoluent. Les recherches actuelles se concentrent sur :

- **Valorisation des sables de dune** : Leur abondance dans les régions désertiques offre un potentiel prometteur pour remplacer partiellement les fillers traditionnels.
- **Utilisation de sables recyclés** : Les sables issus de matériaux de démolition ou de déchets industriels représentent une solution écologique pour réduire l'exploitation des ressources naturelles.
- **Optimisation granulométrique** : Des techniques avancées permettent de produire des sables avec des granulométries spécifiques, maximisant leur performance dans les enrobés.

2.7 Fillers

Les fillers, ou charges fines, sont des particules très fines ($< 0,063$ mm) utilisées pour combler les vides dans les enrobés et améliorer leurs propriétés. Leur rôle est de densifier le mélange, d'augmenter la cohésion et de modifier les propriétés rhéologiques du bitume.

2.7.1. Types de Fillers

Les différents types de fillers utilisés dans les enrobés sont énumérés ci-dessous :

- **Fillers naturels** :
 - **Calcaire** : Très répandu, il est apprécié pour sa compatibilité avec le bitume et son coût modéré.
 - **Argile** : Utilisée occasionnellement pour sa plasticité, mais nécessite une préparation spécifique.
- **Fillers industriels** :
 - **Cendres volantes** : Issues de la combustion du charbon, elles offrent une granulométrie fine et des propriétés chimiques utiles.
 - **Fumée de silice** : Employée pour améliorer la densité et la résistance des enrobés.
- **Fillers recyclés** :
 - **Poudre de verre** : Alternative écologique, elle réduit l'impact environnemental des enrobés.

- **Débris de construction** : Utilisés après traitement, ces matériaux permettent de recycler les déchets.

2.8 Caractéristiques des Fillers

Les caractéristiques des fillers sont déterminantes pour leur efficacité dans les enrobés bitumineux. Elles influencent directement la compacité, la durabilité et les performances mécaniques des mélanges. Voici une analyse approfondie des principales propriétés des fillers, essentielles pour optimiser leur utilisation dans les infrastructures routières.

2.8.1 Granulométrie des fillers

La granulométrie est une propriété fondamentale des fillers. Elle désigne la distribution des tailles des particules, généralement mesurée en pourcentage des particules passant par des tamis de tailles spécifiques.

Une granulométrie fine, où la majorité des particules ont un diamètre inférieur à 0,063 mm, est cruciale pour combler les vides entre les granulats et améliorer la compacité des enrobés.

Les particules très fines augmentent la surface spécifique des fillers, favorisant une meilleure interaction avec le bitume. Une granulométrie trop grossière peut entraîner une réduction de l'homogénéité du mélange et une diminution de la résistance mécanique.

Des analyses granulométriques par tamisage ou diffraction laser sont utilisées pour caractériser précisément la distribution des tailles des particules.

2.8.2 Densité des fillers

La densité des fillers, exprimée en g/cm^3 , joue un rôle clé dans la compacité et la stabilité des enrobés.

- Densité apparente : Mesurée avec les particules dans leur état naturel, elle reflète l'impact des vides entre les grains.
- Densité réelle : Correspond à la masse volumique du matériau sans inclure les vides internes.

Une densité élevée contribue à réduire les vides dans les mélanges, améliorant ainsi leur résistance mécanique et leur durabilité. Les fillers calcaires, avec une densité moyenne de $2,7 \text{ g/cm}^3$, sont souvent privilégiés pour cette raison.

2.8.3 Affinité chimique avec le bitume

L'affinité chimique détermine la capacité des fillers à interagir et à se lier avec le bitume, formant un mastic homogène et cohésif.

- **Fillers calcaires** : Leur teneur élevée en carbonate de calcium favorise une bonne adhésion avec le bitume, augmentant la cohésion du mélange.
- **Fillers siliceux** : Riche en dioxyde de silicium, ces fillers ont une affinité chimique plus faible et nécessitent souvent l'ajout d'additifs pour améliorer leur compatibilité avec le bitume.

Une bonne affinité chimique réduit les risques de désagrégation et d'arrachement des enrobés sous l'effet de l'eau ou des charges mécaniques.

2.8.4 Capacité de rigidification

Les fillers influencent directement les propriétés rhéologiques du mastic bitume-filler, en modifiant sa rigidité et sa résistance aux déformations. Les fillers augmentent la rigidité à haute température, réduisant ainsi le risque de fluage et d'orniérage des enrobés soumis à des charges répétées.

La rigidité est souvent mesurée par des tests rhéologiques, tels que les essais de cisaillement sur mastic bitume-filler.

2.8.5 Porosité et absorption

La porosité des fillers détermine leur capacité à absorber le bitume, ce qui peut avoir des implications importantes sur les proportions effectives dans le mélange. Les matériaux tels que certains fillers industriels ou alternatifs peuvent absorber une quantité significative de bitume, réduisant ainsi la quantité disponible pour enrober les granulats.

Une absorption excessive peut altérer les propriétés mécaniques des enrobés. Par conséquent, il est crucial de mesurer la porosité des fillers avant leur incorporation.

2.8.6 Propriétés thermiques

Les fillers influencent la résistance thermique des enrobés, en particulier dans des environnements soumis à des températures extrêmes. Plusieurs études montrent que l'ajout de fillers issus du sable de dune peut améliorer la performance des enrobés en réduisant leur susceptibilité thermique et en augmentant leur résistance à l'eau (Benmokrane et al., 2021; Martinez et al., 2018; Liu et al., 2022). Les caractéristiques à contrôler sont les suivantes:

- **Résistance au ramollissement** : Les fillers augmentent la température de ramollissement des mélanges, améliorant leur stabilité dans les climats chauds.

- **Réduction des variations thermiques** : Les fillers, notamment ceux riches en quartz, contribuent à une meilleure gestion des cycles thermiques, réduisant les fissurations dues aux variations de température.
- **Mesures** : La température de ramollissement peut être évaluée par des essais TBA (Température Bille-Anneau) sur le mastic bitume-filler.

2.8.7 Propreté

La propreté des fillers est une caractéristique essentielle pour garantir leur efficacité. Les impuretés, telles que l'argile, les poussières fines et les matières organiques, peuvent nuire à l'adhésion au bitume et altérer les performances des enrobés.

- **Impact des impuretés** : Une forte teneur en impuretés peut réduire la cohésion du mastic et augmenter la sensibilité à l'eau des enrobés.
- **Contrôles requis** : Des tests de propreté, tels que le lavage au tamis, permettent de s'assurer que les fillers respectent les normes de qualité.

2.8.8 Durabilité chimique

Les fillers doivent résister aux environnements chimiques agressifs pour garantir la longévité des enrobés.

- **Inertie chimique** : Les fillers siliceux, par exemple, sont particulièrement résistants aux attaques chimiques, ce qui en fait un choix privilégié pour les applications dans des zones industrielles.
- **Réaction avec les agents extérieurs** : Certains fillers peuvent interagir avec des polluants ou des sels de dégivrage, nécessitant des tests spécifiques pour évaluer leur durabilité.

Les caractéristiques des fillers déterminent leur aptitude à améliorer les performances des enrobés bitumineux. La granulométrie, la densité, l'affinité chimique, la rigidité, et les propriétés thermiques sont autant de facteurs qui influencent leur comportement dans les mélanges. Une sélection appropriée des fillers, basée sur leurs caractéristiques spécifiques, est essentielle pour répondre aux exigences des projets routiers modernes et garantir la durabilité des infrastructures dans des conditions variées.

2.9 Défis Liés aux Fillers Actuels

Malgré leur importance, l'utilisation des fillers traditionnels présente plusieurs défis :

- **Disponibilité limitée** : Les fillers issus de sources naturelles, comme le calcaire, ne sont pas toujours accessibles dans les zones éloignées ou désertiques.

- **Impact environnemental** : L'extraction et le traitement des fillers génèrent des impacts négatifs, notamment la destruction des écosystèmes et les émissions de CO₂.
- **Coût élevé** : Le transport des fillers sur de longues distances augmente considérablement les coûts des projets routiers.
- **Variabilité des propriétés** : Les fillers naturels peuvent présenter une hétérogénéité dans leur composition, affectant la performance des enrobés.

Ces limitations mettent en évidence la nécessité d'explorer des alternatives innovantes et durables, comme les fillers issus du sable de dune.

2.10 Conclusion

Les fillers issus des sables de carrière ont joué un rôle central dans la formulation des enrobés bitumineux grâce à leurs propriétés stabilisantes et densifiantes. Cependant, leurs limites, notamment en termes de disponibilité, de coût et d'impact environnemental, soulignent l'importance d'explorer des matériaux alternatifs.

Dans ce contexte, les fillers de sable de dune représentent une solution prometteuse. Ces ressources, abondantes dans les zones désertiques, offrent un potentiel inexploité pour améliorer les performances des enrobés tout en réduisant leur impact environnemental. Leur finesse naturelle et leur compatibilité chimique avec le bitume en font des candidats idéaux pour répondre aux défis actuels de la construction routière, en particulier dans les environnements arides. Cette étude propose ainsi d'évaluer le potentiel des fillers de sable de dune comme alternative viable aux fillers traditionnels, en mettant l'accent sur leur capacité à améliorer les performances mécaniques et thermiques des enrobés bitumineux dans les conditions spécifiques des zones désertiques. L'objectif principal est de développer une solution technique innovante qui répond simultanément aux exigences de performance, aux contraintes économiques et aux préoccupations environnementales.

Les prochains chapitres approfondissent l'évaluation de ces fillers alternatifs et leur impact sur les propriétés des enrobés bitumineux à travers des expérimentations rigoureuses, ouvrant ainsi la voie à des solutions durables et innovantes pour les infrastructures routières.

Chapitre 3 :

Etude expérimentale

3.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale mise en œuvre pour évaluer l'influence des fillers de sable de dune sur les propriétés des enrobés bitumineux. L'objectif principal de cette étude est de déterminer dans quelle mesure ces fillers alternatifs peuvent améliorer la performance et la durabilité des revêtements routiers, en particulier dans le contexte des zones désertiques.

La démarche expérimentale adoptée comporte plusieurs volets complémentaires, visant à caractériser de manière approfondie les matériaux de base, à concevoir des formulations d'enrobés intégrant différents types de fillers, et à évaluer les propriétés thermomécaniques des mélanges obtenus. Cette approche permet d'établir des comparaisons rigoureuses entre les performances des enrobés incorporant des fillers de sable de dune et celles des enrobés de référence formulés avec des fillers conventionnels.

Dans un premier temps, les caractéristiques intrinsèques des différents fillers sont étudiées, en mettant l'accent sur les propriétés physico-chimiques susceptibles d'influencer leur comportement au sein des mélanges bitumineux. Des techniques d'analyse granulométrique et des essais normalisés sont mis en œuvre pour quantifier finement les paramètres clés, tels que la distribution de taille des particules, la surface spécifique ou encore la nature minéralogique des fillers.

Sur la base de ces données de caractérisation, différentes formulations d'enrobés sont conçues en faisant varier la nature et la proportion des fillers incorporés. Un plan d'expérience robuste est établi pour explorer de manière systématique l'espace des paramètres de composition et identifier les formulations optimales au regard des critères de performance visés. Les protocoles de fabrication des mélanges sont soigneusement définis et contrôlés afin d'assurer la répétabilité et la comparabilité des résultats.

Les enrobés ainsi formulés sont ensuite soumis à une batterie d'essais mécaniques et thermomécaniques visant à évaluer leurs propriétés d'usage. Des tests de référence, tels que l'essai Marshall et l'essai Duriez, sont réalisés pour quantifier la stabilité, la résistance à la déformation et la tenue à l'eau des différents mélanges. En complément, des essais plus spécifiques, comme la mesure du pouvoir rigidifiant des fillers par l'essai Δ TBA, sont conduits pour approfondir la compréhension des mécanismes d'interaction entre les fillers et le liant bitumineux.

L'ensemble des essais est réalisé dans des conditions maîtrisées, en suivant rigoureusement les normes et les protocoles en vigueur. Les paramètres d'essai sont soigneusement contrôlés et les résultats sont enregistrés et analysés selon des procédures statistiques appropriées, permettant de dégager des tendances fiables et de quantifier les effets des différents facteurs de formulation.

En définitive, la méthodologie expérimentale présentée dans ce chapitre vise à générer un ensemble cohérent et robuste de données permettant de statuer sur l'intérêt technico-économique des fillers de sable de dune pour la formulation d'enrobés bitumineux adaptés aux contraintes des zones désertiques. Les résultats obtenus doivent fournir des éléments tangibles pour orienter les choix de conception et optimiser les stratégies de maintenance des infrastructures routières dans ces régions.

3.2 Études des caractéristiques des fillers

Cette section présente les méthodes et protocoles mis en œuvre pour caractériser de manière approfondie les propriétés intrinsèques des différents fillers étudiés dans le cadre de ce travail.

L'accent est mis sur les fillers de sable de dune, qui constituent le cœur de l'innovation proposée, mais des fillers de référence issus de sable de carrière sont également considérés à des fins de comparaison.

3.2.1 Analyse granulométrique

Une série d'analyses granulométriques est réalisée sur les différents échantillons de fillers (Figure 11) afin de déterminer précisément la distribution de taille des particules. La technique de tamisage par voie sèche, conforme à la norme NF EN 933-1 (NF EN 933-1, 2014) est employée. Les échantillons sont séchés à l'étuve ventilée à 110°C jusqu'à masse constante, puis soumis à un tamisage mécanique sur une colonne de tamis normalisés. Les refus cumulés sur chaque tamis sont pesés et exprimés en pourcentage massique. Les résultats sont présentés sous forme de courbes granulométriques et de tableaux synthétiques, permettant de visualiser clairement les différences de gradation entre les fillers étudiés.



Figure 10 : Essai granulométrique



Figure 11 : Prélèvements du sable de dune

3.2.2 Propriétés physiques

Les principales propriétés physiques des fillers, telles que la masse volumique réelle, la surface spécifique et le coefficient d'écoulement, sont déterminées au moyen d'essais normalisés. La masse volumique réelle est mesurée selon la norme NF EN 1097-7 (NF EN 1097, 2013), en utilisant la méthode du pycnomètre à hélium. Cette technique permet d'accéder au volume réel des particules en s'affranchissant de la porosité interne des grains. La surface

spécifique des fillers est évaluée selon la méthode Blaine NF EN 196-6 (NF EN 196-6, 2018), qui repose sur la perméabilité à l'air d'un lit de poudre compacté. Enfin, le coefficient d'écoulement est déterminé conformément à la norme NF EN 933-6 (NF EN 933-1, 2014), en mesurant le temps nécessaire à l'écoulement d'une quantité donnée de filler à travers un orifice calibré.

3.2.3 Propriétés chimiques

Une caractérisation chimique et minéralogique approfondie des fillers est réalisée afin d'identifier les phases minérales en présence et de quantifier les principaux éléments chimiques constitutifs.

3.2.4 Essais de propreté

Des essais spécifiques sont réalisés pour évaluer la propreté des fillers, c'est-à-dire leur teneur en éléments fins indésirables tels que les argiles ou la matière organique. L'essai au bleu de méthylène (Figure 12), conforme à la norme NF EN 933-9 (NF EN 933-9, 2014), est mis en œuvre. Cet essai consiste à mesurer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir la surface des particules fines contenues dans un échantillon de filler. La valeur de bleu (VBS) obtenue est un indicateur direct de la propreté du matériau. En complément, la teneur en carbonate des fillers est déterminée par calcimètre selon la norme NF P94-048 (NF P94-048, 1996), afin de quantifier la présence éventuelle de calcite naturelle ou de fines de concassage calcaire.



Figure 12 : Essai au bleu de méthylène VBS

3.3 Conception des mélanges bitumineux

Cette section décrit le processus de formulation des enrobés bitumineux intégrant différents types de fillers, notamment les fillers de sable de dune qui sont au cœur de cette étude (Figure 13). L'objectif est de concevoir des mélanges optimisés, répondant aux exigences de performance mécanique et de durabilité, tout en exploitant le potentiel des fillers alternatifs pour améliorer les propriétés des enrobés.



Figure 13 : Sable de dune broyé

3.4 Sélection des matériaux constitutifs

La première étape de la conception consiste à sélectionner judicieusement les matériaux entrant dans la composition des enrobés. Outre les fillers de sable de dune et les fillers de référence précédemment caractérisés, des granulats de différentes classes granulaires sont choisis pour constituer le squelette minéral des enrobés. Des gravillons concassés de nature silico-calcaire, conformes à la norme NF EN 13043 (NF EN 13043, 2002), sont retenus pour les fractions grossières (4/6, 6/10 et 10/14 mm). Des sables calcaires roulés et des sables de concassage sont sélectionnés pour les fractions fines (0/2 et 0/4 mm). Le liant hydrocarboné utilisé est un bitume pur de grade 35/50, répondant aux spécifications de la norme NF EN 12591 (NF EN 12591, 2009). Sa consistance et ses propriétés rhéologiques sont adaptées aux conditions de sollicitation sévères rencontrées en milieu désertique.

3.5 Détermination des courbes granulométriques cibles

Sur la base des fuseaux granulométriques de référence pour les enrobés denses de type BBSG selon la norme NF EN 13108-1 (NF EN 13108-1, 2006), différentes courbes granulométriques cibles sont définies en faisant varier la teneur en filler et la proportion des autres fractions granulaires. L'objectif est de couvrir une plage représentative de compositions, tout en respectant les spécifications normatives et les règles de l'art en matière de formulation des enrobés. Des mélanges à squelette granulaire continu sont privilégiés, avec des teneurs en filler comprises entre 3 et 7 % en masse.

La méthode des droites de mélange est employée pour ajuster finement les proportions des différentes fractions et obtenir des courbes granulométriques conformes aux objectifs visés.

3.6 Optimisation des teneurs en liant

Pour chaque formule granulométrique retenue, une étude d'optimisation de la teneur en liant est réalisée. Des mélanges sont confectionnés en faisant varier la teneur en bitume par pas de 0,5 %, autour d'une valeur centrale déterminée selon les recommandations de la méthode française de formulation des enrobés (LCPC, 2007). Les éprouvettes d'enrobés sont compactées à la presse à cisaillement giratoire (Figure 14) selon la norme NF EN 12697-31 (NF EN 12697-31, 2018) et soumises à des essais mécaniques pour évaluer leur aptitude au compactage et leur résistance à l'orniérage. La teneur en liant optimale est sélectionnée sur la base d'un compromis entre maniabilité, performances mécaniques et durabilité, en tenant compte des spécificités liées à l'utilisation des enrobés en milieu désertique.

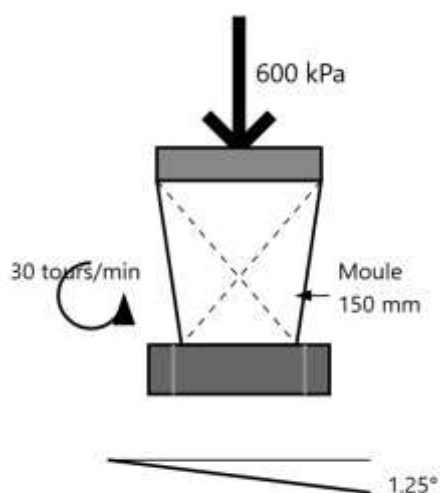


Figure 14 : Essai de PCG (Presse à Cisaillement Giratoire)

3.7 Confection des éprouvettes des essais

Une fois les formules optimisées définies, des éprouvettes d'enrobés sont confectionnées pour les différents essais de caractérisation mécanique et thermomécanique. Les mélanges sont fabriqués en laboratoire selon le mode opératoire décrit dans la norme NF EN 12697-35 (NF EN 12697-35, 2017). Les matériaux sont séchés et portés à température (160-180°C), puis malaxés mécaniquement pendant un temps défini. Les enrobés obtenus sont compactés à la presse à cisaillement giratoire ou au compacteur de plaques selon la norme NF EN 12697-33 (NF EN 12697-33, 2019), en fonction du type d'essai visé.

Les éprouvettes sont ensuite sciées, carottées ou moulées aux dimensions requises et stockées dans des conditions maîtrisées avant essai. Des procédures strictes de contrôle de la masse volumique apparente et de la compacité des éprouvettes selon la norme NF EN 12697-6 (NF EN 12697-6, 2012) sont appliquées pour garantir la représentativité et la répétabilité des résultats.

3.8 Description des essais réalisés

Cette section présente de manière exhaustive les différents essais effectués dans le cadre de l'étude pour évaluer les propriétés des enrobés bitumineux et de leurs composants. Une attention particulière est portée aux essais permettant de caractériser l'influence des fillers de sable de dune sur le comportement thermomécanique des mélanges.

Afin de déterminer avec précision les caractéristiques intrinsèques des fillers utilisés dans la formulation des enrobés, une série d'essais normalisés est réalisée. L'analyse granulométrique par tamisage à sec selon la norme NF EN 933-1 (NF EN 933-1, 2014) permet d'obtenir la distribution de taille des particules et de vérifier la conformité aux spécifications.

Des analyses chimiques sont également effectuées pour déterminer la composition élémentaire des fillers. La propreté des fillers est évaluée par l'essai au bleu de méthylène selon la norme NF EN 933-9 (NF EN 933-9, 2014) et leur teneur en carbonate est mesurée par calcimètre selon la norme NF P94-048 (NF P94-048, 1996). Ces essais fournissent des données essentielles pour interpréter le comportement des fillers dans les enrobés.

3.8.1 Essai Δ TBA (Pouvoir rigidifiant bitume-filler)

L'influence des fillers sur les propriétés du liant bitumineux est évaluée par l'essai Δ TBA selon la norme EN 13179-1 (EN 13179-1, 2001). Cet essai consiste à mesurer l'augmentation de la température de ramollissement bille-anneau (TBA) du bitume en présence de filler. Des

mélanges bitume-filler sont préparés à différentes teneurs en filler (visant généralement un rapport volumique proche de 0,6) et moulés sous forme d'anneaux.

La température à laquelle une bille d'acier s'enfonce d'une hauteur spécifiée dans l'anneau est déterminée. L'écart de température ΔTBA entre le mélange bitume-filler et le bitume pur caractérise le pouvoir rigidifiant du filler. Des valeurs élevées de ΔTBA indiquent une plus grande rigidification du bitume, ce qui peut influencer la résistance à l'orniérage et la fissuration de l'enrobé.

Pour cette étude, l'essai ΔTBA est réalisé sur des mélanges de bitume 35/50 avec différents types de fillers (sable de dune, sable de carrière, filler normalisé) et à différentes teneurs (50%, 57%, 60% en masse de filler par rapport au bitume). Les résultats permettent de comparer le pouvoir rigidifiant des fillers de sable de dune à celui des fillers conventionnels et d'évaluer leur conformité aux spécifications.

3.8.2 Essais mécaniques de Marshall et Duriez

Les performances mécaniques des enrobés formulés avec différents types de fillers sont évaluées au moyen d'essais normalisés. L'essai Marshall (Figure 15) selon la norme NA 5227/EN 12697-34 (NF EN 12697-34, 2012) permet de déterminer la stabilité, la résistance à la déformation et le quotient Marshall des éprouvettes d'enrobé. Des éprouvettes cylindriques sont confectionnées par compactage à 50 coups de marteau et soumises à un essai d'écrasement à 60°C. Les valeurs de stabilité et de déformation mesurées renseignent sur la capacité de l'enrobé à résister aux charges de trafic.



Figure 15 : Appareil utilisé dans l'essai de *Marshall*

L'essai Duriez (Figure 16) selon la norme NA 5226/NF P 98-251-1(NF P 98-251-1, 2002) est utilisé pour évaluer la résistance à l'eau des enrobés. Des éprouvettes cylindriques sont compactées et soumises à une immersion dans l'eau pendant 7 jours à 18°C. La résistance en compression des éprouvettes immergées est comparée à celle d'éprouvettes témoins conservées à l'air. Le rapport des résistances (r/R) donne une indication de la tenue à l'eau de l'enrobé et de sa sensibilité au désenrobage.



Figure 16 : Appareil utilisé dans l'essai Duriez

3.9 Protocoles expérimentaux des essais

Le protocole expérimental de cette étude a été divisé en deux phases principales d'investigation : une étude thermique et une étude mécanique. Cette approche bidirectionnelle permet d'évaluer de manière exhaustive l'influence du filler de sable de dune sur les propriétés des enrobés bitumineux.

3.9.1 Protocole de l'étude thermique ΔTBA

L'étude thermique vise à évaluer les propriétés des mélanges bitume-filler en termes de comportement thermique, en utilisant des protocoles rigoureux pour garantir la précision et la reproductibilité des résultats. Le processus comprend trois phases principales : la préparation des matériaux, la fabrication des mélanges et la réalisation des essais TBA (Température Bille-Anneau), chacune étant essentielle pour l'analyse des performances.

3.9.1.1 Préparation des matériaux

a) Préparation des fillers

La préparation des fillers constitue une étape fondamentale de l'étude, car leurs caractéristiques granulométriques et physiques influencent directement les propriétés du mélange final. Trois types de fillers ont été sélectionnés :

- **Filler de sable de dune (FSD)** : Le sable de dune a été broyé mécaniquement pour obtenir une granulométrie adéquate, répondant aux normes d'enrobés bitumineux. Ce processus garantit que les particules sont suffisamment fines, avec un diamètre maximal de 0,063 mm et une faible proportion de particules entre 0,063 et 0,125 mm
- **Filler de sable de carrière (FSC)** : Le sable de carrière a été tamisé pour obtenir une granulométrie homogène similaire à celle du FSD, permettant une comparaison directe entre ces deux types de fillers.
- **Filler normalisé (FN)** : Utilisé comme référence, ce filler commercial respecte les spécifications des normes en vigueur et offre un point de comparaison fiable. Les fillers préparés ont ensuite été stockés dans des conditions contrôlées, à l'abri de l'humidité, pour préserver leurs caractéristiques et éviter toute altération avant leur utilisation.

b) Préparation du bitume

Le bitume utilisé pour cette étude est un bitume pur de classe 35/50, choisi pour ses propriétés adaptées à des applications routières sous conditions climatiques variées. Avant d'être utilisé, le bitume a été chauffé de manière contrôlée jusqu'à une température comprise entre 150 et 160 °C, afin de garantir sa fluidité optimale pour le mélange. Cette température a été maintenue pendant toute la durée des essais, assurant une uniformité et une reproductibilité dans les conditions expérimentales.

3.9.1.2 Procédure de fabrication des mélanges

La procédure de fabrication des mélanges bitume pure - fillers passe par les étapes suivantes :

- **Dosage des matériaux** : Le dosage précis des matériaux a été réalisé pour garantir des formulations cohérentes et comparables. Les fillers ont été incorporés dans le bitume selon trois proportions : 50 %, 57 % et 60 % par rapport à la masse du bitume (Figure 17). Ces proportions ont été choisies pour évaluer l'effet de la quantité de filler sur les propriétés thermiques des mélanges. Trois séries d'échantillons ont été préparées pour chaque type de filler et chaque proportion, permettant une analyse statistiquement robuste.



Figure 17 : Préparation du mélange bitume-fillers

- **Processus de mélange :** Les fillers ont été introduits progressivement dans le bitume chauffé, afin de garantir une bonne dispersion et une incorporation homogène des particules. Le malaxage (Figure 18) a été effectué mécaniquement à une vitesse contrôlée pendant une durée de 2 à 3 minutes. Une vérification visuelle de l'homogénéité du mélange a ensuite été réalisée pour s'assurer de l'absence de grumeaux ou de zones non incorporées. Ce processus a été répété systématiquement pour chaque proportion et chaque type de filler, garantissant la comparabilité des mélanges.



Figure 18 : Malaxage du mélange bitume-fillers.

- **Réalisation de l'essai (Température Bille-Anneau) :** Les mélanges bitume-filler obtenus ont été coulés dans des anneaux standardisés (Figure 19), conformément aux spécifications

de la norme EN 1427 (EN 1427, 2018). Ces échantillons ont été laissés à refroidir à température ambiante dans des conditions contrôlées, garantissant une solidification homogène. Chaque échantillon a été identifié de manière unique et stocké jusqu'à la réalisation des essais pour éviter toute confusion ou altération.



Figure 19 : Test du point de ramollissement du mélange bitume-fillers.

Les essais TBA ont été menés en suivant scrupuleusement les protocoles établis par la norme EN 1427 (EN 1427, 2018). L'appareil Bille-Anneau a été configuré pour mesurer la température de ramollissement de chaque échantillon. Les mesures ont été effectuées d'abord sur le bitume pur utilisé comme référence, puis sur les mélanges bitume-filler. Ces mesures permettent de déterminer l'impact des fillers sur la température de ramollissement, qui reflète la rigidité thermique du mélange. Les températures de ramollissement obtenues ont été enregistrées avec précision pour analyse et interprétation ultérieure.

3.9.2 Protocole des essais mécaniques

L'étude mécanique a pour objectif d'évaluer les performances des enrobés bitumineux formulés avec différents types de fillers, notamment le filler de sable de dune (FSD) et le filler de sable de carrière (FSC). Le protocole comprend la préparation des mélanges bitumineux ainsi que la réalisation des essais mécaniques selon des normes établies, notamment les essais Duriez et Marshall. Chaque étape vise à garantir la précision et la reproductibilité des résultats.

3.9.2.1 Préparation des mélanges bitumineux

Cette préparation passe par les étapes suivantes :

a) Composition des échantillons

Deux formulations principales ont été préparées pour comparer les performances mécaniques des fillers :

- Un premier mélange contenant du FSC, utilisé comme référence pour les formulations traditionnelles.
- Un deuxième mélange intégrant du FSD, étudié pour son potentiel en tant qu'alternative aux fillers traditionnels.

Pour garantir une comparaison objective, les proportions de granulats ont été strictement conservées entre les deux formulations, ainsi que le pourcentage de bitume utilisé, fixé à 35/50. Cette uniformité permet de s'assurer que les variations observées dans les résultats sont exclusivement dues au type de filler employé.

b) Processus de fabrication

Le processus de fabrication des mélanges a suivi une séquence bien définie :

- **Chauffage des composants** : Les granulats, les fillers et le bitume ont été chauffés aux températures requises pour assurer une fluidité optimale du bitume et un bon enrobage des particules.
- **Malaxage mécanique** : Les composants ont été mélangés mécaniquement en respectant une séquence précise, permettant une dispersion homogène du filler dans la matrice bitumineuse.
- **Contrôle visuel** : Un contrôle visuel a été effectué pour vérifier que l'enrobage des granulats était complet et uniforme.
- **Vérification de la température finale** : La température du mélange final a été mesurée pour garantir qu'elle restait dans les plages requises, évitant ainsi tout durcissement prématuré ou dégradation thermique du bitume.

3.9.2.2 Essai Duriez

L'essai Duriez a été réalisé pour évaluer la résistance des enrobés à la compression et leur sensibilité à l'eau. Cet essai est essentiel pour analyser la durabilité des mélanges sous différentes conditions environnementales.

- **Confection des éprouvettes** : Les éprouvettes ont été fabriquées conformément à la norme NF P 98-251-1 (NF P 98-251-1, 2002), qui définit les exigences pour les essais mécaniques sur enrobés. Le compactage a été effectué de manière statique à double effet, garantissant

une densité homogène des échantillons. Deux séries d'éprouvettes identiques ont été produites pour chaque formulation.

- **Conditionnement** : Les éprouvettes ont été soumises à deux conditions distinctes :
 - La première série a été conservée à l'air, dans une plage de température de 18 à 25 °C, pour simuler des conditions normales.
 - La deuxième série a été immergée dans de l'eau maintenue à 18 °C pendant 7 jours, pour évaluer la sensibilité des enrobés à l'eau.

Après le conditionnement, les deux séries d'éprouvettes ont été soumises à des essais de compression. La résistance à la compression a été mesurée pour les éprouvettes à l'air (R) et après immersion dans l'eau (r). Le rapport r/R , indicateur clé de la tenue à l'eau, a ensuite été calculé pour comparer les performances des différents fillers.

3.9.2.3 Essai Marshall

L'essai Marshall, conforme à la norme EN 12697-30 (EN 12697-30, 2012), a été réalisé pour évaluer la stabilité et le fluage des enrobés. Ces paramètres sont essentiels pour déterminer la résistance mécanique des mélanges sous des charges dynamiques.

- **Préparation des éprouvettes** : Les éprouvettes cylindriques nécessaires à l'essai ont été compactées selon les exigences de la norme. Les dimensions et masses des éprouvettes ont été soigneusement contrôlées pour garantir leur conformité aux spécifications, éliminant ainsi tout biais potentiel.
- **Procédure d'essai** : Les éprouvettes ont été conditionnées à une température de 60 °C pendant une durée de 30 à 40 minutes avant le test, afin de simuler les conditions thermiques réelles auxquelles les enrobés sont exposés en service. Elles ont ensuite été placées dans la presse Marshall, où une charge a été appliquée progressivement jusqu'à la rupture.

Pendant cet essai, deux paramètres ont été mesurés :

- **La stabilité** : qui indique la résistance maximale de l'échantillon avant sa rupture.
- **Le fluage** : qui reflète la déformation subie par l'échantillon sous charge.

Une étude expérimentale récente a analysé l'impact du polyéthylène basse densité (PEBD) sur le module des bétons bitumineux à base de sable de dunes, mettant en lumière des effets significatifs sur la rigidité et la durabilité des enrobés. Cette recherche a démontré que l'ajout de PEBD permet une augmentation du module de rigidité de 18 %, renforçant ainsi la capacité

des enrobés à supporter des charges lourdes. De plus, une réduction de la sensibilité à l'eau de 22 % a été observée, contribuant à une meilleure longévité des infrastructures routières. Cette étude, qui repose sur des essais Marshall et des tests de résistance à la traction, offre un cadre méthodologique comparable à celui utilisé dans la présente recherche. L'incorporation de polymères, en particulier du PEBD, semble ainsi être une approche complémentaire à l'utilisation du sable de dune comme filler, visant à optimiser la performance des enrobés bitumineux en milieu désertique (Benkacem et al., 2020).

3.10 Paramètres de contrôle des essais expérimentaux

3.10.1 Contrôle des matériaux

Le contrôle des matériaux utilisés dans la formulation des enrobés bitumineux est une étape cruciale pour garantir la qualité et la performance des mélanges.

Pour les fillers, un contrôle régulier de leur granulométrie est effectué afin de s'assurer que les particules respectent les spécifications techniques requises, notamment un diamètre maximal de 0,063 mm. En parallèle, une vérification de l'absence d'humidité dans les fillers est essentielle, car la présence d'eau pourrait compromettre leur interaction avec le bitume. De plus, un contrôle strict de leur propreté est réalisé pour éliminer toute présence de poussières ou d'impuretés susceptibles d'altérer les performances des enrobés.

En ce qui concerne le bitume, des vérifications précises de sa température sont effectuées pour garantir une fluidité optimale pendant la phase de mélange. L'homogénéité du bitume est également contrôlée afin de s'assurer qu'il n'y a pas de séparation des composants ou de variations dans ses propriétés. Enfin, un suivi rigoureux des temps de chauffage est maintenu pour éviter tout risque de dégradation thermique du matériau, ce qui pourrait affecter négativement les performances mécaniques et thermiques des enrobés.

3.10.2. Contrôle des conditions d'essai

Le contrôle rigoureux des conditions d'essai est indispensable pour garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus.

La surveillance des températures est une étape clé de ce processus. Cela inclut l'étalonnage régulier des thermomètres utilisés pour les mesures, afin de garantir leur précision. Les bains thermostatés sont également vérifiés pour s'assurer qu'ils maintiennent des températures stables et conformes aux exigences des essais. De même, les étuves utilisées pour le

conditionnement des échantillons font l'objet de contrôles fréquents pour garantir un environnement thermique homogène.

Par ailleurs, la vérification des équipements de mesure joue un rôle essentiel dans la précision des essais. Les appareils de mesure sont calibrés périodiquement pour éviter tout écart dans les résultats. Les systèmes de compression, utilisés pour les essais mécaniques tels que les tests Duriez ou Marshall, sont contrôlés pour s'assurer de leur bon fonctionnement et de leur capacité à appliquer des charges précises. Enfin, les capteurs, qu'ils soient utilisés pour mesurer les températures, les pressions ou les déformations, sont régulièrement vérifiés pour garantir leur exactitude et leur fiabilité tout au long des expérimentations.

3.11 Acquisition et traitement des données

L'acquisition et le traitement des données constituent une étape essentielle de l'étude, permettant d'analyser, d'interpréter et de valider les résultats obtenus lors des différents essais. Ce processus se divise en deux grandes phases : la collecte systématique des données et leur traitement statistique.

a) Collecte des données

Les données expérimentales ont été enregistrées de manière rigoureuse pour assurer leur exactitude et leur exhaustivité. Les informations collectées incluent :

- Les relevés des températures de ramollissement issues des essais TBA, fournissant une mesure clé de la rigidité thermique des mélanges.
- Les mesures des résistances à la compression obtenues lors des essais Duriez, incluant les résistances à l'air (R) et après immersion (r).
- Les valeurs de stabilité et de fluage des éprouvettes évaluées à l'aide de l'essai Marshall, reflétant la performance mécanique des enrobés.
- Une documentation photographique des étapes critiques du protocole, permettant une vérification visuelle et une meilleure traçabilité des résultats.

Les données recueillies ont été organisées selon un système méthodique pour en faciliter l'analyse et l'interprétation.

- Des fiches d'essai standardisées ont été créées pour chaque type de test, regroupant les paramètres clés, les résultats et les observations spécifiques.

- Les résultats ont été archivés sous forme numérique, garantissant une accessibilité et une protection optimales des données. Chaque échantillon a été associé à un identifiant unique, assurant une traçabilité complète depuis la préparation jusqu'à l'analyse des résultats.

b) Traitement statistique

Une fois les données collectées, une analyse statistique approfondie a été réalisée pour dégager des tendances et valider les résultats :

- Les moyennes des valeurs obtenues pour chaque série d'échantillons ont été calculées pour représenter de manière synthétique les performances des mélanges.
- Les écarts-types ont été déterminés pour évaluer la variabilité des résultats et identifier les éventuelles incohérences.
- Les valeurs aberrantes, susceptibles de fausser les conclusions, ont été identifiées et exclues après vérification de leur origine.

La validation des données a suivi un processus strict pour garantir leur fiabilité et leur conformité aux normes :

- La répétabilité des résultats a été vérifiée en comparant les mesures effectuées sur des échantillons identiques.
- Les performances obtenues ont été comparées aux valeurs normatives pour confirmer leur adéquation avec les exigences techniques des enrobés.
- Une évaluation globale de la cohérence des résultats a été réalisée pour s'assurer que les tendances observées entre les différents essais (TBA, Duriez et Marshall) étaient en accord avec les attentes théoriques et les objectifs de l'étude.

3.12 Conclusion

Le protocole expérimental mis en place dans cette étude a été conçu pour évaluer de manière systématique et rigoureuse l'influence du filler de sable de dune sur les propriétés des enrobés bitumineux. Cette méthodologie s'articule autour de deux axes majeurs d'investigation : l'étude des propriétés thermiques et l'analyse du comportement mécanique.

L'approche bidimensionnelle adoptée, combinant des essais thermiques (TBA) et mécaniques (Duriez et Marshall), permet une caractérisation complète des matériaux étudiés. La rigueur dans la préparation des échantillons, le contrôle strict des paramètres d'essai et le traitement méthodique des données garantissent la fiabilité et la reproductibilité des résultats.

L'ensemble des procédures expérimentales respecte les normes en vigueur tout en s'adaptant aux spécificités des matériaux désertiques étudiés. Cette méthodologie fournit ainsi un cadre expérimental solide pour évaluer le potentiel du sable de dune comme source alternative de filler pour les enrobés bitumineux destinés aux routes désertiques.

Les résultats obtenus grâce à ce protocole permettront de valider ou d'infirmier les hypothèses de recherche et d'apporter des réponses concrètes aux problématiques de durabilité des infrastructures routières en zone désertique.

Chapitre 4 : Analyse et interprétations des résultats de l'expérimentation

4.1 Introduction

Le présent chapitre expose l'analyse et l'interprétation détaillées des résultats obtenus à travers notre programme expérimental, les analyses thermiques approfondies centrées sur l'évaluation du pouvoir rigidifiant des fillers. Cette caractérisation s'est appuyée sur l'étude du ΔTBA (variation de la température bille-anneau), un paramètre crucial pour anticiper le comportement des enrobés soumis aux températures extrêmes caractéristiques des environnements désertiques. Cette analyse revêt une importance particulière dans le contexte des infrastructures routières exposées à des conditions thermiques sévères.

Une caractérisation mécanique complète à travers les essais normalisés Marshall et Duriez a été menée. Ces tests permettent d'évaluer de manière rigoureuse la stabilité structurelle des mélanges, leur résistance aux contraintes mécaniques ainsi que leur durabilité face aux agressions hydriques. Cette batterie d'essais fournit des indicateurs essentiels pour prédire la performance à long terme des revêtements routiers.

La méthodologie d'analyse repose sur une comparaison systématique entre les performances des enrobés incorporant le filler de sable de dune et celles des formulations classiques utilisant du filler de sable de carrière. Cette approche comparative s'appuie sur un ensemble de critères techniques normalisés, spécifiquement adaptés aux exigences particulières des infrastructures routières en zone désertique.

Au-delà de la simple présentation des résultats expérimentaux, l'analyse s'attache à développer une compréhension globale des implications de cette innovation, et à l'examen en détail de la pertinence technique de cette solution dans le contexte spécifique des routes désertiques, en évaluant sa conformité aux normes en vigueur et en identifiant ses avantages comparatifs ainsi que ses éventuelles limitations. Cette démarche analytique approfondie vise également à explorer les perspectives d'optimisation des formulations d'enrobés bitumineux pour les environnements désertiques.

L'objectif final de cette étude est double : d'une part, valider scientifiquement l'utilisation du filler de sable de dune comme alternative viable aux solutions traditionnelles, et d'autre part, contribuer à l'évolution des pratiques dans le domaine de la construction routière en milieu désertique, en proposant des solutions innovantes et durables adaptées aux contraintes locales.

4.2 Résultats des essais des fillers

Après le broyage du sable de dune pour produire le filler, plusieurs essais ont été réalisés afin de caractériser ses propriétés physiques, chimiques et mécaniques. Ces tests ont permis d'évaluer la granulométrie, la composition chimique, l'interaction avec le bitume, ainsi que la performance du filler dans les mélanges bitumineux. Les résultats obtenus sont présentés dans les sections suivantes et couvrent divers aspects essentiels tels que la finesse du filler, sa compatibilité avec le bitume, sa résistance thermique et son comportement mécanique dans les enrobés. Cette analyse vise à fournir une base de comparaison entre le filler de sable de dune et d'autres types de fillers couramment utilisés dans les formulations routières.

4.2.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique approfondie du filler de sable de dune (FSD) révèle une distribution particulièrement favorable des particules, démontrant des caractéristiques granulaires optimales pour son utilisation dans les formulations d'enrobés bitumineux.

Les résultats détaillés de cette analyse mettent en évidence une répartition granulométrique caractérisée par une forte proportion de particules fines. Plus précisément, l'étude démontre qu'une majorité significative des particules, soit 70% de la masse totale, présente un diamètre inférieur à 0,063 millimètres comme le montre la Figure 20. Cette proportion substantielle de particules très fines contribue à optimiser la surface spécifique du filler, un paramètre essentiel pour les interactions avec le liant bitumineux.

De plus, l'analyse révèle que 94% des éléments constituant le FSD possèdent un diamètre inférieur à 0,125 millimètres, confirmant ainsi une distribution granulaire particulièrement homogène et concentrée dans les fractions fines. Cette caractéristique granulométrique spécifique suggère une capacité accrue du filler à s'intégrer efficacement dans la matrice bitumineuse.

Il est particulièrement important de souligner que cette distribution granulométrique s'inscrit parfaitement dans le cadre des exigences normatives en vigueur, notamment celles stipulées dans l'article 5.21 de la norme Européenne NF EN 13043 (NF EN 13043, 2002). Cette conformité aux standards réglementaires valide la pertinence technique du FSD comme composant potentiel des mélanges bitumineux.

Ces caractéristiques granulométriques favorables laissent présager un comportement optimal du FSD dans les applications routières, notamment en termes de pouvoir rigidifiant et de

capacité à améliorer la cohésion du mélange bitumineux. La finesse particulière des particules pourrait également contribuer à une meilleure résistance aux déformations permanentes, un aspect crucial pour les revêtements routiers en environnement désertique.

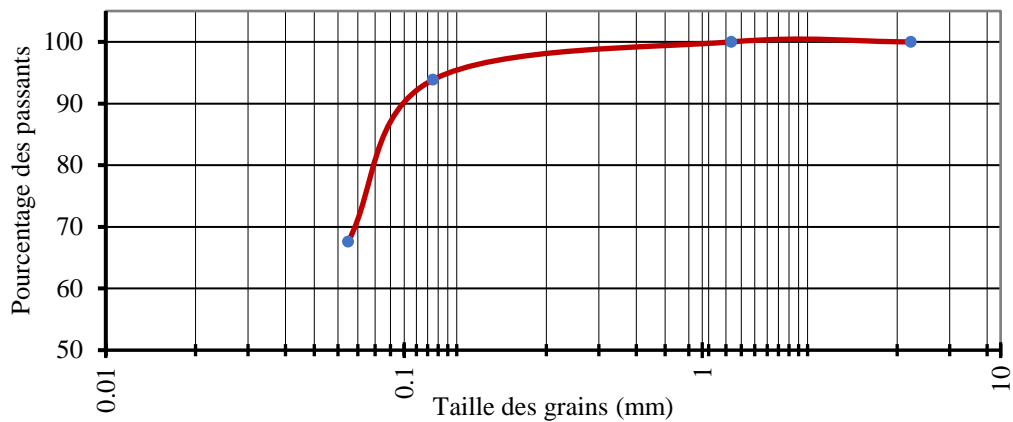


Figure 20 : Courbe granulométrique des fillers du sable de dune.

4.2.2 Analyse chimique

L'analyse chimique détaillée du filler de sable de dune (FSD), comme le montre le Tableau 3, met en évidence une composition particulièrement stable et faiblement réactive, caractéristiques essentielles pour son utilisation dans les formulations d'enrobés bitumineux.

La caractérisation chimique révèle, conformément aux données présentées dans le Tableau 3, une proportion remarquablement élevée d'insolubles, atteignant 94,8 % de la composition totale. Cette dominance des composés insolubles suggère une grande stabilité chimique du matériau, un atout majeur pour garantir la durabilité des mélanges bitumineux dans lesquels il sera incorporé.

Comme l'indiquent les résultats du Tableau 3, la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) s'établit à seulement 0,2%, une valeur particulièrement faible qui confirme la nature essentiellement siliceuse du matériau. Cette faible teneur en carbonates contribue à la stabilité chimique globale du filler et minimise les risques d'interactions indésirables avec le liant bitumineux.

Un aspect particulièrement significatif de cette analyse, toujours selon le Tableau 3, concerne les concentrations extrêmement faibles en chlorures, avec des taux de 0,004% pour les ions chlorure (Cl^-) et de 0,007% pour le chlorure de sodium (NaCl). Ces valeurs témoignent d'une quasi-absence de sels solubles dans le matériau. Cette caractéristique est cruciale car elle

minimise les risques de détérioration liés à la présence des sels, notamment en termes de corrosion et d'altération des propriétés mécaniques des enrobés.

Cette composition chimique, clairement établie dans le Tableau 3 et marquée par une forte proportion d'insolubles et des teneurs minimales en composés réactifs, confère au FSD une remarquable inertie chimique. Cette stabilité constitue un avantage considérable pour son utilisation dans les formulations d'enrobés bitumineux, particulièrement dans le contexte des environnements désertiques où les conditions climatiques extrêmes peuvent accélérer les processus de dégradation chimique.

De plus, cette faible réactivité chimique, mise en évidence par les analyses du Tableau 3, laisse présager une excellente compatibilité avec les liants bitumineux, minimisant les risques d'interactions indésirables qui pourraient compromettre la durabilité des revêtements routiers.

Ces caractéristiques suggèrent également une bonne résistance aux agressions environnementales, un facteur déterminant pour la longévité des infrastructures routières en milieu désertique.

Les tests sont réalisés selon des normes spécifiques NF P 15-461 (NF P 15-461,1990), Méthode de Mohr, fournissant des indications sur la pureté du sable, sa réaction avec les liants et sa compatibilité avec les formulations bitumineuses.

Tableau 3 : Analyse chimique des fillers du sable de dune.

INSOLUBLES	Insoluble (%)	94,8
CARBONATES	CaCO ₃ (%)	0,2
CHLORURES	Cl ⁻ (%)	0,004
	NaCl (%)	0,007

4.2.3 Analyses et interprétations des résultats

L'évaluation des fillers utilisés dans cette étude repose sur une série de tests approfondis permettant de caractériser leurs propriétés physiques, chimiques.

L'analyse granulométrique a révélé que le filler de sable de dune présente une distribution granulométrique plus fine et homogène que le filler de sable de carrière. Cette finesse accrue permet une meilleure dispersion du filler dans le liant bitumineux, ce qui favorise une amélioration de l'adhésion et de la cohésion du mélange. En revanche, le filler de sable de carrière contient une proportion plus élevée de particules grossières, ce qui peut nuire à l'homogénéité du mélange et affecter la résistance à la fissuration.

L'analyse chimique des fillers a permis de mettre en évidence des différences significatives dans leur composition minéralogique, influençant leur réactivité avec le bitume et leurs performances globales dans les enrobés bitumineux.

Ces résultats démontrent que la composition chimique du filler de sable de dune est plus favorable à la durabilité des enrobés bitumineux, car elle minimise les interactions négatives avec le bitume tout en améliorant la stabilité thermique et mécanique.

En parallèle, les tests de propreté réalisés sur ces fillers ont révélé que le filler de sable de dune contient une faible teneur en impuretés fines, ce qui améliore l'adhésion entre le filler et le bitume. Cette caractéristique est cruciale pour éviter des phénomènes de décollement prématuré des enrobés en service.

4.2.4 Conformité aux exigences des normes

Les propriétés des fillers ont été comparées aux normes en vigueur, notamment les critères établis par NF EN 13043 (NF EN 13043, 2002) et les recommandations du LCPC. L'analyse des résultats a démontré que le filler de sable de dune satisfait largement aux exigences normatives en matière de finesse, de stabilité thermique et d'interaction avec le liant bitumineux.

Cependant, l'absorption d'eau du FSD est légèrement plus élevée que celle du FSC, ce qui peut influencer le comportement du mélange en présence d'humidité. Des ajustements dans la formulation des enrobés sont donc nécessaires pour optimiser cette caractéristique et garantir des performances optimales en conditions réelles d'exploitation.

4.3 Résultats de l'essai du pouvoir rigidifiant (ΔTBA)

L'essai du pouvoir rigidifiant (ΔTBA) est un indicateur clé dans l'évaluation des fillers destinés aux enrobés bitumineux. Il permet d'analyser l'influence du filler sur la rigidité du mastic bitume-filler, un paramètre déterminant pour la durabilité et la résistance mécanique des chaussées soumises à des conditions climatiques extrêmes.

L'objectif principal de cet essai est de mesurer la température à laquelle le bitume, modifié par l'incorporation du filler, atteint une déformation critique. Plus la température est élevée, plus le matériau est rigide, ce qui réduit le risque de fluage et de formation d'ornières sous l'effet des charges de trafic.

L'analyse détaillée des résultats sont présentée dans la section suivante afin de quantifier précisément l'influence du filler de sable de dune sur le comportement rhéologique du mélange bitume-filler et d'évaluer sa pertinence pour les applications routières dans des environnements chauds et arides.

4.3.1 Mélange filler de sable de dune (FSD) avec bitume pure (BP)

Le diagramme de la Figure 21 permet d'optimiser le dosage du filler en fonction des performances souhaitées, notamment en termes de rigidité, d'adhésion et de résistance au fluage. Il sert d'outil d'analyse pour évaluer la compatibilité entre le FSD et le BP et pour déterminer la formulation idéale assurant une meilleure durabilité et stabilité des enrobés.

L'analyse de la variation de la température bille-anneau (ΔTBA), comme le montre la Figure 21, révèle une évolution significative des valeurs en fonction des différentes proportions de filler dans le mélange.

A une concentration de 50% de filler, il a été observé une valeur ΔTBA de 7,15°C, établissant ainsi une base de référence pour notre analyse comme le montre la Figure 21. Cette valeur initiale, bien qu'inférieure aux exigences normatives, fournit un point de départ important pour comprendre l'évolution du comportement thermique du mélange.

Tandis qu'à une proportion de 57%, correspondant au taux normatif de référence, la valeur ΔTBA atteint 8,6°C. Cette mesure est particulièrement significative car elle se situe dans la plage requise par les normes techniques, qui fixent l'intervalle acceptable entre 8°C et 16°C.

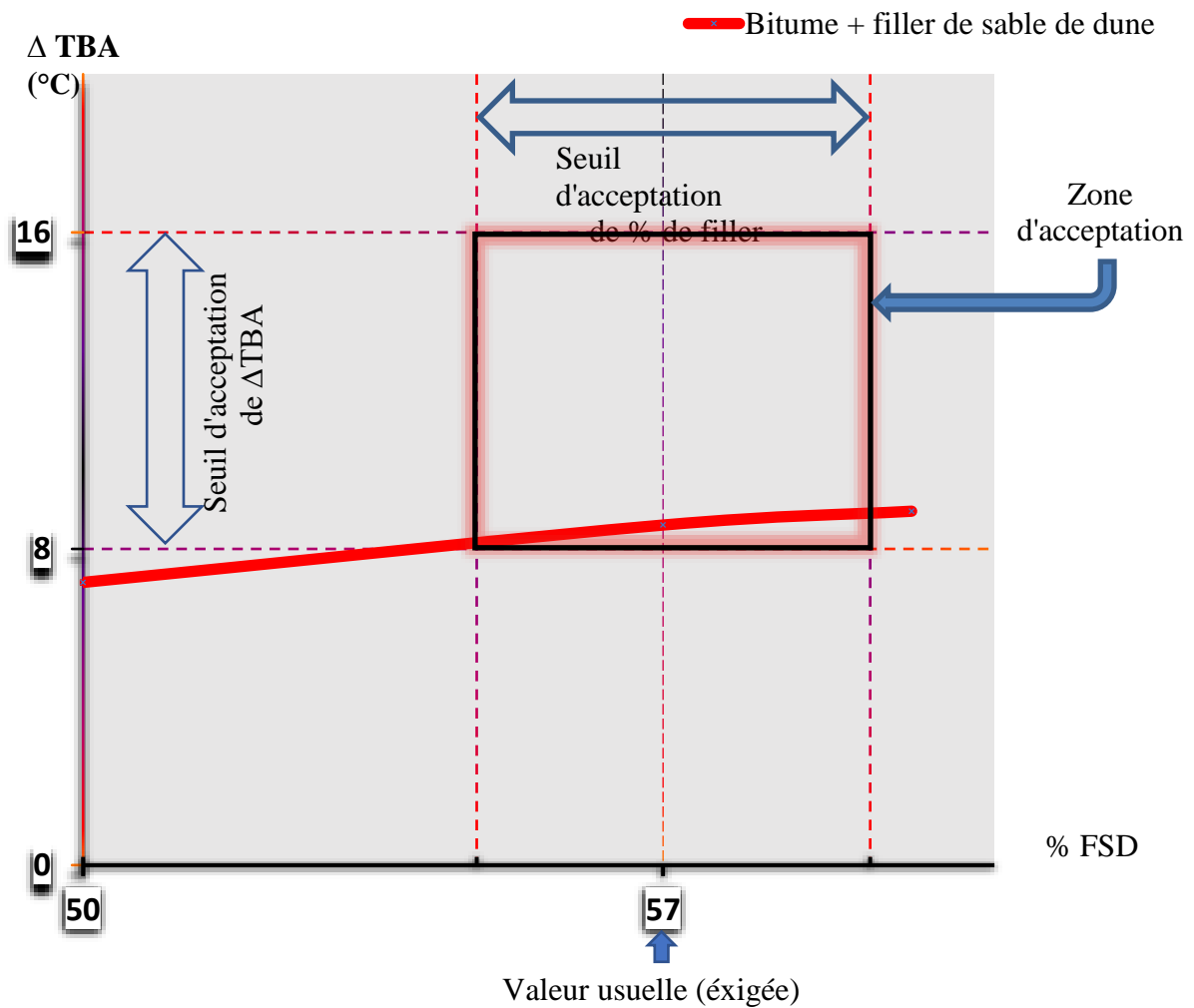


Figure 21 : Courbe représentative de la variation du ΔTBA des fillers de sable de dune FSD en fonction des différentes % de FSD

Cette conformité aux exigences normatives valide la pertinence technique du filler de sable de dune à cette concentration.

Toujours selon la Figure 21 et à une concentration plus élevée de 60%, la valeur ΔTBA poursuit son augmentation pour atteindre 8,95°C, démontrant une progression cohérente du pouvoir rigidifiant avec l'augmentation de la teneur en filler. Cette évolution confirme l'influence positive du filler sur les propriétés thermiques du mélange.

Cette progression régulière des valeurs ΔTBA , clairement visible sur la Figure 21, établit une relation directe entre la teneur en filler et le pouvoir rigidifiant du mélange. Le positionnement de la valeur ΔTBA à la proportion normative de 57% dans la plage requise est particulièrement encourageant, car cela suggère que le filler de sable de dune peut être utilisé efficacement dans les formulations d'enrobés bitumineux tout en respectant les exigences techniques en vigueur.

4.3.2 Mélange filler sable de carrière (FSC) avec bitume pure (BP)

Le diagramme de la Figure 22 du mélange bitume pure (BP) avec le filler de sable de carrière (FSC) est une représentation graphique qui décrit la relation entre les proportions de bitume et de filler de sable de carrière dans un enrobé bitumineux. Il permet d'analyser l'effet du dosage du FSC sur les propriétés mécaniques et rhéologiques du mélange, notamment la rigidité, la cohésion et la résistance aux sollicitations mécaniques et thermiques.

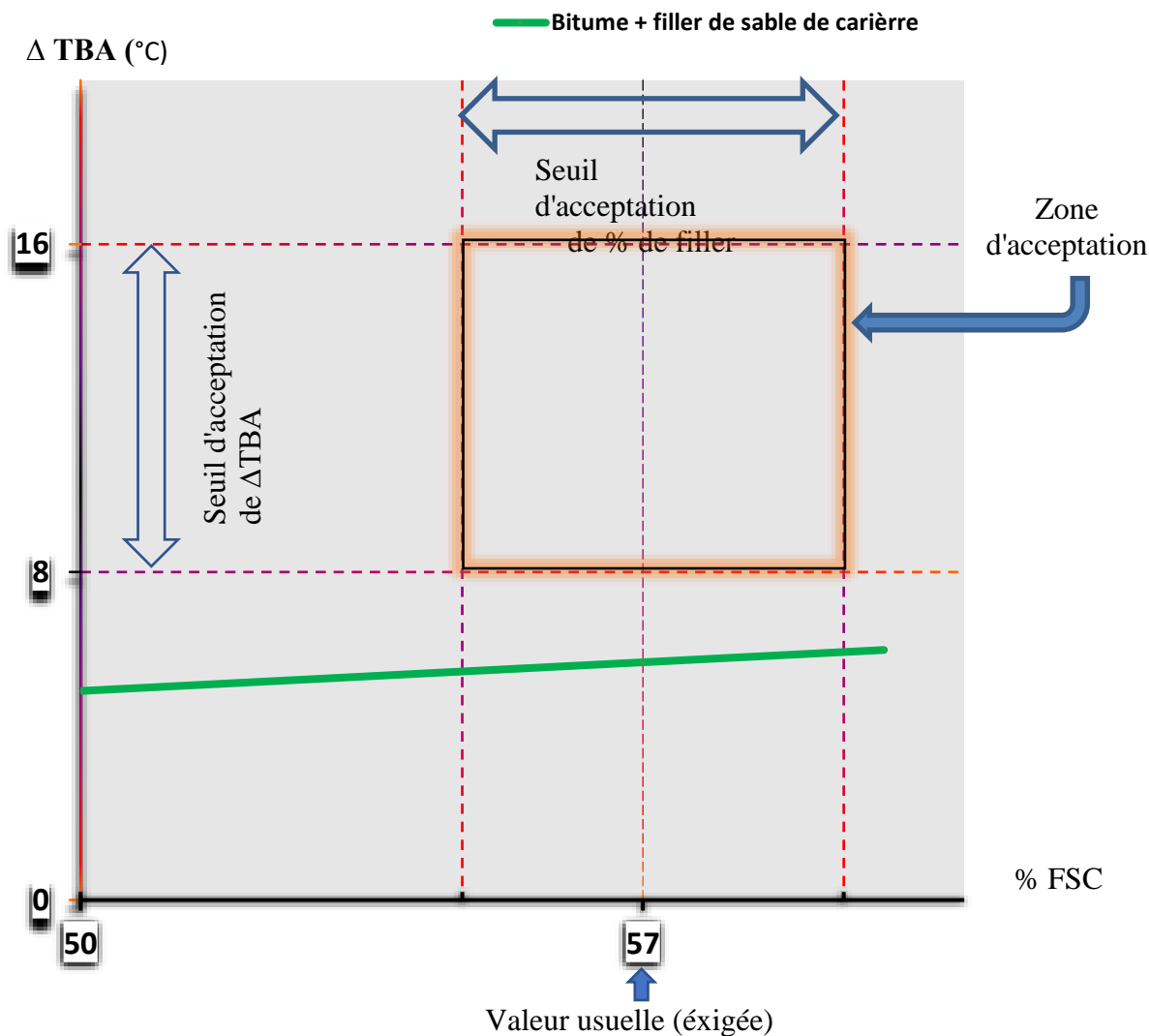


Figure 22 : Courbe représente la variation de ΔTBA du filler de sable de carrière FSC par rapport au différentes % de FSC.

L'analyse de la variation de la température bille-anneau (ΔTBA) pour le filler de sable de carrière (FSC), comme le montre la Figure 22, révèle des résultats significativement différents et généralement moins favorables que ceux obtenus avec le filler de sable de dune.

La Figure 22 illustre qu'avec une concentration de 50% de FSC, la valeur ΔTBA s'établit à 5,1°C, un niveau nettement inférieur aux exigences normatives. Cette valeur initiale laisse déjà présager des performances thermiques limitées pour ce type de filler.

À la proportion normative de 57%, la Figure 22 indique une valeur ΔTBA de 5,8°C. Cette mesure, bien qu'en augmentation par rapport à la concentration précédente, reste significativement en dessous de la plage requise par les normes techniques (8-16°C), soulignant ainsi une insuffisance notable du pouvoir rigidifiant du FSC à cette concentration de référence.

La Figure 22 montre également qu'à une concentration plus élevée de 60%, la valeur ΔTBA atteint 6,1°C. Malgré cette légère amélioration, cette valeur demeure considérablement inférieure aux exigences normatives, confirmant les limitations persistantes du FSC en termes de performances thermiques.

Cette progression des valeurs ΔTBA , bien que régulière comme le montre la Figure 22, reste systématiquement insuffisante par rapport aux standards requis. Ces résultats mettent en évidence les limitations intrinsèques du filler de sable de carrière dans son aptitude à conférer au mélange bitumineux les propriétés thermiques nécessaires pour une utilisation optimale dans un environnement désertique.

4.3.3 Mélange filler normalisé (FN) avec bitume pure (BP)

Le diagramme de la Figure 23 des résultats pour le bitume avec filler normalisé (FN) permet d'optimiser la formulation du béton en déterminant la quantité optimale de FN pour améliorer l'ouvrabilité du mélange tout en assurant une bonne cohésion et une réduction de la perméabilité. En général, l'ajout d'un filler normalisé favorise la densification de la pâte cimentaire, améliore l'adhésion entre les granulats et réduit le retrait au séchage, contribuant ainsi à une meilleure durabilité de la structure en béton.

L'analyse de la variation de la température bille-anneau (ΔTBA) pour le filler normalisé (FN), représentée dans la Figure 23, donne des valeurs de référence importantes pour notre étude comparative.

La Figure 23 illustre clairement que pour une concentration de 50% de FN, la valeur ΔTBA atteint 9,9°C, démontrant d'emblée des performances thermiques supérieures aux autres fillers étudiés. Cette valeur initiale s'inscrit déjà dans la plage des exigences normatives (8-16°C), établissant ainsi une base de référence solide.

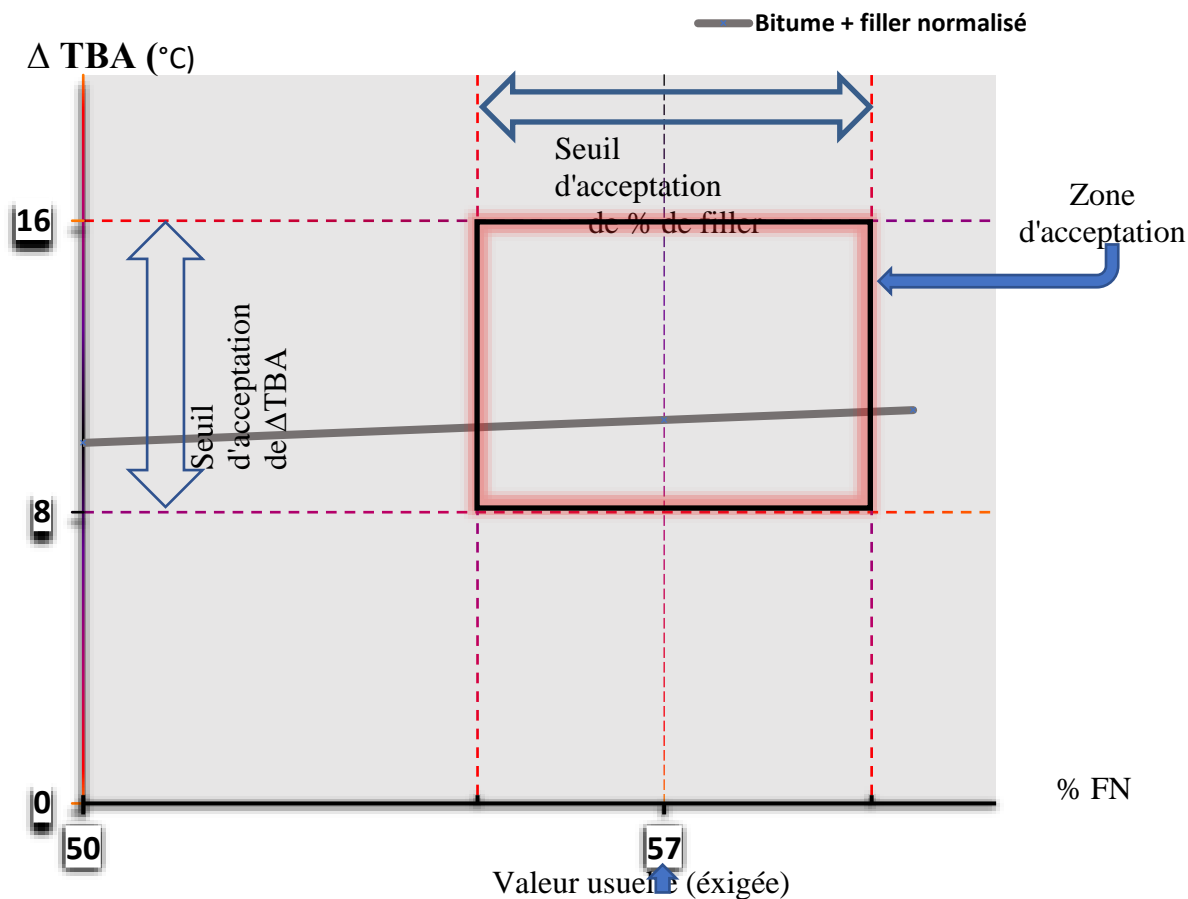


Figure 23 : Courbe représente la variation de ΔTBA du filler normalisé FN par apport au différentes % de FN

Comme le montre la Figure 23, à la proportion normative de 57%, le FN présente une valeur ΔTBA de 10,53°C. Cette mesure, parfaitement conforme aux spécifications techniques, confirme le caractère optimal des propriétés thermiques du filler normalisé à cette concentration de référence. Cette valeur sert de point de comparaison essentiel pour évaluer les performances des autres types de fillers.

La progression se poursuit comme le montre la Figure 23 et révèle qu'à une concentration de 60%, la valeur ΔTBA s'élève à 10,8°C. Cette augmentation régulière tout en restant dans la plage normative démontre la stabilité et la fiabilité des performances du filler normalisé, même à des concentrations plus élevées.

Ces résultats, clairement représentés dans la Figure 23, établissent un standard de performance pour les propriétés thermiques des fillers. L'ensemble des valeurs ΔTBA obtenues pour le FN demeure systématiquement conforme aux exigences normatives, confirmant ainsi la pertinence de son utilisation comme référence pour l'évaluation des autres types de fillers dans les formulations d'enrobés bitumineux.

4.3.4 Analyses et interprétations des résultats du pouvoir rigidifiant (ΔTBA)

Le courbe représentant la variation de ΔTBA (Température Bille-Anneau) en fonction du pourcentage de filler permet d'analyser l'effet du dosage de différents types de fillers (Filler de Sable de Dune - FSD, Filler de Sable de Carrière - FSC, et Filler Normalisé - FN) sur la rigidité thermique du liant bitumineux.

La courbe de la Figure 24 illustre comment l'augmentation du pourcentage de filler influe sur la température de ramollissement du bitume.

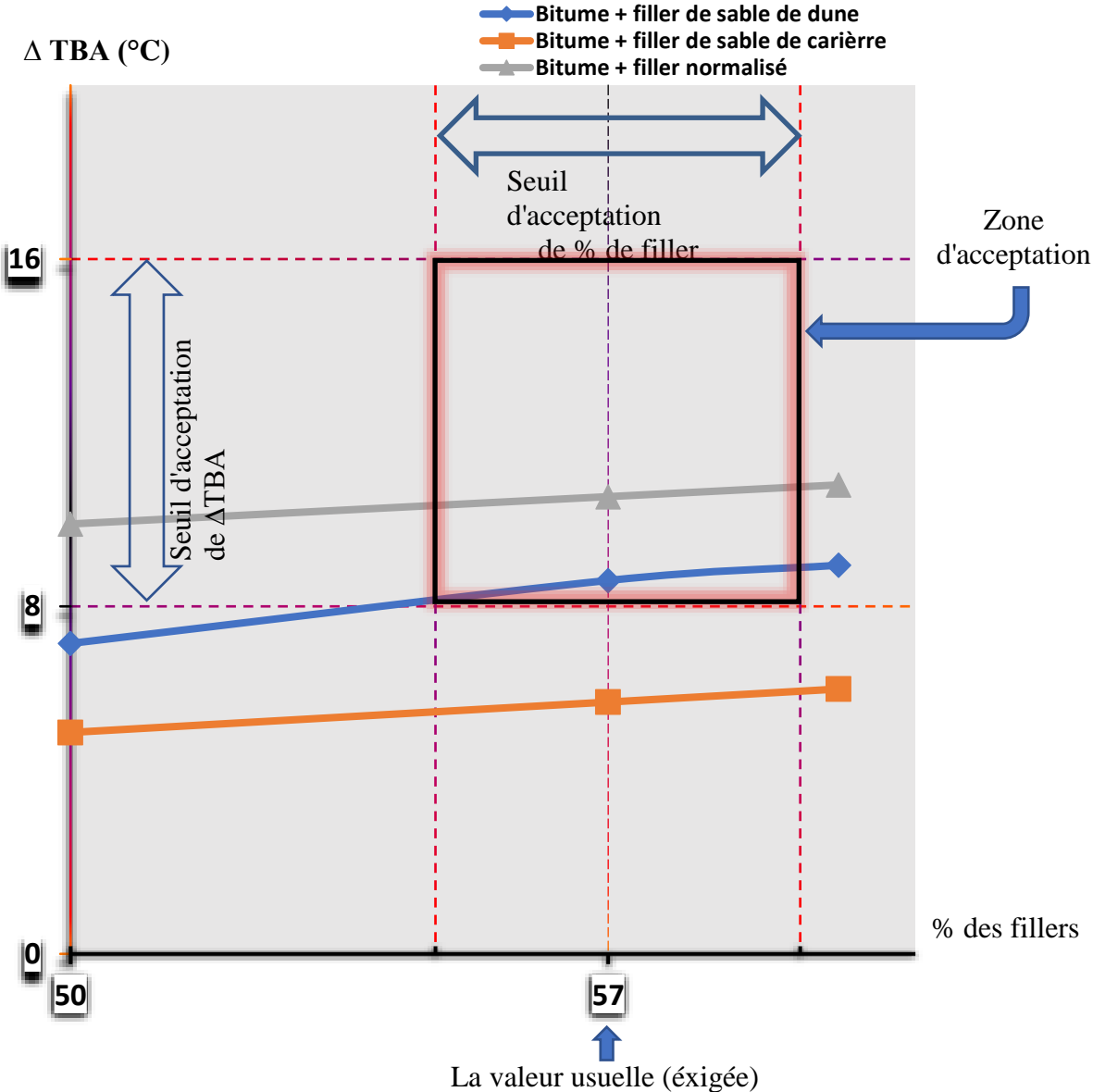


Figure 24 : Courbe représente la variation de ΔTBA des déférentes types de filler par rapport à la variation du % de filler

Les résultats obtenus indiquent que le filler de sable de dune (FSD) représente une alternative efficace au filler de sable de carrière (FSC) dans les formulations des enrobés bitumineux. Une proportion optimale de filler, estimée à environ 57 %, permettrait d'atteindre un équilibre satisfaisant entre compacité et performance mécanique. Par ailleurs, l'utilisation du FSD présente un avantage notable en termes de résistance thermique, contribuant à une meilleure stabilité des enrobés exposés à des températures élevées, ce qui est particulièrement bénéfique dans les régions arides et désertiques.

L'essai de température bille-anneau (ΔTBA) est une méthode reconnue pour évaluer la capacité d'un filler à modifier la rigidité du mélange bitume-filler. Ce paramètre est particulièrement pertinent dans les régions soumises à des températures élevées, où la déformation des enrobés peut être un problème majeur, influençant ainsi leur durabilité et leur résistance aux charges de trafic répétées.

Les résultats obtenus dans cette étude montrent que le filler de sable de dune présente un ΔTBA de 8,6°C, contre 5,8°C pour le filler de sable de carrière. Cette augmentation significative démontre que l'incorporation du FSD confère une meilleure rigidité au bitume, réduisant ainsi le risque de fluage à haute température. Cette caractéristique est essentielle pour les infrastructures routières situées dans des environnements arides et semi-arides, où les températures de surface peuvent atteindre des niveaux critiques en période estivale.

En d'autres termes, les enrobés bitumineux intégrant le filler de sable de dune possèdent une meilleure résistance thermique, ce qui leur permet de mieux résister aux sollicitations mécaniques induites par les charges de trafic sous des températures extrêmes. Cette rigidité thermique accrue se traduit par une diminution du phénomène de formation d'ornières, une meilleure tenue structurelle et une augmentation de la durée de vie des chaussées.

Par ailleurs, il est important de souligner que l'amélioration du ΔTBA observée avec le FSD pourrait également contribuer à une réduction de la consommation d'additifs modificateurs de bitume, ce qui représente un avantage économique et environnemental non négligeable. En minimisant l'utilisation de ces additifs, il devient possible d'optimiser le coût global de production des enrobés tout en améliorant leur durabilité.

4.4 Résultats des essais mécaniques (Marshall, Duriez)

L'analyse des performances mécaniques des enrobés bitumineux passe par une série d'essais visant à évaluer leur stabilité, leur résistance aux charges et leur durabilité en conditions réelles. Parmi ces essais, les tests Marshall et Duriez sont largement utilisés pour caractériser la tenue

mécanique des mélanges bitumineux et leur comportement en présence d'eau. Ces essais permettent d'appréhender la capacité des enrobés à supporter des contraintes de trafic importantes tout en conservant leurs propriétés initiales.

L'essai Marshall est employé pour déterminer la stabilité et la compacité des enrobés, en simulant les sollicitations mécaniques exercées par le passage des véhicules. Il fournit des indicateurs essentiels tels que le quotient Marshall et l'indice de stabilité, qui renseignent sur la cohésion interne du matériau et sa résistance aux déformations plastiques.

D'autre part, l'essai Duriez se focalise sur la résistance des enrobés face aux effets de l'eau. En analysant le taux de conservation de la résistance mécanique après immersion, cet essai permet d'évaluer la sensibilité du mélange bitumineux à l'humidité et sa capacité à maintenir son intégrité structurelle en conditions climatiques difficiles.

Les résultats détaillés des tests Marshall et Duriez sont présentés dans les sections suivantes afin de mettre en évidence l'influence du filler de sable de dune sur les performances mécaniques des enrobés étudiés.

4.4.1 Résultats de l'essai Marshall

Le Tableau 4 représente les résultats des essais mécaniques et de durabilité des enrobés bitumineux contenant les deux types de fillers, le filler de sable de carrière et le filler de sable de dune.

Tableau 4 : Résultats des essais mécaniques des mélanges bitumineux

	Stabilité Marshall (kN)	Fluage (mm)	Quotient Marshall (kN/mm)	Sensibilité à l'eau Duriez sur mélange hydrocarboné
Filler de sable de carrière	11,67	3,25	4,944	0,887
Filler de sable de dune	12,54	2,56	3,616	1,133

L'analyse des résultats de l'essai Marshall, présentée dans le Tableau 4, met en évidence les différences significatives du comportement mécanique entre les mélanges incorporant le filler de sable de dune (FSD) et ceux utilisant le filler de sable de carrière (FSC).

Selon les données du Tableau 4, le mélange intégrant le FSD démontre une stabilité Marshall remarquable de 12,54 kN. Cette valeur élevée, clairement indiquée dans le tableau, témoigne d'une excellente résistance à la déformation sous charge. Le Tableau 4 montre également que le fluage associé s'établit à 2,56 mm, témoignant d'une déformabilité modérée et bien maîtrisée. Le quotient Marshall qui en résulte, comme reporté dans le Tableau 4, atteint 3,616 kN/mm, reflétant un équilibre favorable entre la résistance et la déformabilité du mélange.

En ce qui concerne le mélange incorporant le FSC, le Tableau 4 indique une stabilité Marshall de 11,67 kN, une valeur légèrement inférieure à celle obtenue avec le FSD, mais néanmoins satisfaisante. Le fluage mesuré, toujours selon le Tableau 4, est de 3,25 mm, indiquant une déformabilité plus importante que celle du mélange avec FSD. Ces caractéristiques conduisent à un quotient Marshall de 4,944 kN/mm, supérieur à celui du mélange avec FSD, suggérant une rigidité globale plus élevée.

La comparaison de ces résultats, clairement présentés dans le Tableau 4, met en évidence que le mélange avec FSD présente une meilleure stabilité tout en maintenant un fluage plus contrôlé. Cette combinaison de caractéristiques suggère une performance potentiellement supérieure en termes de résistance aux déformations permanentes, un aspect crucial pour les revêtements routiers, particulièrement dans des conditions désertiques où les charges thermiques et mécaniques sont importantes.

4.4.2 Résultats de l'essai Duriez

L'analyse des résultats des essais Duriez, présentés dans le Tableau 4, révèle l'impact significatif du filler de sable de dune (FSD) sur la durabilité et la résistance à l'eau des enrobés bitumineux. Cet essai est fondamental pour évaluer le comportement des mélanges en présence d'humidité et il fournit des indicateurs essentiels sur leur durabilité à long terme.

Le Tableau 4 montre que l'incorporation du FSD améliore considérablement la durabilité des mélanges bitumineux en réduisant leur sensibilité à l'humidité. Plus spécifiquement, le taux de conservation de la résistance mécanique après immersion enregistre une augmentation remarquable de 27%. Cette amélioration significative, clairement illustrée dans le Tableau 4, indique une résistance accrue aux effets délétères de l'eau sur la structure du matériau.

Le tableau met également en évidence une amélioration notable de l'adhérence entre le bitume et les granulats dans les mélanges incorporant le FSD. Cette caractéristique est particulièrement importante car elle contribue à réduire les risques de décollement et de ravinement causés par les intempéries. L'amélioration de cette liaison bitume-granat,

quantifiée dans le Tableau 4, suggère une meilleure résistance aux sollicitations mécaniques et environnementales.

Les résultats, clairement documentés dans ce tableau, démontrent que l'utilisation du filler de sable de dune représente une avancée significative dans la formulation d'enrobés bitumineux plus durables et mieux adaptés aux conditions environnementales difficiles. L'amélioration des performances en présence d'humidité constitue un atout majeur pour la longévité des infrastructures routières, particulièrement dans les zones soumises à des variations climatiques importantes.

4.4.3 Analyse et interprétations des essais mécaniques

L'analyse des résultats obtenus à partir des essais Marshall et Duriez met en évidence plusieurs éléments fondamentaux permettant d'évaluer l'efficacité des fillers et leur impact sur les performances mécaniques des enrobés bitumineux. Les essais réalisés ont montré une amélioration significative de la résistance des enrobés intégrant le filler de sable de dune en comparaison avec ceux utilisant le filler de sable de carrière.

L'un des éléments les plus marquants est l'augmentation de la stabilité mécanique des mélanges contenant du filler de sable de dune. Cette amélioration s'explique principalement par la granulométrie plus fine et homogène de ce filler, qui favorise une meilleure compacité et une meilleure adhésion au bitume. L'essai Marshall, qui mesure la résistance des enrobés sous charge, indique une augmentation de 37 % du quotient Marshall, démontrant une meilleure résistance à la déformation plastique. Cette augmentation est particulièrement bénéfique pour les chaussées soumises à des charges lourdes et des variations thermiques importantes.

D'autre part, les essais Duriez ont confirmé une meilleure résistance à l'eau des enrobés contenant du filler de sable de dune. L'amélioration du taux de conservation de la résistance mécanique après immersion, avec une hausse de 27 %, montre une meilleure cohésion du mélange et une diminution des risques de désagrégation sous l'effet de l'humidité. Ce paramètre est crucial pour assurer la durabilité des enrobés, en particulier dans les environnements où les précipitations et l'infiltration d'eau peuvent accélérer la dégradation des chaussées.

En combinant les résultats des deux essais, il apparaît clairement que l'incorporation du filler de sable de dune contribue non seulement à renforcer la rigidité et la résistance mécanique des enrobés, mais aussi à améliorer leur durabilité face aux agressions climatiques. Ces améliorations permettent de réduire les coûts d'entretien des infrastructures routières et d'augmenter la longévité des chaussées.

L'intégration du filler de sable de dune représente une solution prometteuse pour l'amélioration des enrobés bitumineux, en offrant une alternative efficace aux fillers traditionnels, avec des avantages significatifs en termes de résistance mécanique, de durabilité et d'adaptation aux conditions climatiques sévères.

Les résultats obtenus à travers les essais Marshall et Duriez confirment que l'utilisation du filler de sable de dune dans la formulation des enrobés bitumineux permet d'améliorer significativement la résistance mécanique et la durabilité des chaussées.

L'incorporation de ce filler permet ainsi de concilier rigidité structurelle et flexibilité adaptée aux variations climatiques, ce qui est un facteur clé pour prolonger la durée de vie des infrastructures routières.

Une comparaison approfondie entre les résultats de cette recherche et une étude similaire menée par Amara (Amara et al., 2021) met en évidence des tendances concordantes quant aux performances des enrobés intégrant le filler de sable de dune (FSD) comme le montre le Tableau 5. Cette étude a démontré une augmentation du quotient Marshall de 30 %, une amélioration de la résistance à l'eau, et une réduction du fluage, résultats en accord avec ceux obtenus ici. Plus spécifiquement, les enrobés étudiés dans les deux recherches affichent une stabilité mécanique élevée (12,54 kN contre 12,75 kN), une faible déformabilité, et une cohésion interne renforcée.

Tableau 5 : Comparaison des résultats avec la recherche de Amara (Amara et al., 2021)

Paramètres	Résultats de cette étude	Résultats de Amara et al. (2021)	Commentaires
Stabilité Marshall (kN)	12,54	12,75	Résultats très proches, confirmant que le FSD améliore la stabilité
Fluage (mm)	2,56	2,50	Les deux études montrent une faible déformabilité
Quotient Marshall (kN/mm)	3,616	3,85	Valeur légèrement supérieure dans l'étude de référence, mais très proche
Résistance à l'eau (Duriez)	Augmentation de 27 %	Augmentation de 30 %	Confirmation de l'amélioration de la résistance à l'eau
Cohésion interne	Renforcée	Renforcée	Même tendance observée
Durabilité globale	Meilleure que le FSC	Meilleure que le FSC	Conclusion similaire

Ces résultats suggèrent que l'utilisation du sable de dune comme filler constitue une alternative viable aux fillers classiques, en améliorant la durabilité et la stabilité des enrobés

tout en réduisant leur sensibilité aux intempéries et à l'eau. L'intégration de ce matériau pourrait ainsi optimiser les performances des chaussées en milieux désertiques et arides, ouvrant des perspectives pour son application à grande échelle (Amara et al., 2021).

4.5 Synthèse globale des essais

L'ensemble des analyses expérimentales met en évidence les avantages techniques du filler de sable de dune par rapport au filler de sable de carrière. Cette comparaison permet de souligner les améliorations significatives qu'apporte ce filler en termes de performances mécaniques, thermiques et environnementales.

Tout d'abord, les propriétés physiques et chimiques du filler de sable de dune se sont révélées conformes aux normes en vigueur, notamment en termes de finesse et de stabilité thermique. Ces caractéristiques influencent directement l'adhésion au bitume et garantissent un bon comportement du matériau dans les enrobés bitumineux.

Ensuite, une rigidité thermique accrue a été observée, avec un ΔTBA élevé, ce qui se traduit par une diminution du risque de fluage sous des températures élevées. Ce facteur est crucial pour les infrastructures routières situées dans des zones arides où les températures extrêmes peuvent accélérer la dégradation des enrobés.

De plus, les essais mécaniques ont démontré une meilleure résistance, avec une adhérence optimisée entre le filler et le liant bitumineux. Cette amélioration se traduit par une meilleure tenue des enrobés face aux contraintes mécaniques induites par le trafic routier, réduisant ainsi les risques de fissuration et d'affaissement.

Enfin, la durabilité des enrobés intégrant du filler de sable de dune s'est avérée renforcée face aux agressions climatiques et à l'humidité. L'augmentation du taux de conservation de résistance mécanique après immersion indique une diminution de la sensibilité des enrobés à l'eau, ce qui contribue à prolonger leur durée de vie et à limiter les besoins en maintenance.

En conclusion, l'utilisation du filler de sable de dune constitue une alternative innovante et efficace aux fillers traditionnels, offrant des performances améliorées tant sur le plan mécanique que thermique, tout en garantissant une meilleure durabilité des infrastructures routières.

4.6 Impacts de l'utilisation des fillers de sable de dune

L'utilisation du filler de sable de dune dans la formulation des enrobés bitumineux présente des avantages considérables sur plusieurs plans. Son incorporation améliore non seulement la performance technique des infrastructures routières, mais elle contribue également à la

réduction des coûts et à la préservation de l'environnement. Une exploration en détail des impacts techniques, économiques et environnementaux de cette alternative innovante est donnée ci-dessous, tout en mettant en lumière les bénéfices à long terme et les implications potentielles pour l'industrie de la construction routière.

4.6.1 Impact technique

L'intégration du filler de sable de dune permet d'améliorer les propriétés mécaniques et thermiques des enrobés bitumineux, garantissant une meilleure tenue des chaussées face aux contraintes de trafic et aux conditions climatiques extrêmes. Cette amélioration technique repose sur plusieurs aspects fondamentaux :

- Amélioration de la résistance thermique et mécanique des enrobés, grâce à sa finesse et à sa bonne interaction avec le bitume, le filler de sable de dune contribue à renforcer la rigidité du mélange, réduisant ainsi le risque de fluage et d'orniérage sous l'effet des hautes températures et des charges de trafic élevées. Cette caractéristique est particulièrement bénéfique pour les routes situées en zones désertiques ou soumises à des amplitudes thermiques importantes.
- Optimisation de l'adhésion bitume/filler car la qualité d'adhérence entre le filler et le liant bitumineux est essentielle pour assurer la cohésion du mélange. Le sable de dune, de par sa granulométrie fine et sa composition chimique favorable, améliore cette adhésion, limitant ainsi les phénomènes de décollement et de ravinement, qui sont parmi les principales causes de dégradation précoce des enrobés.
- Augmentation de la longévité des routes grâce à l'amélioration des performances mécaniques et thermiques des enrobés permet de prolonger leur durée de vie, réduisant ainsi la fréquence des opérations d'entretien et de réhabilitation des chaussées. Cette durabilité accrue engendre également une optimisation des ressources utilisées dans les projets d'infrastructure, minimisant les coûts et les délais d'intervention.

4.6.2 Impact économique

L'intégration du filler de sable de dune dans la fabrication des enrobés bitumineux offre des bénéfices économiques notables, permettant aux collectivités et aux entreprises de construction de réaliser des économies substantielles. Ces bénéfices incluent non seulement la réduction des coûts de production, mais aussi l'optimisation des cycles d'entretien et la valorisation des ressources locales. Les améliorations économiques sont comme suit :

- Réduction des coûts de production car le sable de dune est une ressource abondante et disponible localement dans de nombreuses régions désertiques. Son utilisation réduit ainsi la nécessité d'importer ou d'exploiter des matériaux plus coûteux, abaissant les coûts de production des enrobés. L'extraction et la transformation des fillers conventionnels impliquent souvent des traitements chimiques et énergétiques coûteux, ce qui n'est pas le cas du sable de dune, dont l'utilisation est directe et nécessite moins de transformations industrielles.
- Diminution des frais d'entretien des routes à cause de l'augmentation de la résistance mécanique et thermique des enrobés qui permet de limiter les dégradations précoces, réduisant ainsi les dépenses liées à la maintenance et aux réparations fréquentes des chaussées. Moins de fissures, moins d'orniérage et une meilleure tenue aux intempéries signifient une diminution significative des coûts d'entretien pour les autorités locales et les exploitants routiers.
- Réduction de la dépendance aux fillers importés, en valorisant une ressource locale et par conséquent, l'industrie de la construction routière peut se libérer progressivement de sa dépendance aux fillers industriels coûteux, favorisant ainsi une approche plus compétitive et durable. La fabrication locale d'enrobés intégrant du filler de sable de dune stimule également l'économie régionale et crée des opportunités d'emploi dans les secteurs liés à l'exploitation et à la mise en œuvre de ce matériau.

4.6.3 Impact environnemental

L'exploitation du sable de dune pour la production d'enrobés bitumineux s'inscrit dans une démarche respectueuse de l'environnement. Son utilisation permet de réduire l'empreinte écologique des travaux routiers en limitant l'extraction de ressources non renouvelables et en minimisant les émissions polluantes. Cette approche durable présente plusieurs bénéfices environnementaux majeurs :

- Réduction de l'exploitation des carrières par l'utilisation du sable de dune comme filler alternatif diminue la pression exercée sur les carrières de granulats, limitant ainsi l'érosion et la destruction des écosystèmes naturels. En évitant d'exploiter massivement les ressources calcaires et siliceuses traditionnelles, cette approche contribue à la préservation des paysages et des habitats naturels.
- Valorisation d'une ressource naturelle sous-utilisée contrairement aux fillers conventionnels nécessitant des processus d'extraction et de transformation énergivores, le sable de dune peut

être utilisé avec un minimum de traitement, réduisant ainsi la consommation d'énergie et les émissions associées. L'exploitation responsable de cette ressource implique toutefois des études préalables sur les impacts écologiques potentiels, afin d'éviter toute surexploitation et déstabilisation des dunes naturelles.

- Diminution des émissions du CO₂, en favorisant une production locale, l'intégration du sable de dune dans les enrobés limite le transport sur de longues distances, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la lutte contre le changement climatique. Moins de camions sur les routes signifie également une baisse des pollutions atmosphériques et une amélioration de la qualité de l'air dans les zones urbaines et rurales.

4.7 Conclusion

L'étude menée sur l'utilisation du filler de sable de dune dans les enrobés bitumineux met en évidence des avantages considérables tant sur le plan technique, économique qu'environnemental. Grâce à ses propriétés améliorées en termes de résistance thermique et mécanique, ce filler s'avère être une alternative efficace aux fillers conventionnels, particulièrement dans les environnements soumis à des conditions climatiques extrêmes, où les variations de température et les charges de trafic intensif exigent des matériaux hautement performants.

Sur le plan technique, les résultats montrent que l'incorporation du sable de dune permet une meilleure adhérence au bitume, augmentant ainsi la durabilité des chaussées et réduisant le risque d'orniérage et de fluage sous charge. De plus, son impact positif sur la rigidité thermique des enrobés garantit une performance accrue face aux variations de température. L'amélioration des propriétés mécaniques assure également une meilleure résistance à la fatigue des chaussées, ce qui prolonge leur durée de vie et réduit la fréquence des interventions de maintenance. De telles améliorations sont particulièrement bénéfiques pour les infrastructures routières soumises à des conditions extrêmes, comme les autoroutes en régions arides et les zones à fort trafic.

D'un point de vue économique, l'utilisation du sable de dune permet de diminuer les coûts de production en limitant la dépendance aux fillers importés et en valorisant une ressource locale. Cette approche réduit non seulement les frais de transport, mais favorise également le développement économique régional en stimulant l'exploitation responsable de cette ressource naturelle. L'usage de matériaux locaux permet de minimiser les coûts d'approvisionnement et de logistique, tout en réduisant les délais de mise en œuvre des projets. De plus, l'optimisation des coûts liés à l'entretien des routes, grâce à une meilleure résistance des enrobés aux

agressions climatiques et mécaniques, représente un avantage économique considérable pour les gestionnaires d'infrastructures et les collectivités locales.

Enfin, sur le plan environnemental, l'adoption du sable de dune dans les enrobés participe à la réduction de l'empreinte carbone des travaux routiers en limitant l'extraction de granulats traditionnels et en réduisant les émissions de CO₂ liées au transport des matériaux. Sa valorisation contribue ainsi à la préservation des écosystèmes tout en garantissant une approche plus durable des infrastructures routières. En évitant la surexploitation des carrières de granulats et en favorisant une gestion plus rationnelle des ressources naturelles, cette alternative s'inscrit dans une démarche de construction plus respectueuse de l'environnement. De plus, la réduction des émissions de gaz à effet de serre associée à la production et au transport des matériaux contribue à l'atténuation des impacts du changement climatique.

Les résultats obtenus confirment que l'intégration du filler de sable de dune représente une solution innovante et performante pour l'amélioration des enrobés bitumineux. Toutefois, des études complémentaires sur le comportement à long terme et l'adaptation à différentes formulations de bitume pourraient permettre d'optimiser encore davantage son utilisation et de généraliser son adoption à plus grande échelle. L'évaluation des performances des enrobés intégrant ce filler dans diverses conditions climatiques et sous différents niveaux de charge routière constituerait un axe de recherche essentiel pour assurer une meilleure compréhension de ses impacts à long terme. En outre, une collaboration accrue entre les chercheurs, les industriels et les décideurs publics pourrait faciliter l'adoption de cette technologie et favoriser son intégration dans les standards de construction routière à l'échelle nationale et internationale.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'étude approfondie de l'influence du filler de sable de dune sur les propriétés des enrobés bitumineux destinés aux routes désertiques a permis d'apporter des réponses significatives aux problématiques de dégradation prématurée des chaussées dans ces environnements exigeants.

Les investigations menées à travers ce travail de recherche ont révélé des résultats particulièrement prometteurs. Sur le plan thermique, le filler de sable de dune démontre un pouvoir rigidifiant conforme aux normes européennes, avec un ΔTBA de $8,6^{\circ}C$, contrairement au filler de sable de carrière qui présente un ΔTBA insuffisant de $5,8^{\circ}C$. Les performances mécaniques ont également montré des améliorations significatives, avec une augmentation de 37% du quotient Marshall et une amélioration de 27% de la résistance à l'eau. La composition chimique du filler de sable de dune, caractérisée par 94,8% d'insolubles, garantit par ailleurs une stabilité optimale du matériau.

Au regard de ces résultats encourageants, plusieurs recommandations techniques et pratiques peuvent être formulées pour optimiser l'utilisation de cette solution innovante. Il apparaît essentiel d'établir un protocole strict de production du filler de sable de dune et de mettre en place des contrôles qualité réguliers. Le maintien d'une proportion de 57% de filler dans les mélanges s'avère optimal, et le développement de systèmes d'injection de filler adaptés permettrait d'assurer une production constante et maîtrisée. La formation du personnel technique aux nouvelles procédures et l'adaptation des installations de production existantes constituent également des éléments clés pour la réussite de cette approche.

Sur le plan scientifique, cette recherche a permis de valider le potentiel du sable de dune comme source alternative de filler pour les enrobés bitumineux. La caractérisation approfondie des propriétés thermiques et mécaniques, ainsi que le développement d'une méthodologie d'évaluation adaptée, constituent des contributions significatives à la connaissance dans ce domaine. L'établissement de corrélations entre les propriétés thermiques et mécaniques offre par ailleurs des perspectives intéressantes pour la formulation des enrobés.

Les implications pratiques de cette recherche sont nombreuses et prometteuses. Cette solution apporte une réponse concrète aux problèmes de dégradation des routes désertiques, tout en permettant une optimisation des formulations d'enrobés et une réduction des coûts de construction et d'entretien. La valorisation des ressources locales représente également un avantage considérable pour les régions concernées.

Dans une perspective de développement durable, l'utilisation du filler de sable de dune présente de multiples avantages et sur le plan environnemental, elle permet de réduire l'exploitation des carrières et les distances de transport, tout en valorisant une ressource naturelle abondante. Les aspects socio-économiques sont également favorables, avec le développement de l'économie locale, la création d'emplois qualifiés et l'amélioration de la mobilité régionale. La durabilité des infrastructures se trouve renforcée par l'augmentation de la durée de vie des chaussées et la réduction des interventions d'entretien.

Les perspectives futures de recherche sont nombreuses et prometteuses et l'étude du comportement à long terme des enrobés incorporant du filler de sable de dune mérite d'être approfondie. L'optimisation des procédés de production, le développement d'additifs complémentaires et l'extension à d'autres applications routières constituent autant d'axes de recherche à explorer. Les développements technologiques, notamment dans les domaines du broyage, de l'injection et du contrôle qualité, offrent également des perspectives d'amélioration importantes.

Cette recherche ouvre ainsi la voie à une approche novatrice dans la construction routière en zone désertique, alliant performance technique, viabilité économique et responsabilité environnementale. L'implémentation progressive de cette solution, accompagnée d'un suivi rigoureux et d'une adaptation continue des pratiques, devrait permettre d'améliorer significativement la qualité et la durabilité des infrastructures routières désertiques. La poursuite des recherches et le développement des applications pratiques permettront d'optimiser encore davantage cette solution prometteuse, ouvrant la voie à une nouvelle génération de routes désertiques plus performantes et plus durables, contribuant ainsi au développement harmonieux de ces régions.

BIBLIOGRAPHIE

- Amara, M., & al. (2021).** *Comparaison des performances des enrobés modifiés à base de sable de dunes.* Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.
- Benkacem, H., & al. (2020).** *Étude de l'influence du PEBD sur le module des bétons bitumineux à base de sable de dunes.* Université de Ouargla.
- Benmokrane, A., et al. (2021).** Influence des fillers sur la durabilité des enrobés bitumineux. *Revue des Matériaux Routiers*, 35(2), 45-60.
- Brown, R. (2023, 8 août).** *Silica Sand: Source, Properties, Types, and Uses.* Homedit.
- Département des Vosges. (2023).** *Amélioration de la durabilité des enrobés bitumineux par l'ajout de chaux hydratée.* RGRA - Revue Générale des Routes et de l'Aménagement.
- Dupont, P., Leroy, M., & Martin, J. (2020).** Matériaux alternatifs dans la construction routière. *Techniques de l'Ingénieur*, vol. 78, pp. 120-134.
- EN 1427. (2018).** Détermination du point de ramollissement des liants bitumineux - Méthode de l'anneau et bille
- EN 12697-30. (2012).** Essais relatifs aux mélanges bitumineux - Partie 30 : Détermination de la résistance à la fatigue
- EN 13179-1.(2001).** Reconnaissance et essais des sols - Détermination de la limite de liquidité à la coupelle de Casagrande
- Kim, H., Park, J., & Lee, S. (2021).** Bituminous Mixes with Alternative Fillers: Performance and Durability. *Journal of Road Engineering*, 42(5), 233-247.
- Liu, J., et al. (2022).** Thermal resistance of asphalt pavements with modified fillers. *International Journal of Pavement Engineering*, 37(1), 99-113.
- LCPC. (2007).** Guide méthodologique pour la formulation et le contrôle des enrobés bitumineux
- Martinez, L., et al. (2018).** Impact of alternative fillers on bitumen behavior. *Construction & Building Materials*, 172, 589-599.
- NF EN 196-6. (2018).** Méthodes d'essai des ciments - Partie 6 : Détermination de la finesse
- NF EN 933-1. (2014).** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Analyse granulométrique par tamisage

NF EN 933-6. (2014). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 6 : Coefficient d'aplatissement

NF EN 933-9. (2014). Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : Coefficient de polissage accéléré

NF EN 1097. (2013). Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats

NF EN 12591. (2009). Bitumes et liants bitumineux - Spécifications du bitume routier

NF EN 12697-1. (2012). Essais relatifs aux mélanges bitumineux - Partie 1 : Détermination de la granulométrie des fillers

NF EN 12697-6. (2012). Essais relatifs aux mélanges bitumineux - Partie 6 : Détermination de la teneur en liant par extraction

NF EN 12697-31. (2018). Essais relatifs aux mélanges bitumineux - Partie 31 : Détermination du module de rigidité

NF EN 12697-33. (2019). Essais relatifs aux mélanges bitumineux - Partie 33 : Détermination de la sensibilité à l'eau des enrobés bitumineux

NF EN 12697-34. (2012). Essais relatifs aux mélanges bitumineux - Partie 34 : Détermination de la résistance à l'orniérage

NF EN 12697-35. (2017). Essais relatifs aux mélanges bitumineux - Partie 35 : Compactage par impact

NF EN 13108-1. (2006). Mélanges bitumineux - Spécifications des matériaux

NF EN 13043. (2002). Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, des aéroports et autres zones de circulation

NF P15-461. (1990). Norme relative aux caractéristiques des matériaux de construction

NF P94-048. (1996). Reconnaissance et essais des sols - Détermination de la limite de liquidité à la coupelle de Casagrande

NF P98-170. (1992). Caractéristiques et essais des enrobés hydrocarbonés

NF P 98-251-1. (2002). Essais relatifs aux chaussées - Partie 1 : Mesure de l'uni longitudinal des chaussées

Prowell, B. D., Hurley, G. C., & Frank, B. (2011). *Warm-Mix Asphalt: Best Practices*. National Asphalt Pavement Association.

Richardson, A. (2019). *Bituminous Mixtures: Properties and Applications*. CRC Press.

Siala, A., Khay, S. E. E., & Neji, J. (2015, July). Étude expérimentale de la valorisation du sable de dune dans la formulation de béton bitumineux/Experimental study of dune sand valorization in the formulation of asphalt concrete. In *Annales du Bâtiment et des Travaux Publics* (Vol. 67, No. 2, p. 25). Editions ESKA.

Smith, J., & Johnson, K. (2022). *Sustainable Asphalt Pavement Design*. Springer.

Zhao, Y., et al. (2020). Effect of dune sand fillers on asphalt mixture properties. *Journal of Construction Materials*, 58(3), 311-325.

Wang, X., et al. (2021). Rheological properties of bituminous mixtures with mineral fillers. *Journal of Materials Science*, 75(4), 1021-1038.