

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Abou Bakr Belkaid**  
**Faculté de Technologie**  
**Département de Génie Civil**



Mémoire pour l'Obtention du Diplôme  
De Master en Génie Civil  
Option : Efficacité énergétique dans les bâtiments de construction

**Thème**  
**Contribution à l'amélioration du comportement de béton**  
**bitume 0/14 par des fibres de bouteille de plastique**

**Présenté en Juin 2024 par :**

***Mlle. BOUZIANE Manel***

**Devant le Jury composé de :**

**PR. BENCHOUK Assia**  
**DR. KHELIFI Zakia**  
**PR. ZADJAOUI Abdeldjalil**  
**M. BENDIMRAD Karam Fath-Allah**

**Président**  
**Examinatrice**  
**Encadrant**  
**Encadrant**

2023-2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

وَمَا أُوتِيتُمْ مِّنَ الْعِلْمِ إِلَّا قَلِيلًا

[سورة الإسراء، الآية 85]

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمَ

# REMERCIEMENTS

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur :*

*Mr. ZADJAOUI. A, Professeur à l'université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen*

*Mr. BENDIMRED. K,F, Doctorant à l'université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen*

*Pour leur aide et leur soutien, lors de la rédaction de mon mémoire de fin d'études, vous avez été pour moi une inspiration et un véritable modèle dans mon travail, merci pour les précieux conseils, orientations et conseils que vous m'avez prodigué durant cette période, je vous remercie de votre écoute, de votre soutien constant, merci pour tout ce que vous m'avez apporté et vos encouragements constants.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à :*

*Mme BENCHOUK, A, Professeur à l'université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen*

*Mme KHELIFI. Z, Maitre de Conférences à l'université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen*

*Pour avoir accepté de faire partie de notre jury et d'examiner ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à LTPO et particulièrement Mr Ismail et*

*Mr Fouad. Pour leurs aides dans la partie expérimentation de caractérisation qui nous a été précieuse pour réussir ce modeste travail.*

# DEDICACES

*Je dédie ce modeste travail*

*À ma très chère mère que je ne saurai remercier assez pour les sacrifices*

*Qu'elle a consentis pour moi.*

*À mon très cher père qu'il a su se faire sentir dans les moments difficiles ainsi*

*Que pour chaque instant de bonheur qu'il m'a procuré.*

*Mes frères Chahrazed, Mohammed el Amine, Iyed Anes.*

*À tous mes amis Asma, Hafida, Romaysa.*

*À ma tante Hafsa ce qui était comme binôme pour moi.*

*À tous les enseignants du Département de Génie Civil en particulier mon*

*Encadrant Mr. ZADJAOUI A.*

## Résumé

Le but de ce travail est la comparaison technique entre deux bétons bitumineux 0/14 et un béton bitumineux 0/14 associé au fibre de bouteille de plastique type PET de divers taux (0.5, 1, 1.5, 2 & 3% en poids du mélange) pour une application routière.

L'association d'un BB 0/14 obtenus a l'aide d'une méthode formulation dite Marshall, la plus déployer dans notre pays et les fibre de polymère PET résultant des satisfactions technique à court terme a savoir :

- Une amélioration de la stabilité, de la compacité et du quotient Marshall.
- Une réduction du fluage Marshall.

En dehors de ce gain technique, la variante d'incorporer des fibres de polymère PET présente une optique environnementale issue de la réutilisation de ces déchets qui présentant un risque planétaire dans l'avenir.

**Mots clés :** Route, Formulation d'un béton bitumineux, Essai Marshall, Polymère PET.

## Abstract

The aim of this work is the technical comparison between two types of bituminous concrete 0/14 and a bituminous concrete 0/14 combined with plastic bottle fibers of PET type at various rates (0.5, 1, 1.5, 2, and 3% by weight of the mixture) for road application. The combination of a 0/14 bituminous concrete obtained using the Marshall mix design method, the most widely used in our country, and PET polymer fibers results in short-term technical benefits, namely:

- Improved stability, compactness, and Marshall quotient.
- Reduced Marshall flow.

Apart from this technical gain, the variant incorporating PET polymer fibers has an environmental perspective due to the reuse of these wastes, which present a global risk for the future.

**Keywords:** Road, Bituminous concrete mix design, Marshall test, PET polymer.

الهدف من هذا العمل هو المقارنة الفنية بين خرسانتين فاريتين 14/0 وخرسانة قارية 14/0 مرتبطة بألياف الزجاج البلاستيكية PET بسبب مختلفة (0.5، 1.5، 2، 3% من وزن الخليط) تطبيق الطرق.

تم الحصول على مزيج BB 0/14 باستخدام ما يسمى بطريقة صياغة مارشال، الأكثر انتشارا في بلدنا وألياف البوليمر PET مما أدى إلى رضا في على المدى القصير وهي:

✓ تحسين الاستقرار والاكتناز وحاصل مارشال.

✓ انخفاض في زحف مارشال.

وبصرف النظر عن هذا المكسب التقني، فإن البديل المتمثل في دمج ألياف البوليمر PET يقدم منظورا بيئيا جادا عن إعادة استخدام هذه النفايات التي تتسبب في كوارث بيئية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة البيتومينية، PET، الطرق، اختبار مارشال، تصميم خليط الخرسانة.

# Table des matières

|                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>REMERCIEMENTS</i> .....                                                                 | 3  |
| <i>DEDICACES</i> .....                                                                     | 4  |
| <b>Table des matières</b> .....                                                            | 6  |
| <b>Liste des Figures</b> .....                                                             | 7  |
| <b>Liste des Tableaux</b> .....                                                            | 9  |
| <b>Introduction Générale</b> .....                                                         | 1  |
| <b>CHAPITRE N°1 : REVUE DE LITTERATURE</b> .....                                           | 3  |
| <b>I.1 : Introduction</b> .....                                                            | 3  |
| <b>I.2 : Les Bétons Bitumineux</b> .....                                                   | 3  |
| <b>I.2.1 : Constituants des bétons bitumineux</b> .....                                    | 4  |
| <b>I.2.2 : Types des bétons bitumineux</b> .....                                           | 8  |
| <b>I.2.3 : Caractéristique du mélange</b> .....                                            | 9  |
| <b>I.2.4 : Comportement des bétons bitumineux</b> .....                                    | 11 |
| <b>I.2.5 : Méthode de formulation des bétons bitumineux</b> .....                          | 12 |
| <b>I.3 : Comportement viscoélastique linéaire des mélange hydrocarbonés</b> .....          | 13 |
| <b>I.4 : Béton bitumineux a module élevé (BBME)</b> .....                                  | 14 |
| <b>I.4.1 : Historique d'apparition</b> .....                                               | 15 |
| <b>I.4.2 : Caractéristique des bétons bitumineux a module élevé</b> .....                  | 16 |
| <b>I.4.3 : Procédé d'obtention des liants pour un mélange type BBME</b> .....              | 17 |
| <b>I.4.4 : Fabrication et mise en place</b> .....                                          | 18 |
| <b>I.5 : Structure étudiée (Chaussées Souple)</b> .....                                    | 19 |
| <b>I.5.1 : Clarification des sollicitations subisse par la structure de chaussée</b> ..... | 21 |
| <b>I.5.2 : Dégradation et modalité de mesure</b> .....                                     | 22 |
| <b>I.6 : Les déchets plastique et les bétons bitumineux</b> .....                          | 23 |
| <b>1.6.1 : Algérie est les enjeux environnemental des plastiques</b> .....                 | 25 |
| <b>I.6.2 : Le poly téréphtalate d'éthylène (PET)</b> .....                                 | 25 |
| <b>I.6.3 : Les PET et les béton bitumineux</b> .....                                       | 28 |
| <b>I.7 : Conclusion</b> .....                                                              | 29 |
| <b>CHAPITRE N°2 : CONTRIBUTION EXPÉRIMENTALE</b> .....                                     | 30 |
| <b>II.1 : Introduction :</b> .....                                                         | 30 |
| <b>II.2 : Echantillonnage :</b> .....                                                      | 30 |
| <b>II.2.1 : Données Géographique :</b> .....                                               | 30 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.2.2 : Données Géologique :.....                                             | 31 |
| II.3 : Caractérisation des matériaux.....                                      | 31 |
| II.4 : Détermination des performances mécaniques .....                         | 36 |
| II.4.1 : Constitution des mélange bitumineux.....                              | 36 |
| II.4.2 : Détermination de la teneur en liant.....                              | 37 |
| II.4.3 :Détermination des performances mécaniques des différents mélanges..... | 38 |
| II.4.3.1 : Protocol expérimental.....                                          | 38 |
| II.4.3.2 : Résultats & Discussions.....                                        | 40 |
| II.5. : Conclusion .....                                                       | 43 |
| CONCLUSION GENERALE .....                                                      | 44 |
| III : Conclusion générale .....                                                | 44 |
| Références Bibliographiques.....                                               | 45 |



| Figure                                         | Titre                                                                                                                                            | Page |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <b>Chapitre 01 : REVUE DE LITTERATURE</b>      |                                                                                                                                                  |      |
| 1                                              | Constituant d'un mélange bitumineux (Granulats). (Image Projet PFE)                                                                              | 05   |
| 2                                              | Aperçu sur le process de raffinage d'obtention des bitumes                                                                                       | 06   |
| 3                                              | Principe d'essai 'a' de pénétrabilité à l'aiguille et 'b' point de ramollissement                                                                | 07   |
| 4                                              | Béton bitumineux 0/14 dans son état de mise en place                                                                                             | 08   |
| 5                                              | Presse d'essai 'a' Duriez, 'b' Marshall (NF P 98-251-1 & 2)                                                                                      | 10   |
| 6                                              | Diagramme de phase volumique d'enrobé                                                                                                            | 13   |
| 7                                              | Constituant des bétons bitumineux a module élevé                                                                                                 | 14   |
| 8                                              | 'a' Le polyisobutylène et 'b' Ethylène-vinyle-acétate                                                                                            | 17   |
| 9                                              | Schématisation du circuit de fabrication des BBME. (Image Web)                                                                                   | 18   |
| 10                                             | 'a' Coupe type d'une structure de chaussé souple, 'b' Schéma de fonctionnement d'une structure de chaussé sous application d'une charge roulante | 21   |
| 11                                             | 'a' Fissuration, 'b' Soulèvement différentielle, 'c' Orniérage et 'd' Affaissement                                                               | 22   |
| 12                                             | Production mondiale de plastiques primaires et de déchets primaires (en millions de tonnes métriques) en 2015 selon le type de polymère/additif  | 24   |
| 13                                             | Structure PET. (Image Web).                                                                                                                      | 26   |
| 14                                             | Résultat d'essai Marshall                                                                                                                        | 28   |
| <b>Chapitre 02: CONTRIBUTION EXPÉRIMENTALE</b> |                                                                                                                                                  |      |
| 15                                             | Courbes granulométriques des agrégats                                                                                                            | 33   |
| 16                                             | Fuseau spécifique de la courbe granulométrique du mélange BB 0/14                                                                                | 39   |
| 17                                             | Protocole Expérimental                                                                                                                           | 41   |
| 18                                             | Déroulement d'essais Marshall                                                                                                                    | 42   |
| 19                                             | Résultats de l'essai Marshall sur éprouvettes cylindriques :<br>a) Stabilité Marshall; b) Fluage Marshall ; c) Quotient Marshall                 | 43   |

## Liste des Tableaux

| Tableau                                        | Titre                                                                    | Page      |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Chapitre 01 : REVUE DE LITTERATURE</b>      |                                                                          |           |
| <b>1</b>                                       | Epreuves de formulation des bétons bitumineux                            | <b>12</b> |
| <b>2</b>                                       | Fraction granulaire pour un BB 0/14                                      | <b>12</b> |
| <b>3</b>                                       | Propriétés type des bétons bitumineux à module élevé                     | <b>16</b> |
| <b>4</b>                                       | Température de fabrication                                               | <b>19</b> |
| <b>5</b>                                       | Ecart moyen granulométrie du mélange                                     | <b>19</b> |
| <b>Chapitre 02: CONTRIBUTION EXPÉRIMENTALE</b> |                                                                          |           |
| <b>6</b>                                       | Données granulométriques du sable de carrière                            | <b>33</b> |
| <b>7</b>                                       | Données granulométriques du gravier I                                    | <b>33</b> |
| <b>8</b>                                       | Données granulométriques du gravier II                                   | <b>33</b> |
| <b>9</b>                                       | Résultats d'essai de propreté, aplatissement et absorption des granulats | <b>34</b> |
| <b>10</b>                                      | Résultats d'essais sur le sable                                          | <b>35</b> |
| <b>11</b>                                      | Densité des grains                                                       | <b>35</b> |
| <b>12</b>                                      | Caractéristiques intrinsèques des gravillons                             | <b>36</b> |
| <b>13</b>                                      | Récapitulatif des résultats                                              | <b>37</b> |
| <b>14</b>                                      | Pourcentage des fractions granulaires                                    | <b>38</b> |
| <b>15</b>                                      | Protocole Expérimentale En Chiffre                                       | <b>40</b> |
| <b>16</b>                                      | Récapitulatif des résultats                                              | <b>42</b> |



***Introduction  
Générale***

### Introduction Générale

L'effet cyclique des charges sur les chaussées entraîne des phénomènes de fatigue. Les passages successifs de véhicules provoquent une dégradation progressive des matériaux, provoquant des dégradations très avancées des divers structures du corps de la chaussée.

La réhabilitation et la remise en état des routes sont devenues un problème croissant. Maintenir les autoroutes et les routes principales en bon état sans perturber le flux de circulation représente un défi majeur pour les donneurs d'ordres et les équipes opérationnelles en charge de la construction et de l'entretien des routes.

C'est dans ce contexte que sont apparus de nouveaux enrobés, permettant de construire des chaussées offrant les meilleures conditions de circulation. L'évolution des enrobés s'est principalement concentrée sur l'épaisseur des couches et leurs performances, notamment les constituants. La mise au point de bitumes modifiés et d'additifs a permis la création d'enrobés plus performants.

L'invention de ces enrobés performants est attribuée à la France, où ils ont été largement adoptés il y a plus de 20 ans. Ces matériaux sont désormais normés et couramment utilisés sur des chaussées très sollicitées. L'expérience s'est étendue à la Belgique, à la République Tchèque, à l'Irlande, à la Suisse, à la Pologne et, plus récemment, à l'Algérie.

Le réseau routier en Algérie est parmi les plus importants d'Afrique, avec plus de 108302 km de longueur, répartis sur l'autoroute, les routes nationales, les chemins de wilayas et les routes secondaires.

La mise au point du bitume modifié, associé à des additifs organiques (tels que l'asphalte dur et les polymères) sous forme de fines ou de granulés dans les années 1990, a permis l'arrivée des enrobés à module élevé (EME) pour les couches d'assise et des bétons bitumineux à module élevé (BBME) pour les couches de roulement.

Les performances d'un enrobé dépendent directement de ses constituants sous couverture sa formulation. L'évaluation de ces performances se fait en laboratoire grâce à une série d'essais spécifiques et normalisés, qui sont eux-mêmes directement liés à la méthode de formulation utilisée.

Notre étude s'inspire de la technique des BBME. Toutefois, la formulation appliquée reste celle en vigueur en Algérie, connue sous le nom de Méthode Marshall.

L'objectif était principalement de formuler et de comparer les performances mécaniques d'enrobés incorporant des déchets plastique à des enrobés conventionnels et ce, sous une optique environnementale dans le but :

- 1) d'évaluer la possibilité d'incorporer des déchets plastique les enrobés bitumineux ;
- 2) de pouvoir formuler des enrobés qui offrent des performances familiarisées à celles d'enrobés de référence de manière à promouvoir ainsi sa mise en marché.

Le travail s'est déroulé en deux principales étapes :

**Chapitre I :** Une synthèse bibliographique constitue un survol des différentes notions utiles à la compréhension des enrobés bitumineux ;

**Chapitre II :** Contribution expérimentale résultant d'étude comparatif entre notre produit bitumineux et enrobés conventionnels par la méthode Marshall ;

Les principaux résultats obtenus sont rappelés et commentés dans une conclusion.



**CHAPITRE N°1:  
REVUE DE  
LITTERATURE**

## CHAPITRE N°1 : REVUE DE LITTERATURE

### I.1 : Introduction

Ce chapitre fait un survol des connaissances et de la littérature traitant des notions qui sont en relation avec notre projet de contribution.

A cet effet, notre présent passage a pour objectif la déclinaison sous forme de revue les axes ci-dessous comme matière première de notre recherche afin de bien comprendre les paramètres de la recherche, mais également de mettre en relief les différentes études et recherches qui ont déjà été réalisées sur le sujet d'une part et de proposer des recommandations aux donneurs d'ordres acteurs dans le domaine sous des conditions contraignantes de choix de la variante des matériaux.

La revue est initiée par un aperçu des connaissances sur les bétons bitumineux (constituants, caractéristiques et composition) suivi par un passage dédié aux bétons bitumineux, structure étudiée et couronnée par un fragment sur l'application des déchets plastique dans le champ des bétons hydrocarbonés.

### I.2 : Les Bétons Bitumineux

Dans le monde actuel, où le développement durable est devenu essentiel pour assurer un avenir meilleur aux générations futures, la construction et l'entretien des chaussées des infrastructures de transport doivent intégrer cette perspective.

Pour ce faire, il est possible de choisir parmi diverses techniques qui respectent les engagements des commanditaires en matière de développement durable.

Parmi ces techniques, certaines sont anciennes, d'autres ont émergé récemment, et d'autres encore sont en cours de développement. Voici une liste de ces divers procédés :

- Enrobés à froid : graves émulsion (GE) ;
- Recycler à froid : en centrale ou en place ;
- Enrobé semi-chaud et /ou semi tiède ;
- Enrobé chaud en centrale ;
- Enrobé à module élevé ;

Un revêtement d'asphalte est un mélange de gravier, de sable et un liant hydrocarboné tel que le bitume, appliqué en une ou plusieurs couches pour former le revêtement des routes, des pistes d'aéroport et d'autres zones de circulation, .(Sidibe A. et Hamadi H., 2020).

### I.2.1 : Constituants des bétons bitumineux

Les granulats (Graviers, Sables Et/Ou filières) associées a un liant sont les constituants direct d'un béton bitumineux.

Le comportement du mélange bitumineux est influencé par les propriétés de ces composants à savoir les granulats et le bitume. Celles-ci sont traitées dans la présente section, (Sidibe A. et Hamadi H., 2020).

**1.2.1.1 : Les granulats :** Dans un mélange de béton bitumineux, les granulats (Sable et Graviers) représentent environ 95% du poids, le reste étant du liant, (Mahoub M.et al., 2015 ).

**i : Caractéristiques des granulats :** Le rôle principal des granulats dans les bétons est la répartition des charges vers les couches inférieures de la chaussée et les sols d'infrastructure. Cependant, pour bien gérer et absorber ces charges, l'angularité, la forme, la texture de surface et la propreté des granulats sont importante pour la constitution d'un squelette granulaire solide et résistant aux charges (Harizi I., 2012).

- ✓ **La forme :** La forme des granulats peut être cubique, aplatie ou allongée, elle influence directement le squelette granulaire d'un enrobé bitumineux. Par exemple, un granulat trop allongé et plat risque de se briser lors du malaxage, du compactage ou sous l'effet du trafic. La forme d'un granulat est caractérisée par le coefficient d'aplatissement (CA) qui représente le pourcentage des éléments par rapport à leurs épaisseurs.
- ✓ **L'angularité :** L'angularité des granulats est également un facteur essentiel pour que l'enrobé supporte bien les charges. L'emploi de matériau concassé venant de carrières est recommandé puisque, contrairement aux granulats naturels qui sont arrondis, les granulats concassés possèdent une angularité élevée.  
Cette angularité permet aux granulats de bien s'ancrer entre eux, ce qui limite les déplacements relatifs et offre une meilleure résistance. L'indice de concassage (IC) désigne le pourcentage d'élément concassé contenu dans un matériau donné.
- ✓ **La surface :** La surface du granulat joue également un rôle important lors de la confection d'un enrobé. Elle peut être lisse ou rugueuse, ce qui aura un impact sur la micro-texture.

- ✓ **La propreté :** La propreté des granulats permet de mettre en évidence la proportion relative de poussière fine nuisible à la qualité du mélange. Appréciee par l'essai d'équivalent des sables (ES) pour les sable et différence des poids des granulats dans leurs état et après lavage.
- ✓ **La dureté :** Analyser en fonction des résultats des essais Los Angeles et l'essai Micro Deva, une donnée important initiée à un aperçu du comportement du mélange.

**ii : Les différents essais de contrôle des granulats :** Les matériaux utilisés pour le béton doivent être résistants et conserves leurs qualités le plus longtemps possible. Des tests sont effectués sur les granulats pour déterminer leur durabilité. Les plus fréquents sont l'essai Los Angeles (NF EN 1097-1) et l'essai Micro Deval (NF EN 1097-2).

La résistance aux chocs et à l'usure par frottement des gros granulats est évaluée par l'essai Los Angeles. La résistance à l'usure par attrition est déterminée par l'essai Micro-Deval. La dégradation des granulats est simulée par ce dernier lorsqu'ils se frottent les uns contre les autres (Harizi I., 2012)

Il existe également d'autres essais servant à valider le bon comportement des granulats :

- Analyse granulométrique par tamisage : NF EN 933-1 ;
- Essai de propreté des granulats : NF P 932-3 ;
- Coefficient d'aplatissement des Graviers : NF EN 933-3 ;
- Coefficient d'absorption d'eau des gravillons et des sables : NF EN 1097-6 ;
- Essai équivalent de sable : NF EN 933-8 ;
- Essai de bleu de méthylène : NF P 94-068 ;
- Densité des grains : NF P 94-054 ;



Figure n°1 : Constituant d'un mélange bitumineux (Granulats).

**1.2.1.2 : Le liant :** Le liant est la substance qui maintient les granulats entre eux dans un enrobé bitumineux, il donne la cohésion à l'enrobé. Dans les bétons à chaud, c'est très souvent le bitume qui joue ce rôle.

**Le bitume** est une matière noire produite par distillation du pétrole brut. L'asphaltène et le maltène constituent un hydrocarbure. Les saturés, les aromatiques et les résines forment le maltène. Tous ces éléments chimiques contribuent à la formation d'un bitume (Bachand A., 2018).

- ✓ **Asphaltènes :** Les asphaltènes sont des composants qui influencent significativement les propriétés rhéologiques du bitume. En effet, une augmentation de leur concentration rend le bitume plus dur et plus visqueux, tout en réduisant sa pénétrabilité et en élevant son point de ramollissement. La quantité et les caractéristiques des asphaltènes varient en fonction du type de pétrole utilisé. Ils contiennent également divers éléments chimiques tels que le carbone, l'hydrogène, l'azote, le soufre et l'oxygène.
- ✓ **Résines :** Les résines jouent un rôle crucial dans l'adhésion et la ductilité du bitume. Elles agissent comme agents de dispersion ou de "peptisation" des asphaltènes, empêchant ainsi les interactions entre ces derniers. En outre, leur forte polarité confère aux résines d'excellentes propriétés adhésives.
- ✓ **Aromatiques :** Les aromatiques sont les composants les plus abondants dans le bitume, représentant entre 40% et 65% de sa composition. Ils sont principalement composés de carbone et d'hydrogène, avec une présence notable de soufre. Ces composés naphténiques aromatiques se caractérisent par des chaînes carbonées non polaires dominées par des systèmes aromatiques insaturés.

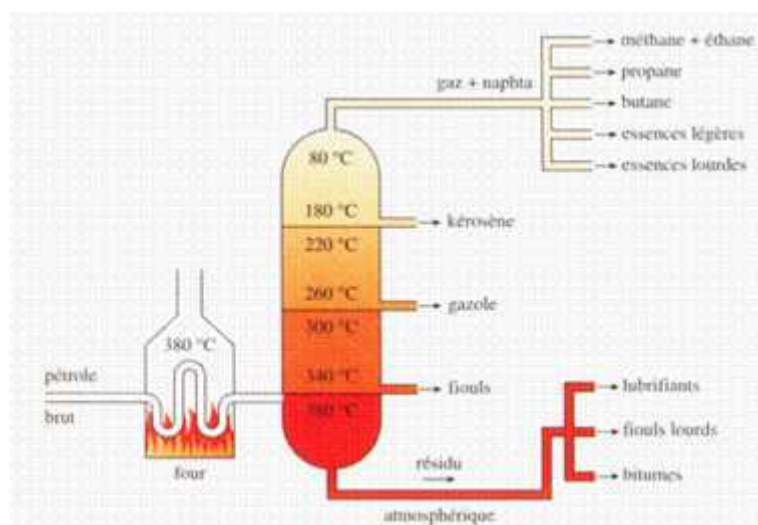


Figure n°2 : Aperçu sur le process de raffinage d'obtention des bitumes (Chetoumi M. et Mokeddem A., 2020).

- ✓ **Saturés** : Les saturés influencent la viscosité et la fluidité du bitume. Présents sous forme d'huile visqueuse, ils sont composés de carbone et d'hydrogène, comme les autres composants du bitume. Ils se caractérisent par des hydrocarbures aliphatiques à chaîne droite ou ramifiée et constituent entre 5% et 20% du bitume.

Le liant représente souvent 5% à 7% massiques des constituants de l'enrobé (10-15% volumique), mais a un impact très important au niveau de ses propriétés viscoélastiques et de sa rigidité. Il donne également des propriétés d'étanchéité à l'enrobé en comblant les vides entre les granulats et en empêchant l'eau de s'y infiltrer.

**i : Caractéristiques des bitumes** : Le bitume permet à l'enrobé de s'adapter à certaines dégradations causées par plusieurs facteurs, tels que le trafic, les conditions climatiques du site, etc. A température de service élevée, le bitume doit demeurer suffisamment visqueux afin d'éviter que le phénomène d'orniérage ne se produise. En revanche, à basse température, le bitume doit conserver une certaine élasticité pour éviter le phénomène de fissuration par retrait thermique et la fragilisation de l'enrobé. En températures intermédiaires, il est résistant à la fatigue sous l'effet du trafic répété (Mahoub M. et al., 2015).

**ii : Les différents essais de contrôle des bitumes** : Les plus importants sont l'essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF T66 – 004) et l'essai de point de ramollissement bille et anneau (NF T66 – 008). L'essai de pénétrabilité à l'aiguille exprime la pénétration verticale d'une aiguille de référence dans un échantillon d'essai du matériau, dans des conditions prescrites de température, de charge et de durée d'application de la charge, en outre, l'essai de point de ramollissement bille et anneau définit la température de ramollissement à laquelle le matériau dans les conditions de référence de l'essai atteint une certaine consistance, (Harizi I., 2012).

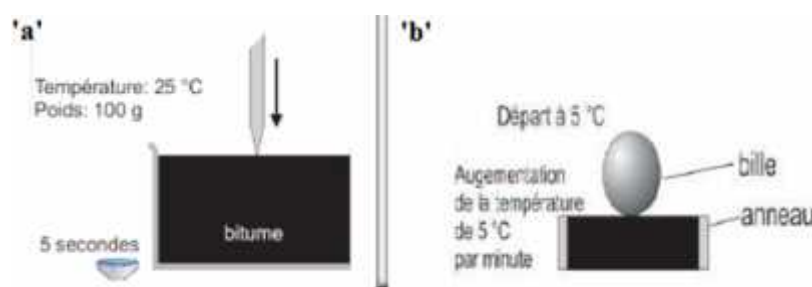


Figure n°3 : Principe d'essai 'a' de pénétrabilité à l'aiguille et 'b' point de ramollissement (Sidibe A. et Hamadi H., 2020).

Comme récap., les bitumes issus donc par distillation du pétrole sont classifiés selon leur pénétrabilité au poinçon de 100 grammes à une température constante de 25 ° sur une durée de 5 secondes, (Harizi I., 2012).

Ces classifications définissent leur pénétrabilité et les classent en 4 familles:

- Bitume 180-220 : température fabrication 140 °- température mise en Œuvre: 120 ;
- Bitume 70-100: température fabrication 150 °- température mise en Œuvre: 130 ;
- Bitume 50-70: température fabrication 155 °- température mise en Œuvre: 140 ;
- Bitume 35-50: température fabrication 160 °- température mise en Œuvre: 150 ;

### I.2.2 : Types des bétons bitumineux

Il existe plusieurs types de béton bitumineux qui assurent différentes fonctions au sein de la chaussée, (Chetoumi M. et Mokeddem A., 2020). On retrouve :

- ✓ **Les bétons de base** : Les bétons de base apportent la rigidité au revêtement et réduisent ainsi les contraintes dans les couches inférieures. Ils sont généralement couverts d'une couche de roulement.
- ✓ **Les bétons de liaison** : Employés pour rendre la chaussée plus étanche, limiter la propagation de fissure et créer une protection thermique.
- ✓ **Les bétons de surface ou de roulement** : Garantissent le confort de roulement, l'étanchéité de la chaussée et la protection des usagers.

Les bétons bitumineux les plus employés sont la grave bitume (GB) de grosseur nominale 20 mm, le béton bitumineux (BB) type 0/14 et le béton bitumineux à module élevé (BBME) une génération développée des BB dans les vingt dernières années qui présente une excellente rigidité, une longue durée de vie et de bonnes performances mécaniques. L'épaisseur de la couche varie de 4 à 7 cm.



Figure n°4 : Béton bitumineux 0/14 dans son état de mise en place.

D'autres types d'une utilisation modérée existant dans le secteur à savoir :

**Béton bitumineux souple (BBS) :** Comme son nom l'indique, ce type de béton est fabriqué à partir de bitume suffisamment mou pour obtenir un revêtement déformable. Il présente cependant des caractéristiques mécaniques modérées.

**Béton bitumineux mince (BBM) :** la granulométrie est de 0/10 ou 0/14. Ce béton bitumineux se compresse facilement et complètement imperméable.

**Béton bitumineux drainant (BBD) :** Comme son nom l'indique, ce type de béton est drainant perméable.

### **I.2.3 : Caractéristique du mélange**

Les bétons bitumeux sont composés de granulats et de liants qui ont différentes fonctions sur la chaussée. Les choses importantes sont :

- Supporter les charges des véhicules dus au trafic ;
- Assurer un confort de roulement et une sécurité aux usagers ;
- Protéger les couches inférieures des facteurs atmosphériques extérieurs comme l'eau, le soleil et les cycles de gel-dégel ;

La satisfaction de ces missions, passe par une caractérisation (Bachand A., 2018) :

**I.2.3.1 : De la teneur en liant :** Le niveau d'enrobage des composants minéraux est directement lié à la teneur en liant, influençant ainsi la qualité des contacts entre les agrégats du squelette granulaire. Une quantité excessive de liant saturera le mélange, réduisant les efforts de contact entre les granulats; dans ce cas, seule l'adhésivité et la cohésion du liant garantissent la résistance aux déformations permanentes du squelette granulaire et donc du mélange. En revanche, une quantité insuffisante de liant pose également des problèmes : elle n'assure pas un bon enrobage des granulats, ce qui entraîne une perte d'adhésivité des composants minéraux, une augmentation de la teneur en vides et une diminution de la stabilité du squelette granulaire.

**I.2.3.2 : Du pourcentage de vides ou Compacité :** Le pourcentage de vides ou la compacité des mélanges hydrocarbonés sont des facteurs très importants dans la formulation des enrobés. Les propriétés des matériaux varient en fonction du volume du squelette granulaire, du liant (y compris éventuellement celui des additifs) et du volume d'air "libre", appelé par la suite pourcentage de vides (la teneur en vides). Il est habituellement considéré qu'une bonne compacité (faible teneur en vides) correspond à une bonne résistance aux déformations permanentes, (Bachand A., 2018).

**1.2.3.3 : Des propriétés mécaniques :** L'analyse des résultats d'essais de laboratoire peut déterminer les propriétés mécaniques des matériaux bitumineux. Ces essais, normalisés, sont effectués dans des conditions bien définies de température et de sollicitation. Ils sont fabriqués sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire ou éventuellement prélevées sur place. Les essais de caractérisation des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux sont nombreux et divers, les déployés lors de notre travail sont :

**i : Essai Duriez (NF P 98-251-1) :** La méthode d'essai Duriez, essai de compression simple type, a pour but de déterminer, à 18 °C pour un compactage donnée, la teneur à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir des résistances à la compression avec ou sans immersion des éprouvettes. Les éprouvettes sont fabriquées par compactage statique à double effet. La masse volumique apparente est ensuite déterminée sur un certain nombre d'éprouvettes pour calculer la teneur en vide. D'autres éprouvettes sont soumises à un essai de compression après conservation à 18°C dans des conditions définies :

- à l'air pour certaines éprouvettes ;
- en immersion pour d'autres éprouvettes ;

La teneur à l'eau est caractérisée par le rapport des résistances avec ou sans immersion.



Figure n°5 : Presse d'essai 'a' Duriez, 'b' Marshall (NF P 98-251-1 & 2).

**ii : Essai Marshall (NF P 98-251-2) :** L'essai Marshall, qui est toujours très utilisé au niveau international, conduit à la détermination directe de la stabilité Marshall (SM) (force maximale appliquée) ; et du fluage Marshall (FM) (valeur de la déformation en 1/10 mm correspondant à la stabilité), deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage. Elles permettent de définir le quotient Marshall SM/FM. Les éprouvettes, compactées par impact, sont immergées dans un bain d'eau à 60 °C pendant une durée de 30 à 40 min puis comprimées à vitesse constante (51 mm/min) en compression diamétrale empêchée au moyen de mâchoires hémicylindrique.

### **I.2.4 : Comportement des bétons bitumineux**

Les enrobés bitumineux ont un comportement mécanique qui dépend de leur teneur rhéologique, c'est-à-dire de leur déformation sous un chargement en fonction du temps.

Il existe quatre comportements principaux pouvant être identifiés en fonction de l'amplitude de déformation de l'enrobé et du nombre de cycles de chargement, (Bachand A., 2018).

- Comportement non-linéaire : lorsque l'enrobé est soumis à un faible nombre de chargements et à un très faible pourcentage de déformation ;
- Comportement viscoélastique linéaire : lorsque l'enrobé est soumis à quelques centaines de cycles et un faible pourcentage de déformation ( $<10^{-4}$ ) ;
- Fatigue : lorsque qu'il y a endommagement de l'enrobé à la suite de chargements de plusieurs milliers de cycles à de faibles déformations ;
- Déformations permanentes : lorsqu'il y a des déformations permanentes et irréversibles dans l'enrobé à la suite d'amplitudes de déformation près de la rupture ;

Certains éléments peuvent avoir un impact positif sur le béton bitumineux, tandis que d'autres peuvent avoir un impact négatif .(Prithvi et al 2009) & (Imad et al 2008).

Ci-dessous, quelques exemples ayant un impact positif :

- Utilisation de granulats de haute qualité : L'utilisation de granulats de haute qualité peut améliorer la résistance, la durabilité et les performances du béton bitumineux ;
- Qualité du bitume : La qualité du bitume peut améliorer l'adhérence, la résistance à l'usure et la durabilité du béton bitumineux ;
- Compactage : Un compactage adéquat peut améliorer la densité, la résistance et la durabilité du béton bitumineux ;
- La conception du mélange : Une conception appropriée du mélange, en termes de proportions des différents composants impacte les performances du mélange ;

Et négatives à savoir :

- Utilisation de granulats de qualité médiocre : L'utilisation de granulats de mauvaise qualité peut entraîner une diminution de la résistance, de la durabilité et des performances du béton bitumineux ;
- Qualité médiocre du bitume qui peut entraîner une mauvaise adhérence, une résistance à l'usure faible et une durabilité médiocre du béton bitumineux ;
- Compactage insuffisant : Un compactage inadéquat peut entraîner la formation de vides dans le béton bitumineux, réduisant ainsi sa densité, sa résistance et sa durabilité ;
- Conception du mélange médiocre : Une mauvaise conception du mélange peut entraîner des propriétés inadéquates du béton bitumineux en termes de résistance, de durabilité et de performance ;

### I.2.5 : Méthode de formulation des bétons bitumineux

Objectifs recherchés, l'enjeu du chantier et l'importance des sollicitations auxquelles sera soumis l'enrobé, constituant les données d'entrées pour la détermination du niveau d'épreuve de la formulation. De plus l'enrobé sera sollicité mécaniquement, plus le niveau d'épreuve de formulation devra être élevé.

Le tableau ci-dessous définit les approches pratiques à ce jour :

Tableau n°1 : Epreuves de formulation des bétons bitumineux (Mahoub M. et al., 2015) ;

| Niveau de l'épreuve de formulation | Teneur en eau NF P 98-251-1 & NF P 98-251-2 | Presse à cisaillement giratoire PCG NF P98-52 | Orniérage NF P98-260-2 | Module complexe (E*) NF P98-261-1 | Résistance à la fatigue NF P98-261-1 |
|------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| Niveau 1                           | X                                           |                                               |                        |                                   |                                      |
| Niveau 2                           | X                                           | X                                             | X                      |                                   |                                      |
| Niveau 3                           | X                                           | X                                             | X                      | X                                 |                                      |
| Niveau 4                           | X                                           | X                                             | X                      | X                                 | X                                    |

Formuler un béton bitumineux est de déterminer le meilleur mélange taux de bitume et fraction granulaire dans un objectif :

- Un squelette granulaire ayant un pourcentage des vides optimum ;
- Performance mécanique appropriées tel que la résistance à la déformation permanente ;

L'élaboration algérienne repose sur la caractérisation des éléments et sur les résultats des essais Duriez et Marshall pour les matériaux granulaires. Une formule qui donne un meilleur compactage du mélange et qui pourrait donner une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné est sélectionnée.

Les granulats sont sélectionnés entre 0/3, 3/8 et 8/15.

#### I.2.5.1 : Fuseau granulaire : Conformément au tableau n°2.

Tableau n°2 : Fraction granulaire pour un BB 0/14 (Bendimerad K. et al., 2017).

| Passant au tamis [mm] | BB 0/14   |
|-----------------------|-----------|
| 20                    | 100       |
| 14                    | 94 == 100 |
| 10                    | 72 == 84  |
| 6.3                   | 50 == 66  |
| 2                     | 28 == 40  |
| 0.08                  | 7 == 10   |

**I.2.5.2 : Teneur en bitume :** On appelle la teneur en bitume, la masse du liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage, pour cela on utilise la formule suivante :

$$\text{Teneur en liant} = \alpha \times k^5 \times (\Sigma)^{1/2} \dots\dots (\text{Harizi I., 2012}).$$

**k :** Module de richesse pouvant prendre les valeurs suivantes :

- 2 à 2.6 pour les graves bitumes ;
- 3.3 à 3.9 pour un béton bitumineux ;

$\alpha$  : Coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats d'où ;

$$\alpha = 2.65 / \text{MVRg} \dots \dots (\text{Harizi I., 2012}).$$

**MVRg** : Masse volumique réel des granulats ;

$\Sigma$  : Surface spécifique du granulat calculée par la formule ;

$$100.\Sigma = 0.25 G + 2.3 S + 12 s + 135 f \dots \dots (\text{Harizi I., 2012}).$$

- G : % en poids des éléments de dimension supérieur à 6.3 mm ;
- S : % en poids des éléments de dimension comprise entre à 6.3 et 0.315 mm ;
- s : % en poids des éléments de dimension comprise entre à 0.315 et 0.08 mm ;
- f : % en poids des éléments de dimension inférieure à 0.315 mm ;

**I.2.5.3 : Pourcentage des vides** : La compacité est une conséquence directe de la formulation.

$$C = 100 - \% \text{Vides (V : Volume des vides)} \quad (\text{Chetoui M. et al., 2020}).$$

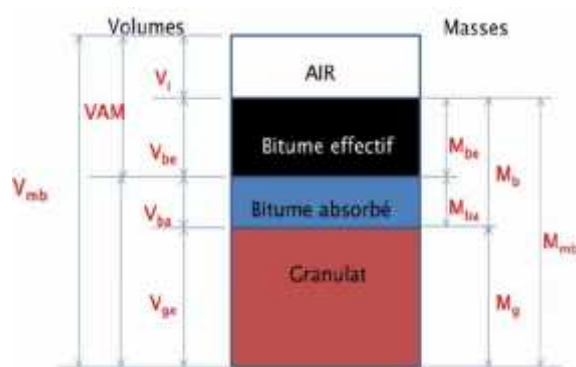


Figure n°6 : Diagramme de phase volumique d'enrobé (Bachand A., 2018).

### I.3 : Comportement viscoélastique linéaire des mélange hydrocarbonés

Dans un enrobé bitumineux, la fréquence de chargement ainsi que la température ont un effet sur son module de rigidité et son module complexe. Le module complexe ( $E^*$ ) est l'expression de la rigidité d'un matériau viscoélastique sous **chargement cyclique**, varie également en fonction de la température et déterminé avec un essai soumettant l'enrobé bitumineux à des sollicitations sinusoïdales sous différentes fréquences et températures, tout en restant dans le domaine des petites déformations (Bachand A., 2018).

Le  $E^*$  est un nombre complexe composé d'une partie réelle ( $E_1$ ) et d'une partie imaginaire ( $E_2$ ), tel que présenté à l'Equation I.1. Le  $E^*$  peut également se décomposer en deux

paramètres sous sa forme vectorielle, soit son module ( $|E^*|$ ) (norme du vecteur) et ( $\delta$ ) et son argument (angle du vecteur) (Bachand A., 2018).

- Le  $|E^*|$  est le rapport entre la contrainte totale (maximale) et la déformation totale (maximale), bien qu'elles ne se produisent pas en même temps.
- Le ( $\delta$ ) représente le décalage dans le temps entre la contrainte et la déformation. Il varie de  $0^\circ$  pour un matériau purement élastique à  $90^\circ$  pour un matériau purement visqueux.

#### I.4 : Béton bitumineux a module élevé (BBME)

Les BBME sont obtenus à partir d'un mélange de bitume pur ou modifié, de granulats et additifs tels que poudre d'asphalte ou fibre, fabriquer dans une centrale d'enrobage. Ils sont destinés à la réalisation des couches de liaison et de roulement pour un trafic lourd et rapide.

Les granularités sont identiques à celles des bétons bitumineux ordinaires. La teneur en bitume est généralement plus au moins élevée que celle des enrobés classiques.



Figure n°7 :Constituant des bétons bitumineux a module élevé.

Dans un objectif de constituer des enrobés permettant de mieux répondre aux attentes en matière de résistance à la fatigue, stabilité et rigidité face à l'accroissement des sollicitations lourdes.

Deux types de bétons bitumineux à module élevé sont distingués en trois classes en fonction de leur module de rigidité « E » et le pourcentage d'ornièrè :

- Béton bitumineux à module élevé 0/10 mm (BBME 0/10) ;
- Béton bitumineux à module élevé 0/14 mm (BBME 0/14) ;
  - Classe 1 : % ornièrè à 30000 cycles < 10 %,  $E \geq 9000\text{MPa}$  ;
  - Classe 2 : % ornièrè à 30000 cycles < 7.5 %,  $E \geq 11000\text{MPa}$  ;
  - Classe 3 : % ornièrè à 30000 cycles < 5%,  $E \geq 11000\text{MPa}$  ;

**Le module de rigidité 'E'** est le module déterminé lors d'essai résistance à la fatigue (NF EN 12697-26 A ou C), s'effectue sur une éprouvette de forme trapézoïdale qui est testée en flexion deux points. La déformation considérée est la déformation maximale subie par la fibre extrême de l'éprouvette lors d'une sollicitation sinusoïdale à amplitude de flèche constante. Cette déformation est calculée à partir de la flèche en tête en supposant le matériau linéaire et homogène. La durée de vie d'une éprouvette est donc le nombre de cycles correspondant à un module de rigidité égal à la moitié du module initial de cette même éprouvette (Harizi I., 2012).

Ce pendant et lors des essais d'orniérage **le pourcentage d'ornière** est déterminé d'une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence : 1 Hz, charge : 5 kN, pression : 6 bars), dans des conditions sévères de température (60 °C) (Bachand A., 2018).

#### **I.4.1 : Historique d'apparition**

A la fin des années 1970, les problèmes d'apparition des ornières sur les enrobés dus à l'augmentation du nombre des poids lourds et de leurs agressivité ont poussé pour la recherche d'un enrobe plus rigide. Cela a été possible grâce à l'utilisation de bitume plus dur ou l'incorporation des nouvelles substances dans la composition des mélanges.

L'enchaînement des dates suivantes donne une idée sur l'évolution des techniques d'enrobés et l'apparition des EME et BBME (Chettouf L., 2014) :

- 1912 : Première application significative des enrobés ;
- 1924 : Utilisation des bitumes de raffinage ;
- A partir de 1945 : l'utilisation des enrobés a connu un essor considérable avec la mécanisation de la mise en œuvre et l'évolution de l'agressivité du trafic ;
- Années 1960 : Les techniques d'enrobés ont commencé à être codifiées (Directives) ;
- 1968 : Apparition de la GB et du BBSG ;
- 1975 : Les bitumes modifiés feront leur entrée, ces bitumes seront normalisés en 2003 ;
- 1982 : Utilisation du bitume dur 10/20 en Europe pour enrobé en couche de base (EME) qui sera généralisé en 1988, les bitumes durs seront normalisés en 2003 ;
- 1990 : Les enrobés feront l'objet de normalisation en France ;
- 1991 : Edition de la norme française sur l'EME ;
- 1993 : Edition de la norme française sur le BBME ;
- 2007 : Apparition des normes européennes pour les enrobés à module élevé ;

#### I.4.2 : Caractéristique des bétons bitumineux a module élevé

- ✓ **Rigidité** : Les BBME utilisent des liants et des additifs qui leur donnent des modules de rigidité bien plus élevés que ceux des enrobés traditionnels. Cela réduit les contraintes du trafic transmises au sol, ce qui permet de diminuer l'épaisseur de la chaussée tout en maintenant la même durée de vie.

Les résultats des chercheurs étudient l'influence de l'ajout d'additifs dans des enrobés, ont montré que l'ajout augmente la rigidité de l'enrobé jusqu'à une valeur optimale en verre de 15% (Sajed & Shafabakhsh 2014).

Airey et al. (2004), ont également fait l'étude du module de rigidité suivant la méthode ITSM. D'abord, les résultats ont montré que l'enrobé avec ajout, ne contenant pas de chaux, avait une rigidité très semblable, quoique légèrement plus importante.

- ✓ **Résistance à la fatigue** : La sélection des liants et des additifs, ainsi que le réglage approprié de leur concentration, garantissent des niveaux de résistance très élevés à la fatigue et garantissent ainsi la durabilité de la chaussée en fonction de tous les types de trafic.

Selon Lachance-Tremblay et al. (2016), certaines recherches démontrent que l'additif a un effet concret sur ce comportement et que la nature des granulats a peu d'influence sur la résistance à la fatigue.

D'autres études montrent toutefois une amélioration de la résistance en fatigue de l'enrobé à module élevé (Arabani et al. 2012) expliquent qu'un mélange avec 15% d'additif type verre concassé améliore la résistance à la fatigue.

- ✓ **Stabilité** : basée sur l'utilisation de granulats formant un squelette minéral très frottant, les BBME présentent une excellente résistance à l'orniérage. Ils sont ainsi particulièrement adaptés aux itinéraires et zones très sollicités.

Toutefois, Sajed & Shafabakhsh (2014) montrent que l'ajout d'additif augmente la résistance à l'orniérage jusqu'à une teneur optimale de 15%. Cette amélioration des performances serait due à la plus grande angularité des particules et à la salification du squelette granulaire.

Le tableau n°3 met en relief les propriétés type des bétons bitumineux à module élevé.

Tableau n°3 : Propriétés type des bétons bitumineux à module élevé (Chettouf L., 2014).

| Produit | Norme       | Classification     |               | Epaisseur [cm] |      |
|---------|-------------|--------------------|---------------|----------------|------|
|         |             | Classe             | Granulométrie | Min            | Moy. |
| BBME    | NF P 98-141 | Classe n°1, 2 Ou 3 | 0/10          | 4              | 6    |
|         |             |                    | 0/14          | 5              | 8    |

### I.4.3 : Procédé d'obtention des liants pour un mélange type BBME

On peut obtenir un BBME en modifiant le liant utilisé avec des additifs chimiques ou en ajoutant des polymères tels que des granulés au bitume dans le mélange. Cette ajout entraîne une modification de la consistance du mélange et donc de plusieurs de ses propriétés. (Chettouf L., 2014).

**L'apport** ou **le Rôle** des ajouts est la modification des propriétés du bitume tous en modifie sa structure chimique telle que la viscoélasticité et la susceptibilité thermique.

L'adjonction de ces additifs résultant d'elle des liants composés type élastomère, caoutchouc ou bien les plus courants les **liants plastomères** (bitume + polymère).

Les couples bitume / polymère sont :

- Pour des teneurs en polymères inférieures à 5 %, les modifications des propriétés sont principalement dues à l'augmentation de la teneur en asphaltènes dans la phase bitumineuse.
- Pour des teneurs élevées en polymères, le polymère est plastifié par une fraction des maltènes du bitume, et les propriétés du liant dépendent du polymère choisi. On observe alors une diminution de la pénétrabilité et une forte augmentation de la température de ramollissement (bille et anneau).

Et pour effet conditionné par le choix du type et d'origine du bitume :

- L'addition de PIB aux bitumes routiers en diminue la fragilité à froid ;
- L'utilisation conjointe de PIB et d'EVA permet d'améliorer simultanément le comportement à haute et basse température ;
- A l'exception des liants PIB-EVA, les mélanges bitumes copolymères sont rarement stables au stockage. (Sauf pour des teneurs <3% EVA et pour des liants à faible teneur en asphaltènes). Il est nécessité d'agir ou de réticuler le liant ;



Figure n°8 : 'a' Le polyisobutylène et 'b' Ethylène-vinyle-acétate (Chettouf L., 2014).

Un **polymère** se construit par synthèse chimique de molécules de base de carbone et d'hydrogène, d'où elle est née la matière plastique.

Les familles des polymères citées ci-dessus sont définies comme suit :

- ✓ **PIB : Le polyisobutylène ou polyisobutène** est un homopolymère saturé, peu réactif (faible oxydabilité), issu du monomère isobutylène. Cette polyoléfine a pour formule -  $[\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)_2]_n-$ . Elle est d'abord produite en 1931 par l'unité BASF d'IG Farben sous le nom commercial Oppanol B. Les butyles présentent une imperméabilité remarquable aux gaz. Ainsi, ils sont surtout utilisés pour la fabrication de chambres à air ou du revêtement intérieur de pneus tubeless (sans chambre), et de vessies. Les applications secondaires sont très variées (Chettouf L., 2014).
- ✓ **EVA : Ethylène-vinyle-acétate** est le copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle. Il s'agit d'un matériau très élastique, il est trois fois plus souple que le polyéthylène basse densité, montrant l'allongement en traction de 750%, avec un pic de température de fusion de 96 ° C. Ce matériau présente de bonnes propriétés de barrière, ténacité à basse température, résistance à la fissuration, les propriétés imperméables à l'eau adhésive thermo fusible, et la résistance aux rayons ultraviolets. EVA a peu ou pas d'odeur et est en concurrence avec caoutchouc et en vinyle dans de nombreuses applications.

#### I.4.4 : Fabrication et mise en place

La **fabrication** commence par la vérification de la fiabilité de la centrale de fabrication moyennant l'examen du niveau d'équipement de cette dernière et l'étalonnage des systèmes de pesage pondéraux ou volumétriques et des systèmes de relevé des températures.

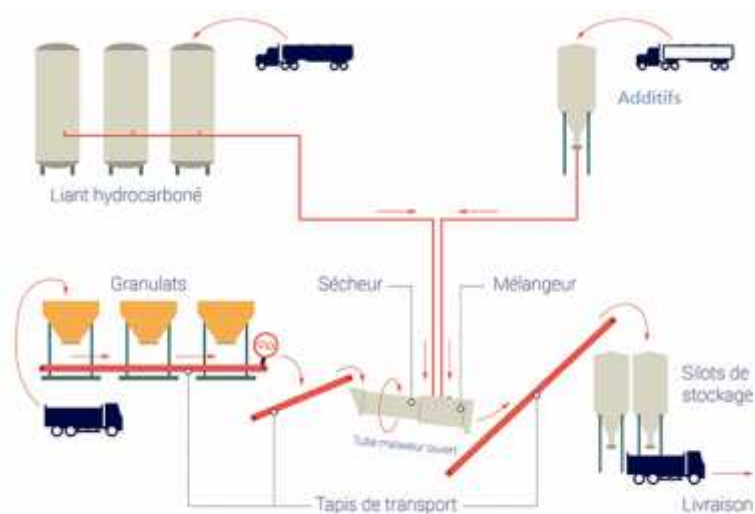


Figure n°9 : Schématisation du circuit de fabrication des BBME. (Image Web).

Après réception de la qualité des matières premières (granulats et bitumes), la fabrication de L'enrobés peut être entamée et les éléments suivants doivent être examinés :

- ✓ **Température du liant** : Maximum toléré pour le bitume est 180°C ;
- ✓ **Température de fabrication** : Voir tableau n°4 ;

Tableau n°4 : Température de fabrication (Chettouf L., 2014 ).

| Catégorie du bitume | Température de fabrication [°C] |
|---------------------|---------------------------------|
| 10/20 & 15/25       | 160/180                         |
| 20/30               | 160/180                         |
| 40/50               | 150/170                         |

- ✓ **Granulométrie du mélange** : Voir tableau n°5 ;

Tableau n°5 : Ecart moyen granulométrie du mélange (Chettouf L., 2014 ).

|                   | Teneur en liant | %< 63 $\mu$ m | %<2 mm    | %< D/2 mm | %<D mm    |
|-------------------|-----------------|---------------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Ecart Moy.</b> | $\pm 0,3\%$     | $\pm 1\%$     | $\pm 3\%$ | $\pm 4\%$ | $\pm 4\%$ |

**La mise en œuvre** des enrobés joue un rôle essentiel dans les caractéristiques nécessaires pour une couche de chaussée. Une fois que le matériel de mise en œuvre et de transport des enrobés a été reçu, les planches d'essai et de référence ont été réalisées, les caractéristiques à vérifier sont les suivantes (Sidibe A. et Hamadi H., 2020) :

- Préparation du support ;
- Reprofilage ou fraisage préalable ;
- Exécution d'une couche d'accrochage ;
- Etalage des enrobés : Pour ce genre d'enrobés, il est recommandé d'avoir un finisseur avec table à haut pouvoir de pré-compaction et cela afin d'optimiser le temps de compactage en fonction de la température requise ;
- Epaisseur : C'est un des paramètres importants dans la réussite de la technique des enrobés à module élevé vu que les épaisseurs au dimensionnement sont déjà faibles et qu'une légère sous épaisseur entraîne un sous dimensionnement de la structure du corps de chaussée ;
- Compactage : L'objectif étant de réduire le pourcentage de vides du matériau afin d'augmenter sa stabilité, ses performances mécaniques et la durée de vie ;

### I.5 : Structure étudiée (Chaussées Souples)

Une chaussée souple comprend un ensemble des couches, utilisées pour la construction sur le sol support. Son rôle principal est de répartir les charges du trafic en les amortissant progressivement afin que les efforts transmis au sol support soient assez faibles.

Ce type de structure est actuellement la plus couramment utilisée dans le monde, y compris dans notre pays.

La structure type d'une chaussée souple est illustrée comme suit :

- ✓ **La couche de surface** : La couche de surface est constituée de la couche de roulement, le cas échéant, d'une couche de liaison entre la couche de roulement et les couches d'assise. La couche de roulement est la couche supérieure qui subit directement les sollicitations du trafic ainsi que les variations thermiques. Elle doit donc posséder des caractéristiques particulières pour assurer une bonne adhérence entre le pneu et la chaussée tout en résistant aux efforts tangentiels, à l'orniérage, aux fissurations thermiques, à l'eau et même aussi à la fatigue si les couches ne sont pas bien collées. L'enrobé composant la couche de roulement doit donc être un enrobé de très haute qualité comme les bétons bitumineux (BB) ou les bétons bitumineux à module élevé (BBME). Ces enrobés sont composés de granulats peu sensibles au polissage et à l'humidité et dont la granulométrie doit être hautement maîtrisée et d'un bitume afin de répondre aux critères d'usage de la couche de roulement.  
Le coût de revient de ces couches de roulement est généralement élevé , donc il faut par conséquent réduire leurs épaisseurs au minimum (5 à 7 cm) pour des raisons économiques. L'utilisation d'une couche de liaison de 6 à 10 cm, en enrobé bitumineux, entre la couche de roulement et la couche d'assise, facilite l'obtention d'un profil longitudinal confortable et sécuritaire pour les utilisateurs.
- ✓ **Les couches d'assise** : Les couches de base et de fondation composent ensemble la couche d'assise qui joue un rôle structural important d'amortissement et de répartition des charges verticales induites par le trafic afin de maintenir les déformations à ce niveau dans les limites admissibles (Chetoumi M. et Mokeddem A., 2020).  
Les couches de fondation peuvent être composées de matériaux granulaires non traités (graves non traitées « GNT » sélectionnées selon un fuseau granulaire distinct).  
Les couches de base sont couramment construites avec des matériaux granulaires traités au liants hydrocarbonés (grave-bitume). D'autres liants comme la chaux, les pouzzolanes, les cendres volantes ou d'autres, sont rarement utilisés.
- ✓ **La couche de forme** : La couche de forme a un rôle structural dans la chaussée à court terme pour permettre la circulation des engins pendant la phase de construction, comme à long terme, afin réduire les efforts transmis au sol support on garantit un certain niveau de portance.

Cette couche est généralement composée de matériaux granulaires non traités comme peut également être traitée à la chaux ou au ciment afin d'augmenter sa capacité structurale (Chetoumi M. et Mokeddem A., 2020).

- ✓ **La partie supérieure des terrassement** : La partie supérieure des terrassements (PST) désigne la zone supérieure des terrains en place ou rapportés, elle fait environ 1m d'épaisseur.

La plateforme de la PST est l'arase de terrassement dit AR.

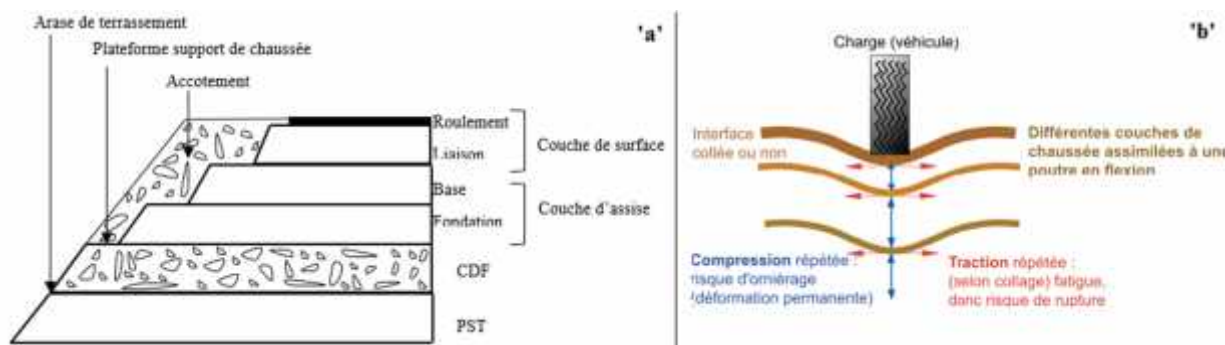


Figure n°11 : 'a' Coupe type d'une structure de chaussée souple, 'b' Schéma de fonctionnement d'une structure de chaussée sous application d'une charge roulante (Mahoub M.et al., 2015).

### I.5.1 : Clarification des sollicitations subisse par la structure de chaussée

Les structures routières sont soumises à des sollicitations externes dues au trafic de véhicules et aux agressions climatiques. Ces sollicitations, couplées à d'autres phénomènes comme le vieillissement du bitume, la présence d'eau ou de sels de déglacage, mèneront à la dégradation des revêtements routiers (Mahoub M.et al., 2015).

**I.5.1.1 : Sollicitations de trafic** : Il s'agit plus particulièrement des sollicitations induites par les passages des véhicules lourds qui engendrent des effets dynamiques ou statiques.

La figure 11'b' illustre schématiquement les effets d'un passage d'une charge dans les différentes couches de la structure routière, la chaussée est assimilée à un assemblage de poutres, qui peuvent être collées ou non, et qui subissent des efforts dans plusieurs directions. Ces sollicitations peuvent mener à des dégradations par fatigue et à l'accumulation de déformations permanentes (orniérage), mais aussi au polissage des granulats en couche de roulement, à la perte de granulats (arrachement) ou à l'apparition de trous dans le revêtement (nid de poule).

**I.5.1.2 : Sollicitations climatiques :** Tout au long de sa vie, une chaussée est exposée à des conditions climatiques différentes et variées. C'est à la température, dans le comportement de la chaussée, que revient le rôle prépondérant, et ce particulièrement pour les chaussées souples.

## I.5.2 : Dégradation et modalité de mesure

- ✓ **Fissuration :** Définie comme étant une rupture du revêtement parallèle à la direction de la route et située dans les pistes de roues.

Une des difficultés dans l'évaluation de la fissuration est de bien définir l'ouverture et la sévérité de chaque fissure. Dans le cas de fissures multiples comprenant une fissure principale et des fissures secondaires, la sévérité de la fissuration détectée est égale à la sévérité de la fissure principale. (Sidibe A. et Hamadi H., 2020).

- ✓ **Orniérage :** Est la dépression longitudinale simple située dans les pistes de roue. La forme transversale de la dépression correspond à celle d'une courbe parabolique très évasée.

Chaque mesure d'orniérage correspond à la hauteur maximale en millimètres mesurée entre une règle de 1,8 m et la surface du revêtement. Les mesures ponctuelles sont prises par exemple à tous les 10 m dans chaque piste de roue.

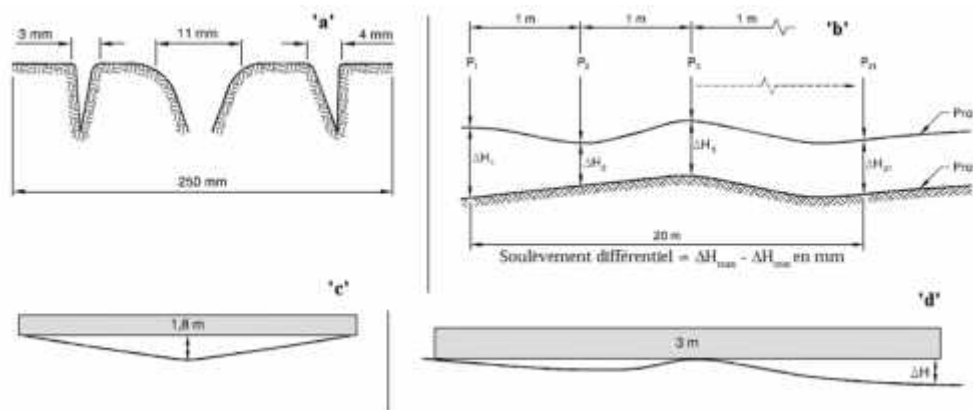


Figure n°12 : 'a' Fissuration, 'b' Soulèvement différentielle, 'c' Orniérage et 'd' Affaissement (Mahoub M. et al., 2015).

- ✓ **Affaissement :** Distorsion du profil en bordure de la chaussée ou au voisinage de conduites souterraines.

La règle de 3 m simule le prolongement théorique du profil existant. Le H mesuré donne le niveau de sévérité.

- ✓ **Soulèvements différentiels :** Décrit dans la littérature sous forme d'un gonflement localisé de la chaussée, aussi bien parallèle que perpendiculaire à l'axe de la chaussée.

Pour chaque segment successif de 20 m, on détermine d'abord la valeur du soulèvement de chacun des points, on retient ensuite l'écart maximal et l'écart minimal entre le point repère et les points de mesure. Le soulèvement différentiel est égal à la différence entre l'écart maximal et l'écart minimal.

### **I.6 : Les déchets plastique et les bétons bitumineux**

Ces dernières décennies ont été marquées par des avancées technologiques significatives et une urbanisation rapide. Cependant, ces progrès exercent une pression considérable sur l'environnement. Pour garantir un développement durable, nos sociétés doivent mettre en place des stratégies efficaces, notamment en matière de gestion des déchets industriels et domestiques. Dans ce cadre, diverses solutions ont été proposées et testées pour valoriser les déchets plastiques.

Tout d'abord, bien qu'il existe une multitude de substances plastiques, seulement sept d'entre elles sont principalement utilisées : le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC), le polyuréthane (PUR), le poly(téréphtalate d'éthylène) (PET), le polystyrène (PS) et le polystyrène expansé (EPS). En raison de leur polyvalence et de leurs qualités, la production mondiale de résines polymères et de fibres a atteint 382 millions de tonnes métriques en 2015 (Geyer et al., 2017).

Ces matériaux sont largement employés dans des secteurs clés tels que l'emballage, la construction, les transports, les énergies renouvelables, les dispositifs médicaux, entre autres. Selon la Fédération de la Plasturgie et des Composites (Poivey, 2015), le secteur agroalimentaire et des produits ménagers consomme 19% des matières plastiques, suivi par l'industrie automobile avec 17% et le secteur de la construction avec 12%. En 2015, environ 41% de tous les plastiques, à l'exclusion des fibres, ont été utilisés dans l'emballage, principalement composé de PE (23%), de PET (10%) et de PP (8%) (Geyer et al., 2017).

Selon Geyer et al. (2017), l'histogramme ci-dessous présente les quantités de plastiques primaires, qui sont produits à partir de matériaux vierges, ainsi que les déchets produits en 2015. En premier lieu, les matériaux utilisés sont principalement composés de Polyester, Polyamide et Acrylique (PP & A).

Le PET (fibres incluses) est le polymère le plus utilisé au monde avec 116 millions de tonnes métrique, soit 30,3 % de la production mondiale de résines, suivi par le PET (fibres incluses) avec 19,4 % et le PP avec 17,8 % La majeure partie des déchets produits provient de ces trois

polymères. Les déchets en PE, PET et PP représentent respectivement 34%, 21% et 19% de la totalité des déchets (Geyer et coll., 2017)

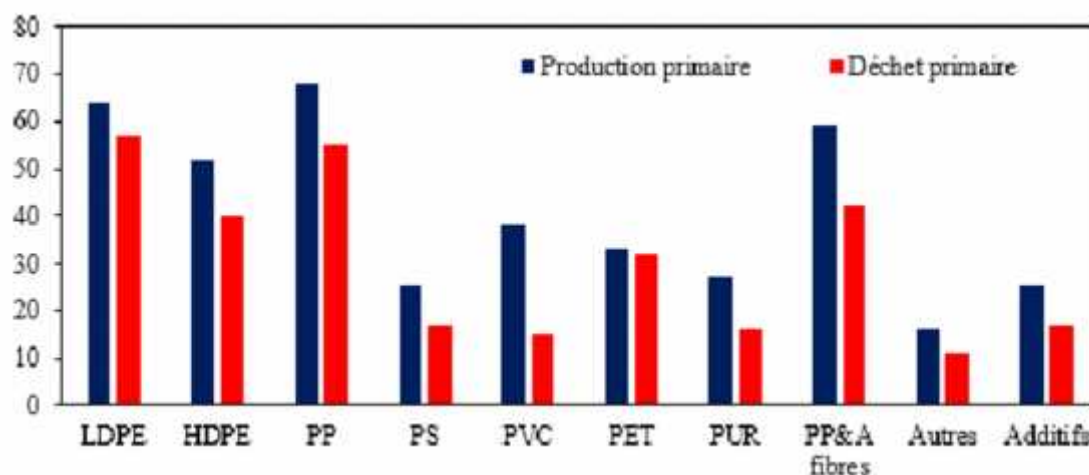


Figure n°13 : Production mondiale de plastiques primaires et de déchets primaires (en millions de tonnes métriques) en 2015 selon le type de polymère/additif (Geyer et al., 2017).

Pour adresser les défis associés à l'utilisation des matières plastiques et valoriser les déchets qui en découlent, diverses technologies sont envisageables. En effet, les matières plastiques revêtent une importance cruciale dans l'économie circulaire en préservant les ressources à chaque étape de leur cycle de production.

Les plastiques sont toujours des ressources précieuses qui peuvent être transformées en matières premières ou en énergie à la fin de leur vie. La valorisation matière est l'exploitation d'un déchets pour la fabrication de nouveaux biens. Réutilisation, recyclage mécanique ou chimique :

**Le recyclage mécanique** consiste à transformer un déchet en des granulés après une série de traitements tels que le tri, la séparation des déchets, le lavage en vue d'élimination de la saleté et des contaminants, le broyage et le concassage. Ce type de recyclage est simple, mais il entraîne une perte des propriétés des polymères à chaque cycle (Dhahak A., 2019)

**Le recyclage chimique** à transformer les polymères par la chaleur ou des agents chimiques en hydrocarbures pouvant être réutilisés dans la production de nouveaux polymères ou comme matières premières chimiques. Actuellement, les méthodes chimiques utilisées incluent la dépolymérisation (glycolyse, méthanolyse, hydrolyse et aminolyse) ainsi que des procédés thermochimiques comme la pyrolyse, l'hydrocraquage et la gazéification (Dhahak A., 2019).

### **1.6.1 : Algérie est les enjeux environmental des plastiques**

Nommé comme étant le deuxième importateur de matière brute de plastique en Afrique et moyen Orient, En 2018, l'Algérie importe près de deux milliard de dollars de matières plastique sous forme primaire, ce qui représente 95% de ses besoins nationaux.

Les importations de 'technologie plastique' ont également connu une forte augmentation. Depuis 2017, l'Algérie est le premier importateur de cette technologie en Afrique et le deuxième au Moyen-Orient avec un montant de 185 millions d'euros par an.

Au cours des dix dernières années, la consommation de plastique en Algérie a augmenté d'environ 9% par an. Pres de 60% de cette consommation est représenté par les emballages, 20% par la construction et le reste par diverses industries (AFTP ;2019).

Selon le secrétaire général de l'association des fabrications de tubes plastiques (AFTP), le manque de recyclage fait perdre au moins 8 milliards de dinars algériens par an.

### **1.6.2 : Le poly téréphtalate d'éthylène (PET)**

Le PET, comme toutes les substances plastiques, concentre de nombreux enjeux environnementaux, liés à l'utilisation des ressources fossiles pour sa fabrication, à la production de déchets et à l'émission de CO<sub>2</sub>. D'une part, 1,9 kg de pétrole brut sont nécessaires pour produire 1 kg de PET (KRONES-Meta Pure, 2018). Pour la production des fibres en polyester, ce polymère consomme environ 70 millions barils de pétrole par an (Wedressfair, 2018). D'autre part, l'incinération de 1 kg de PET produit 1,72 kg de CO<sub>2</sub>, alors que le recyclage de la même quantité de PET évite l'émission de 2,7 kg de CO<sub>2</sub> (Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement (IBGE), 2008). Par conséquent, le recyclage semble être la meilleure voie de valorisation qui respecte l'environnement (Lazarevic et al., 2010). Néanmoins, cette méthode n'est applicable que sur des déchets propres, non dégradés et homogènes, ce qui limite son utilisation. Bien que ces plastiques puissent être réparés ou réutilisés plusieurs fois, ils finissent par devenir des déchets non recyclables, ouvrant ainsi la boucle de l'économie circulaire. Les procédés thermochimiques constituent une autre voie de valorisation des déchets plastiques. Contrairement au recyclage matière, ces procédés peuvent être utilisés même si le PET est impur (mélanges avec d'autres polymères, charge minérale) (Dhahak A., 2019).

**I.6.2.1 : Définition :** Le PET ou poly (téréphtalate d'éthylène)  $(C_{10}H_8O_4)_n$  est un polymère linéaire de la famille **des thermoplastiques**. Il est composé d'une unités répétitives comme représenté sur la figure n°... (Mark, 2007). Breveté par Nathaniel Wyeth en 1973 (Park and Kim, 2014).

Un **thermoplastique** est une famille de plastique qui, sous l'effet de la chaleur, fond ou ramollit suffisamment pour pouvoir être remodelée un nombre infini de fois, et ce, sans que ses propriétés mécaniques soient modifiées. Les **thermoplastiques** ont la propriété de ramollir à la chaleur et de durcir au froid.



Figure n°14 : Structure PET. (Image Web).

**I.6.2.2 : Propriété des PET :** Les PET présentent des propriétés mécaniques liées à leurs masses molaire pour les deux branches Amorphe ou semi cristalline. En effet, une masse molaire de 15 000 à 25 000 g/mol est suffisante pour les applications textiles, et une masse supérieure à 30 000 g/mol pour les applications d'injection et de moulage (Dini et al., 2014)

Les propriétés thermiques et chimiques d'un PET cristallin sont satisfaisantes. La température de transition vitreuse varie en fonction de la structure de la chaîne : elle est égale à 69 °C pour l'état amorphe et à 81 °C pour l'état semi-cristallin. Le PET est très résistant aux acides, aux bases, aux alcools, aux graisses et aux huiles. Elle lui fournit également d'excellentes capacités de protection contre les gaz (Thomas et Visakh, 2011)

Cependant, un PET type amorphe se caractérise par un module d'élasticité plus au moins inférieure par rapport à un PET cristallin mais d'une ductilité plus large.

**I.6.2.3 : Domaine d'application des PET et leur recyclage :** Étant donné l'omniprésence et l'importance du PET dans la vie quotidienne et l'industrie, en raison de sa facilité de production, de sa malléabilité, de sa légèreté et de sa diversité, ce polymère est principalement utilisé dans l'industrie textile sous forme de fibres synthétiques (représentant plus de 60% de la production mondiale de PET) et dans l'emballage alimentaire, notamment sous forme de bouteilles (environ 30% de la production) et de films.

En 2018, le marché mondial des bouteilles en PET a atteint 17,5 millions de tonnes, enregistrant une croissance d'environ 2,3% entre 2011 et 2018.

La croissance de la production de PET entraîne inévitablement une augmentation des déchets, ce qui pose des défis environnementaux et économiques en raison de leur faible biodégradabilité.

Pour remédier à cette situation et valoriser ces déchets, diverses méthodes de recyclage primaire et secondaire sont envisagées.

**Le recyclage primaire** est la réintroduction d'un déchet dans une extrudeuse afin d'obtenir un produit utilisé pour les mêmes applications que le plastique d'origine. Cette méthode, appelée recyclage en boucle fermée, ne peut être utilisée qu'avec des déchets quasi-vierges. La production de bouteilles à partir d'un mélange de PET recyclé et de PET vierge est un exemple de recyclage primaire .

Cependant, étant donné que divers polymères et autres matériaux tels que le papier, les pigments, les métaux et les adhésifs sont utilisés comme matériaux d'emballage en plastique, le recyclage par ce procédé est difficile. Bien que cette méthode présente les avantages de la simplicité et du faible coût, elle n'est pas une méthode très utilisée (Dhahak A., 2019).

**Le recyclage secondaire** est une méthode de recyclage mécanique qui a été commercialisée dans les années 1970. Cette méthode transforme un déchet en des granulés après une série des traitements tels que le tri, la séparation des déchets, le lavage en vue de l'élimination de la saleté et des contaminants, le broyage et le concassage (Dhahak A., 2019).

Ce type de recyclage est simple, mais il entraîne une dégradation des propriétés du polymère à chaque cycle. Par exemple, la ductilité du PET diminue d'environ 310 à 218 % après un cycle de recyclage mécanique, et atteint 2,9 % après le troisième cycle. Par conséquent, cette méthode de recyclage n'est pas adaptée à la fabrication de produits nécessitant des normes de qualité élevées. Environ 50 à 77 % du PET recyclé est transformé en fibres utilisées dans la production de matériaux mixtes comme les tapis. Les bouteilles en PET sont généralement fabriquées avec des poids moléculaires relativement élevés, et même si le processus de recyclage réduit la longueur des chaînes, il fournit toujours un matériau de poids moléculaire moyen suffisamment élevé pour la production de fibres.

### I.6.3 : Les PET et les béton bitumineux

Un mélange bitumineux composite est principalement composé de granulats de différentes tailles, d'un liant bitumineux, d'espaces vides et éventuellement d'additifs améliorant les propriétés techniques ou de performance. Des déchets plastique tels que des granulés de polyéthylène et de polypropylène ont été utilisés comme additifs dans des mélanges d'asphalte denses et perméables (Kamada et Yamada, 2002) résultant que cet ajout a permis d'améliorer la résistance à l'affaissement, à la fatigue et à l'humidité dans les mélanges denses. En revanche, la résistance à l'affaissement, à l'huile et à l'abrasion a été améliorée pour les mélanges bitumineux perméables.

Dans la même vision, d'autres études spécifiques ont été menées pour évaluer les effets de ces interactions sur les propriétés du béton bitumineux et pour optimiser les formulations en conséquence. (Garcia et al 2016) (Ahmadinia et al 2011) (Naskar et al 2010).

Idem pour Sidibe A. et Hamadi H., 2020, qui capitalisent que l'utilisation des fibres PET améliore le comportement du béton bitumineux. Cette amélioration se traduit par une augmentation du quotient Marshall. Chettouf L., 2014, prouve dans ces recherches (voir figure n°15) que l'ajout des additifs type polymère pour une constitution BB classique améliore ces données Marshall tel que le fluage et la stabilité.

Contrairement ou dans certains cas, l'ajout de déchets plastiques peut entraîner une diminution des performances de l'enrobé (Yin et al. 2021). (Lugeiyamu et al. 2021). illustrons qu'en raison de la température élevée des mélanges d'asphalte plastique peuvent subir des dégradations telles que l'orniérage à moyen terme.

Ces changements de rhéologies résultant d'une interaction plastiques liant bitumineux au niveau microscopique, ce qui modifie la structure et la cohésion du matériau tous en affectent la capacité du mélange à résister à la fatigue, à la fissuration et à d'autres formes de détérioration.

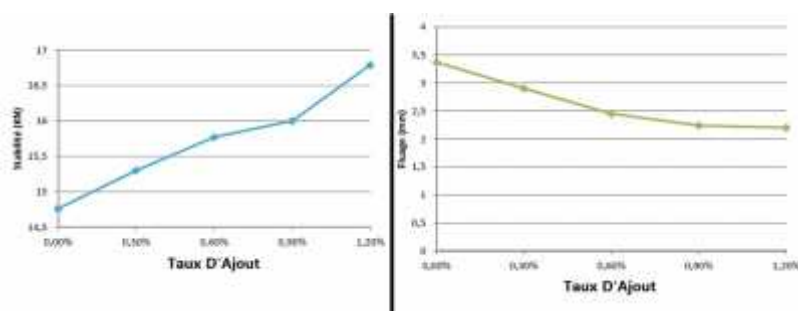


Figure n°15 : Résultat d'essai Marshall Chettouf L., 2014.

## **I.7 : Conclusion**

L'analyse des paragraphes précédents, a permis de définir les différentes parties qui constituent les chaussées, définir leurs rôles et de souligner les propriétés requise de ces constituent a titre des couches de roulement qu'ont pour but de répartir les charges sur la plus grande surface et de réduire ainsi les pressions transmises au sol jusqu'à une valeur admissible.

Les enrobés bitumineux exceptionnels sont généralement soumis à des températures et des fréquences de sollicitation variables dans le temps. Les conditions de demande vont aussi dépendre de la nature de la chaussée construite et de la localisation. Le comportement d'un enrobé bitumineux dans une chaussée est complexe car il dépend de la température et des charges des véhicules ainsi que des conditions météorologiques des lieux d'emplacement des routes.

Nous avons essayé par la suite mettre en lumière dans un contexte environnemental et technique les déchets plastique a titre des PET leurs mécanisme et enjeu en relation avec notre contribution scientifique.

A la fin, nous annonçons les résultats de notre recherche bibliographique convergent vers une solution prometteuse : l'utilisation de béton bitumineux intégrant du PET, à la fois économiquement viable et respectueuse de l'environnement. En effet, l'abondance du PET, combinée à sa faible biodégradabilité, fait de son recyclage une option attrayante pour réduire les déchets plastiques. En incorporant le PET dans les bétons bitumineux, non seulement nous pourrions offrir une seconde vie à ce matériau, mais nous pourrions également améliorer les propriétés mécaniques et thermiques du béton, tout en réduisant la dépendance à l'égard des ressources naturelles. Cette approche pourrait donc représenter une avancée significative vers la réalisation de constructions plus durables et respectueuses de l'environnement.



**CHAPITRE N°2:  
CONTRIBUTION  
EXPÉRIMENTALE**

## CHAPITRE N°2 : CONTRIBUTION EXPÉRIMENTALE

### II.1 : Introduction :

Cette partie expérimentale consiste en l'étude de l'effet de l'ajout d'un polymère type PET issue des déchets domestique (Bouteille d'eau en plastique) sur les performances d'un béton bitumineux constitué selon la méthode Marshall. L'adjonction du PET étant pour objectif d'analyser la variation des caractéristiques mécanique du mélange hydrocarbonate en fonction de la variation du pourcentage d'additif : 0.5, 1, 1.5, 2 & 3%. Le mélange est obtenu à partir de trois fractions granulaires et un bitume 35/50 fournis par de la Société de Terrassement et d'Aménagement et de Revêtement Routier (**STARR**) associier au déchets PET. Cette partie expérimental dans sa réalisation été répartie entre le laboratoire Matériaux De Construction de l'Université de Tlemcen ainsi le Laboratoire des Travaux Publics de l'Ouest (**LTPO**).

Dans une première étape nous avons procédé à une identification des matériaux pour la détermination de leurs caractéristiques physiques puis nous avons procédé en deuxième étape à la réalisation des essais destinés à étudier les caractéristiques mécaniques du mélange après la validation du mélange granulaire.

### II.2 : Echantillonnage :

#### II.2.1 : Données Géographique :

La région de Sidi Abdelli est située à 28 Kilomètres au Nord Est de Tlemcen et à 25 Kilomètres au Nord-Ouest d'Ouled Mimoun. Elle est comprise entre Djebel Sebaâ Chioukh au Nord et les Monts de Tlemcen (s.s) au Sud. Le gisement est localisé à 5 km au Sud de la commune de Sidi Abdelli (Wilaya de Tlemcen). Morphologiquement, elle montre deux parties distinctes, une colline Est (Site Rabello) correspondant au secteur d'étude ; et une colline Ouest. Sidi El Abdli se situe aux alentours de 35.3986° de latitude nord et 1.3544° de longitude ouest. La région de Sidi El Abdli est située à une altitude moyenne d'environ 390 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le climat de Sidi El Abdli est de type méditerranéen, caractérisé par des étés chauds et secs, et des hivers doux et pluvieux. La région présente un relief vallonné, avec des collines et des plaines agricoles. Sidi El Abdli est traversé par des cours d'eau intermittents, alimentés par les précipitations de la région. La végétation de Sidi El Abdli est principalement composée de maquis méditerranéen, avec une diversité d'espèces adaptées au climat sec et aux sols calcaireux.

### II.2.2 : Données Géologique :

Sidi El Abdli est une région située à Tlemcen, en Algérie. Les données géologiques de cette région comprennent principalement des roches sédimentaires, telles que des calcaires, des grès et des argiles. Ces roches ont été formées au cours de différentes périodes géologiques, notamment au Mésozoïque et au Cénozoïque.

En outre, la région de Sidi El Abdli est également connue pour sa géologie structurale, avec la présence de diverses failles et plis qui ont été formés par des mouvements tectoniques au fil du temps. Ces structures géologiques jouent un rôle important dans la distribution des ressources minérales et dans la compréhension de l'évolution géologique de la région. Les données géologiques de Sidi El Abdli sont importantes pour l'exploration des ressources naturelles de la région, telles que les minéraux et les hydrocarbures, ainsi que pour la gestion des risques géologiques, tels que les glissements de terrain et les séismes. Ces données sont souvent utilisées par les géologues, les ingénieurs et les décideurs pour prendre des décisions éclairées en matière de développement durable et de protection de l'environnement.

### II.3 : Caractérisation des matériaux

- *Analyse granulométrique par tamisage : NF EN 933-1* ; L'analyse granulométrique par tamisage est une méthode couramment utilisée pour déterminer la distribution des tailles de particules d'un échantillon de sol ou de matériau. Cette technique consiste à passer l'échantillon à travers une série de tamis de mailles différentes afin de séparer les particules en fonction de leur taille ;

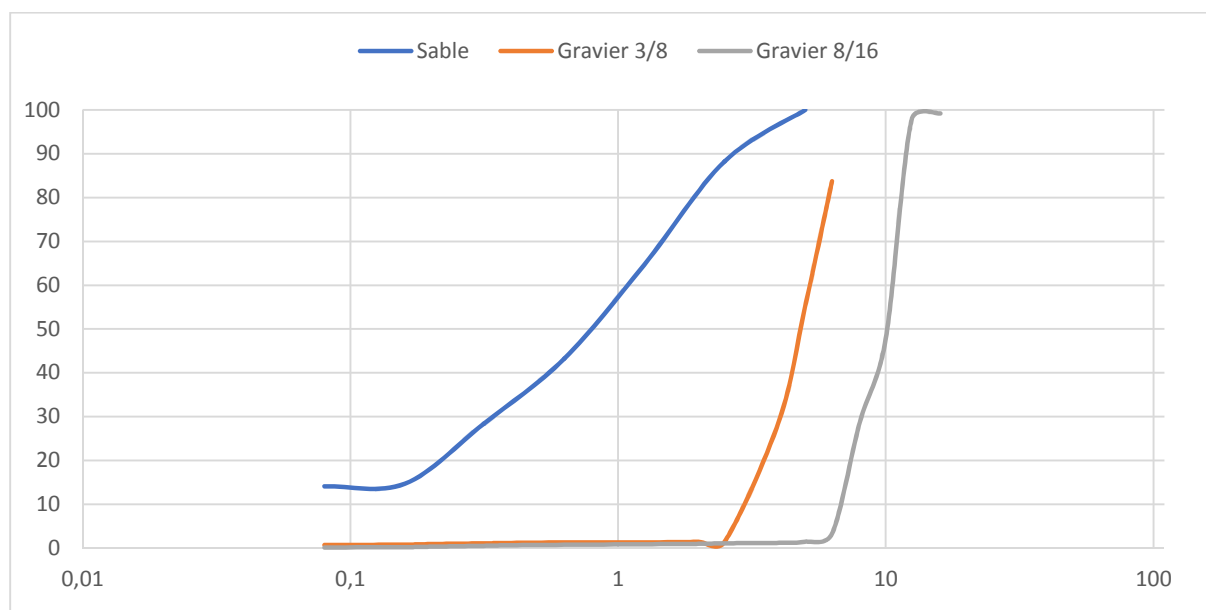


Figure n°16 : Courbes granulométrique des agrégats.

**Sable Carrière :**

Tableau n°6 : Données granulométrique du sable de carrière.

|                | Passant au Tamis de<br>0.08 mm | Passant au<br>Tamis de 0.63 mm | Passant au Tamis de<br>2.5 mm | Passant au Tamis de<br>5 mm |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| <b>ECH 01</b>  | 14.09                          | 43.22                          | 88.22                         | 99.98                       |
| <b>ECH 02</b>  | 14.13                          | 43.30                          | 88.31                         | 99.99                       |
| <b>Moyenne</b> | 14.11                          | 43.26                          | 88.265                        | 99.985                      |

**Fraction gravier I :**

Tableau n°7 : Données granulométrique du gravier I.

|                | Passant au Tamis de<br>1.25 mm | Passant au<br>Tamis de 2.5 mm | Passant au Tamis de<br>5 mm | Passant au Tamis de<br>6.3 mm |
|----------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| <b>ECH 01</b>  | 1.29                           | 1.42                          | 55.13                       | 83.70                         |
| <b>ECH 02</b>  | 1.32                           | 1.45                          | 55.17                       | 83.76                         |
| <b>Moyenne</b> | 1.305                          | 1.435                         | 55.15                       | 83.73                         |

**Fraction gravier II :**

Tableau n°8 : Données granulométrique du gravier II.

|                | Passant au Tamis de<br>5 mm | Passant au<br>Tamis de 6.3 mm | Passant au Tamis de<br>10 mm | Passant au Tamis de<br>16 mm |
|----------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>ECH 01</b>  | 1.44                        | 3.29                          | 47.70                        | 99.18                        |
| <b>ECH 02</b>  | 1.48                        | 3.33                          | 47.75                        | 99.21                        |
| <b>Moyenne</b> | 1.46                        | 3.31                          | 47.725                       | 99.195                       |

- *Essai de propreté des granulats : NF P 932-3* ; L'essai de propreté des granulats est une méthode utilisée pour évaluer le niveau de contamination d'un matériau granulaire par des impuretés telles que de l'argile, des particules fines, des matières organiques ou d'autres substances indésirables. Cette procédure est importante car la présence de contamination peut affecter les propriétés et la qualité des granulats, ce qui peut à son tour influencer les propriétés des mélanges ou des matériaux dans lesquels ils sont utilisés ;
- *Coefficient d'aplatissement des Gravieres : NF EN 933-3* ; La détermination du coefficient d'aplatissement est l'un des tests permettant de caractériser la forme plus ou moins massive des granulats. Comprise entre 4 mm et 80 mm est pesé, Puis le refus de chaque classe granulaire est tamisé sur le tamis à fente d'écartement E correspondant ;
- *Coefficient d'absorption d'eau des gravillons et des sables : NF EN 1097-6* ; L'essai de coefficient d'absorption des graviers et des sables est une méthode utilisée pour déterminer la capacité d'un matériau à absorber l'eau. Cette propriété est importante car elle peut influencer divers aspects des matériaux, tels que la durabilité, la stabilité et les performances dans différentes applications de constructions. Ce test dévalue la porosité et la capacité d'absorption d'eau des matériaux. Des matériaux adsorbant trop d'eau peuvent être sujets à

la fissuration, au gel, à l'érosion ou à d'autres problèmes de durabilité. Ainsi, en connaissant le coefficient d'absorption, les ingénieurs et les professionnels de la matériaux adaptes pour différentes applications en fonction de leurs propriétés d'absorption d'eau ;

Tableau n°9 : Résultats d'essai de propreté, aplatissement et absorption des granulats.

| Classe Granulaire<br>[mm] |         | -Propreté des<br>granulats-<br>-P- | -Aplatissement des<br>granulats-<br>-A- | Coefficient<br>d'absorption -<br>Ab- |
|---------------------------|---------|------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|
| Gravier-I-                | ECH-01  | 1.36                               | 9.94                                    | 1.41                                 |
|                           | ECH-02  | 1.39                               | 9.92                                    | 1.45                                 |
|                           | Moyenne | 1.375                              | 9.93                                    | 1.43                                 |
| Gravier-II-               | ECH-01  | 0.64                               | 5.09                                    | 1.31                                 |
|                           | ECH-02  | 0.69                               | 5.02                                    | 1.34                                 |
|                           | Moyenne | 0.665                              | 5.055                                   | 1.325                                |

- *Essai équivalent de sable : NF EN 933-8* ; Les grains de sable doivent être propre et sans poussières argileuses. Cette essai est utilisé pour évaluer la propreté des sables qui peut être déterminer par la mesure du pourcentage de fines dans ces sable. Les sables peuvent être concasse de carrière ou des sables de dune ou d'oued ;
- *Essai de bleu de méthylène : NF P 94-068* ; Le bleu de méthylène est un composé chimique utilisé dans le domaine de la géotechnique et des granulats pour déterminer la valeur de bleu de méthylène par l'essai à la tâche, essai couramment utilisé pour estimer la fraction argileuse contenue dans un matériau ;

Tableau n°10 : Résultats d'essais sur le sable.

| Classe Granulaire<br>[mm] |         | Équivalent<br>de Sable -<br>ES- | Valeur de bleu de<br>méthylène-<br>-VBS- | Coefficient<br>d'absorption -<br>Ab- | Module de<br>Finesse<br>-MF- |
|---------------------------|---------|---------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| Sable-<br>Carrière-       | ECH-01  | 75                              | 0.5                                      | 0.98                                 | 3.47                         |
|                           | ECH-02  | 77                              | 1                                        | 0.99                                 | 3.54                         |
|                           | Moyenne | 76                              | 0.75                                     | 0.985                                | 3.505                        |

- *Densité des grains : NF P 94-054* ; On définit la masse volumique des grains solides du sol est la quotient de la masse de ces grains solides par leur volume. Le but de cette essai pour détermine la masse volumique des grains solides d'un échantillon. La masse

volumique d'un sol utilise pour connaître l'indice des vides, le degré de saturation et la porosité ;

Tableau n°11 : Densité des grains.

| Classe granulaire [mm] | Densité Absolue |
|------------------------|-----------------|
| Sable Carrière         | 2.66            |
| Gravier –I-            | 2.68            |
| Gravier –II-           | 2.68            |

- *Essai Micro Deval : NF EN 1097-1* ; permet de déterminer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulat. Quatre échantillons identiques, de fraction 10/14 mm, sont soumis à un cycle d'usure, en présence d'eau, par contact avec des billes d'acier à l'intérieur d'un cylindre en rotation ;
- *Essai Los Angeles : NF EN 1097-2* ; permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat. Ce mode opératoire s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des chaussées et bétons hydrauliques ;

Tableau n°12 : Caractéristiques intrinsèques des gravillons :

| Classe Granulaire [mm] |         | Valeur Micro Deval<br>M <sub>DE</sub> en % | Valeur Los Angeles<br>LA en % |
|------------------------|---------|--------------------------------------------|-------------------------------|
| Gravier-I-<br>3/6      | ECH-01  | 9                                          | 21.02                         |
|                        | ECH-02  | 9.2                                        | 21.1                          |
|                        | Moyenne | 9.1                                        | 21.055                        |
| Gravier-II-<br>8/16    | ECH-01  | 10.01                                      | 20.90                         |
|                        | ECH-02  | 10.06                                      | 20.93                         |
|                        | Moyenne | 10.035                                     | 20.915                        |

### Vérification des classes granulaires : (Norme NF P 18-545)

La norme NF P18-545'Granulats : Mit en valeur les éléments de définition , conformité et codification établit les réglés générale pour effectuer les contrôles des granulats. Elle spécifie les exigences auxquelles les granulats doivent répondre en fonction de leurs différents usage possibles, tels que les granulats utilises pour les chaussées ( couches de fondation et de base, couche de roulement avec des liants hydrocarbonées ou en béton de ciment). Les granulats utilises pour les bétons hydrauliques et les mortiers, et les granulats utilises pour les voies ferres (assises, ballast).

L'objectif de cette norme est de pour définir les termes liée aux granulats relevant de la directive produits de construction DPC, pour établir les réglés générales pour le contrôle des granulats, pour préciser les spécifications mentionnées dans les normes NF EN produits auxquelles les granulats doivent répondre pour certains usages. Elle précise les critères de régularité et d'énoncée les critères de régularité et de conformité en définissant des plages de spécifications encadrées par une limite inférieure  $L_i$  et une limite supérieure  $L_s$ , ainsi que des plages de régularité limitées par une valeur spécifique inférieure  $V_{si}$  et une valeur spécifique supérieure  $V_{ss}$ , ainsi que des plages de fabrication.

Les plages de régularité ( $V_{si}$  et  $V_{ss}$ , associées a des valeurs d'incertitude d'essai dépendant de sa respectabilité et de sa reproductibilité) permettent de définir des critères de conformité.

✓ Sable de carrière :

| Condition N° | Dimension des tamis | Mesure à prendre | Condition à vérifier norme<br>XP P 18-545 |     |
|--------------|---------------------|------------------|-------------------------------------------|-----|
| 01           | 0.08                | 14.11            | 10-70                                     | OUI |
| 02           | 2                   | 88.265           | 10-85                                     | OUI |
| 03           | 4                   | 99.98            | 85-99                                     | OUI |

✓ Gravier I :

| Condition N° | Dimension des tamis | Mesure à prendre | Condition à vérifier norme<br>XP P 18-545 |     |
|--------------|---------------------|------------------|-------------------------------------------|-----|
| 01           | 0.4                 | 0.19             | <1                                        | OUI |
| 02           | 1                   | 0.29             | <1                                        | OUI |
| 03           | 2                   | 0.42             | <1                                        | OUI |
| 04           | 4                   | 29.18            | 15-90                                     | OUI |
| 05           | 5                   | 55.15            | 15-90                                     | OUI |
| 06           | 6.3                 | 83.73            | 85-99                                     | OUI |

✓ Gravier –II- : 8/16

| Condition N° | Dimension des tamis | Mesure à prendre | Condition à vérifier norme<br>XP P 18-545 |     |
|--------------|---------------------|------------------|-------------------------------------------|-----|
| 01           | 5                   | 0.46             | <1                                        | OUI |
| 02           | 6.3                 | 0.51             | <1                                        | OUI |
| 03           | 8                   | 28.74            | 15-90                                     | OUI |
| 04           | 10                  | 47.70            | 15_90                                     | OUI |
| 05           | 12.5                | 97.85            | 85-99                                     | OUI |
| 06           | 16                  | 99.195           | 85-99                                     | OUI |

En conclusion selon la norme NF P 18-545 les caractéristiques des granulats mesurées sont conformes aux spécifications techniques pour la fabrication d'un enrobé hydrocarbonés pour couche de roulement.

Tableau n°13 : Récapitulatif des résultats.

| <i>Caractéristiques Mesurées</i>          | <b>Gravier<br/>-I-</b> | <b>Gravier<br/>-II-</b> | <b>Sable –<br/>0/3-</b> | <b>Observations</b> |
|-------------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
| Classe Granulaire                         | 3/8                    | 8/16                    | 0/3                     |                     |
| Valeur Micro Deval -M <sub>DE</sub> en %- | 9.1                    | 10.035                  |                         |                     |
| Valeur Los Angeles -LA en %               | 21.055                 | 20.915                  |                         |                     |
| Aplatissement des granulats -A en %-      | 9.93                   | 5.055                   |                         |                     |
| Propreté des granulats -P en %-           | 1.375                  | 0.54                    |                         | Gravier propre      |
| Rapport de Concassage -RC-                |                        |                         |                         |                     |
| Équivalent de Sable -ES en %-             |                        |                         | 76                      | Sable propre        |
| Valeur de bleu de méthylène -VBS en %-    |                        |                         | 0.75                    | Sable limoneux      |

#### II.4 : Détermination des performances mécaniques

Le démarrage de notre étude consiste à choisir la courbe granulométrique qui s'insère dans un fuseau granulaire.

Le taux du bitume est déterminé par la suite afin de compléter les taux de chaque constituant.

Le mélange granulaire étant fixé, la méthodologie consiste à concevoir plusieurs mélange avec divers teneur en additif (PET) en vue d'avoir une batterie de résultat de stabilité, fluage Marshall du mélange hydrocarboné sous optique comparatif.

Les étapes de travail suivis par les laboratoires Algériens sont :

1. Choix du mélange granulaire ;
2. Calcul des teneurs en bitume ;
3. Détermination des performances mécaniques des différents mélanges ;

##### II.4.1 : Constitution des mélange bitumineux

L'objectif visé est de maîtriser la disposition de squelette granulaire pour avoir la meilleure aptitude de compactage et qui pourrait conférer à une stabilité du mélange.

Celui-ci se fait par combinaison des fractions granulaires utilisées de manière que le mélange s'insère dans un fuseau granulaire de référence. Le fuseau de référence utilisé est celui d'un béton bitumineux 0/14 (BB0/14) (Voir chapitre n°1).

A partir des analyses granulométriques des différentes fractions (0/3, 3/8, et 8/16), on attribue un pourcentage pour chaque fraction, ensuite on fait une combinaison des fractions granulaires utilisées de manière que la courbe de mélange s'insère dans le fuseau de référence.

Le tableau ci-dessous représente les pourcentage des fractions granulaires de notre mélange :

Tableau n°14 : Pourcentage des fractions granulaires

| Fractions    | Pourcentage des constituants[ %] |
|--------------|----------------------------------|
| Filler       | 0                                |
| Sable 0/3    | 40                               |
| Gravier 3/8  | 20                               |
| Gravier 8/16 | 40                               |
| Total        | 100                              |
| Bitume       | /                                |
| Plastique    | Variable                         |

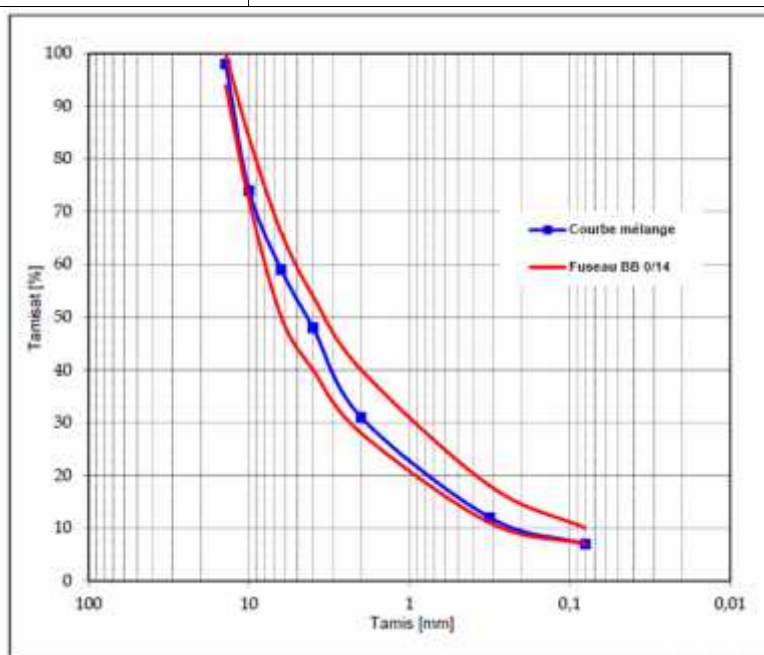


Figure n°17 : Fuseau spécifique de la courbe granulométrique du mélange BB 0/14.

#### II.4.2 : Détermination de la teneur en liant

On appelle la teneur en bitume, la masse du liant sur la masse des granulats secs exprimé en pourcentage, pour cela on utilise la formule suivante :

$$\text{Teneur en liant} = \alpha \times k^5 \times (\Sigma)^{1/2} \dots\dots(\text{Harizi I., 2012}).$$

**k** : Module de richesse pouvant prendre les valeurs suivantes :

- 2 à 2.6 pour les graves bitumes ;
- 3.3 à 3.9 pour un béton bitumineux ;

$\alpha$  : Coefficient correcteur destiné à tenir compte de la masse volumique des granulats d'où ;

$$\alpha = 2.65 / \text{MVRg} \dots\dots(\text{Harizi I., 2012}).$$

**MVRg** : Masse volumique réel des granulats ;

$\Sigma$  : Surface spécifique du granulat calculée par la formule ;

$$100.\Sigma = 0.25 G + 2.3 S + 12 s + 135 f \dots\dots(\text{Harizi I., 2012}).$$

- G : % en poids des éléments de dimension supérieur à 6.3 mm ;
- S : % en poids des éléments de dimension comprise entre à 6.3 et 0.315 mm ;
- s : % en poids des éléments de dimension comprise entre à 0.315 et 0.08 mm ;
- f : % en poids des éléments de dimension inférieure à 0.315 mm ;

**Application numérique :**

| Teneur en liant | Module de richesse 'k' | Coefficient correcteur 'α' | Masse volumique réel |
|-----------------|------------------------|----------------------------|----------------------|
| 6.15            | 3.5                    | 1                          | 2.60                 |

## II.4.3 :Détermination des performances mécaniques des différents mélanges

### II.4.3.1 : Protocol expérimental

Le principe de notre études consiste à fabriquer au laboratoire des gâchées expérimentales à partir d'un mélange  $M_i$  à 0% d'additifs et un dosage en bitume  $b_i = 6.15\%$  correspondant à un couple Stabilité / Fluage Marshall.

Si les résultats des essais de compactibilité sont satisfaisants, ces essais seront reconduits avec le même mélange minéral / bitume ( $M_i, b_i$ ) est un taux d'additif de  $T_2 = 0.5\%$  du poids du mélange afin d'apprécier les variations de paramètres d'essais de performances mécanique en fonction de la teneur en plastique.

La compactibilité est jugée satisfaisante lorsque la compacité à 50 coups est comprise entre 93 et 97 %.

Les gâchés seront repris avec des divers teneur en PET (1, 1.5, 2 et 3%) tout en maintenant le mélange granulaire.

Le couple (  $M_i, T_i$ ) de mélange minéral et le taux du PET ayant conduit à des résultats servient pour la suite à des analyses et discussion dans le contexte.

Donc l'initiale mélange minéral / bitume ( $M_i, b_i$ ) consiste l'incorporation de 2kg de sable, 1kg de gravier 3/8 , 2kg de gravier 8/16 et 325g de bitume dans le récipient du malaxeur a bitume type UTG-0130 à une température de 160 C°, de capacité 5 kg comprenez un dispositif de chauffe pour malaxeur et un batteur de rechange conformément à la norme EN 12697 – 35,

afin de fabriquer par la suite des éprouvettes pour servir a la suite du protocole.

Le renforcement du mélange est fait à l'utilisation des fibres de PET mesurant 3cm et 2 cm coupés manuellement.

La confection des éprouvette passe par un compactage a chaud de 1200 g d'échantillon sous 2 x 50 coups de dame.

Tableau n°15 : Protocole Expérimentale En Chiffre.

| Fractions    | Pourcentage des constituants[ %] |      |      |      |      |      |
|--------------|----------------------------------|------|------|------|------|------|
|              | A                                | B    | C    | D    | E    | F    |
| Filler       | 0                                | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    |
| Sable 0/3    | 40                               | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   |
| Gravier 3/8  | 20                               | 20   | 20   | 20   | 20   | 20   |
| Gravier 8/16 | 40                               | 40   | 40   | 40   | 40   | 40   |
| Total        | 100                              | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  |
| Bitume       | 6.15                             | 6.15 | 6.15 | 6.15 | 6.15 | 6.15 |
| Plastique    | 0                                | 0.5  | 1    | 1.5  | 2    | 3    |



A : Granulats



B : Bitume



C : Plastique



D : Mélange



E : Eprouvettes Pour Essais

Figure n°18 : Protocole Expérimental.

### II.4.3.2 : Résultats & Discussions

**Essai Marshall :** L'essai de Marshall, également appelé test d'asphalte Marshall, est largement utilisé dans l'industrie des travaux publics pour évaluer les propriétés des enrobes bitumineux utilisés dans la construction et l'entretien des routes. Ce test permet d'indiquer la résistance et la densité de l'enrobe bitumineux, deux caractéristiques essentielles pour garantir la durabilité, la qualité et les performances des revêtements routiers.

C'est une méthode de détermination de la teneur en vide et des caractéristiques mécaniques d'un enrobé bitumineux. Le procédé a été mis au point par Bruce Marshall en 1939. Plusieurs normes encadrent le procédé telle que la norme européenne EN 12697-34. Un échantillon est compacté puis plongé dans un bain-marie à 60 °C pendant 40 minutes, puis dans une presse Marshall. Les deux mâchoires d'écrasement de la presse appliquent une contrainte de compression diamétrale avec une vitesse de 50 mm/min jusqu'à destruction de l'échantillon.

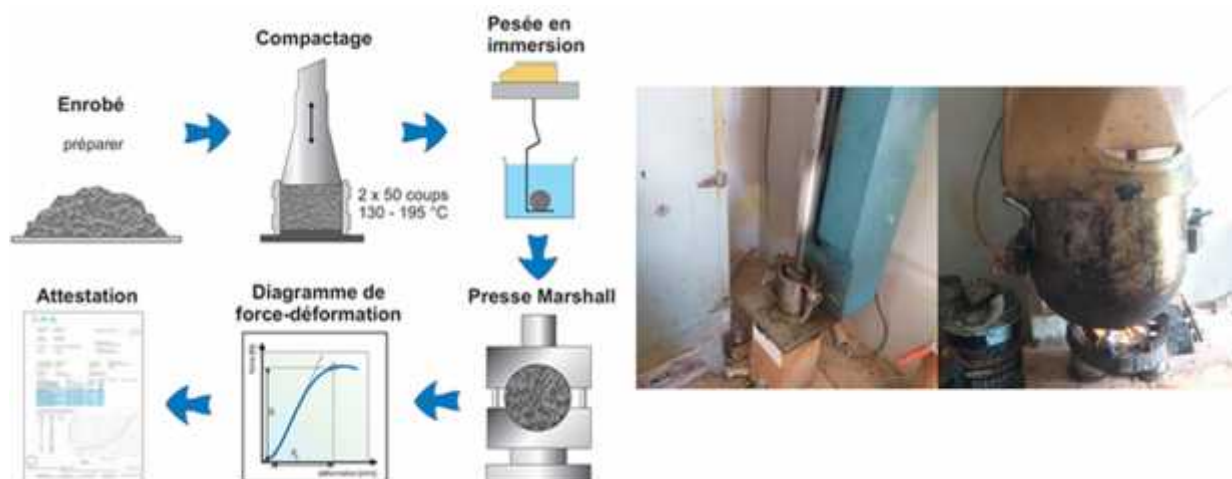


Figure n°19 : Déroulement d'essais Marshall.

Au cours de l'essai, la force appliquée et la résultante de la déformation sont enregistrées. En pratique, c'est la résistance maximale de l'éprouvette à la déformation qui est mesurée en kN et la valeur de l'affaissement selon le diamètre vertical de l'échantillon au moment de la rupture en mm. On obtient un diagramme de force-déformation.

- ✓ **La stabilité Marshall :** Il s'agit de l'effort maximum de rupture ( en daN ) de l'éprouvette ayant été comprimée suivant une génératrice dans un moule d'écrasement et par une presse dont la vitesse d'avancement est réglée à 0.85 mm /s.
- ✓ **Le fluage Marshall :** C'est l'affaissement en 1/10 de mm , de l'éprouvette au moment de la rupture. La compactibilité par l'essai Marshall consiste à déterminer l'évolution de la compacité de l'enrobé en fonction de l'énergie de compactage.

Le tableau ci-dessous récapitule nos résultats conformément à ce qui a décrit précédemment :

Tableau n°16 : Récapitulatif des résultats

| Pourcentage de plastique |         | 0     | 0.5   | 1     | 1.5   | 2     | 3     |
|--------------------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Stabilité (S)<br>(KN)    | ECH01   | 10.97 | 11.23 | 11.92 | 12    | 12.36 | 12.56 |
|                          | ECH02   | 12.03 | 12.87 | 12.78 | 13.14 | 13.4  | 13.44 |
|                          | Moyenne | 11.5  | 12.05 | 12.35 | 12.57 | 12.88 | 13    |
| Fluage (F)<br>(mm)       | ECH01   | 3.8   | 3.67  | 3.06  | 2.8   | 2.6   | 2.43  |
|                          | ECH02   | 4.5   | 4.11  | 4     | 3.64  | 3.34  | 3.23  |
|                          | Moyenne | 4.15  | 3.89  | 3.53  | 3.22  | 2.97  | 2.83  |
| Q/M                      | ECH01   | 2.88  | 3.06  | 4.26  | 4.28  | 4.76  | 5.2   |
|                          | ECH02   | 2.67  | 3.13  | 3.2   | 3.61  | 4.01  | 4.16  |
|                          | Moyenne | 2.77  | 3.09  | 3.49  | 3.91  | 4.33  | 4.68  |
| Indice des vides (%)     | ECH01   | 3.90  | 4.06  | 4.84  | 4.81  | 4.72  | 5.61  |
|                          | ECH02   | 3.53  | 4.02  | 5.26  | 7.35  | 5.35  | 5.70  |
|                          | Moyenne | 3.715 | 4.04  | 5.05  | 6.08  | 5.655 | 5.65  |

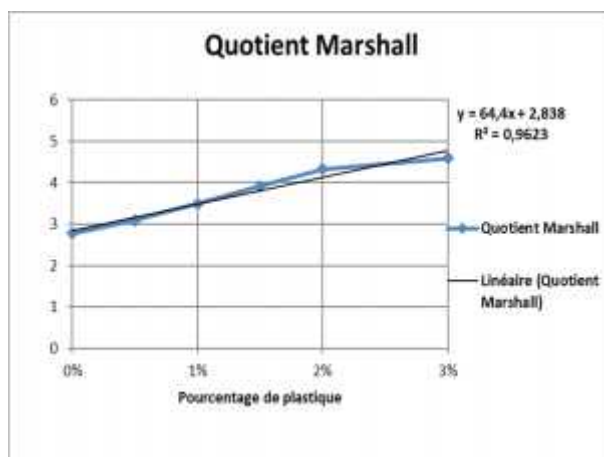
Le quotient Marshall est calculé par équation suivante :  $Q=S/F$  ;

Indice de vide est calculé par équation suivante : Indice de vide %:  $100-100 \text{ (passe hydraulique/densité réelle)}$  ;

Les résultats obtenus démontrent que l'indicateur de stabilité est en proportion avec l'ajout du plastique, contrairement au fluage qui diminue le long ou le pourcentage du PET augmente.

Cependant le phénomène d'augmentation de la valeur de l'indice des vides reste sombre nécessitant des investigations complémentaires.

Donc il est évident qu'une incorporation optimale d'additif à l'exemple du PET est responsable de la réorganisation microstructurale et morphologique du mélange qui entraîne des changements de ces propriétés mécaniques.



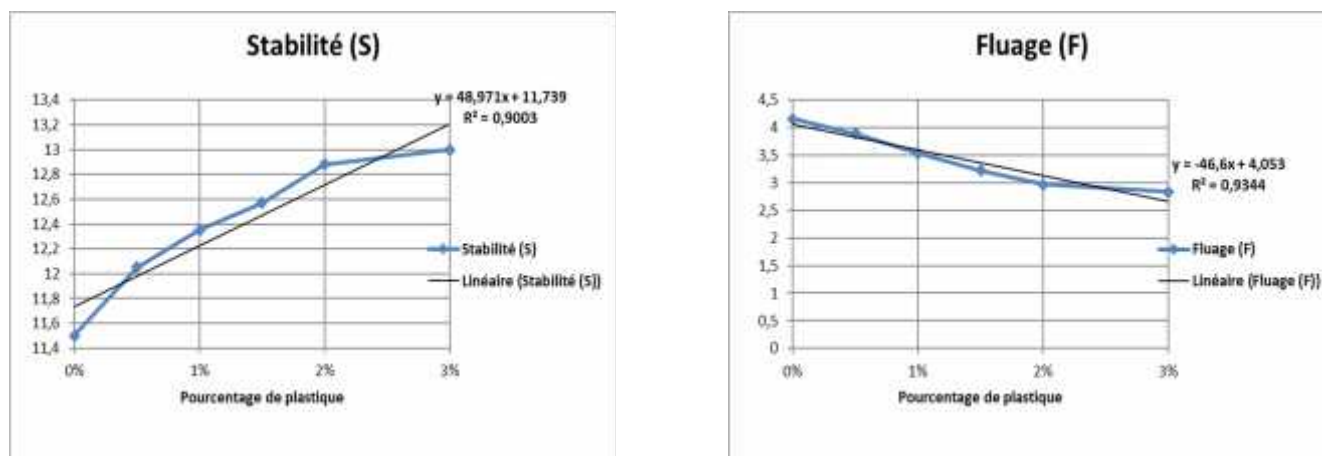


Figure n°20 : Résultats de l'essai Marshall sur éprouvettes cylindriques :  
a) Stabilité Marshall; b) Fluage Marshall ; c) Quotient Marshall.

Les enrobés bitumineux sont définis comme un matériau hétérogène composé de l'union finale des: granulats, du filler et d'un liant bitumineux, dans lequel une proportion plus ou moins grande d'air reste incluse dans la masse. Ces enrobés nécessitent des propriétés spécifiques, notamment une capacité d'adhérence aux granulats et une consistance variable en fonction de la température. On distingue trois types d'enrobés : le béton bitumineux très mince, le béton bitumineux mince et l'enrobé à module élevé.(Valero 1976)

Le plastique est largement utilisé dans une large gamme d'applications en raison de ses caractéristiques uniques telles que sa légèreté, sa durabilité et ses coûts de production réduits. Il fait partie de notre vie quotidienne, allant de l'emballage utilisé pour stocker les aliments et les boissons à l'intérieur de nos voitures.(Sara et al 2024).

Dans la même vision, d'autres études spécifiques ont été menées pour évaluer les effets de ces interactions sur les propriétés du béton bitumineux et pour optimiser les formulations en conséquence.(Garcia et al 2016) (Ahmadinia et al 2011) (Naskar et al 2010).

Idem pour Sidibe A. et Hamadi H., 2020, qui capitalisent que l'utilisation des fibres PET améliore le comportement du béton bitumineux. Cette amélioration se traduit par une augmentation du quotient Marshall.

Chettouf L., 2014, prouve dans ces recherches (voir figure n°15) que l'ajout des additifs type polymère pour une constitution BB classique améliore ces données Marshall tel que le fluage et la stabilité.

Contrairement ou dans certains cas, l'ajout de déchets plastiques peut entraîner une diminution des performances de l'enrobé (Yin et al.2021). (Lugeiyamu et al. 2021).illustrons qu' en

raison de la température élevée des mélanges d'asphalte plastique peuvent subir des dégradations telles que l'orniérage à moyen terme.

Ces changements de rhéologies résultant d'une interaction plastiques liant bitumineux au niveau microscopique, ce qui modifie la structure et la cohésion du matériau tous en affectent la capacité du mélange à résister à la fatigue, à la fissuration et à d'autres formes de détérioration.

### **II.5. : Conclusion**

L'enrobé principal utilisé dans cette étude est un BB0/14, qui a été modifié en remplaçant le polymère PET de 0 à 3% du poids total. L'intégration de PET à différents taux dans le béton bitumineux a révélé une amélioration de la stabilité, du fluage et du quotient Marshall.

Une comparaison entre les performances obtenues du BB formulé par la méthode Marshall et un BB équivalent avec ajout formulé par la méthode Marshall, on a constaté que les valeurs sont très familières.

Toutefois, tout comme toute nouvelle substance, le PET peut présenter des désavantages à long terme, des désavantages qui ne sont pas identifiés à court terme. Cette observation est applicable à la fois à la production et à l'amélioration des enrobés traditionnels. Il est important de rester vigilant, de mener des recherches concernant un éventuel vieillissement prématuré des mélanges et autres, avant de généraliser leur utilisation.



***Conclusion  
Générale***

## CONCLUSION GENERALE

### III : Conclusion générale

Globalement, l'intégration du polymère dans le système de mélange a entraîné une amélioration des performances du produit final au fur et à mesure de l'augmentation du taux d'ajout. Les taux d'ajout du PET ont été les suivants : **0,5, 1, 1,5, 2 et 3%** du poids total de l'enrobé.

Cependant, Cette combinaisons permettent de proposer une des voies réactionnelles de réutilisation et/ou recyclage des PET afin de résoudre un des problèmes liés à l'utilisation de matières plastiques et valoriser les déchets prouvent jouer un rôle clé dans l'économie circulaire en préservant les ressources à chaque étape de production

- Le taux d'ajout, fournie sur une échelle macroscopique et à court terme aux mélanges des performances mécaniques remarquable.

Notre comparaison entre les performances obtenues du BB formulé par la méthode Marshall et un BB avec additifs on a constaté que les valeurs sont très familières.

De plus, il semble que la méthode Marshall réponde, tout comme pour les enrobés traditionnels, aux exigences de formulation des Enrobés à Module Elevé. Cette conclusion est soumise à des recherches supplémentaires et à l'élaboration de normes appropriées.

À partir de ces diverses applications, il est recommandé d'expérimenter afin de développer un modèle basé sur un ensemble d'expériences, permettant ainsi de faire des prédictions ou d'optimiser les processus à l'intérieur du domaine expérimental.



*Références  
Bibliographiques*

## Références Bibliographiques

AFNOR 1986. La norme européenne NF T66-004.. Pétroles et dérivés - Produits bitumineux - Pénétrabilité à l'aiguille . décembre 1986.

AFNOR 1986. La norme européenne NF T66-008.. . Produits noirs - Détermination du point de ramollissement des produits bitumineux - Méthode "bille et anneau" . juillet 1979

AFNOR 1990. La norme européenne NF P18-572. Granulats- Essai d'usure Micro-Deval.Décembre 1990.

AFNOR 1990. La norme européenne NF P18-573. Granulats- Essai Los Angeles.Décembre 1990.

AFNOR 1990. La norme européenne NF P18-591. Granulats- Détermination de la propreté superficielle. Septembre 1990.

AFNOR 1990. La norme européenne NF P18-597. Granulats-Determination de la propreté des sables : équivalent de sable a 10 % de fines.Décembre 1990.

AFNOR 1991. La norme européenne NF P98-253-1. Essais relatifs aux chaussees-Deformation permanents des mélanges hydrocarbonées:essai d'ornierage .Juillet 1991.

AFNOR 1992. La norme européenne NF P98-251-2. Essais relatifs aux chaussees-Essais statiques sur mélanges hydrocarbonées:essai Marshall .Avril 1992.

AFNOR 1999. La norme européenne NF P98-130. Enrobes hydrocarbonés-Couches de liaison : bétons bitumineux semi BBSG-Definituon-Classification-Characteristique-Fabricaton-Mise en œuvre .Novembre 1999.

AFNOR 1999. La norme européenne NF P98-138. Enrobes hydrocarbonés-Couches d'essises:graves-bitume GB-Definituon-Classification-Characteristique-Fabricaton-Mise en œuvre .Novembre 1999.

AFNOR 2003. La norme européenne EN 12697-10. Melanges bitumineux-Methodes d'essai pour melange hydrocarbore a chaud:compactabilite. Juillet 2003.

AFNOR 2004. La norme européenne NF P98-251-4. Essais relatifs aux chaussees-Essais statiques sur mélanges hydrocarbonées:essai Duriez aménagé sur mélange hydrocarbonées a froid a l'émulsion de bitume .Août 2004.

AFNOR 2005. la norme européenne NF EN 12591. Bitumes et liants bitumineux-Specefications des bitumes routiers.15 Décembre 2005.

AFNOR 2005. La norme européenne NF EN 12697-24. Mélanges bitumineux-Methode d'essai pour mélange hydrocarbonée a chaud:résistance a la fatigue .Mars 2005.

AFNOR 2006. la norme européenne NF EN 13924. Bitumes et liants bitumineux-Specefications des bitumes routiers de grade dur. Décembre 2005.

AFNOR 2007. La norme européenne NF EN 13108-1. Mélange Bitumineux-Specification des matériaux .Février 2007.

AFNOR 2007. La norme européenne NF EN 13108-1. Mélanges bitumineux. Specification des matériaux,enrobes bitumineux .Février 2007.

AFNOR 2007. La norme européenne NF EN 1426. Bitumes liants bitumineux-Determination de la penetraibilite a l'aiguille .Mars 2007.

AFNOR 2007. La norme européenne NF EN 1426. Bitumes liants bitumineux-Determination de la penetraibilite a l'aiguille .Mars 2007.

AFNOR 2007. La norme européenne NF EN 1426. Bitumes liants bitumineux-Determination de la penetrabilite a l'aiguille .Mars 2007.

AFNOR 2007. La norme européenne NF EN 1427. Bitumes liants bitumineux-Determination du point de ramollissement-Methode Bille et Anneau .Juin 2007.

AFNOR 2008. La norme européenne EN 12697-12.Melanges bitumineux-Methodes d'essai pour melange hydrocarbure a chaud:Deremination de la sensibilité a l'eau des eprouvettes bitumineux. Septembre 2008.

AFNOR 2010. La norme européenne NF P98-150-1. Enrobes hydrocarbonés-Execution des assises de chaussées, couches de liaison et couches de roulement:enrobes hydrocarbonées a chaud- Constituants, fabrication,transport,mise en ouvre et contrôle sur chantier. .Juin 2010.

AFNOR 2012. La norme européenne EN 12697-30.Melanges bitumineux-Methodes d'essai pour melange hydrocarbure a chaud: confection d'eprouvettes par compacteur a impact. Septembre 2012.

AFNOR 2012. La norme européenne EN 12697-30.Melanges bitumineux-Methode d'essai pour melange hydrocarbure a chaud:confection d'eprouvettes par compacteur a impact. Septmbre 2012.

AFNOR 2012. La norme européenne EN 12697-6. Melanges bitumineux-Methode d'essai pour melange hydrocarbure a chaud:determination de la masse volumique apparente des eprouvettes bitumineuses. Aout 2012.

AFNOR 2017. La norme européenne NF EN 12697-35. Melanges btumineux- Essais : malaxage de laboratoire.Juillet 2017.

AFNOR 2018. EN 12697-26.Materiaux enrobes-Methode d'essai:module rigidite. Juin 2018.

AFNOR 2018. La norme européenne EN 12697-8.Materiaux enrobes-Methodes d'essai : determination de la teneur en vides caracteristique des materiaux bitumineux. Décembre 2018.

AFNOR 2018. La norme européenne EN 12697-5. Melanges bitumineux-Methode d'essai : masse volumique reelle MVR. Decembre 2018.

AFNOR 2019. EN 12697-32.Materiaux enrobes-Methode d'essai:confection d'emprouvettes par compacteur vibratoire. Mars 2019.

AFNOR 2019. La norme européenne EN 12697-33.Mélange bitumineux-Methode d'essai:preparation de corps d'epreuve au compacteur de plaque. Mars 2019

AFNOR 2020. La norme européenne EN 12697-22.Melanges bitumineux-Methodes d'essai : essai d'ornierage. Fevrier 2020.

AFNOR 2020. La norme européenne EN 12697-34.Melanges bitumineux-Methodes d'essai: essai de marshall.Fevrier 2020 .

AFTP , Radio algérienne, L'Algérie consomme 7 milliards de sacs en plastique/an non recyclés,09/04/2019 - 18:21 .

AFTP ,L'Algérie est le 5  me consommateur de sacs en plastique au monde ,Rédaction AE,11 avril 2019 .

Ahmadinia et al., 2011 E. Ahmadinia, M. Zargar, M.R. Karim, et al. Utilisation de bouteilles en plastique usagées comme additif pour l'asphalte cou   en pierre Matériaux et conception, 32 (10) (2011), pages 4844 à 4849.

- [Asma Dhahak](#), [G. Hild](#), [Mathieu Rouaud](#), [G. Mauviel](#), [V. Burklé-Vitzthum](#) less  
Bendimerad Karam Fatah Allah et ZADJAOUI Abdjalil Effet de la chaux sur la stabilité et la portance dans les travaux de terrassement, may 2017
- Brown. Hot mix asphalt materials, mixture design and construction third edition. (National asphalt pavement association 15 décembre 2009 – 720 Page).
- Build.Mater., 65(2014), pp.487-494. [10.1016/j.conbuildmat.2014.05.006](#).
- Charles-Antoine Bachand, Nikki Diak, Stocholm Syndrome in Athletics : A Paradox, Published in children Australia 20 June 2018. DOI: [10.1017/cha.2018.31](#). Corpus ID: 150243509
- Chetoui Mansour et Ayoub MOKEDDEM, confection des bétons bitumineux pour les chaussées souples en zones arides, 2020. 4.624.1.683 ; 87 p ; illustré
- CHETTOUF LYNDIA, formulation par la méthode marshal d'un béton bitumineux à module amélioré, mémoire de master septembre 2014
- Copyright © 2011 Scrivener Publishing LLC. All rights reserved., Handbook of Engineering and Speciality Thermoplastics: Polyethers and Polyesters
- David Lazarvic, Emmanuelle Aoustin, Nicolas Buclet, Nils Brandt, Plastic waste management in the context of a European recycling society, December 2010. 55(2) : 246-259. DIO : [10.1016/j.resconrec.2010.09.014](#).
- E. Ray and Prithvi S. Kandhal and Freddy L. Robert and Y. Roberts and Y. Richard Kim and Dah-Yinn Lee and Thomas W. Kennedy
- F. Yin, M. Fortunatus, R. Moraes, . Évaluation des performances d'enrobés bitumineux modifiés avec du polyéthylène recyclé par voie humide Dossier de recherche sur les transports, 2675 (2021), p. 491-502.
- G. García-Travé, R. Tauste, F. Moreno-Navarro. Utilisation de géomembranes récupérées pour la modification de performances mécaniques des liants bitumineux Journal of Materials in Civil Engineering, 28 (7) (2016), Article 04016021.
- G. Shafabakhsh, Yousef Saied, Investigation of dynamic behavior of hot mix asphalt containing waste materials, case study : Glass cullet, Published 2014, Engineering, Environmental Science, Materials Science, Case Studies in Construction Materials, DOI: [10.1016/J.CSCM.2014.05.002](#), Corpus ID: 135952224
- Harizi I., 2012 ; Amélioration de module de rigidité des enrobés bitumineux par l'ajout d'un additif. Magister mémoire. Université de Blida. Hyejune Park, Youn – Kyung Kim, The role of social network websites in the consumer-brand relationship, July 2014. 21(4) : 460-467. DIO : [10.1016/j.jretconser.2014.03.011](#). [Dini Modigliani S](#), [Morlando M](#), [Erichelli L](#), [Sabatelli M](#), [Bozzoni I](#), An ALS-associated mutation in the FUS 3'-UTR disrupts a microRNA-FUS regulatory circuitry, Nature Communications (2014) 5, DOI: [10.1038/ncomms5335](#)
- Imad L. Al-Qadi, Tom Scarpas, Andreas Loizos. Pavement Cracking: Mechanisms, Modeling, Detection, Testing and Case Histories (1 June 2008) 930 page.
- James E. Mark, Physical properties of polymers Handbook. 2007.
- Kamada and Yamada, 2002. O. Kamada, M. Yamada. Utilization of waste plastic in asphalt mixtures. Oskara city university, oskara 2002.

Krones- Meta Pure Krones MetaPure – PET and polyolefins superlatively recycled, Recycling of PET and PO 2018

L. Lugeiyamu, M. Kunlin, E.S.K. Mensahn et coll. Utilisation de déchets de polyéthylène téréphtalate (PET) comme remplacement partiel du bitume dans l'asphalte en pierre coulée Construction and Building Materials, 309 (2021), p. 125-176.

M. Naskar, T.K. Chaki, K.S.Reddy Voir l'article Voir dans Scopus 71 Effet des déchets plastiques comme modificateur sur la stabilité thermique et la cinétique de dégradation du mélange bitume/déchets plastiques Thermochemical Acta, 509 (1-2) (2010), pages 128-134.

Mahoub M et al 2015

Materials Science, Chemistry, Slow pyrolysis of polyethylene terephthalate: Online monitoring of gas production and quantitative analysis of waxy products, DOI: [10.1016/J.JAAP.2019.104664](https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2019.104664), Corpus ID: 199072329

Measurement, 74(2015), pp.159-169, [10.1016/j.measurement.2015.07.012](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.07.012).

Mouhoub Mohamed Fouz , Sota Ahmed Amine, Rais Saïd, recyclage du béton bitumineux, état d'art, Juin 2015 ,mémoire de master, universite de guelma.

Print ISBN:9780470639269 |Online ISBN:9781118104729 |DOI:10.1002/9781118104729

Published in [Journal of Analytical and...](#) 1 September 2019

Roland gayer, jennar. Jambeck, andkara lavender law. Vol 3, issue 7, 10.1126.19jul 2017.

Sabu Thomas, Visakh P.M., First published: 23 May 2011

Sarra Soares, Fatima Serralha, Maria Catarina Paz, Nelson Carrico, Sergiu-Valentin Galatanu, Unveiling the data: An analysis of plastic waste with emphasis on the countries of the E3UDRES2 alliance, 15 april 2024, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28375>

Sidibe Aissata et Hamadi Houssam, Amélioration du béton bitumineux par des polymères issus du recyclage, Septembre 2020. mémoire de master université 8 mai 1945 de Guelma.

T.B.Moghaddam, M.R.Karim, M.Soltani, H.Baaj. Optimization of asphalt and modified contents for polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures using response surface methodology.

T.B.Moghaddam, M.R.Karim, M.Soltani. Experimental characterization of rutting performance of polyethylene terephthalate modified asphalt mixtures under static and dynamic loads. Constr.

T.B.Moghaddam, M.R.Karim, M.Soltani. Utilization of waste plastic bottles in asphalt mixture. J. Eng. Sci. Technol., 8(3) (2013), pp. 264-271.

Valero Luis, Dosage des enrobés bitumineux: définition et types d'enrobés. Propriétés qu'ils doivent présenter. 21 Novembre 2010.

VALÉRO, L. DOSAGE DES ENROBES BITUMINEUX: 1) DEFINITION ET TYPES D'ENROBES. PROPRIETES QU'ILS DOIVENT PRESENTER. Numéro d'édition : 94. Mai 1976