



Faculty of Sciences and Technology

Department of Process Engineering

Ref :...../U.M/F.S.T/2026

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم هندسة الطرائق

رقم :..... / ج.م.ك.ع.ت. // 2026

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : **INDUSTRIES PÉTROCHIMIQUES**

Option: **GÉNIE PÉTROCHIMIQUE**

THÈME

**Valorisation des déchets plastique dans les enrobés
bitumineux**

Présentée par

CHOUROUK OULD YUCEF

Soutenu le :28 /06/2026 devant le jury composé de :

Présidente :	FEDDAL Imane	MCA	Université de Mostaganem
Examinatrice :	OUADJENIA Fatima	MCA	Université de Mostaganem
Rapporteur :	DRIOUCH Aouatef	Pr	Université de Mostaganem
Co-rapporteur :	MEZOUAGH Amina	MCA	Université de Mostaganem
Co-rapporteur :	MOHAMED SEGHIR Zahira	MCB	

Année Universitaire 2025/2026

Sommaire

I. Introduction Générale.....	1
Chapitre 1.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Généralités sur les plastiques.....	4
I.2.1. Définition des plastiques.....	4
I.2.2. Classification des plastiques.....	5
I.2.3. Types de plastiques utilisés.....	7
I.2.4. Propriétés des plastiques.....	9
I.3 Pollution et gestion des déchets plastiques.....	10
I.3.1 Les impacts environnementaux des déchets plastiques.....	10
I.3.2 Les méthodes de valorisation des déchets plastiques.....	12
I.4. Valorisation des plastiques dans les matériaux routiers.....	14
I.4.1. Les enrobés bitumineux.....	15
I.4.1.1. Définition d'un enrobé bitumineux.....	15
I.4.1.2. Composition des enrobés bitumineux.....	15
I.4.1.3. Classification des enrobés bitumineux.....	15
I.4.1.4. Propriétés recherchées des enrobés bitumineux.....	16
I.4.2. Techniques d'incorporation du plastique : voie sèche et voie humide.....	17
I.4.2.1 La voie sèche (Dry process).....	17
Mécanisme d'action :	17
Avantage :	17
Limite :	17
I.4.2.2 La voie humide (Wet process).....	17
Mécanisme d'action :	18
Avantage :	18
Limite :	18
I.4.3. Comparaison entre les deux méthodes.....	18
I.4.4. Paramètres influençant l'efficacité.....	19
I.4.5. Influence des plastiques sur les performances des enrobés.....	19
I.4.5.1. Amélioration des performances mécaniques.....	19
1. Résistance à l'orniérage.....	19

2. Résistance à la fatigue	19
I.4.5.2. Comportement thermique et durabilité	19
1. Sensibilité à la température	19
2. Durabilité et vieillissement	20
I.4.6. Interaction bitume–granulat	20
I.4.7. Limites et effets défavorables	20
I.5. Travaux antérieurs et comparaison des résultats	20
Chapitre 2	22
II.1. Introduction	23
II.2. Matériaux utilisés	23
II.2.1. Bitume	23
II.2.1.1. Essai réalisé sur le bitume	23
II.2.2. Granulats	26
II.2.2.1. Analyse Granulométrique [NF P 18-560]	27
II.2.2.2. Coefficient d'aplatissement [NFP 18-561]	28
II.2.2.3. Essai d'Equivalent De Sable a 10% de fines [NFP 18-597]	29
II.2.2.4. Essai los-Angeles [NFEN1097-2]	30
II.2.2.5. Essai Micro-Deval [NF P 18-572]	32
II.2.2.6. Masse volumique absolue des agrégats [NA255/1990]	33
II.2.2.7. Essais de propreté superficielle	34
II.2.3. Déchets plastiques	35
II.2.3.1. Collecte des déchets plastiques	35
II.2.3.2. Lavage des déchets plastiques	36
II.2.3.3. Broyage du plastique	37
II.2.3.4. Séchage du plastique broyé	37
II.2.3.5. Problème des étiquettes plastiques résiduelles	38
II.2.3.6. Lavage et séchage du plastique traite	40
II.3. Préparation des enrobé bitumeux	41
II.3.1. Méthodologie expérimentale	41
II.3.2. Paramètres expérimentaux étudiés	41
II.3.3. Fabrication des éprouvettes	41
II.4. Essais réalisés	45
II.4.1. Essai Marshall	45

II.4.2. Masse volumique apparente	46
II.4.3. Teneur en vides (air voids)	47
Chapitre 3.....	48
III.1. Introduction	49
III.2. Les résultats des essais sur le bitume	49
III.2.1. Essai de pénétrabilité aiguille [NFT 66-004]	49
III.2.2. Essai de point de ramollissement [NFT 66-008]	50
III.2.3. Essai de perte de masse au chauffage [NF EN 13303].....	50
III.3. Les résultats des essais sur les granulats.....	51
III.3.1. Analyse granulométrique par tamisage [NFP 18-560].....	51
III.3.2. Analyse de coefficient d'aplatissement [NFP 18-561(10/78)]	55
III.3.3. Essai d'équivalent de sable [NFP 18-597]	56
III.3.4. Essai Los-Angeles (LA) [NF-EN 1097-2].....	57
III.3.5. Essai Micro-Deval [NFP 18-572]	57
III.3.6. Essai de la masse volumique absolue [NA255/1990]	58
III.3.7. Essai de propreté superficiel [NFP 18-591]	58
III.4. Etude de formulation de l'enrobé.....	59
III.4.1. Essai Marshall.....	60
III.4.2. Essai de la masse volumique apparente	70
III.4.3. Essai teneur en vides (air voids) :	75
III.4.4. Détermination des conditions optimales	77
III.4.5. Impact environnemental	78
III.4.6. Impact économique	79
III.5. Conclusion	80

Liste des figures

Figure III. 1: Courbes de vérification de la conformité des classes granulaires par analyse granulométrique	53
---	----

Figure III. 2: Graphe du mélange.....	60
Figure III. 3: Variation de la stabilité en fonction du taux de PET à 165°C et 170°C	67
Figure III. 4: Variation du fluage en fonction de pourcentage de PET à 165°C et 170 °C	69
Figure III. 5: Masse volumique apparente en fonction de pourcentage de PET à 165°C et 170 °C	74
Figure III. 6: Teneur en vide en fonction de pourcentage de PET a 165 °C et 170 °C	76

Liste des tableaux

Tableau I 1 : Comparaison entre voie sèche et voie humide	18
Tableau III. 1: Résultats d'essai de pénétrabilité aiguille	49
Tableau III. 2 : Point de ramollissement de bitume	50
Tableau III. 3 : Perte de masse de bitume	50
Tableau III. 4 : Analyse granulométrique par tamisage d'échantillon de sable 0/3	51
Tableau III. 5 : Analyse granulométrique par tamisage d'échantillon de sable 3/8	51
Tableau III. 6 : Analyse granulométrique par tamisage d'échantillon de sable 8/15	52
Tableau III. 7 : Coefficient d'aplatissement gravier 3/8	55
Tableau III. 8: Coefficient d'aplatissement gravier 8/15	55
Tableau III. 9: Exécution des mesures d'ES	56
Tableau III. 10: Résultats d'essai Los-Angeles	57
Tableau III. 11: Résultat d'essai Micro-Deval	57
Tableau III. 12: Les résultats du calcul de la masse volumique absolue.....	58
Tableau III. 13: résultats du calcul de la propriété superficielle.....	58
Tableau III. 14: mélange granulaire	59
Tableau III. 15: Résultats d'essai Marshall d'enrobé de référence 0% de PET à T=165 °C..	61
Tableau III. 16: Résultats d'essai Marshall d'enrobé de référence 0% de PET à T=170 °C	61
Tableau III. 17: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 2% de PET à T = 165°C.....	61
Tableau III. 18: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 2% de PET à T = 170°C.....	62
Tableau III. 19: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 4% de PET à T = 165°C.....	63
Tableau III. 20: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 4% de PET à T = 170°C.....	64
Tableau III. 21: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 6% de PET à T = 165°C.....	65
Tableau III. 22: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 6% de PET à T = 170°C.....	66
Tableau III. 23: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de référence à T=165°C.....	70
Tableau III. 24: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de référence à T=170°C.....	70
Tableau III. 25: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 2% de PET à T=165°C.....	71
Tableau III. 26: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 2 % de PET à T=170°C.....	71

Tableau III. 27: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 4 % de PET à T=165°C.....	72
Tableau III. 28: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 4 % de PET à T=170°C.....	72
Tableau III. 29: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 6 % de PET à T=165°C.....	72
Tableau III. 30: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 6 % de PET à T=170°C.....	73
Tableau III. 31: Résultats des caractéristiques volumétriques des mélanges bitumineux modifiant pour différentes températures	75
Tableau III. 32: Les conditions optimales retenues	77
Tableau III. 33: Estimation de la quantité de déchets plastiques valorisés.....	78

Liste des photos

Photo I. 1 : Matériaux plastiques	5
Photo I. 2 : Thermoplastique	6
Photo I. 3 : Thermodurcissable	6
Photo I. 4 : Elastomères	7
Photo I. 5 : Types de plastiques	9
Photo I. 6 : Pollution du plastique	12
Photo I. 7 : Valorisation du plastique	13
Photo I. 8 : compactage d'un enrobe bitumineux incorporant des déchets plastiques	15
Photo II 1 : 1Essai de pénétrabilité aiguille	24
Photo II 2 : Essai de point de ramollissement	25
Photo II 3 : Essai de perte de masse au chauffage	26
Photo II 4 : Equipement d'essai d'analyse granulométriques.....	27
Photo II 5 : Essai de coefficient d'aplatissement.....	29
Photo II 6 : Essai d'équivalent de sable	30
Photo II 7 : Essai los-Angeles.....	31
Photo II 8 : Essai de Micro-Deval	32
Photo II 9 : Essai de masse volumique des agrégats	34
Photo II 10 : Collecte des déchets plastiques	36
Photo II 11 : Lavage des déchets plastiques	36
Photo II 12 : Broyage du plastique	37
Photo II 13 : Séchage du plastique broyé	38
Photo II 14 : Résidus d'étiquettes observés après le broyage des déchets plastiques	39
Photo II 15 : Trempage du plastique broyé dans une solution d'eau salée pour le retrait des étiquettes	39

Photo II 16 : Lavage du plastique traite	40
Photo II 17 : Séchage du plastique recyclé	40
Photo II 18 : Préparation des agrégats pour la fabrication du mélange.....	42
Photo II 19 : Etuve des agrégats et de bitume	43
Photo II 20 : Mesure des agrégats et de bitume.....	43
Photo II 21 : Introduction de PET et malaxage	44
Photo II 22 : Versement du mélange dans les éprouvettes.....	44
Photo II 23 : Compactage avec la presse Marshall et démoulage	45
Photo II 24 / Préparation des éprouvettes au bain-marie, essai de stabilité Marshall et mesure du fluage.....	46

Photo III. 1: Éprouvettes d'enrobé contenant 2 % de PET à T = 165 °C après rupture lors de l'essai Marshall	62
Photo III. 2: Éprouvettes d'enrobe contenant 2 % de PET à T=170 °C après rupture lors de l'essai Marshall	63
Photo III. 3: Éprouvettes d'enrobe contenant 4 % de PET à T=165 °C après rupture lors de l'essai Marshall	64
Photo III. 4: Éprouvettes d'enrobe contenant 4 % de PET à T=170 °C après rupture lors de l'essai Marshall	65
Photo III. 5: Éprouvettes d'enrobe contenant 6 % de PET à T=165 °C après rupture lors de l'essai Marshall	66

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Allah le Tout-Puissant qui m'a donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce projet.

Mes sincères remerciements s'adressent également à Mr **SLIMANI Mohamed**, Directeur des Travaux Publics de Mostaganem, ainsi qu'à Mr **SEKKAK Abdelrazzak**, Chef du service du développement des infrastructures routières à la Direction des Travaux

Publics de la wilaya de Mostaganem, pour leur accueil, leur soutien et les moyens mis à ma disposition durant cette étude.

J'exprime ma profonde reconnaissance à Mr **KACEM Mohamed El Habib**, Chef du Département contrôle qualité du Laboratoire ((LTPO), à Mr **Belala Hamid**, Chef de Service du Laboratoire des Travaux Publics d'Oran, ainsi qu'à Mr **Larbi BOUHADEF**, Ingénieur au sein du même laboratoire, pour leur aide précieuse, leurs orientations techniques, leur disponibilité et leur accompagnement tout au long des travaux expérimentaux.

Je tiens tout particulièrement à remercier mon encadrante, Pr **Aouatef Driouch**, Professeure à l'université de Mostaganem, pour son accompagnement, sa disponibilité, ses précieux conseils ainsi que pour la confiance qu'elle m'a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens aussi remercier mes deux co-encadrantes Dr **MEZOUAGH Amina**, Maître de conférences A à l'université de Mostaganem et Dr **MOHAMED SEGHIR Zahira**, Maître de conférences B à l'université de Mostaganem pour leurs conseils et leur accompagnement tout au long de ce travail

Je remercie également l'ensemble du personnel du Laboratoire des Travaux Publics d'Oran pour leur collaboration, leur professionnalisme et leur bienveillance.

Mes remerciements vont également aux honorables membres du jury, Dr **FEDDAL Imane**, Maître de conférences A à l'Université de Mostaganem, qui a accepté de présider ce jury et d'évaluer ce travail, ainsi qu'à Dr **OUADJENIA Fatima**, Maître de conférences A à l'Université de Mostaganem, qui a accepté d'examiner et de juger ce travail.

J'adresse ma gratitude à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation académique et universitaire. Grâce à leurs enseignements, leurs conseils et leur dévouement, j'ai pu acquérir les connaissances nécessaires à l'accomplissement de ce parcours.

Enfin, je remercie sincèrement tous mes amis ainsi que toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

À toutes celles et à tous ceux qui m'ont soutenue et accompagnée au cours de cette aventure académique, j'adresse mes plus sincères remerciements.

Dédicace

Je dédie ce travail à ma famille, en particulier à mes chers parents.

À ma mère, pour son amour inconditionnel, ses sacrifices, ses encouragements constants et ses prières qui m'ont accompagnée tout au long de mon parcours.

À mon père, pour son soutien, sa confiance en moi et les efforts qu'il a consentis afin de me permettre d'atteindre mes objectifs.

Que ce travail soit pour eux le témoignage de ma profonde gratitude et de mon immense affection.

Je dédie aussi mon travail à mes frères pour leur présence, leur soutien moral et leurs encouragements tout au long de mes études.

Une pensée toute particulière est adressée à ma meilleure amie Abir, dont les encouragements, l'écoute, le soutien et la présence dans les moments difficiles ont été d'une valeur inestimable. Son amitié sincère et sa confiance en moi m'ont donné la motivation nécessaire pour avancer et persévérer jusqu'à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

La gestion des déchets plastiques représente aujourd'hui un enjeu environnemental majeur. Parmi ces déchets, le polyéthylène téréphtalate (PET), largement utilisé dans la fabrication des bouteilles et emballages, constitue une source importante de pollution en raison de sa faible biodégradabilité. Dans ce contexte, ce travail porte sur la valorisation du PET recyclé dans les enrobés bitumineux destinés à la construction routière.

L'étude a consisté à caractériser les matériaux utilisés, notamment les granulats, le bitume et le PET recyclé, à travers différents essais normalisés. Après vérification de leur conformité aux spécifications techniques, plusieurs formulations ont été élaborées afin d'évaluer l'influence de l'incorporation du PET sur les propriétés des enrobés bitumineux.

Les résultats obtenus montrent que l'intégration du PET recyclé constitue une solution innovante permettant de valoriser les déchets plastiques tout en contribuant à l'amélioration de certaines caractéristiques des enrobés. Cette approche offre une alternative durable pour réduire l'impact environnemental des déchets plastiques et promouvoir l'économie circulaire dans le secteur routier.

Mots-clés : PET recyclé, déchets plastiques, enrobés bitumineux, recyclage, valorisation des déchets, développement durable, construction routière.

المخلص

المستخدم على نطاق واسع، (PET) تُعد إدارة النفايات البلاستيكية من أبرز التحديات البيئية في الوقت الحاضر. ويُعتبر بولي إيثيلين تيرفثالات في صناعة القوارير ومواد التغليف، من أهم مصادر التلوث البيئي بسبب بطء تحلله الطبيعي. في هذا السياق، يهدف هذا العمل إلى تأمين نفايات المعاد تدويرها من خلال إدماجها في الخلطات البيتومينية المستخدمة في مجال إنشاء الطرق PET. المعاد تدويره، وذلك من خلال مجموعة من الاختبارات PET شملت الدراسة توصيف المواد المستعملة، والمتمثلة في الركام والبيتومين و المعاد تدويره، PET المعيارية للتحقق من مطابقتها للمواصفات التقنية المطلوبة. بعد ذلك، تم إعداد عدة خلطات بيتومينية تحتوي على نسب من المعاد تدويره، بهدف دراسة تأثير إضافته على خصائص وأداء هذه الخلطات. المعاد تدويره في الخلطات البيتومينية يُعد حلاً واعداً لتأمين النفايات البلاستيكية، كما يساهم في PET أظهرت النتائج المتحصل عليها أن إدماج تحسين بعض خصائص الخلطات، مما يجعله خياراً مستداماً للحد من التلوث البيئي ودعم مبادئ الاقتصاد الدائري في قطاع إنشاء الطرق. المعاد تدويره، النفايات البلاستيكية، الخلطات البيتومينية، إعادة التدوير، تأمين النفايات، التنمية المستدامة، إنشاء PET الكلمات المفتاحية: الطرق.

Abstract

Plastic waste management has become a major environmental challenge worldwide. Among these wastes, polyethylene terephthalate (PET), widely used in the manufacture of bottles and packaging, represents a significant source of pollution due to its low biodegradability. In this context, the present study focuses on the valorization of recycled PET in bituminous mixtures used for road construction.

The study involved the characterization of the materials used, including aggregates, bitumen, and recycled PET, through various standardized tests. After verifying their compliance with technical specifications, several mixture formulations were prepared to evaluate the effect of PET incorporation on the properties of bituminous mixtures.

The obtained results indicate that the incorporation of recycled PET is a promising solution for plastic waste valorization while contributing to the improvement of certain characteristics of bituminous mixtures. This approach provides a sustainable alternative for reducing the environmental impact of plastic waste and promoting the principles of the circular economy in the road construction sector.

Keywords: Recycled PET, plastic waste, bituminous mixtures, recycling, waste valorization, sustainable development, road construction

I. Introduction Générale

Ces dernières années, les déchets plastiques sont devenus un véritable problème en Algérie. On les retrouve un peu partout : dans les rues, dans les oueds et même sur les plages. Cette situation s'explique par une consommation importante de produits plastiques, surtout ceux à usage unique, ainsi que par des difficultés liées à leur gestion et à leur recyclage. Selon plusieurs rapports nationaux, les déchets plastiques représentent une part non négligeable des déchets ménagers, ce qui contribue à leur accumulation dans l'environnement.

À l'échelle mondiale, la production de plastique ne cesse également d'augmenter. Plusieurs centaines de millions de tonnes de plastiques sont produites chaque année, dont une grande partie n'est pas recyclée. Cette situation entraîne des impacts importants sur les sols, les ressources en eau et les écosystèmes marins).

En parallèle, le secteur des travaux publics en Algérie connaît un développement important, notamment dans le domaine des infrastructures routières. Cependant, on constate que certaines chaussées se dégradent rapidement sous l'effet des conditions climatiques et de l'intensité du trafic. Cela montre qu'il est nécessaire de rechercher des solutions permettant d'améliorer la qualité et la durabilité des matériaux utilisés.

Dans ce contexte, la valorisation des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux apparaît comme une solution intéressante[1]. Elle permettrait non seulement de réduire la quantité de déchets plastiques dans l'environnement, mais aussi d'améliorer certaines propriétés des enrobés, notamment leur résistance et leur durabilité.

Cependant, cette approche dépend de plusieurs paramètres, tels que le type de plastique utilisé, la proportion incorporée ainsi que les conditions de préparation. Cela nous amène à poser la problématique suivante :

Dans quelle mesure l'incorporation des déchets plastiques peut-elle améliorer les performances des enrobés bitumineux tout en contribuant à la réduction de la pollution en Algérie ?

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'ajout des déchets plastiques sur les propriétés des enrobés bitumineux. Plus précisément, il s'agit d'analyser l'influence de certains paramètres, de déterminer les conditions les plus adaptées et d'évaluer les performances du mélange obtenu.

Nous supposons que l'incorporation de déchets plastiques peut améliorer la résistance des enrobés, augmenter leur durée de vie et réduire certains problèmes tels que les fissures et les déformations.

Enfin, ce mémoire est structuré en plusieurs chapitres.

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les déchets plastiques et leur valorisation dans les matériaux routiers. Il expose également les caractéristiques des enrobés bitumineux ainsi que les différentes méthodes d'incorporation des plastiques.

Le deuxième chapitre présente les différents matériaux utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée pour la réalisation des enrobés bitumineux modifiés par des déchets plastiques.

Le chapitre trois de ce travail est consacré à la présentation et à l'analyse des résultats expérimentaux obtenus sur les différents matériaux et formulations étudiés. Ils regroupent les résultats des essais réalisés sur les granulats, le bitume, le PET recyclé ainsi que sur les enrobés bitumineux modifiés, permettant ainsi d'évaluer l'influence de l'incorporation du PET sur les performances des enrobés.

Le quatrième chapitre est dédié à la présentation du projet startup « PETume ». Il décrit les différents aspects liés à la création du projet, notamment le Business Model Canvas (BMC), l'étude du Business Plan (PB), l'identité visuelle à travers le logo, ainsi que les principaux éléments organisationnels, techniques et économiques nécessaires à la mise en œuvre du projet.

Chapitre 1

Etat de l'art

I.1. Introduction

Dans ce chapitre, une revue de la littérature est présentée afin de dresser un état des connaissances actuelles sur la valorisation des déchets plastiques dans les enrobés routiers. Après avoir défini les différents types de déchets plastiques et mis en évidence les enjeux environnementaux liés à leur gestion, les principales techniques de recyclage et de valorisation seront examinées. Les caractéristiques des enrobés bitumineux ainsi que les différentes méthodes d'incorporation des plastiques, notamment par voie sèche et par voie humide, seront ensuite décrites. Enfin, les effets de ces matériaux sur les performances des enrobés, les résultats des études antérieures et les principales limites identifiées dans la littérature seront analysés afin de mettre en évidence la problématique et de justifier les objectifs du présent travail.

I.2. Généralités sur les plastiques

I.2.1. Définition des plastiques

Les plastiques sont des matériaux appartenant à la famille des polymères (photo I.1), c'est-à-dire des substances constituées de longues chaînes de molécules appelées macromolécules. Ils sont principalement issus de la transformation de ressources pétrolières ou gazières, bien que certaines alternatives biosourcées commencent à apparaître.

Ces matériaux sont devenus incontournables dans la vie quotidienne en raison de leurs nombreux avantages[2]. Ils sont légers, faciles à transformer, résistants et généralement peu coûteux. Grâce à ces caractéristiques, ils sont utilisés dans plusieurs secteurs tels que l'emballage, le bâtiment, l'automobile ou encore les travaux publics.



Photo I. 1 : Matériaux plastiques

I.2.2. Classification des plastiques

Les plastiques peuvent être classés selon leur comportement thermique en trois grandes catégories :

♦ Les thermoplastiques

Un thermoplastique est un polymère qui ramollit ou fond lorsqu'il est chauffé et qui retrouve sa rigidité en refroidissant, sans subir de modification chimique permanente. Ce processus est réversible et peut être répété plusieurs fois.

Parmi les thermoplastiques les plus courants, on trouve :

- Le polyéthylène (PE)
- Le polypropylène (PP)
- Le polyéthylène téréphtalate (PET)

La photo I.2 illustre des bouteilles en polyéthylène téréphtalate (PET), l'un des thermoplastiques les plus utilisés pour l'emballage des boissons grâce à sa transparence, sa légèreté et sa recyclabilité



Photo I. 2 : Thermoplastique

♦ Les thermodurcissables

Les thermodurcissables ne peuvent pas être refondus après leur mise en forme (photo I.3). Ils subissent une transformation chimique irréversible lors de leur fabrication.



Photo I. 3 : Thermodurcissable

♦ Les élastomères

Ce sont des polymères caractérisés par leur grande élasticité et leur capacité à reprendre leur forme initiale après déformation (photo I.4). Grâce à leur structure moléculaire souple et faiblement réticulée, les élastomères présentent une excellente flexibilité ainsi qu'une bonne résistance aux chocs, aux vibrations et à l'usure.

Parmi les élastomères les plus utilisés, on trouve :

- Le caoutchouc naturel (NR)
- Le styrène-butadiène (SBR)
- L'éthylène-propylène-diène monomère (EPDM)
- Le nitrile-butadiène (NBR)
- Le silicone



Photo I. 4 : Elastomères

I.2.3. Types de plastiques utilisés

Les principaux types de plastiques utilisés sont le polyéthylène téréphtalate (PET), le polyéthylène (PEHD et PEBD), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC) et le polystyrène (PS) (photo I.5). Chacun possède des propriétés spécifiques qui le rendent adapté à différentes applications, telles que les emballages, les bouteilles, les canalisations ou les produits industriels. Parmi eux, le PET est largement utilisé pour les bouteilles et constitue un matériau facilement recyclable.

♦ Le polyéthylène (PE)

Le polyéthylène est l'un des plastiques les plus utilisés au monde. Il existe sous plusieurs formes, notamment le PE basse densité (PEBD) et le PE haute densité (PEHD).

Le PEBD est souple et utilisé dans les sacs plastiques et les films d'emballage, tandis que le PEHD est plus rigide et utilisé dans les bouteilles et les conteneurs.

♦ Le polypropylène (PP)

Le polypropylène est un plastique rigide et résistant à la chaleur. Il est utilisé dans les emballages alimentaires, les pièces automobiles et divers objets du quotidien. Il présente une bonne résistance mécanique et une température de fusion relativement élevée.

♦ **Le polyéthylène téréphtalate (PET)**

Le PET est principalement utilisé dans la fabrication des bouteilles d'eau et des fibres textiles photo (5). Il se caractérise par une bonne résistance mécanique et une certaine rigidité.

♦ **Le polychlorure de vinyle (PVC)**

Le polychlorure de vinyle (PVC) est un plastique largement utilisé dans les secteurs de la construction et de l'industrie. Il est employé pour la fabrication des canalisations, des fenêtres, des revêtements de sol et des gaines électriques.

Il se distingue par sa grande résistance aux produits chimiques, sa durabilité et ses bonnes propriétés d'isolation, ce qui en fait un matériau adapté à de nombreuses applications.

♦ **Le polystyrène (PS)**

Le polystyrène (PS) est un plastique léger et rigide utilisé dans les emballages, les gobelets jetables, les boîtiers de produits électroniques et les matériaux d'isolation sous forme expansée.

Il présente une bonne aptitude au moulage et une faible densité, mais il est relativement fragile et sensible aux chocs, ce qui limite certaines de ses applications.

 PET	  	BOITEILLES D'EAU ET DE BOISSONS, EMBALLAGES ALIMENTAIRES , RÉCIPIENTS PLASTIQUES (PAQUETS DE BISCUITS, SAUCES ETC.)
 HDPE	  	BOITEILLES DE LAIT, SACS DE CONGÉLATION, RÉCIPIENTS POUR GLACES, BOUTEILLES DE JUS FRUITS, BOUTEILLES DE SHAMPOING, DE PRODUITS CHIMIQUES ET DE DÉTERGENTS
 PVC	 	RÉCIPIENTS POUR PRODUITS COSMÉTIQUES, FILMS ÉTIRABLES A USAGE DOMESTIQUE
 LDPE	 	BOUTEILLES SOUPLES, FILMS ÉTIRABLES, FILMS RÉTRACTABLES, SACS-POUBELLE
 PP	 	PLATS POUR MICRO-ONDES, SACS DE CHIPS, TUBES DE SAUCES
 PS	 	BOÎTES DE CD, Gobelets des distributeurs d'eau, couverts en plastique, verres en plastique « imitation cristal »
 EPS	  	Gobelets en polystyrène expansé pour boissons chaudes, coques pour restauration rapide, plateaux en mousse pour viande pré-emballée, protection pour objets fragiles
 OTHERS	 	BOUTEILLES POUR FONTAINES, FILMS SOUPLES, EMBALLAGES MULTI-MATÉRIAUX

Photo I. 5 : Types de plastiques

I.2.4. Propriétés des plastiques

Les plastiques possèdent plusieurs propriétés qui expliquent leur intérêt dans les matériaux routiers.

- **Propriétés physiques**

Les plastiques sont généralement légers et présentent une faible densité. Cela permet de réduire le poids des matériaux dans lesquels ils sont incorporés.

- **Propriétés thermiques**

Les thermoplastiques se ramollissent sous l'effet de la chaleur, ce qui facilite leur intégration dans les matériaux. Leur comportement dépend de leur température de fusion.

- **Propriétés mécaniques**

Certains plastiques présentent une bonne résistance à la traction et aux chocs. Ils peuvent améliorer la résistance globale des matériaux lorsqu'ils sont bien incorporés.

- **Propriétés chimiques**

Les plastiques sont généralement résistants à l'eau et à plusieurs agents chimiques. Cette propriété est importante dans plusieurs domaines, car elle permet de limiter les effets de l'humidité.

- **Propriétés environnementales**

Bien que les plastiques présentent une grande stabilité chimique et une longue durée de vie, leur faible biodégradabilité constitue une limite majeure. Ils persistent longtemps dans l'environnement, ce qui rend nécessaire leur valorisation et leur recyclage.

I.3 Pollution et gestion des déchets plastiques

I.3.1 Les impacts environnementaux des déchets plastiques

Les déchets plastiques constituent aujourd'hui l'un des problèmes environnementaux les plus complexes[3]. Contrairement à d'autres types de déchets, ils ne disparaissent pas rapidement dans la nature. Leur dégradation peut prendre des dizaines, voire des centaines d'années, ce qui entraîne leur accumulation progressive dans tous les milieux, constituant ainsi une forme de pollution persistante. À ce titre, cette pollution représente aujourd'hui un enjeu environnemental global touchant l'ensemble des compartiments de l'environnement. Elle engendre également des conséquences économiques et sociales importantes, notamment en raison des coûts liés à la gestion des déchets, à la dégradation des paysages et aux pertes dans des secteurs tels que le tourisme et la pêche.

1. Impact des plastiques sur les sols

Au niveau des sols, la présence de plastiques modifie leur fonctionnement de manière durable. Lorsqu'ils s'accumulent en surface ou en profondeur, ils peuvent réduire la porosité du sol, limiter l'infiltration de l'eau et perturber les échanges gazeux. Cela a un impact direct sur l'activité biologique du sol, notamment sur les micro-organismes qui jouent un rôle essentiel dans sa fertilité.

Par ailleurs, certains plastiques contiennent des additifs chimiques (plastifiants, stabilisants, colorants) susceptibles d'être libérés dans le sol, entraînant une contamination chimique pouvant atteindre les nappes phréatiques.

2. Impact sur les milieux aquatiques

Dans les milieux aquatiques, les déchets plastiques représentent une menace majeure. Leur transport est facilité par les eaux de ruissellement, ce qui explique leur présence dans les oueds, les rivières et les mers. Une fois introduits dans ces milieux, ils persistent et affectent les organismes vivants.

3. Effets sur la faune et la biodiversité

Les impacts sur la faune sont multiples. Certains animaux ingèrent les plastiques en les confondant avec de la nourriture, ce qui peut entraîner des troubles graves. D'autres espèces peuvent être piégées dans ces déchets, limitant leurs mouvements et compromettant leur survie. Ces phénomènes contribuent à la diminution des populations animales et à la perturbation des écosystèmes.

4. Formation et impact des microplastiques

Un aspect particulièrement préoccupant est la formation de microplastiques et de nanoplastiques. Sous l'effet des rayonnements UV, de la chaleur et des contraintes mécaniques, les plastiques se fragmentent en particules très fines capables de pénétrer dans les organismes vivants et de s'accumuler dans les tissus.

Ces particules peuvent également adsorber et transporter des substances toxiques, augmentant ainsi leur dangerosité.

5. Impact sur la santé humaine

Les microplastiques ont été détectés dans divers milieux, notamment dans l'eau potable et certains aliments. Cela suggère que leur impact dépasse le cadre environnemental et pourrait affecter la santé humaine, bien que les effets à long terme restent encore à préciser.

6. Pollution atmosphérique liée aux plastiques

La pollution de l'air constitue un autre aspect souvent négligé. La combustion à l'air libre des déchets plastiques libère des gaz toxiques et des composés nocifs, contribuant à la dégradation de la qualité de l'air et à des effets néfastes sur la santé, notamment respiratoire.

7. Plastiques comme vecteurs de pollution

Les plastiques peuvent agir comme vecteurs de pollution en adsorbant des contaminants tels que les métaux lourds et d'autres substances chimiques (photo I.6). Ils peuvent ensuite transporter ces polluants sur de longues distances et les relarguer dans d'autres environnements.



Photo I. 6 : Pollution du plastique

I.3.2 Les méthodes de valorisation des déchets plastiques

Face à la croissance continue des déchets plastiques, leur valorisation constitue aujourd'hui un enjeu majeur dans la gestion durable des ressources[4]. Elle s'inscrit dans une démarche visant non seulement à réduire l'impact environnemental des plastiques, mais aussi à leur conférer une seconde vie sous forme de matières ou d'énergie[5] (photo I.7).

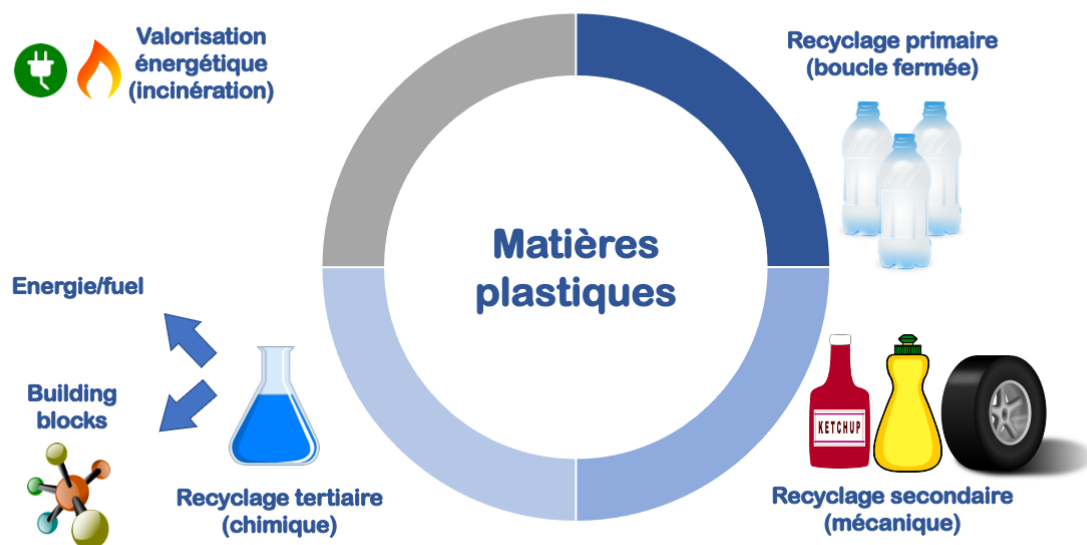


Photo I. 7 : Valorisation du plastique

Dans ce cadre, les stratégies de valorisation peuvent être classées en trois grandes catégories : la valorisation matière, la valorisation chimique et la valorisation énergétique.

1. La valorisation mécanique

Repose sur la transformation physique des déchets plastiques. Elle comprend les étapes de collecte, tri, lavage, broyage puis refusion pour la production de nouveaux matériaux. Cette filière est la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de son coût relativement faible. Toutefois, elle reste fortement dépendante de la qualité du tri, et les propriétés des polymères peuvent se dégrader après plusieurs cycles de recyclage, limitant ainsi leur durabilité.

2. La valorisation chimique

Elle consiste à décomposer les polymères en molécules de base par des procédés thermochimiques ou chimiques tels que la pyrolyse ou la dépolymérisation. Les produits obtenus peuvent ensuite être réutilisés pour la synthèse de nouveaux plastiques de qualité équivalente à ceux issus de ressources vierges. Cette approche est particulièrement adaptée

aux déchets complexes ou fortement contaminés, mais son développement reste limité par des coûts élevés et des exigences technologiques importantes.

3. La valorisation énergétique

Elle repose sur l'utilisation des déchets plastiques comme source d'énergie via leur combustion contrôlée. Elle permet une réduction significative du volume des déchets et la production d'énergie thermique ou électrique. Cependant, elle nécessite un contrôle strict des émissions, afin de limiter les impacts environnementaux liés aux polluants générés lors de l'incinération.

I.4. Valorisation des plastiques dans les matériaux routiers

La valorisation des déchets plastiques dans les matériaux routiers (photo I.8) consiste à intégrer les plastiques recyclés dans les enrobés bitumineux afin de les transformer en une ressource utile plutôt qu'en déchets[6]. Les plastiques peuvent être incorporés directement au bitume ou mélangés aux granulats à haute température (150 à 180 °C), où ils fondent et se répartissent dans le mélange. Ils agissent alors comme modificateurs du liant, améliorant la résistance aux déformations, la rigidité, la durabilité et l'adhérence entre le bitume et les granulats, tout en renforçant la stabilité thermique des chaussées. Cette approche présente un double intérêt : environnemental, en réduisant la quantité de déchets plastiques, et technique, en améliorant les performances des infrastructures routières[7]. Toutefois, son efficacité dépend du type de plastique utilisé, de la taille des particules, de la proportion incorporée et des conditions de mise en œuvre, dont la maîtrise est essentielle pour obtenir un matériau performant et durable.



Photo I. 8 : compactage d'un enrobe bitumineux incorporant des déchets plastiques

I.4.1. Les enrobés bitumineux

I.4.1.1. Définition d'un enrobé bitumineux

Un enrobé bitumineux est un matériau composite utilisé dans la construction routière, constitué d'un mélange de granulats et d'un liant hydrocarboné, généralement le bitume. Ce matériau est fabriqué en centrale d'enrobage puis mis en œuvre à chaud, à tiède ou à froid sur les chaussées. Il constitue la couche principale des revêtements routiers en raison de ses bonnes performances mécaniques et de sa durabilité.

I.4.1.2. Composition des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux sont constitués principalement de trois éléments :

- **Les granulats** : ils représentent la phase minérale principale (sable, gravillons, graviers). Ils assurent la structure et la résistance mécanique de l'enrobé.
- **Le liant bitumineux** : c'est le bitume issu du pétrole. Il agit comme un liant assurant la cohésion entre les granulats et l'imperméabilité du mélange.
- **Le filler** : ce sont des particules très fines (poussières minérales, ciment, chaux) qui remplissent les vides entre les granulats et améliorent la stabilité de l'enrobé.

I.4.1.3. Classification des enrobes bitumineux

Les " Enrobés bitumineux" sont classés en plusieurs type, selon leur composition et leur utilisation.

1. Béton bitumineux (BB)

Le béton bitumineux (BB) est un mélange à granularité continue se composant de gravillons, de sable, de filler, de liant bitumineux et d'additifs éventuels. Les classes granulaires des bétons bitumineux sont les suivantes : BB 0/8, BB 0/12, BB 0/14.

- Ce type de matériau est bien adapté aux couches de surface des chaussées à forts trafics en raison des bonnes caractéristiques mécaniques. Il est aussi utilisé pour les chaussées neuves en renforcement.
- Selon le type, il convient pour la couche de roulement ou la couche de liaison des routes, des autoroutes et des aéroports. Il est fabriqué, mis en œuvre et compacté à chaud.

2. Grave bitumineux (GB)

La grave-bitume (GB) est un mélange à granularité continue 0/20 se composant de granulats, de sable de filler, de liant bitumineux et d'additifs éventuels. Elle est appropriée pour couche de base de routes, autoroutes et aéroports. Elle est fabriquée, mise en œuvre et compactée à chaud et assure la portance de la chaussée et la répartition des charges du trafic transmis par les couches de surface. Elle sert aussi à établir le profil souhaité de la chaussée respectivement comme couche de reprofilage. La technique des graves bitumes est destinée à la réalisation des assises de chaussée (couche de base et couche de fondation).

3. Sable bitume (SB)

Le sable-bitume est un mélange constitué de sables naturels ou concassés et de bitume pur, auquel on ajoute généralement des fines minérales issues du concassage (filler calcaire, fines de carrière) ou des additions industrielles telles que la chaux ou le ciment. Le bitume utilisé est généralement de grade dur (40/50 ou 20/30), afin d'améliorer la rigidité et la stabilité mécanique du matériau.

Le sable-bitume est principalement utilisé en couche de base ou de fondation des chaussées. Il peut également jouer un rôle de couche de protection limitant la propagation des fissures vers les couches supérieures.

I.4.1.4. Propriétés recherchées des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux doivent répondre à plusieurs exigences essentielles :

1. **Rigidité** : capacité à supporter les charges de trafic sans déformation excessive.

2. **Durabilité** : résistance au vieillissement, aux cycles de température et à l'usure due au trafic.
3. **Résistance à l'eau** : aptitude à limiter la pénétration de l'eau afin d'éviter le désenrobage et la dégradation prématurée de la chaussée.

I.4.2. Techniques d'incorporation du plastique : voie sèche et voie humide

L'intégration des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux[8] peut se faire selon deux approches principales : la voie sèche et la voie humide. Ces deux techniques reposent sur des principes différents, mais elles poursuivent le même objectif : améliorer les performances des enrobés tout en valorisant les déchets plastiques.

I.4.2.1 La voie sèche (Dry process)

La voie sèche consiste à incorporer des déchets plastiques broyés directement aux granulats chauffés (165–170 °C) avant l'ajout du bitume. Le plastique fond et forme un film autour des granulats, améliorant leur hydrophobicité et réduisant le phénomène de désenrobage (stripping). Ensuite, le bitume est ajouté pour obtenir le mélange final.

Mécanisme d'action :

- Formation d'un film plastique autour des granulats ;
- Amélioration de l'adhésion bitume–granulats ;
- Réduction de la pénétration de l'eau.

Avantage :

- Procédé simple et compatible avec les installations existantes ;
- Coût relativement faible ;
- Amélioration de la résistance à l'eau ;
- Valorisation directe des déchets plastiques.

Limite :

- Dispersion parfois non homogène du plastique ;
- Sensibilité à la taille des particules ;
- Contrôle limité des propriétés finales.

I.4.2.2 La voie humide (Wet process)

La voie humide consiste à incorporer les plastiques directement dans le bitume chauffé (160–180 °C) sous agitation, afin de produire un bitume modifié avant mélange avec les granulats. Selon le type de plastique, il peut y avoir dissolution partielle, gonflement ou formation d'une structure interne qui modifie les propriétés du liant.

Mécanisme d'action :

- Augmentation de la viscosité du bitume ;
- Amélioration de la rigidité à haute température ;
- Meilleure résistance aux déformations permanentes (orniérage).

Cette modification permet d'améliorer le comportement du bitume face aux contraintes mécaniques et aux variations de température.

Avantage :

- Excellente homogénéité du mélange ;
- Amélioration significative des propriétés mécaniques ;
- Meilleure résistance aux hautes températures ;
- Durabilité accrue.

Limite :

- Nécessité d'équipements spécifiques ;
- Coût plus élevé ;
- Sensibilité aux conditions de température ;
- Compatibilité variable selon le type de plastique.

I.4.3. Comparaison entre les deux méthodes

Les deux méthodes ont chacune leurs avantages (Tableau I.1): la voie sèche est simple, économique et adaptée à une valorisation rapide des plastiques, tandis que la voie humide permet un meilleur contrôle des propriétés du bitume mais nécessite des équipements plus complexes. Le choix dépend donc des objectifs de l'étude et des moyens disponibles.

Tableau I 1 : Comparaison entre voie sèche et voie humide

Critère	Voie sèche	Voie humide
Ajout plastique	Dans malaxeur	Dans bitume
Modification centrale	Faible	Elevée
Homogénéité	Moyenne	Excellente
Coût	Plus bas	Plus élevée
Contrôle qualité	Moyen	Très bon
Usage industriel	Plus simple	Plus performant

I.4.4. Paramètres influençant l'efficacité

L'efficacité de ces techniques dépend de plusieurs paramètres essentiels :

- Le type de plastique (PE, PP, PET, etc.) ;
- Le taux d'incorporation, qui doit être optimisé ;
- La température de mélange, qui doit assurer une bonne fusion sans dégradation ;
- Le temps de mélange, influençant l'homogénéité ;
- La taille des particules, qui affecte la dispersion.

Une mauvaise maîtrise de ces paramètres peut entraîner des défauts dans le mélange final.

I.4.5. Influence des plastiques sur les performances des enrobés

L'incorporation de déchets plastiques dans les enrobés bitumineux entraîne des modifications significatives des propriétés mécaniques et fonctionnelles du matériau[9]. Ces effets dépendent principalement de la nature du polymère utilisé, du taux d'incorporation ainsi que du procédé de fabrication mis en œuvre.

I.4.5.1. Amélioration des performances mécaniques

1. Résistance à l'orniérage

L'un des effets les plus fréquemment rapportés dans la littérature est l'amélioration de la résistance à l'orniérage. L'ajout de plastiques augmente la rigidité du mélange et limite les déformations permanentes sous charges répétées, notamment à haute température. Cette amélioration est généralement attribuée à l'augmentation de la viscosité du liant et à une meilleure stabilité structurelle de l'enrobé modifié.

2. Résistance à la fatigue

Concernant la résistance à la fatigue, plusieurs études indiquent une tendance globalement positive[10]. L'introduction de plastiques tels que le polyéthylène ou le PET peut améliorer la durée de vie en fatigue grâce à une meilleure capacité de dissipation de l'énergie et à une réduction de la propagation des fissures. Toutefois, ces performances restent fortement dépendantes du dosage optimal en polymère.

I.4.5.2. Comportement thermique et durabilité

1. Sensibilité à la température

La présence de plastiques améliore généralement le comportement des enrobés à haute température, en augmentant leur résistance au ramollissement. Cependant, un dosage excessif

peut entraîner une rigidification du mélange et une augmentation de la fragilité à basse température, favorisant l'apparition de fissures thermiques.

2. Durabilité et vieillissement

Les enrobés modifiés présentent en général une meilleure résistance à l'oxydation et au vieillissement. Cette amélioration est liée à une structure plus stable du matériau et à une réduction de sa sensibilité aux agents environnementaux, ce qui contribue à prolonger la durée de service des chaussées.

I.4.6. Interaction bitume–granulat

L'ajout de plastiques peut également améliorer l'adhésion entre le bitume et les granulats, en particulier dans le cas de la voie sèche. La formation d'un film polymère autour des granulats limite la pénétration de l'eau et réduit le phénomène de désenrobage ce qui améliore la résistance à l'humidité.

I.4.7. Limites et effets défavorables

Malgré ces avantages, certains effets négatifs peuvent être observés. Une teneur élevée en plastiques peut entraîner une diminution de la ductilité du mélange, une augmentation excessive de la rigidité ainsi que des problèmes d'homogénéité, notamment dans le cas de la voie humide mal maîtrisée. Par ailleurs, des phénomènes de séparation de phases entre le bitume et le polymère ont été rapportés dans certaines conditions de formulation.

I.5. Travaux antérieurs et comparaison des résultats

De nombreuses recherches ont été menées ces dernières années sur l'incorporation des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux [6], avec pour objectif d'évaluer leur impact sur les performances mécaniques et la durabilité des chaussées. Les résultats de ces études montrent globalement une amélioration des propriétés des enrobés, mais avec des variations importantes selon le type de plastique, la méthode d'incorporation et surtout le taux de substitution.

Plusieurs auteurs [11] ont mis en évidence une amélioration significative des performances mécaniques pour des teneurs faibles à modérées en plastiques [12]. En particulier, l'utilisation de déchets plastiques broyés (sacs plastiques, principalement polyéthylène) dans les enrobés améliore la résistance à l'orniérage. De même, l'ajout de PET (polyéthylène téréphtalate) améliore la rigidité et la stabilité des enrobés à chaud. Ces études

indiquent que des taux compris généralement entre 2 % et 10 % en masse permettent d'améliorer la résistance à l'orniérage, la rigidité et parfois la durabilité des enrobés.

Cependant, les résultats montrent également qu'au-delà d'un certain seuil critique, les performances peuvent se dégrader. Des travaux sur le polyéthylène haute densité (HDPE) montré qu'un excès de plastique entraîne une diminution de la ductilité et une perte de résistance à la fatigue. De plus, des problèmes de compatibilité et de séparation de phases dans les bitumes modifiés par des polymères plastiques lorsque les conditions de mélange ne sont pas optimisées.

La comparaison des études disponibles met en évidence une tendance générale commune : les performances des enrobés modifiés suivent une évolution optimale en fonction du dosage en plastique. Ainsi, une amélioration progressive est observée jusqu'à un point optimal, au-delà duquel les propriétés mécaniques commencent à se détériorer.

En conclusion, les travaux antérieurs confirment l'intérêt de la valorisation des déchets plastiques dans les enrobés bitumineux, tout en soulignant la nécessité de déterminer un dosage optimal afin d'équilibrer amélioration des performances et stabilité du matériau.

Chapitre 2

Matériels et méthodes

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les différents matériaux utilisés ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée pour la réalisation des enrobes bitumineux modifiés par des déchets plastiques. L'objectif est de décrire de manière claire les étapes de préparation, les paramètres étudiés et les essais réalisés afin d'évaluer les performances des mélanges.

II.2. Matériaux utilisés

II.2.1. Bitume

Dans cette étude, un bitume routier de pénétration 40/50 a été utilisé. Ce type de bitume est couramment employé dans les travaux routiers en raison de son bon compromis entre rigidité et flexibilité.

II.2.1.1. Essai réalisé sur le bitume

L'échantillon de bitume utilisé pour les besoins des études de formulations a été soumis aux essais suivants :

- Essais de pénétrabilité à 25°C
- Mesures du point de ramollissement (TBA)
- Mesures de la densité relative à 25°C

a. Essai de pénétrabilité aiguille [NFT 66 - 004]

La pénétrabilité du bitume représente la mesure de la pénétration (exprimée en dixièmes de millimètres) dans un échantillon de bitume, au bout d'un temps de 5 secondes, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100 g. C'est donc une mesure de la consistance du bitume. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C.

Mode opératoire

Le bitume est d'abord chauffé puis coulé dans un godet normalisé et laissé refroidir jusqu'à obtenir une surface plane. L'échantillon est ensuite placé dans un bain thermostatique à 25 °C pendant une durée suffisante pour atteindre l'équilibre thermique. Le godet est positionné sous le pénétromètre et l'aiguille est amenée au contact de la surface du bitume (photo II.1). Une charge totale de 100 g est appliquée et l'aiguille est libérée pendant 5 secondes. À l'issue de ce temps, la profondeur de pénétration est lue directement sur

l'appareil et exprimée en dixièmes de millimètre. L'essai est généralement répété à plusieurs endroits de l'échantillon afin de calculer la valeur moyenne.



Photo II 1 : 1Essai de pénétrabilité aiguille

b. Essai de point de ramollissement [NFT 66 – 008]

C'est la température à laquelle s'enfonce une bille à travers un anneau de bitume (photo II.2) dans des conditions définies de fabrication et d'essai. Par voie de conséquence, il s'agit de la température à laquelle le bitume étudié atteint un certain degré de ramollissement.

Mode opératoire

Le bitume est chauffé puis coulé dans deux anneaux métalliques et laissé refroidir afin d'obtenir des éprouvettes de surface plane. Les anneaux sont ensuite placés dans le dispositif d'essai et une bille d'acier est déposée au centre de chaque échantillon. L'ensemble est immergé dans un bain dont la température augmente progressivement à une vitesse de $5 \pm 0,5$ °C par minute. Sous l'effet de la chaleur, le bitume se ramollit et la bille s'enfonce jusqu'à atteindre une plaque située 25 mm en dessous des anneaux. La température enregistrée au moment où chaque bille touche cette plaque correspond au point de ramollissement.



Photo II 2 : Essai de point de ramollissement

c. Essai de perte de masse au chauffage [NF EN 13303] :

L'essai de perte de masse au chauffage a pour objectif de déterminer la variation de masse d'un liant bitumineux après son exposition à une température élevée pendant une durée déterminée. Il permet d'évaluer la volatilisation des composants légers et le vieillissement à court terme du bitume sous l'effet de la chaleur.

Mode opératoire

Une quantité déterminée de bitume est d'abord pesée avec précision dans une coupelle métallique propre et sèche afin d'obtenir sa masse initiale. La coupelle contenant l'échantillon est ensuite placée dans une étuve ventilée (photo II.3) maintenue à une température de 163 ± 1 °C pendant une durée de 5 heures. À l'issue du chauffage, la coupelle est retirée de l'étuve et laissée à refroidir à température ambiante avant d'être pesée de nouveau pour déterminer la masse finale de l'échantillon. La perte de masse est ensuite calculée en pourcentage à partir de la différence entre la masse initiale et la masse finale, ce qui permet d'évaluer la volatilisation des constituants légers et le vieillissement thermique à court terme du liant bitumineux. L'essai a été réalisé deux fois afin de valider la reproductibilité des résultats obtenus.



Photo II 3 : Essai de perte de masse au chauffage

La perte de masse au chauffage est donnée par l'équation II.1:

$$\text{perte de masse} = \frac{(m_i - m_f)}{m_i} \dots\dots\dots (II.1)$$

Avec :

m_i : masse initiale (g)

m_f : masse finale (g)

II.2.2. Granulats

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

- Sable de classe 0/3 de la carrière TELEMEN ;
- Gravier de classe 3/8 de la carrière TELEMEN ;
- Gravier de classe 8/15 de la carrière TELEMEN ;

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

- Analyse Granulométrique [NF P 18-560] ;
- Essais de Propreté [NFP 18-591] ;

- Equivalent de sable [NFP 18-597] ;
- Masse volumique absolue [NA255/1990] ;
- Mesures du coefficient d'Aplatissement [NFP 18-561(10/78)] ;
- Essais LOS ANGELOS [NF-EN 1097-2] ;
- Essai MICRO DEVAL [NFP 18-572].

II.2.2.1. Analyse Granulométrique [NF P 18-560]

Elle est déterminée par analyse granulométrique par tamisage, traduite par une courbe granulométrique (% de passants cumules en ordonnée, et les dimensions de tamis en abscisse a échelle logarithmique).

a. Echantillon de sable 0/3 :

Un échantillon de sable 0/3 de masse $M = 1000$ g a été prélevé. Cette masse a été choisie conformément à la condition : la masse entre 2000 et 5000 g

L'échantillon a été ensuite lavé sur un tamis de 0,063 mm (photo II.4) afin d'éliminer les particules fines. Après le lavage, le refus retenu sur le tamis a été récupéré puis placé dans une étuve maintenue à une température de 105 ± 5 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Une fois le séchage terminé, le refus sec a été pesé et une masse $M_s = 854,7$ g a été obtenue.



Photo II 4 : Equipement d'essai d'analyse granulométriques

b. Désignation du matériau 3/8

Un échantillon de matériau 3/8 d'une masse initiale de 2000 g a été pesé. L'échantillon a ensuite été lavé sur un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les fines particules. Le refus retenu sur le tamis a été séché à l'étuve à une température de 105 ± 5 °C jusqu'à l'obtention d'une

masse constante. Après séchage, la masse sèche du refus a été déterminée et une valeur de 1985,6 g a été obtenue. Enfin, l'échantillon séché a été soumis à l'opération de tamisage.

c. Désignation du matériau 8/15

Un échantillon de granulat de classe 8/15 a été prélevé et une masse initiale $M = 3000$ g a été pesée. L'échantillon a ensuite été lavé sur un tamis de 0,063 mm afin d'éliminer les particules fines. Après lavage, le refus retenu sur le tamis a été séché dans une étuve maintenue à 105 ± 5 °C jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Une fois le séchage terminé, la masse sèche du refus a été déterminée par pesée est égale à 2989.9g

II.2.2.2. Coefficient d'aplatissement [NFP 18-561]

Le coefficient d'aplatissement est déterminé selon la norme NF P 18-561. L'échantillon de granulats est d'abord séché à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante, puis refroidi à température ambiante. Il est ensuite tamisé sur une série de tamis à mailles carrées afin d'obtenir différentes classes granulaires d/D (photo II.5). Chaque fraction est pesée pour déterminer sa masse initiale. Par la suite, chaque classe est soumise à un tamisage sur des grilles à fentes parallèles normalisées, dont l'écartement est adapté à la dimension des granulats. Les éléments passant à travers ces fentes sont considérés comme des grains plats ou allongés. Pour chaque fraction, la masse totale et la masse des éléments plats sont déterminées, puis le coefficient d'aplatissement est calculé en rapportant la masse des éléments plats à la masse totale de la fraction. Le coefficient global de l'échantillon est ensuite obtenu par sommation pondérée des différentes classes granulaires, ce qui permet de quantifier la proportion de granulats plats et d'évaluer leur influence sur les performances mécaniques des matériaux routiers.

Plus les gravillons sont plats, moins leur mise en place dans la route ou dans les bétons est facile et plus ils sont fragiles. Il est donc important de contrôler le coefficient d'aplatissement des granulats. Ce coefficient d'aplatissement est calculé par l'équation II.2.

$$A = \frac{M_e}{M_g} \times 100 \dots\dots\dots (II.2)$$

A : coefficient d'aplatissement

Me : masse des granulats aplatis

Mg : masse totale des granulats soumis à l'essai



Photo II 5 : Essai de coefficient d'aplatissement

II.2.2.3. Essai d'Equivalent De Sable a 10% de fines [NFP 18-597]

L'essai d'équivalent de sable à 10 % de fines (ES) permet de mesurer la propreté d'un sable. Il est réalisé sur la fraction d'un granulat passant au tamis à mailles carrées de 0,063 mm dont la teneur en fines a été ramenée à 10 % à l'aide d'un sable correcteur lorsque cette teneur est supérieure à 11 %. Cet essai rend compte de la qualité globale des éléments fins en exprimant un rapport volumétrique conventionnel entre les éléments sableux qui sédimentent et les particules fines argileuses qui restent en suspension sous forme de floculat. La valeur de l'équivalent de sable à 10 % de fines (ES) est égale au rapport, multiplié par 100, entre la hauteur de la partie sableuse sédimentée et la hauteur totale constituée de la partie sableuse sédimentée et du floculat.

Mode opératoire :

L'échantillon est tout d'abord tamisé sous l'eau sur un tamis de 2 mm. Le refus obtenu est ensuite séché à l'étuve jusqu'à atteindre une teneur en eau comprise entre 1 % et 3 %. Une masse d'environ 1500 g est alors prélevée. À partir de ce matériau, quatre échantillons sont préparés. La masse sèche du premier échantillon M_s est déterminée. Le deuxième échantillon de masse $M_{h2} = 375$ g, est tamisé sous l'eau sur un tamis de 0,063 mm. Le refus retenu sur ce tamis est ensuite séché à l'étuve puis pesé. Une masse $m_s = 309$ g est ainsi obtenue ce qui permet de calculer la teneur en fines de l'échantillon.

À partir de cette teneur en fines, la masse sèche de sable correcteur nécessaire est déterminée. Lorsque la teneur en fines est supérieure à 11 %, une correction est appliquée afin de ramener cette teneur à 10 %. La masse M_{h3} de l'échantillon destiné à l'essai d'équivalent de sable est alors calculée. La quantité de sable correcteur précédemment déterminée est ajoutée à l'échantillon de manière à obtenir une masse totale de 120 g.

L'essai d'équivalent de sable est ensuite réalisé sur deux éprouvettes conformément à la norme NF P 18-597 (photo II.6). Après décantation, la hauteur de la colonne de sable visible h_1 ainsi que la hauteur totale mesurée à l'aide du piston h_2 sont relevées. La valeur de l'équivalent de sable est finalement calculée pour chaque éprouvette à l'aide de l'équation II.3 suivante :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100 \dots\dots\dots(II.3)$$

ES : équivalent de sable

h_1 : sable propre + élément fine (floculant).

h_2 : sable propre seulement.

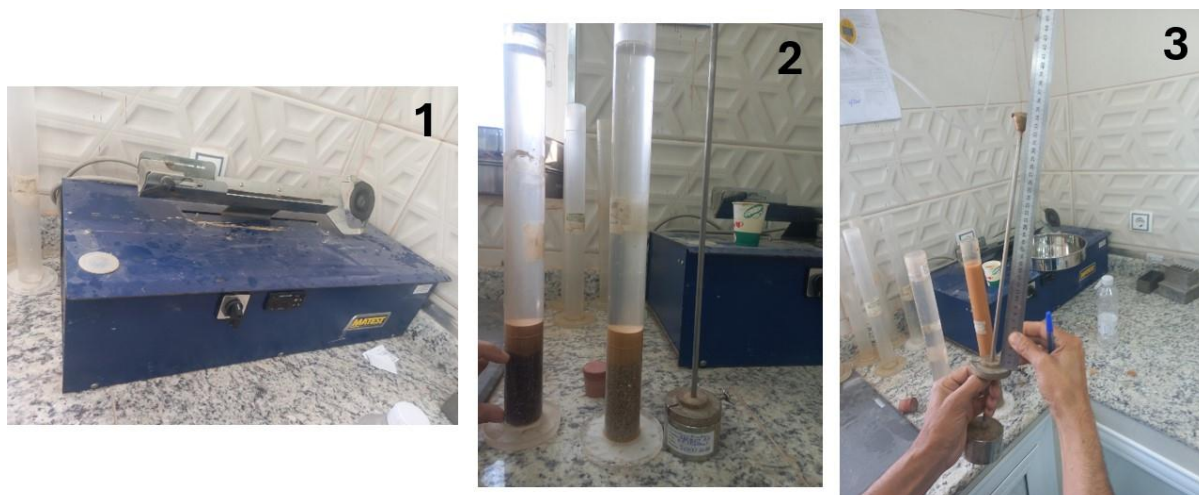


Photo II 6 : Essai d'équivalent de sable

II.2.2.4. Essai los-Angeles [NFEN1097-2]

L'essai Los-Angeles est destiné à évaluer la résistance des granulats à la fragmentation et aux chocs. Pour tester la dureté d'un matériau, on le soumet à une épreuve de chocs dans un tambour.

Mode opératoire :

L'échantillon a été préalablement lavé puis séché à l'étuve à une température de 105 °C jusqu'à obtention d'une masse constante. Deux classes granulaires ont été retenues, à savoir la classe [10–14] et la classe [4–5,6]. Une masse de 5000 g de granulats (M) a ensuite été pesée et introduite dans le tambour de la machine Los Angeles (photo II.7). L'essai a été réalisé avec 11 boulets d'acier pour la classe [10–14], et avec 7 boulets d'acier pour la classe [4–5,6], la masse totale des boulets étant de 4840 g. Le tambour a été mis en rotation pendant 500 tours à une vitesse comprise entre 30 et 33 tr/min. À l'issue de l'essai, le matériau a été récupéré puis tamisé sur un tamis de 1,6 mm. Le refus recueilli sur ce tamis a été soigneusement lavé afin d'éliminer les particules fines, puis séché à l'étuve à 105 °C. Après refroidissement, le refus a été pesé et une masse finale $m = 3894,7$ g a été obtenue. Le coefficient Los Angeles a ensuite été calculé à partir de la masse initiale et de la masse finale du refus.

Le coefficient Los Angeles (LA) correspond au pourcentage de matériau détruit pendant l'essai déterminé par l'équation II.4.

$$LA = \frac{(M-m)}{M} \cdot 100 \dots\dots\dots(II.4)$$

où :

M: masse initiale de l'échantillon (g),

m: masse des granulats retenus sur le tamis de 1,6 mm après l'essai (g).

Le résultat est exprimé en pourcentage (%).



Photo II 7 : Essai los-Angeles

II.2.2.5. Essai Micro-Deval [NF P 18-572]

Cet essai permet de déterminer l'usure d'une chaussée sous l'effet de frottements (pneus des véhicules). L'essai consiste à introduire des granulats dans le cylindre de la machine MDE (photo II.8), avec de l'eau et des billes de taille normalisée équivalente à celle des gravillons. Lors de la rotation du cylindre, les gravillons frottent sur les billes. La masse des éléments inférieurs à 1,6 mm à la fin de l'essai donne la résistance à l'usure du granulat. Plus le résultat est faible, plus le granulat est résistant à l'usure.



Photo II 8 : Essai de Micro-Deval

Mode opératoire :

L'échantillon a été lavé puis séché à l'étuve à une température de 105 °C jusqu'à masse constante. La classe granulaire choisie a été fixée à [10-14] mm. Une prise d'essai de 500 g de granulats a ensuite été pesée. Une charge abrasive de 5000 ± 5 g a également été pesée. L'essai a été réalisé en présence d'eau (essai MDE), en ajoutant 2,5 L d'eau dans la jarre. L'ensemble constitué de l'échantillon, de la charge abrasive et de l'eau a été introduit dans le cylindre d'essai. La vitesse de rotation a été réglée à 100 tours/minute, puis le cylindre a été maintenu en rotation pendant 2 heures. À l'issue de cette période le matériau a été récupéré et tamisé sur le tamis de 1,6 mm. Le refus obtenu a ensuite été séché à l'étuve à 105 °C, puis pesé avec précision. La masse du refus après usure a été mesurée à $m' = 412,50$ g, puis ont calcul le Micro-Deval

Le coefficient Micro-Deval est calculé par l'équation II.5:

$$MDE = 100 \times \frac{M-m}{M} \dots\dots\dots(II.5)$$

où :

M: masse initiale des granulats (g) ;

m: masse du refus des granulats retenus sur le tamis de 1,6 mm après l'essai (g).

Le résultat est exprimé en pourcentage (%).

II.2.2.6. Masse volumique absolue des agrégats [NA255/1990]

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

Mode opératoire :

Les matériaux de classes granulaires 0/3, 3/8 et 8/15 ont été soumis à l'essai de détermination de la masse volumique absolue par la méthode du pycnomètre (Photo II.9). Pour chaque essai, un échantillon de 500 g a été prélevé conformément aux exigences de la méthode. Le pycnomètre vide a tout d'abord été pesé, donnant une masse P1 = 539,0 g, puis rempli d'eau jusqu'au repère afin de déterminer P2 = 1540,0 g. L'échantillon a ensuite été introduit dans le pycnomètre vide et l'ensemble a été pesé, conduisant à une masse P3 = 1039,0 g. Après ajout d'eau jusqu'au repère, une dernière pesée a été effectuée pour obtenir la masse P4, spécifique à chaque matériau.

Les valeurs de P4 mesurées sont de 1676,3 g pour le granulat 0/3, 1850,2 g pour le granulat 3/8 et 1848,2 g pour le granulat 8/15. À partir de ces différentes pesées, la masse volumique absolue a été calculée selon la relation normalisée du pycnomètre (équation II.6).

$$P_{abs} = \frac{(p3-p1)}{(p2-P1)-(p4-p3)} \dots\dots\dots(II.6)$$



Photo II 9 : Essai de masse volumique des agrégats

II.2.2.7. Essais de propreté superficielle

Les granulats de classes 3/8 et 8/15 ont été soumis à l'essai de propreté superficielle afin d'évaluer la quantité de particules fines adhérant à leur surface. Dans les deux cas, les échantillons ont d'abord été tamisés sur un tamis de 2 mm afin d'éliminer les éléments les plus fins, puis une prise d'essai de masse comprise entre 200D et 300D a été constituée. Deux échantillons ont ensuite été préparés pour chaque classe granulaire : 1000 g pour le matériau 3/8 et 1500 g pour le matériau 8/15.

Le premier échantillon a été séché à l'étuve à une température de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ jusqu'à l'obtention d'une masse constante. Les masses sèches obtenues sont de $M_{1s} = 992,9 \text{ g}$ pour le granulat 3/8 et de $M_{1s} = 1498,7 \text{ g}$ pour le granulat 8/15, correspondant également aux masses sèches des échantillons soumis à l'essai (M_s). Chaque échantillon a ensuite été lavé sous l'eau sur un tamis de 0,5 mm afin d'éliminer les particules fines adhérentes. Le refus récupéré a été séché à l'étuve dans les mêmes conditions puis tamisé pendant 1 minute sur un tamis de 0,5 mm avant d'être pesé.

La propreté superficielle des deux granulats 3/8 et 8/15 ont été calculer en utilisant les équations II.7 , II.8 et II.9 :

$$P = \frac{m'}{M_s} \times 100 \dots\dots\dots (\text{II.7})$$

$$m = M_s - m' \dots\dots\dots (\text{II.8})$$

$$M_s = \left(\frac{M_{1s}}{M_{1h}} \right) \times M_{1h} \dots\dots\dots (\text{II.9})$$

P : la propreté superficielle

m' : masse du refus par tamisage 0,5 ou 1,6 mm en (g)

M_s : la masse sèche de l'échantillon en (g)

II.2.3. Déchets plastiques

Dans le cadre de cette étude, les déchets plastiques utilisés est le polyéthylène téréphtalate (PET), collecté principalement auprès d'un récupérateur de plastique (petite entreprise) de la daïra d'Ain Tedless situé à 20 Km de Mostaganem Ville.

- **Préparation des déchets plastiques**

Avant leur incorporation dans les enrobés, les déchets plastiques subissent plusieurs étapes de traitement :

- Tri pour éliminer les impuretés
- Lavage pour retirer les contaminants
- Séchage afin d'éviter toute humidité
- Broyage en particules de petite taille

II.2.3.1. Collecte des déchets plastiques

Cette première étape consiste à récupérer les déchets plastiques provenant des ménages (photo II.10), des industries ou des centres de tri. Les plastiques sont regroupés selon leur nature afin de faciliter leur recyclage et leur utilisation dans le mélange bitumineux. Cette étape est importante pour garantir une matière première disponible et réduire la pollution environnementale.



Photo II 10 : Collecte des déchets plastiques

II.2.3.2. Lavage des déchets plastiques

Après la collecte, les déchets plastiques sont lavés à l'eau afin d'éliminer les impuretés telles que la poussière, le sable, les huiles, les résidus organiques et les étiquettes (photo II.11). Un bon lavage améliore la qualité du plastique recyclé et évite les défauts lors du mélange avec le bitume.



Photo II 11 : Lavage des déchets plastiques

II.2.3.3. Broyage du plastique

Les plastiques propres sont introduits dans un broyeur mécanique. Cette machine réduit les déchets en petits morceaux ou en paillettes (photo II.12). Après le broyage, on obtient des particules plastiques de taille réduite et relativement uniforme. Ces granulés permettent une meilleure dispersion dans le mélange bitumineux et améliorent l'homogénéité du matériau final.



Photo II 12 : Broyage du plastique

II.2.3.4. Séchage du plastique broyé

Les particules plastiques sont ensuite séchées pour éliminer toute trace d'humidité (photo II.13). Cette étape est essentielle car la présence d'eau peut provoquer des défauts lors du chauffage et diminuer l'adhérence entre le plastique et le bitume.



Photo II 13 : Séchage du plastique broyé

II.2.3.5. Problème des étiquettes plastiques résiduelles

Après le broyage, il a été observé que les étiquettes plastiques n'avaient pas été retirées par l'entreprise avant la découpe. Bien que ces étiquettes soient également constituées de plastique, elles sont généralement fabriquées à partir d'un polymère de nature différente de celui de la bouteille ou de l'emballage principal. Cette différence de nature s'accompagne souvent d'une différence de densité, qui peut être exploitée pour faciliter leur séparation. Ainsi, les déchets broyés ont été immergés dans une solution d'eau salée (photo II.14) afin d'augmenter la densité du liquide. Dans ces conditions, les particules de plastique et les étiquettes ne présentent pas le même comportement de flottation : les étiquettes, ayant une densité différente, peuvent être plus facilement séparées du plastique principal (photo II.15). Par ailleurs, cette immersion contribue également à décoller progressivement les couches adhésives, améliorant ainsi l'efficacité de l'opération de tri et la qualité du matériau destiné au recyclage.



Photo II 14 : Résidus d'étiquettes observés après le broyage des déchets plastiques



Photo II 15 : Trempage du plastique broyé dans une solution d'eau salée pour le retrait des étiquettes

II.2.3.6. Lavage et séchage du plastique traite

Après le trempage, les étiquettes ramollies ont été retirées manuellement afin d'obtenir un matériau plastique plus propre et plus homogène. Le plastique ainsi débarrassé des étiquettes a ensuite été soigneusement lavé à l'eau pour éliminer les traces de sel, les résidus de colle ainsi que les autres impuretés (photo II.16). Il a ensuite été séché afin d'éliminer toute humidité résiduelle susceptible d'altérer la qualité du mélange bitumineux ou de provoquer des défauts lors du chauffage (photo II.17).



Photo II 16 : Lavage du plastique traite



Photo II 17 : Séchage du plastique recyclé

II.3. Préparation des enrobé bitumeux

II.3.1. Méthodologie expérimentale

Dans cette étude, la méthode d'incorporation adoptée est la voie sèche, en raison de sa simplicité et de son efficacité dans la valorisation des déchets plastiques.

Le procédé se déroule selon les étapes suivantes :

- Les granulats chauffés sont introduits dans le malaxeur.
- Les déchets plastiques sont ajoutés directement aux granulats chauds.
- Le mélange est maintenu pendant quelques minutes afin de permettre la fusion progressive du plastique et son enrobage autour des granulats.
- Le bitume chaud est ensuite incorporé au mélange.
- L'ensemble est malaxé jusqu'à obtention d'un enrobé homogène.

Cette méthode permet d'obtenir une bonne interaction entre les composants et une répartition relativement uniforme du plastique.

II.3.2. Paramètres expérimentaux étudiés

Afin d'analyser l'influence des conditions de fabrication les paramètres principaux ont été retenus :

- Le taux de déchets plastiques (%)

Les niveaux choisis sont les suivants :

Taux de plastique : 2%, 4% et 6%

- Température : 165°C et 170°C

La teneur en bitume a été déterminée au préalable (méthode Marshall) et maintenue constante pour l'ensemble des essais, afin d'isoler l'effet des déchets plastiques.

Ces paramètres ont été choisis en raison de leur impact direct sur la qualité du mélange et les performances des enrobés.

II.3.3. Fabrication des éprouvettes

Les mélanges obtenus ont été utilisés pour fabriquer des éprouvettes cylindriques à l'aide d'un moule standard. Le compactage a été réalisé selon la méthode Marshall, en appliquant un nombre déterminé de coups de marteau sur chaque face afin d'assurer une densité homogène et une bonne cohésion du matériau.

Après fabrication, les éprouvettes ont été laissées à température ambiante pendant une durée suffisante avant la réalisation des essais.

Mode opératoire :

Les granulats sont d'abord séchés dans une étuve à 105 °C, puis chaque classe granulaire est pesée avec une précision de 0,1 g (photo II.18). Les granulats, le bitume ainsi que les accessoires de malaxage et le moule de compactage sont ensuite préchauffés à 165 °C ou 170 °C (photo II.19). La quantité de bitume et celle des granulats nécessaires pour chaque mélange sont pesées (photo 28), de manière à obtenir une masse de 1 200 g par éprouvette, soit 3 600 g pour trois éprouvettes. Le PET est ensuite incorporé au bitume préchauffé, puis les granulats sont introduits dans le malaxeur préchauffé avant l'ajout du mélange bitume–PET. L'ensemble est malaxé rapidement jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène (photo II.20). Une fine couche d'huile est appliquée sur le moule afin d'éviter l'adhérence, puis le mélange est versé dans le moule (photo II.21). Le compactage est réalisé à l'aide d'une dame en appliquant 50 coups sur chaque face en 55 à 60 secondes, avec retournement immédiat du moule pour compacter la seconde face. Les éprouvettes sont ensuite démoulées à l'aide d'une presse (photo II.22 et II.23), laissées à refroidir à température ambiante pendant 24 heures, puis trois éprouvettes de même composition sont préparées pour chaque formulation étudiée.



Photo II 18 : Préparation des agrégats pour la fabrication du mélange



Photo II 19 : Etuve des agrégats et de bitume



Photo II 20 : Mesure des agrégats et de bitume



Photo II 21 : Introduction de PET et malaxage



Photo II 22 : Versement du mélange dans les éprouvettes



Photo II 23 : Compactage avec la presse Marshall et démoulage

II.4. Essais réalisés

Dans le cadre de cette étude, plusieurs essais ont été réalisés afin d'évaluer de manière complète le comportement des enrobés bitumineux modifiés par des déchets plastiques. Ces essais permettent d'analyser non seulement les propriétés mécaniques, mais également les caractéristiques physiques et la durabilité du matériau.

II.4.1. Essai Marshall

L'essai Marshall est utilisé pour évaluer la résistance mécanique des enrobés bitumineux. L'éprouvette cylindrique est placée dans une machine Marshall puis soumise à une charge de compression appliquée à vitesse constante jusqu'à rupture.

Deux paramètres principaux sont mesurés :

1. La stabilité Marshall (KN), correspondant à la charge maximale supportée par l'éprouvette avant rupture ;
2. Le fluage (mm), représentant la déformation de l'éprouvette au moment de la rupture.

Mode opératoire :

Des éprouvettes Marshall ont été préparées à partir d'un enrobé bitumineux de référence (sans ajout de plastique) ainsi que d'enrobés modifiés par incorporation de PET à des teneurs de 2 %, 4 % et 6 %. Afin d'étudier l'influence de la température de fabrication sur les performances mécaniques, les mélanges ont été élaborés à deux températures différentes : 165 °C et 170 °C.

Après leur confection, les éprouvettes ont été placées dans un bain-marie maintenu à 60 °C pendant une durée d'environ 30 à 40 minutes, conformément à la norme de l'essai

Marshall (photo II.24), afin d'assurer une température uniforme avant les essais mécaniques. Chaque éprouvette a ensuite été introduite dans la presse Marshall, où une charge a été appliquée progressivement jusqu'à la rupture. Les valeurs de stabilité Marshall (charge maximale supportée) et de fluage (déformation correspondante) ont été enregistrées pour chaque formulation.

Cet essai permet d'évaluer l'influence de l'incorporation du PET et de la température de fabrication sur la capacité des enrobés à résister aux sollicitations du trafic et aux déformations permanentes, tout en identifiant la formulation offrant les meilleures performances mécaniques.



Photo II 24 / Préparation des éprouvettes au bain-marie, essai de stabilité Marshall et mesure du fluage

II.4.2. Masse volumique apparente

La masse volumique apparente permet d'évaluer la compacité de l'enrobé. Elle est déterminée à partir de la masse de l'éprouvette dans l'air et dans l'eau.

Mode opératoire :

La détermination de la masse volumique apparente a été réalisée sur un enrobé de référence sans ajout de plastique ainsi que sur des enrobés modifiés par incorporation de PET à des teneurs de 2 %, 4 % et 6 %. Les différentes formulations ont été préparées à deux températures de fabrication, 165 °C et 170 °C, afin d'évaluer l'influence conjointe de la teneur en PET et de la température de préparation sur cette propriété. Pour chaque éprouvette, la masse sèche a d'abord été déterminée par pesée dans l'air, puis l'éprouvette a été immergée dans l'eau afin de mesurer sa masse immergée. Après immersion, elle a été

essuyée superficiellement et pesée de nouveau pour obtenir sa masse saturée sèche en surface. Les différentes valeurs obtenues ont ensuite été utilisées pour calculer la masse volumique apparente selon la méthode normalisée. Ce paramètre permet d'apprécier le degré de compacité de l'enrobé, une compacité élevée étant généralement associée à une meilleure résistance mécanique, une plus faible porosité et une durabilité accrue du matériau.

La masse volumique apparente est calculée par l'équation II.10 :

$$Mva = \frac{\text{poids sec}}{\text{poids sec} - \text{poids d'eau}} \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

Avec :

Mva : masse volumique apparente hydrostatique

Poids sec : masse sèche de l'éprouvette

Poids d'eau : masse immergée dans l'eau

Cette formule permet d'évaluer la capacité de l'enrobe

II.4.3. Teneur en vides (air voids)

La teneur en vides (V) représente le pourcentage du volume total d'un enrobé bitumineux occupé par les vides remplis d'air. Elle constitue un paramètre essentiel pour évaluer la compacité, la durabilité et les performances mécaniques des enrobés.

Le principe de la détermination de la teneur en vides consiste à comparer la masse volumique apparente de l'enrobé compacté à sa masse volumique maximale théorique, correspondant à un matériau totalement dépourvu de vides d'air. La différence entre ces deux masses volumiques permet de calculer le volume des espaces vides présents dans le mélange.

Il est calculé à partir :

- De la masse volumique apparente ;
- De la masse volumique théorique maximale.

Le pourcentage de vides est déterminé par l'équation (II.11).

$$V = \left[1 - \frac{Mva}{MVR} \right] \times 100 \dots\dots\dots(\text{II.11})$$

Et MVR est calculé par l'équation (II.12)

$$MVR = \frac{\text{poids ds grnults+bitum}}{\text{volum ds grnuls}} \dots\dots\dots(\text{II.12})$$

Avec :

V : pourcentage de vide %

MVR : masse volumique réelle (calculé)

Chapitre 3

Résultats et discussion

III.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus lors de l'étude de l'incorporation du polyéthylène téréphtalate (PET) recyclé dans les enrobés bitumineux. Les différents essais réalisés ont permis d'évaluer l'influence du taux de PET sur les propriétés mécaniques et volumétriques des mélanges. Les résultats sont analysés et comparés afin d'identifier les variations de comportement induites par l'ajout du PET. Une discussion approfondie est ensuite menée pour interpréter les observations expérimentales et mettre en évidence les mécanismes responsables des performances obtenues. Enfin, une phase d'optimisation est réalisée dans le but de déterminer le pourcentage de PET offrant le meilleur compromis entre les différents critères de performance étudiés.

III.2. Les résultats des essais sur le bitume

III.2.1. Essai de pénétrabilité aiguille [NFT 66-004]

Les résultats de pénétrabilité sont résumés dans le tableau III.1. Afin de garantir la reproductibilité et la fiabilité des résultats, l'essai est réalisé trois fois dans les mêmes conditions expérimentales et la valeur retenue correspond à la moyenne des trois mesures obtenues.

Tableau III. 1: Résultats d'essai de pénétrabilité aiguille

Essai	1	2	3
Valeur	49	48	47
Moyenne	48		
Spécification	40 à 50		

Les résultats de l'essai de pénétrabilité à l'aiguille (Tableau III.1) ont donné des valeurs de 49, 48 et 47 (1/10 mm) soit une moyenne de 48 (1/10 mm). Cette valeur se situe

dans la plage spécifiée par la norme NFT 66-004 (40 à 50) ce qui confirme la conformité du bitume utilisé. La faible dispersion entre les mesures traduit une bonne homogénéité du matériau et une bonne précision de l'essai. Le bitume présente ainsi une consistance adaptée à son utilisation dans la formulation des enrobés bitumineux.

III.2.2. Essai de point de ramollissement [NFT 66-008]

Les résultats résumés dans le tableau III.2. Afin de garantir la reproductibilité des résultats, l'essai est réalisé sur trois fois et la valeur retenue est la moyenne des trois températures.

Tableau III. 2 : Point de ramollissement de bitume

Essai	1	2	3
Valeur	52	52	52
Moyenne	52		
Spécification	47 à 60		

L'essai du point de ramollissement a donné des valeurs de 52 °C pour les trois déterminations réalisées, soit une moyenne de 52 °C. Cette valeur se situe dans la plage spécifiée par la norme (47 à 60 °C) ce qui confirme la conformité du bitume utilisé. L'absence de dispersion entre les résultats témoigne de la bonne homogénéité de l'échantillon et de la fiabilité de l'essai. Le bitume présente ainsi une bonne résistance au ramollissement sous l'effet de la température ce qui constitue un avantage pour son utilisation dans les enrobés bitumineux destinés aux chaussées.

III.2.3. Essai de perte de masse au chauffage [NF EN 13303]

Les résultats de perte de masse au chauffage sont résumés dans le tableau III.3. L'essai a été réalisé deux fois afin de valider la reproductibilité des résultats obtenus.

Tableau III. 3 : Perte de masse de bitume

Essai	1	2
Résultat	0,018	
Spécification	Inferieur a 0,5	

L'essai de perte de masse au chauffage a donné une valeur de 0,018 %, largement inférieure à la limite maximale de 0,5 % fixée par la norme NF EN 13303. Ce résultat confirme la bonne stabilité thermique du bitume utilisé et indique une faible teneur en composés volatils (tableau III.3). Le liant présente ainsi une bonne résistance au vieillissement à court terme lors des opérations de chauffage ce qui constitue un critère favorable pour son utilisation dans la formulation des enrobés bitumineux.

III.3. Les résultats des essais sur les granulats

III.3.1. Analyse granulométrique par tamisage [NFP 18-560]

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage des trois classes granulaires 0/3, 3/8 et 8/15 sont présentés respectivement dans les tableaux III.4, III.5 et III.6.

Tableau III. 4 : Analyse granulométrique par tamisage d'échantillon de sable 0/3

Ouverture des tamis en mm	Masse des refus cumules Ri en gr	Pourcentage des refus cumules $Ri/M \cdot 100$	Pourcentage des tamisas cumules $100 - Ri/M \cdot 100$
6.3	/	/	/
5	/	/	100%
2,5	119,3	11,93	89%
1,25	380,9	38,09	62%
0,63	577,0	57,7	43%
0,315	712,6	71,26	29%
0,16	798,3	79,83	21%
0,08	845,0	84,50	16%

Tableau III. 5 : Analyse granulométrique par tamisage d'échantillon de sable 3/8

Ouverture des tamis en mm	Masse des refus cumules Ri en gr	Pourcentage des refus cumules $Ri/M \cdot 100$	Pourcentage des tamisas cumules $100 - Ri/M \cdot 100$
10	/	/	100%
8	218	10,9	89%

6,3	628	31,4	69%
5	1222	61,1	39%
2,5	1982	99,1	1%
1,25	/	/	/
0,63	/	/	/
0,315	/	/	/
0,16	/	/	/
0,08	/	/	/

Tableau III. 6 : Analyse granulométrique par tamisage d'échantillon de sable 8/15

Ouverture des tamis en mm	Masse des refus cumules Ri en gr	Pourcentage des refus cumules $Ri/M \cdot 100$	Pourcentage des tamisas cumules $100 - Ri/M \cdot 100$
16	/	/	100%
12,5	1017,0	33,9	66%
10	2253,0	75,1	25
8	2985,0	99,5	1%
6,3	/	/	/

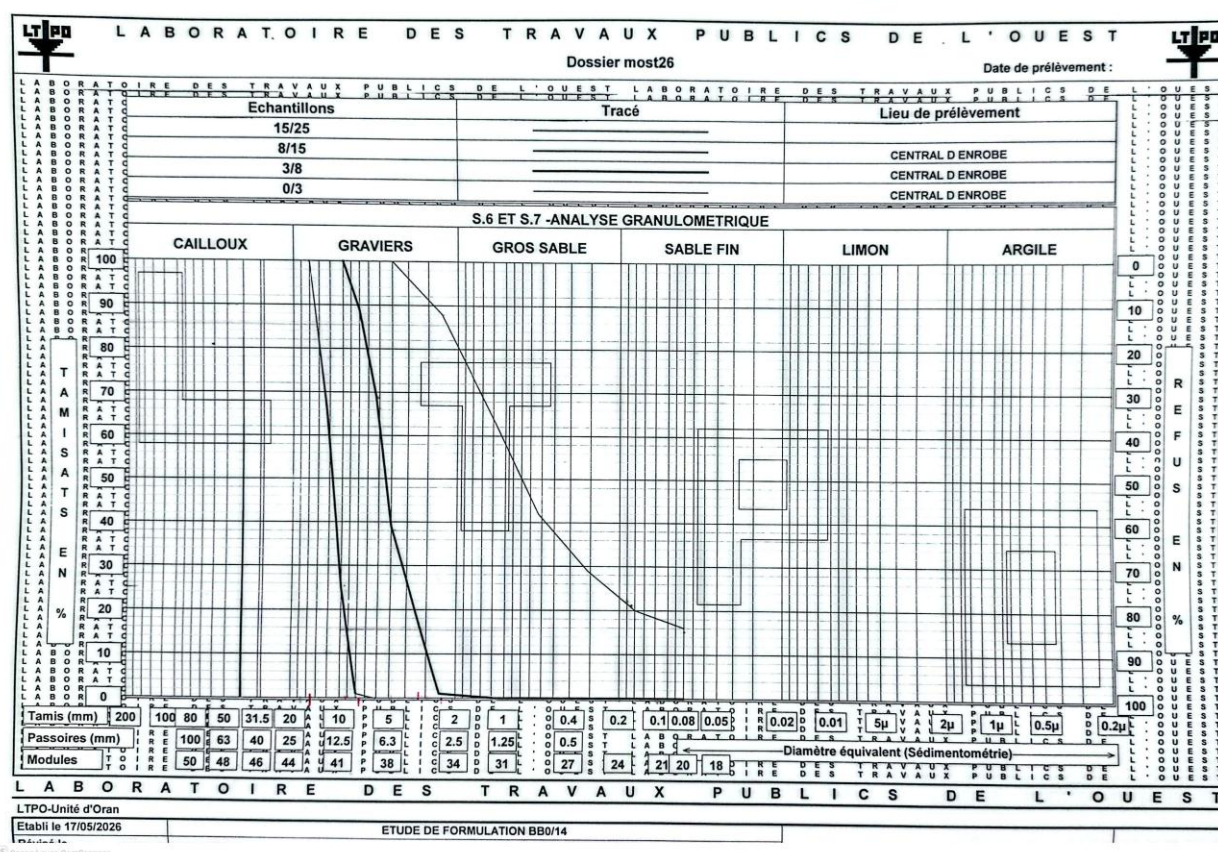


Figure III. 1: Courbes de vérification de la conformité des classes granulaires par analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée sur trois fractions de granulats destinées à une utilisation potentielle dans les enrobés bitumineux : sable 0/3, gravillon 3/8 et gravillon 8/15. L'objectif est de vérifier leur conformité par rapport à leur désignation granulométrique et leur aptitude à être utilisés dans une formulation routière.

1. Conformité du sable 0/3

L'échantillon 0/3 présente les caractéristiques suivantes :

- 100 % des particules passent à 5 mm ;
- 89 % passent à 2,5 mm ;
- 16 % passent à 0,08 mm.

Le matériau respecte la désignation 0/3, car la dimension maximale observée est inférieure à 5 mm, ce qui est cohérent avec un sable 0/3.

La granulométrie est continue, sans discontinuité marquée, ce qui est favorable pour les mélanges bitumineux. Le sable 0/3 est conforme sur le plan granulométrique, mais sa teneur en fines doit être surveillée selon les exigences de formulation.

2. Conformité du gravillon 3/8

Les résultats montrent :

- 100 % passant à 10 mm ;
- 89 % passant à 8 mm ;
- 1 % passant à 2,5 mm.

La granulométrie est serrée et homogène, ce qui est typique d'un gravillon destiné à la constitution du squelette granulaire.

Le gravillon 3/8 est conforme et adapté aux enrobés bitumineux, avec une très bonne qualité granulométrique.

3. Conformité du gravillon 8/15

Les résultats indiquent :

- 100 % passant à 16 mm ;
- 66 % passant à 12,5 mm ;
- 1 % passant à 8 mm.

Le matériau est conforme à la classe 8/15, car la majorité des grains est comprise entre 8 et 15 mm et la dimension maximale est inférieure à 16 mm.

Le gravillon 8/15 est conforme à sa classe granulométrique et adapté à une utilisation en couche de structure.

Les trois matériaux étudiés présentent une bonne conformité granulométrique et une complémentarité évidente pour la formulation d'enrobés bitumineux. Le sable 0/3 assure le rôle de remplissage et de compacité grâce à sa fraction fine, le gravillon 3/8 joue une fonction de transition et de stabilisation de la structure granulaire, tandis que le gravillon 8/15 constitue le squelette porteur garantissant la résistance mécanique du mélange. L'association de ces fractions permet ainsi d'obtenir une granulométrie bien graduée, favorable à la

réalisation d'enrobés présentant une bonne compacité, une stabilité durable et de bonnes performances mécaniques en service.

III.3.2. Analyse de coefficient d'aplatissement [NFP 18-561(10/78)]

Les résultats de l'essai du coefficient d'aplatissement des échantillons de gravier 3/8 et 8/15 sont présentés dans le tableau III.7 et III.8.

Tableau III. 7 : Coefficient d'aplatissement gravier 3/8

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles	
Classe granulaire	Mg	Ecartement des grilles	Passant Me
d/D	(grs)	S(mm)	(grs)
12,5-16	/	8	/
10-12,25	/	6,3	/
8-10	196	5	63
6,3-8	452	4	89
5-6,3	563	3,15	110
4-5	385	2,5	96
La somme	1596	La somme	358

Tableau III. 8: Coefficient d'aplatissement gravier 8/15

Tamisage sur tamis		Tamisage sur grilles	
Classe granulaire	Mg	Ecartement des grilles	Passant Me
d/D	(grs)	S(mm)	(grs)

20-25	/	12,5	/
16-20	/	10	/
12,5-16	1583	8	280
10-12,25	1092	6,3	178
8-10	299	5	54
6,3-8	/	4	/
La somme	2974	La somme	512

Les résultats de l'essai du coefficient d'aplatissement montrent des valeurs de 22,44 % pour le gravier 3/8 et 17,22 % pour le gravier 8/15. Ces valeurs sont inférieures à la limite maximale de 25 % prescrite pour les bétons bitumineux destinés à un trafic poids lourds moyen journalier annuel (PL.MJA) supérieur ou égal à 150. Les granulats étudiés sont donc conformes aux exigences spécifiées. Cette conformité traduit une faible proportion de grains aplatis, ce qui favorise un meilleur emboîtement des granulats, une bonne compacité du mélange et une meilleure résistance mécanique de l'enrobé.

III.3.3. Essai d'équivalent de sable [NFP 18-597]

Les résultats des essais d'équivalent de sable (ES) sont présentés dans le tableau III.9.

Tableau III. 9: Exécution des mesures d'ES

Tube	Hauteur	Hauteur h1	Hauteur h2	ES
N°	Totale	Sable visible	Piston	
1	43	11,80	34,10	75,42%
2	43	11,50	34,30	75,76%
Moyenne				76%

Les résultats obtenus lors de l'essai d'équivalent de sable montrent des valeurs de 75,42 % et 75,76 % pour les deux mesures réalisées, soit une valeur moyenne de 76 %. Cette valeur est supérieure au seuil de 75 % généralement requis pour qualifier un sable de bonne qualité. Elle indique que le matériau contient une faible proportion de particules fines argileuses ou limoneuses susceptibles de nuire à l'adhérence entre les granulats et le liant bitumineux. Ainsi, le sable analysé peut être considéré comme propre et apte à être utilisé dans la formulation des enrobés bitumineux. De plus, la faible différence entre les deux mesures témoigne d'une bonne reproductibilité de l'essai et confirme la fiabilité des résultats obtenus.

III.3.4. Essai Los-Angeles (LA) [NF-EN 1097-2]

Les résultats du calcul du pourcentage de LA sont reporté sur le tableau III.10.

Tableau III. 10: Résultats d'essai Los-Angeles

N° de l'échantillon	Nature de l'échantillon	Classe granulaire	Nombre de boulets	Masse sèche m' après essai	Coefficient LA %
1	3/8	[4-6,3]	7	3844,6	23,10
2	8/15	[10-14]	11	3894,7	22,10

Les coefficients de Los Angeles obtenus sont inférieurs à 25 %, ce qui correspond à la dureté des granulats de bonne qualité pouvant être utilisés dans les couches de chaussée et dans la fabrication des enrobés bitumineux soumis à un trafic important.

III.3.5. Essai Micro-Deval [NFP 18-572]

Les résultats du calcul du coefficient Micro-Deval [MDE] en présence d'eau sont résumés sur le tableau III.11.

Tableau III. 11: Résultat d'essai Micro-Deval

N° de l'échantillon	Nature de l'échantillon	Classe granulaire	Poids initial P du matériau	Poids P' après usure	MDE (%)
---------------------	-------------------------	-------------------	-----------------------------	----------------------	---------

1	Gravier 3/8	[4-6,3]	500	409,5	18,10
2	Gravier 8/15	[10-14]	500	412,5	17,5

Les valeurs de MDE pour les deux échantillons sont inférieures à 20 %, ce qui indique une bonne résistance à l'usure et au frottement en présence d'eau. Plus la valeur du coefficient MDE est faible, plus le granulat est résistant à l'abrasion.

Ainsi, les deux classes granulaires sont de bonne qualité, adaptées à la réalisation des couches de chaussée et à la fabrication des enrobés bitumineux destinés à supporter un trafic important.

III.3.6. Essai de la masse volumique absolue [NA255/1990]

Les résultats du calcul de la masse volumique absolue sont résumés sur le tableau III.12.

Tableau III. 12: Les résultats du calcul de la masse volumique absolue

Désignation	0/3	3/8	8/15
Pabs (g/cm ³)	2,682	2,634	2,606

Les résultats de l'essai de masse volumique absolue montrent des valeurs de 2,682 g/cm³, 2,634 g/cm³ et 2,606 g/cm³ respectivement pour les classes granulaires 0/3, 3/8 et 8/15. On observe une légère diminution de la masse volumique absolue avec l'augmentation de la taille des granulats. Cette variation reste toutefois faible, ce qui traduit une bonne homogénéité de la nature minéralogique des granulats utilisés. Elles indiquent des matériaux compacts et peu poreux, aptes à assurer de bonnes performances mécaniques du mélange.

III.3.7. Essai de propreté superficiel [NFP 18-591]

Les résultats du calcul de la de propreté superficiel (P%) sont résumés sur le tableau III.13.

Tableau III. 13: résultats du calcul de la propreté superficiel

Désignation	3/8	8/15
Ms (g)	992,9	1498,7
m (g)	14	8,3
P (%)	1,4	0,5

Les deux classes granulaires présentent des coefficients de propreté superficielle très faibles, inférieurs à 2 %, avec 1,4 % pour le granulat 3/8 et 0,55 % pour le granulat 8/15. Ces

résultats témoignent d'une faible teneur en particules fines adhérentes, traduisant une bonne qualité des granulats et une propreté satisfaisante pour leur utilisation dans les travaux routiers, notamment dans la formulation des enrobés bitumineux.

III.4. Etude de formulation de l'enrobé

Dans cette étude, nous avons formulé un enrobé bitumineux BB 0/14 conforme à la norme EN 13108-1, en utilisant les fractions granulaires 0/3, 3/8 et 8/15 afin d'obtenir une courbe granulométrique située à l'intérieur du fuseau spécifié

Tableau III. 14: mélange granulaire

Tamis (mm)	Gravier 8/15		Gravier 3/8		Sable 0/3		Mélange 100%	Fuseau min %	Fuseau max %
	100%	32%	100%	24%	100%	44%			
20	100	32	100	24	100	44	100	/	/
16	100	32	100	24	100	44	100	100	/
14	100	32	100	24	100	44	100	84	100
12.5	66	21,12	100	24	100	44	89,12	82	96
10	25	8,0	100	24	100	44	76,0	70	82
8	1	0,32	89	21,36	100	44	65,68	60	73
6,3	0	0	69	16,56	100	44	60,56	53	66
5	0	0	39	9,36	100	44	53,36	45	58
2,5	0	0	1	0,24	89	39,16	39,40	32	45
1,25	0	0	0	0	62	27,28	27,28	19	34
0,63	0	0	0	0	43	18,92	18,92	13	25
0,315	0	0	0	0	29	12,76	12,76	10	19
0,160	0	0	0	0	21	9,24	9,24	8	16
0.063	0	0	0	0	16	7,04	7,04	6	9

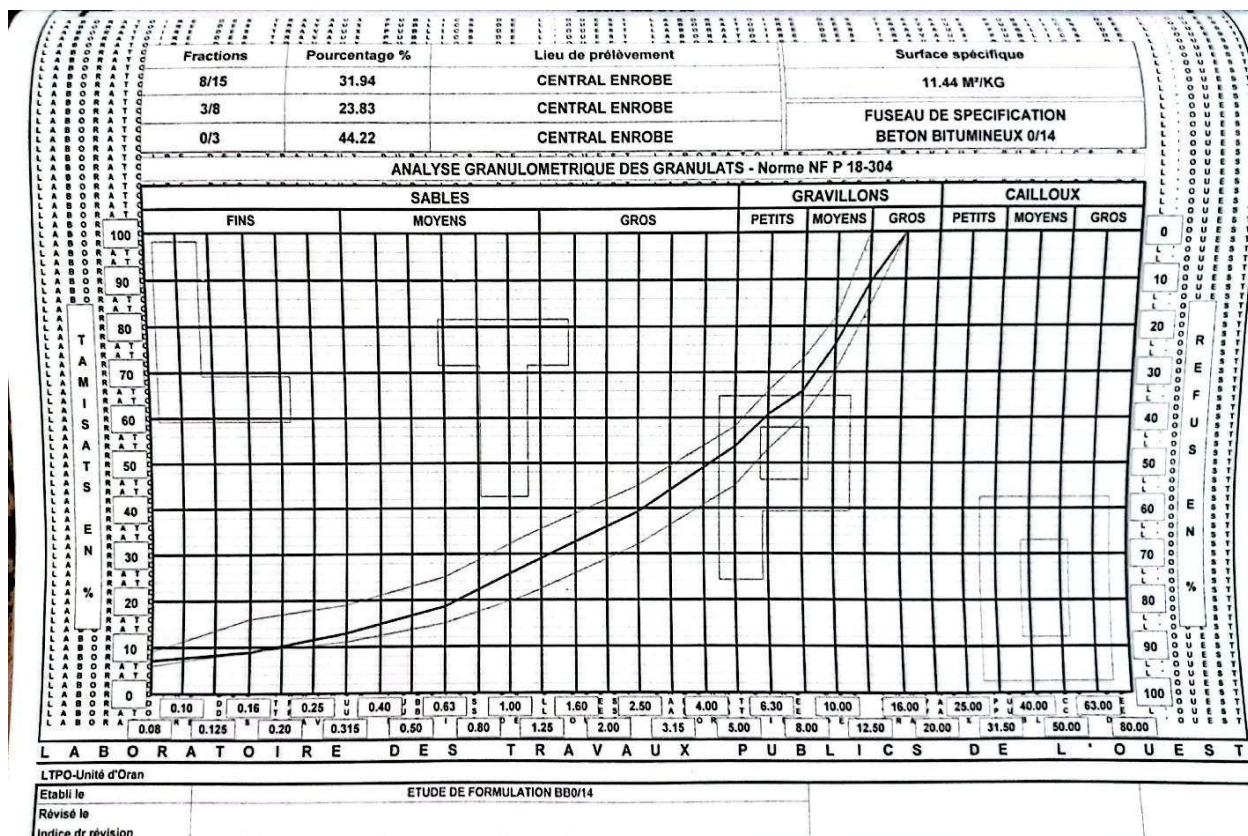


Figure III. 2:Graphe du mélange

On remarque que la courbe granulométrique s'insère bien dans le fuseau de référence préconisé en Algérie pour les BB

III.4.1. Essai Marshall

Les résultats obtenus pour les différentes formulations d'enrobés, comprenant un enrobé de référence sans ajout de plastique (0 % PET) ainsi que des enrobés intégrant des teneurs en PET de 2 %, 4 % et 6 %, préparés à des températures de 160 °C et 170 °C, sont présentés dans les tableaux III.15 à III.22. Ces résultats permettent d'évaluer l'influence de l'incorporation du PET, en comparaison avec l'enrobé témoin, ainsi que l'effet de la température de préparation sur les performances mécaniques et volumétriques du mélange bitumineux.

Tableau III. 15: Résultats d'essai Marshall d'enrobé de référence 0% de PET à T=165 °C

Nombre des éprouvettes	1	2	3	Moyenne
Poids des éprouvettes	1170,2	1168,2	1156,7	1165,0
Hauteur des éprouvettes (mm)	6,3	6,3	6,3	6,3
Diamètre des éprouvettes (mm)	101,6	101,6	101,6	101,6
Volume des éprouvettes (cm³)	510,4	510,4	510,4	510,4
Stabilité Marshall (KN)	10,90	10,70	10,80	10,80
Fluage Marshall 1/10 (mm)	39,4	38	37	38,13

Tableau III. 16: Résultats d'essai Marshall d'enrobé de référence 0% de PET à T=170 °C

Nombre des éprouvettes	1	2	3	Moyenne
Poids des éprouvettes	1148,8	1166,7	1158,9	1158,1
Hauteur des éprouvettes (mm)	6,3	6,3	6,3	6,3
Diamètre des éprouvettes (mm)	101,6	101,6	101,6	101,6
Volume des éprouvettes (cm³)	510,4	510,4	510,4	510,4
Stabilité Marshall (KN)	11,10	11,25	10,90	11,1
Fluage Marshall 1/10 (mm)	36,4	38,20	37,50	37,36

Tableau III. 17: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 2% de PET à T = 165°C

Nombre des éprouvettes	1	2	3	Moyenne
Poids des éprouvettes	1168,9	1156,4	1149,9	1158,4

Hauteur des éprouvettes (mm)	6,3	6,3	6,3	6,3
Diamètre des éprouvettes (mm)	101,6	101,6	101,6	101,6
Volume des éprouvettes (cm³)	510,4	510,4	510,4	510,4
Stabilité Marshall (KN)	10	11	11	10,66
Fluage Marshall 1/10 (mm)	38	37	34	36,33



Photo III. 1: Éprouvettes d'enrobé contenant 2 % de PET à T = 165 °C après rupture lors de l'essai Marshall

Tableau III. 18: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 2% de PET à T = 170°C

Nombre des éprouvettes	1	2	3	Moyenne
Poids des éprouvettes	1161,1	1158,9	1144,5	1154,83

Hauteur des éprouvettes (mm)	6,3	6,3	6,3	6,3
Diamètre des éprouvettes (mm)	101,6	101,6	101,6	101,6
Volume des éprouvettes (cm³)	510,4	510,4	510,4	510,4
Stabilité Marshall (KN)	11,20	12,20	10,80	11,40
Fluage Marshall 1/10 (mm)	32	32	34	32,66



Photo III. 2: Éprouvettes d'enrobe contenant 2 % de PET à T=170 °C après rupture lors de l'essai Marshall

Tableau III. 19: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 4% de PET à T = 165°C

Nombre des éprouvettes	1	2	3	Moyenne
Poids des éprouvettes	1176,9	1172,0	1181,9	1176,93

Hauteur des éprouvettes (mm)	6,3	6,3	6,3	6,3
Diamètre des éprouvettes (mm)	101,6	101,6	101,6	101,6
Volume des éprouvettes (cm³)	510,4	510,4	510,4	510,4
Stabilité Marshall (KN)	12,70	11,60	15,30	13,20
Fluage Marshall 1/10 (mm)	12,70	13,00	14,00	13,00



Photo III. 3: Éprouvettes d'enrobe contenant 4 % de PET à T=165 °C après rupture lors de l'essai Marshall

Tableau III. 20: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 4% de PET à T = 170°C

Nombre des éprouvettes	1	2	3	Moyenne
Poids des éprouvettes	1184,9	1176,2	1180,5	1180,5

Hauteur des éprouvettes (mm)	6,3	6,3	6,3	6,3
Diamètre des éprouvettes (mm)	101,6	101,6	101,6	101,6
Volume des éprouvettes (cm³)	510,4	510,4	510,4	510,4
Stabilité Marshall (KN)	11,42	12,50	13,20	12,37
Fluage Marshall 1/10 (mm)	22	24	26	24



Photo III. 4: Éprouvettes d'enrobe contenant 4 % de PET à T=170 °C après rupture lors de l'essai Marshall

Tableau III. 21: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 6% de PET à T = 165°C

Nombre des éprouvettes	1	2	3	Moyenne
Poids des éprouvettes	1179,1	1182,3	1187,6	1183,0
Hauteur des éprouvettes (mm)	6,3	6,3	6,3	6,3

Diamètre des éprouvettes (mm)	101,6	101,6	101,6	101,6
Volume des éprouvettes (cm³)	510,4	510,4	510,4	510,4
Stabilité Marshall (KN)	5,50	6,50	3,50	5,16
Fluage Marshall 1/10 (mm)	46	44	45	45



Photo III. 5: Éprouvettes d'enrobe contenant 6 % de PET à T=165 °C après rupture lors de l'essai Marshall

Tableau III. 22: Résultats d'essai Marshall d'enrobe avec 6% de PET à T = 170°C

Nombre des éprouvettes	1	2	3	Moyenne
Poids des éprouvettes	1184,4	1189,7	1171,8	1181,9

Hauteur des éprouvettes (mm)	6,3	6,3	6,3	6,3
Diamètre des éprouvettes (mm)	101,6	101,6	101,6	101,6
Volume des éprouvettes (cm³)	510,4	510,4	510,4	510,4
Stabilité Marshall (KN)	7,2	6,8	6,9	6,9
Fluage Marshall 1/10 (mm)	46,80	47	48	47,26

La figure présente l'évolution de la stabilité Marshall des enrobés en fonction du taux de PET incorporé (0 %, 2 %, 4 % et 6 %) pour deux températures de fabrication : **165 °C** et **170 °C**.

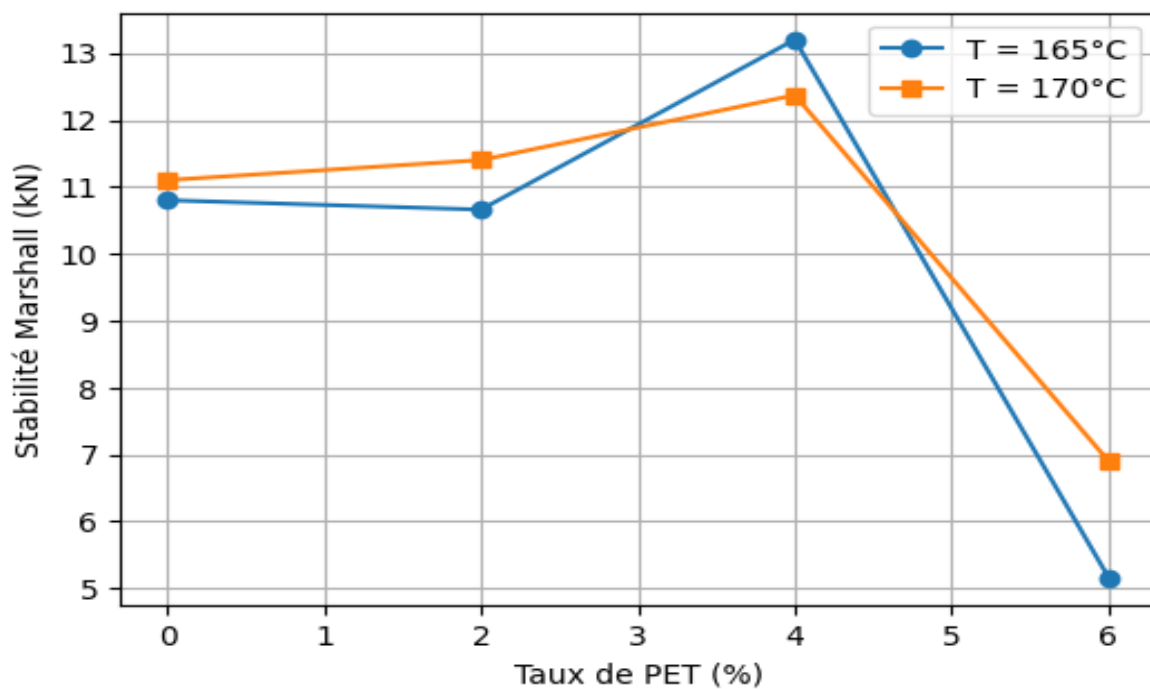


Figure III. 3:Variation de la stabilité en fonction du taux de PET à 165°C et 170°C

On observe tout d'abord que l'incorporation du PET améliore progressivement la stabilité Marshall jusqu'à une teneur de 4 % de PET. À 165 °C, la stabilité passe d'environ 10,8 kN pour l'enrobé témoin à 13,1 kN pour l'enrobé contenant 4 % de PET, soit une

augmentation d'environ 21 %. De même, à 170 °C, la stabilité augmente de 11,1 kN à 12,4 kN, ce qui traduit également un renforcement de la résistance mécanique du mélange.

En revanche, lorsque la teneur en PET atteint 6 %, une diminution brutale de la stabilité est observée pour les deux températures. La stabilité chute à environ 5,1 kN à 165 °C et 6,9 kN à 170 °C. Cette baisse importante suggère qu'un excès de PET perturbe l'homogénéité du mélange, entraîne une dispersion moins efficace du polymère et peut provoquer une diminution de l'adhérence entre les constituants de l'enrobé.

Par ailleurs, la température de 170 °C conduit à des valeurs de stabilité légèrement supérieures à celles obtenues à 165 °C pour les teneurs de 0 %, 2 % et 6 % de PET, ce qui indique une meilleure fusion et dispersion du polymère dans le liant bitumineux. Toutefois, à 4 % de PET, la stabilité maximale est obtenue à 165 °C, montrant que cette température est suffisante pour assurer une bonne incorporation du PET tout en limitant les éventuelles dégradations thermiques du matériau.

L'observation visuelle des éprouvettes (photos III.1 à III.4) confirme ces résultats. Les échantillons contenant 2 % et surtout 4 % de PET présentent une structure plus homogène et compacte, avec une bonne cohésion entre les granulats et le liant bitumineux, ce qui traduit une meilleure résistance mécanique et explique les valeurs élevées de stabilité Marshall obtenues.

Cette tendance est également mise en évidence par l'observation de l'éprouvette contenant 6 % de PET (photo III.5), qui présente une répartition moins uniforme du plastique, des zones de mauvaise cohésion et une structure plus hétérogène. Ces observations visuelles corroborent la diminution de la stabilité Marshall et confirment qu'un excès de PET nuit aux performances mécaniques de l'enrobé.

La figure III.4 présente l'évolution du fluage Marshall en fonction du taux de PET incorporé dans l'enrobé pour deux températures de fabrication (165 °C et 170 °C). Le fluage représente la déformation de l'éprouvette au moment de la rupture ; des valeurs plus faibles traduisent généralement une meilleure résistance aux déformations permanentes.

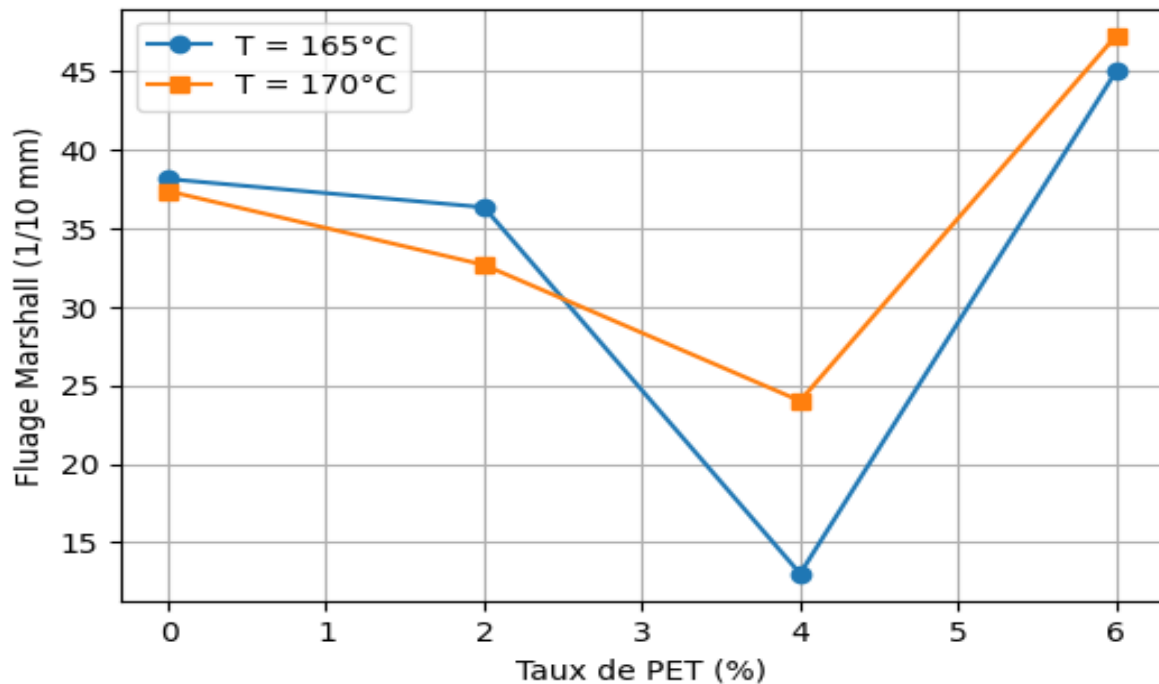


Figure III. 4: Variation du fluage en fonction de pourcentage de PET à 165°C et 170 °C

On observe tout d'abord que le fluage diminue progressivement lorsque le taux de PET augmente de 0 % à 4 %. À 165 °C, le fluage passe d'environ 38 (1/10 mm) pour l'enrobé témoin à 13 (1/10 mm) pour l'enrobé contenant 4 % de PET. À 170 °C, il diminue également de 37,5 (1/10 mm) à 24 (1/10 mm). Cette réduction du fluage indique une augmentation de la rigidité du mélange et une meilleure résistance aux déformations sous charge.

La valeur minimale du fluage est obtenue pour une teneur de 4 % de PET, particulièrement à 165 °C, ce qui confirme que cette teneur correspond à une formulation optimale. L'incorporation du PET améliore la cohésion du mélange et limite les déplacements relatifs entre les granulats lors de l'application de la charge.

En revanche, lorsque la teneur en PET atteint 6 %, le fluage augmente fortement pour les deux températures. Il atteint environ 45 (1/10 mm) à 165 °C et 47 (1/10 mm) à 170 °C, dépassant même les valeurs observées pour l'enrobé témoin. Cette augmentation traduit une perte de rigidité et une plus grande sensibilité aux déformations, probablement due à une répartition moins homogène du PET dans le mélange et à une dégradation de la cohésion interne de l'enrobé.

Par ailleurs, les valeurs de fluage obtenues à 170 °C sont généralement inférieures à celles observées à 165 °C pour les faibles teneurs en PET, ce qui suggère une meilleure dispersion du polymère dans le liant bitumineux. Toutefois, à la teneur optimale de 4 %, la température de 165 °C conduit au plus faible fluage, indiquant que cette température permet d'obtenir le meilleur compromis entre rigidité et homogénéité du mélange.

III.4.2. Essai de la masse volumique apparente

Les résultats de la détermination de la masse volumique apparente des différentes formulations d'enrobés, comprenant l'enrobé de référence ainsi que les enrobés modifiés par incorporation de 2 %, 4 % et 6 % de PET, préparés à 165 °C et 170 °C, sont présentés dans les tableaux III.23 à III.30. Ces résultats permettent d'évaluer l'influence de la teneur en PET et de la température de fabrication sur la compacité et les caractéristiques physiques des mélanges bitumineux.

Tableau III. 23: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de référence à T=165°C

Echantillon	1	2	3
Poids sec (g)	1170,2	1168,2	1156,7
Poids d'eau (g)	663,2	661,9	658,9
Différence (g)	507	506,3	497,8
Masse volumique apparente Mva	2,308	2,307	2,323
Moyenne de la masse volumique apparente	2,312		

Tableau III. 24: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de référence à T=170°C

Echantillon	1	2	3
Poids sec (g)	1148,8	1166,7	1158,9
Poids d'eau (g)	653,0	664,7	657,0
Différence (g)	495,80	502,0	501,90

Masse volumique apparente Mva	2,317	2,324	2,309
Moyenne de la masse volumique apparente	2,316		

Tableau III. 25: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 2% de PET à T=165°C

Echantillon	1	2	3
Poids sec	1168,9	1156,4	1149,9
Poids d'eau	666,8	659,23	656,59
Différence	502,1	497,2	493,3
Masse volumique apparente Mva Mesure hydrostatique	2,328	2,326	2,331
Moyenne de la masse volumique apparente	2,328		

Tableau III. 26: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 2 % de PET à T=170°C

Echantillon	1	2	3
Poids sec	1161,1	1158,9	1144,5
Poids d'eau	660,3	658,9	651,4
Différence	500,8	500,0	493,1
Masse volumique apparente Mva	2,318	2,317	2,321
Moyenne de la masse volumique apparente	2,318		

Tableau III. 27: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 4 % de PET à T=165°C

Echantillon	1	2	3
Poids sec	1176,9	1172,0	1181,9
Poids d'eau	670,7	668,6	673,3
Différence	506,2	503,4	508,6
Masse volumique apparente Mva	2,325	2,328	2,323
Moyenne de la masse volumique apparente	2,325		

Tableau III. 28: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 4 % de PET à T=170°C

Echantillon	1	2	3
Poids sec	1184,9	1176,2	1180,5
Poids d'eau	674,9	670,3	671,9
Différence	510,0	505,9	508,6
Masse volumique apparente Mva	2,323	2,325	2,320
Moyenne de la masse volumique apparente	2,322		

Tableau III. 29: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 6 % de PET à T=165°C

Echantillon	1	2	3
Poids sec (g)	1179,1	1182,3	1187,6
Poids d'eau (g)	672,4	673,6	675,3
Différence (g)	506,7	508,7	512,3

Masse volumique apparente Mva	2,327	2,324	2,318
Moyenne de la masse volumique apparente	2,323		

Tableau III. 30: Résultats d'essai de la masse volumique apparente d'enrobe de 6 % de PET à T=170°C

Echantillon	1	2	3
Poids sec (g)	1184,4	1189,7	1171,8
Poids d'eau (g)	673,70	678,70	662,8
Différence (g)	510,70	511,0	509,0
Masse volumique apparente Mva	2,319	2,318	2,302
Moyenne de la masse volumique apparente	2,313		

La figure III.5 présente l'évolution de la masse volumique apparente des enrobés en fonction du taux de PET incorporé pour deux températures de fabrication (165 °C et 170 °C).

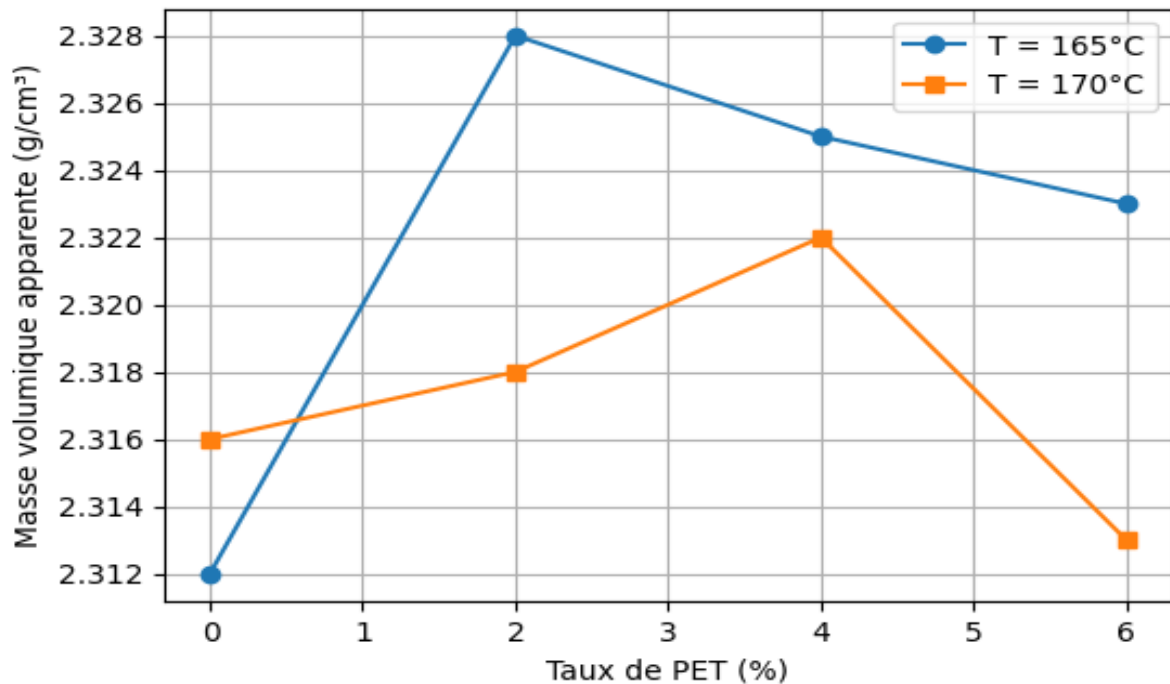


Figure III. 5: Masse volumique apparente en fonction de pourcentage de PET à 165°C et 170 °C

On observe que l'ajout de PET entraîne dans un premier temps une augmentation de la masse volumique apparente. À 165 °C, celle-ci passe d'environ 2,312 g/cm³ pour l'enrobé témoin à 2,328 g/cm³ pour l'enrobé contenant 2 % de PET, avant de diminuer légèrement pour les teneurs supérieures. À 170 °C, la masse volumique apparente augmente progressivement de 2,316 g/cm³ à 2,322 g/cm³ lorsque la teneur en PET atteint 4 %, puis diminue à 2,313 g/cm³ pour 6 % de PET.

Cette augmentation initiale de la masse volumique apparente traduit une amélioration de la compacité du mélange. L'incorporation de faibles quantités de PET favorise vraisemblablement un meilleur remplissage des vides et une meilleure cohésion entre les constituants de l'enrobé, ce qui conduit à une structure plus dense.

Les valeurs maximales sont obtenues pour 2 % de PET à 165 °C et pour 4 % de PET à 170 °C. Ces résultats indiquent que l'effet du PET sur la densification de l'enrobé dépend également de la température de fabrication, qui influence la fusion et la dispersion du polymère dans le liant bitumineux.

En revanche, lorsque la teneur en PET atteint 6 %, une diminution de la masse volumique apparente est observée pour les deux températures. Cette baisse peut être attribuée à une dispersion moins homogène du PET dans le mélange, entraînant l'apparition de vides supplémentaires et une réduction de la compacité de l'enrobé.

Par ailleurs, les enrobés fabriqués à 165 °C présentent des masses volumiques apparentes légèrement supérieures à celles obtenues à 170 °C pour les teneurs de 2 %, 4 % et 6 % de PET, ce qui suggère une meilleure compacité du mélange à cette température. Cette observation est cohérente avec les résultats de stabilité Marshall, qui ont montré les meilleures performances mécaniques pour la formulation contenant 4 % de PET à 165 °C.

III.4.3. Essai teneur en vides (air voids) :

Les résultats obtenus pour la teneur en vides (V_a) sont regroupés dans le tableau III.31. Ce tableau présente les valeurs mesurées pour les différents enrobés étudiés afin de faciliter leur comparaison et leur analyse.

Tableau III. 31: Résultats des caractéristiques volumétriques des mélanges bitumineux modifiant pour différentes températures

PET %	Température	MVR	Mva	% V_a
0	165	2,442	2,312	5,323
0	170		2,316	5,159
2	165		2,328	4,668
2	170		2,318	5,077
4	165		2,325	4,791
4	170		2,322	4,914
6	165		2,323	4,873
6	170		2,313	5,282

La figure III.6 présente l'évolution du pourcentage de vides des enrobés en fonction du taux de PET incorporé pour deux températures de fabrication (165 °C et 170 °C). Le pourcentage de vides est un indicateur important de la compacité du mélange : des valeurs plus faibles traduisent généralement une structure plus dense et mieux compactée.

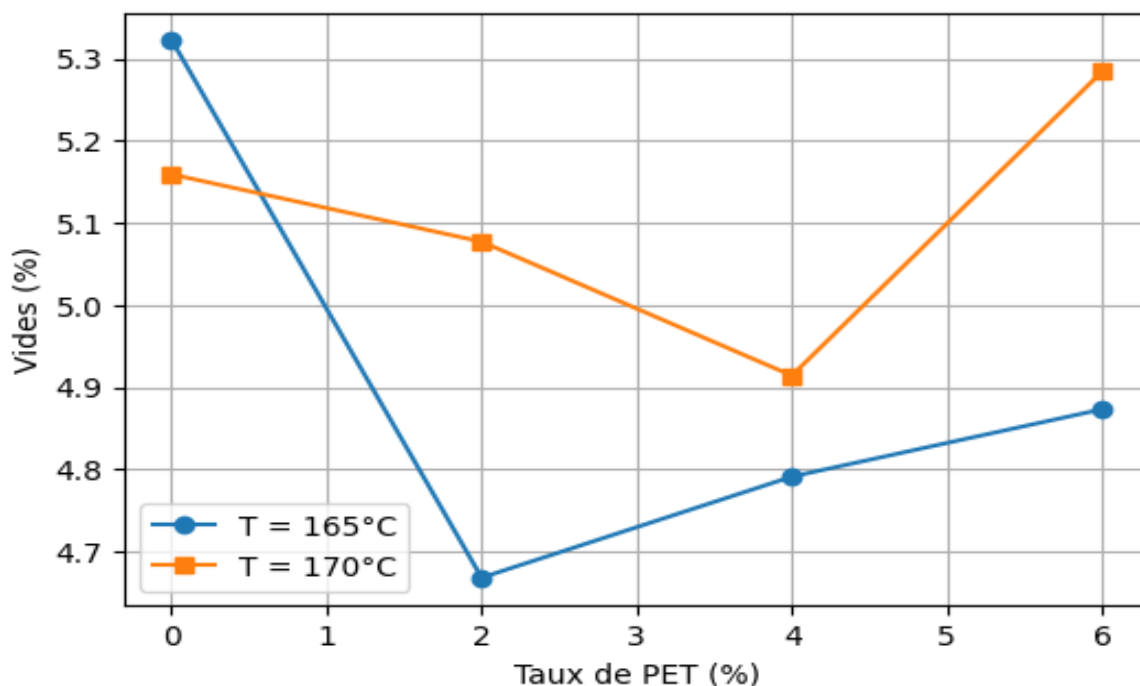


Figure III. 6: Teneur en vide en fonction de pourcentage de PET a 165 °C et 170 °C

On observe qu'à 165 °C, le pourcentage de vides diminue fortement lorsque le taux de PET passe de 0 % à 2 %, passant d'environ 5,32 % à 4,67 %. Cette diminution indique une amélioration significative de la compacité du mélange grâce à l'incorporation du PET. Au-delà de 2 %, le pourcentage de vides augmente légèrement pour atteindre 4,79 % à 4 % de PET puis 4,88 % à 6 % de PET, tout en restant inférieur à celui de l'enrobé témoin.

À 170 °C, la même tendance générale est observée. Le taux de vides diminue progressivement de 5,16 % pour l'enrobé témoin à 4,91 % pour l'enrobé contenant 4 % de PET, ce qui traduit également une amélioration de la compacité. En revanche, une augmentation marquée est observée à 6 % de PET, où le pourcentage de vides atteint environ 5,29 %, soit une valeur supérieure à celle obtenue pour les teneurs intermédiaires.

La diminution des vides observée pour les faibles teneurs en PET peut être attribuée à une meilleure répartition du polymère dans le mélange et à un remplissage plus efficace des espaces intergranulaires, favorisant ainsi une structure plus homogène et plus compacte. À l'inverse, l'augmentation des vides à forte teneur en PET suggère qu'un excès de polymère perturbe l'arrangement des constituants de l'enrobé et limite son compactage.

Par ailleurs, ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus pour la masse volumique apparente. En effet, les formulations présentant les plus faibles pourcentages de vides correspondent également aux valeurs les plus élevées de masse volumique apparente, confirmant une meilleure compacité du mélange. Cette amélioration de la structure interne contribue également aux bonnes performances mécaniques observées lors de l'essai Marshall.

III.4.4. Détermination des conditions optimales

L'analyse des essais Marshall, de la masse volumique apparente et de la teneur en vides montre que l'incorporation du PET influence de manière significative les propriétés mécaniques et volumétriques de l'enrobé.

Le dosage de 4 % de PET à 165 °C apparaît comme la formulation optimale (Tableau III.2), car il présente :

- La stabilité Marshall la plus élevée : 12,785 kN
- Le fluage le plus faible : 18,50 (1/10 mm)
- Une teneur en vide acceptable : 4,791 %
- Une masse volumique apparente élevée : 2,325 g/cm³

Ces résultats traduisent une meilleure cohésion du mélange et une résistance accrue aux déformations permanentes.

Tableau III. 32: Les conditions optimales retenues

Paramètre	Valeur optimale
Température	165 °C
Teneur en PET	4 %
Bitume	5,88 %
Procédé	Voie sèche

III.4.5. Impact environnemental

Au-delà des performances techniques obtenues, l'utilisation du PET recyclé dans les enrobés bitumineux présente également des avantages environnementaux significatifs :

- ❖ Valorisation des déchets plastiques PET par leur réutilisation dans les enrobés bitumineux.
- ❖ Réduction de la quantité de déchets plastiques envoyés vers les décharges.
- ❖ Diminution de la pollution des sols et des ressources en eau causée par l'accumulation des plastiques.
- ❖ Contribution à la préservation de l'environnement grâce à une gestion plus durable des déchets.
- ❖ Promotion de l'économie circulaire en transformant un déchet en matière première utile.
- ❖ Réduction de l'exploitation des ressources naturelles par l'intégration de matériaux recyclés.
- ❖ Encouragement des pratiques de recyclage et de développement durable dans le secteur routier.
- ❖ Contribution à l'amélioration de la qualité environnementale et à la protection des écosystèmes.

Afin de mieux apprécier l'impact environnemental de l'incorporation du PET dans les enrobés bitumineux, une estimation de la quantité de déchets plastiques valorisés a été effectuée à l'échelle d'un kilomètre de chaussée (Tableau III.33). Cette évaluation permet de mettre en évidence le nombre potentiel de bouteilles en PET recyclées grâce à cette technique.

Tableau III. 33: Estimation de la quantité de déchets plastiques valorisés

Paramètre	Enrobe de référence (0% de PET)	Enrobe modifié (4% de PET)
Mva (t/m ³)	2,312	2,325
Masse totale d'enrobe (t)	693,6	697,5
Masse de bitume (t)	40,79	41,01
Masse de granulats (t)	652,81	656,49
Masse de PET recycle (t)	0	1,64

Pour un kilomètre de chaussée, l'enrobé modifié avec 4 % de PET permet de valoriser environ 1,64 tonne de déchets plastiques recyclés.

L'utilisation de 1,64 tonne de PET recyclé permet de valoriser une quantité importante de déchets plastiques. En fonction de la masse moyenne des bouteilles, cela correspond à environ 41 000 bouteilles de 2 L jusqu'à 136 000 bouteilles de 0,5 L, avec une estimation intermédiaire de référence d'environ 54 700 bouteilles de 1,5 L.

Ainsi, même une quantité relativement modérée de PET permet de détourner des dizaines de milliers de bouteilles de l'environnement ou des décharges, ce qui met en évidence l'intérêt environnemental majeur de l'intégration du PET recyclé dans les matériaux de construction, notamment les enrobés bitumineux.

III.4.6. Impact économique

D'un point de vue économique, l'utilisation de 4 % de PET recyclé dans les enrobés bitumineux constitue une alternative particulièrement intéressante. En effet, le PET recyclé représente une matière première à faible coût comparativement à certains additifs conventionnels, tout en permettant de valoriser les déchets plastiques et de réduire les dépenses liées à leur collecte, leur traitement et leur mise en décharge. Par ailleurs, les chaussées urbaines réalisées en béton bitumineux (BB) sont fréquemment soumises à des dégradations dues au trafic répété, aux freinages et aux conditions climatiques, ce qui engendre des opérations d'entretien et de réhabilitation régulières. Les résultats obtenus dans cette étude montrent qu'à la teneur optimale de 4 % de PET, l'enrobé présente une stabilité Marshall plus élevée, un fluage plus faible et une masse volumique satisfaisante, traduisant une amélioration de ses performances mécaniques. Cette amélioration est susceptible d'accroître la durée de service des chaussées et, par conséquent, de réduire la fréquence des interventions de maintenance, générant ainsi des économies significatives sur les coûts d'entretien des infrastructures routières à long terme. L'intégration du PET recyclé dans les enrobés bitumineux apparaît ainsi comme une solution à la fois économiquement avantageuse et durable.

III.5. Conclusion

En conclusion, les résultats obtenus dans ce chapitre ont permis de confirmer l'aptitude des matériaux utilisés à la formulation des enrobés bitumineux. Les caractéristiques physiques, mécaniques et géométriques du bitume et des granulats se sont révélées conformes aux exigences normatives, garantissant ainsi la réalisation d'un mélange présentant une bonne compacité, une résistance mécanique satisfaisante et une durabilité adaptée aux conditions de service des chaussées. Par ailleurs, l'étude de l'incorporation du PET a mis en évidence son influence significative sur les performances des enrobés. Les résultats montrent qu'une teneur de 4 % de PET, associée à une température de fabrication de 165 °C, permet d'obtenir les meilleures performances mécaniques et volumétriques, caractérisées par une stabilité Marshall élevée, un faible fluage, une masse volumique apparente importante et un faible pourcentage de vides. Cette teneur apparaît ainsi comme le dosage optimal, assurant le meilleur compromis entre résistance mécanique et compacité du mélange. En revanche, des teneurs supérieures à 4 % conduisent à une dégradation progressive des performances de l'enrobé. Ainsi, l'utilisation du PET recyclé dans les enrobés bitumineux constitue une solution prometteuse tant sur le plan technique qu'environnemental, sous réserve du respect de la teneur optimale déterminée dans cette étude.

Conclusion générale

La valorisation des déchets plastiques constitue aujourd'hui un enjeu majeur tant sur le plan environnemental qu'économique. Dans ce contexte, cette étude s'est intéressée à l'incorporation du polyéthylène téréphtalate (PET) recyclé dans les enrobés bitumineux afin d'évaluer son influence sur leurs performances mécaniques et volumétriques.

Les résultats expérimentaux obtenus montrent que l'ajout de PET améliore significativement les caractéristiques de l'enrobé jusqu'à une teneur optimale de 4 %. Les essais Marshall ont mis en évidence une augmentation de la stabilité et une diminution du fluage à cette teneur, traduisant une meilleure résistance aux déformations permanentes et une plus grande capacité portante. Par ailleurs, les essais de masse volumique apparente et de teneur en vides ont révélé que l'incorporation du PET n'entraîne que de faibles variations des propriétés volumétriques, lesquelles restent conformes aux exigences techniques.

L'ensemble des résultats permet ainsi de conclure que la formulation contenant 4 % de PET, préparée à une température de 165 °C, représente le meilleur compromis entre performances mécaniques et caractéristiques volumétriques. Cette formulation offre une amélioration notable du comportement de l'enrobé tout en assurant une valorisation efficace des déchets plastiques.

Au-delà des performances techniques, l'utilisation du PET recyclé dans les matériaux routiers s'inscrit pleinement dans une démarche de développement durable et d'économie circulaire. Elle contribue à la réduction des quantités de déchets destinés à l'enfouissement ou à l'incinération, limite la consommation de matières premières vierges et participe à la conception d'infrastructures routières plus respectueuses de l'environnement.

En perspective, il serait intéressant de compléter cette étude par des essais de durabilité à long terme, notamment l'évaluation de la résistance à la fatigue, à l'orniérage, au vieillissement et à l'action de l'eau, ainsi que par des expérimentations à l'échelle réelle sur chaussée. Ces investigations permettraient de confirmer les performances observées en laboratoire et de favoriser une application plus large du PET recyclé dans la construction routière.

Références

- [1] Z. N. Kalantar, M. R. Karim, and A. Mahrez, "A review of using waste and virgin polymer in pavement," *Constr. Build. Mater.*, vol. 33, pp. 55–62, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.009.
- [2] N. K. Verma, K. Kumar, J. Chaurasiya, M. A. Raza, and A. Pandey, "POLYMER AND APPLICATIONS : A REVIEW," *Res. J. Med. Sci*, vol. 6, no. 1, pp. 16–29, 2024.
- [3] X. Cousin *et al.*, *Pollution plastique, la biodiversité menacée*, Quae. 2025. doi: <https://doi.org/10.35690/978-2-7592-4084-5>.
- [4] P. Lettieri and J. Baeyens, "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 10, pp. 2625–2643, 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2009.06.004.
- [5] J. Hopewell, R. Dvorak, and E. Kosior, "Plastics recycling : challenges and opportunities," *Phil. Trans. R. Soc. B*, vol. 2007, pp. 2115–2126, 2009, doi: 10.1098/rstb.2008.0311.
- [6] A. Ben Ameer and J. Valentin, "A Review on the Use of Plastic Waste as a Modifier of Asphalt Mixtures for Road Constructions," *CivilEng*, pp. 1–31, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/civileng6020017>.
- [7] A. M. Shah, R. H. Lodhi, M. F. Javed, and M. Gono, "Structural Performance of Waste Plastic Bottles Modified Asphalt : A Review," *Resources*, vol. 12, no. 10, 2023, doi: <https://doi.org/10.3390/resources12010010>.
- [8] L. Yu, H. Kang, R. Li, J. Pei, and Y. Du, "A Study on the Environmental Performance of an Asphalt Mixture Modified with Directly Added Waste Plastic," *Materials (Basel)*, vol. 18, p. 1168, 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/ma18051168>.
- [9] F. Hall and G. White, "Bituminous Binders and Asphalt Mixtures," *Materials (Basel)*, vol. 14, p. 6176, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/ma14206176>.
- [10] J. Nicolas, L. Macchia, O. Baglieri, D. Dalmazzo, and E. Santagata, "Experimental investigation on fatigue properties of asphalt mixtures with high content of RAP and

- recycled plastics,” *Mater. Struct.*, vol. 58, no. 8, pp. 1–14, 2025, doi: 10.1617/s11527-025-02793-9.
- [11] L. D. Poulikakos *et al.*, “RILEM interlaboratory study on the mechanical properties of asphalt mixtures modified with polyethylene waste,” *J. Clean. Prod. J.*, vol. 375, no. September, p. 134124, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.134124.
- [12] D. Xuan, L. Marie, E. Hassan, and M. Filippo, “Performance Evaluation of Post-Consumer and Post-Industrial Recycled Plastics as Binder Modifier in Asphalt Mixes,” *Int. J. Pavement Res. Technol.* (, vol. 19, pp. 663–676, 2026, doi:<https://doi.org/10.1007/s42947-024-00482-4>.