

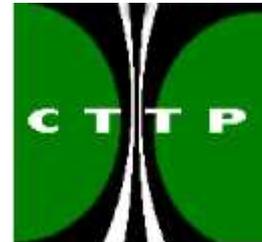
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Civil



Unité de  
Recherche en  
Ingénierie &  
Environnement



## Mémoire

**Formulation par la méthode Marshall d'un Béton  
Bitumineux à Module Amélioré**

Pour l'obtention du  
GRADE MASTER

SPÉCIALITÉ : GENIE CIVIL

Promotrice : Professeur MORSLI Meriem

Par : Mlle CHETTOUF Lynda

*Promotion Septembre 2014*



# Remerciements

*Je tiens à remercier Professeure MORSLI Meriem pour son aide et ses conseils durant l'élaboration de ce modeste travail.*

*J'exprime ma profonde reconnaissance à mes enseignants d'avoir accepté de faire partie de ce jury.*

*J'exprime également mes vifs remerciements à messieurs :*

*Mr MAGRAMANE Djamel chef de service produit noirs au CTTP, et Mr NAHI Samir ingénieur au service de produit noir qui m'ont encadré et guidé durant la période du stage.*

*J'adresse un grand remerciement à l'ensemble du personnel du laboratoire produit noirs du CTTP qui a contribué à la réalisation de la partie expérimentale, et qui a facilité mon intégration parmi eux, je citerai en particulier :*

*GHELIS Islam, AZZOUZ Mustapha, et DJIDA Hicham.*

*Mes remerciements vont également à tous ceux qui ont aidé à la réalisation de ce travail.*





# Dédicace

*Au nom d'Allah le Clément le Miséricordieux  
Tout d'abord je remercie le Dieu qui m'a donné le courage pour arriver à ce stade de fin  
d'études.*

*Je dédie ce modeste travail A:*

 *Mon père, qui a été toujours présent pour moi par son soutien et ses encouragements.*

 *La source de ma vie, ma mère qui m'a appris l'éducation avant le savoir et qui n'a pas cessé de me soutenir durant toutes mes études.*

*Que ce travail soit pour eux le symbole de ma reconnaissance pour leur aide qu'ils m'ont apporté durant toute ma vie.*

 *Mes chers frères et sœur : Mounir, Nadir, Hassan, et Farida.*

 *Mon ami Sofiane pour ses encouragements durant toute l'année.*

 *Tous mes camarades de classe.*



## Résumé

Cette étude consiste en la formulation un béton bitumineux modifié à deux niveaux : dans un premier temps, il s'agissait de pour corriger une mauvaise adhésivité entre les granulats locaux et le bitume qui ont servi à son élaboration par ajout de 1% de chaux, taux calculé sur la proportion pondérale du sable 0/3. Dans une deuxième partie, il a été question d'améliorer les performances du mélange par une technique appropriée. Notre choix s'est porté sur l'ajout de l'additif PR PLAST S destiné à l'origine pour la mise au point des Béton Bitumineux à Module Elevé (BBME). L'additif a été incorporé à divers taux : 0.3%, 0.6%, 0.9%, et 1.2% du poids total de l'enrobé. Le taux optimal d'ajout de l'additif PR PLAST S retenu dans cette étude est de 0.6%; à ce taux : la stabilité gagne 7%, le quotient Marshall, indice des déformations permanentes, augmente de 47%, le module de rigidité passe de 8277 MPa à 10666 MPa soit une augmentation de 31%, pour dépasser le seuil préconisé pour les Enrobés à Module Elevé.

**Mot clés :** formulation, béton bitumineux modifié, béton bitumineux à module élevé, additif PR PLAST S, module de rigidité.

لتصحيح ضعف	مستويين	الإسفلتي	صياغة	هذ
3/0	1	1	تجريد بين الحصى و البيتومين كانت تستخدم في تطويره	
من الوزن الكلي للمزيج	1.2	0.9	0.6	0.3 :
يزيد	7	هذا المعدل يكسب	هي: 0.6	بها هذه
يتجاوز	بزيادة قدرها 31	10666 ميغا	ينتقل من 8277 ميغا	47
			للمزيج ذات	المؤيدة

صياغة : الإسفلتيّة، مزيج ذات

## Abstract

This study is about the formulation modified asphalt concrete at two levels: firstly, it was to correct a poor adhesion between local aggregates and bitumen was used in its development by adding 1% lime, rate calculated in the weight ratio of sand 0/3. In a second part, it has been a question of improving the performance of the mixture by a suitable technique. Our choice was the addition of the additive PR PLAST S originally intended for the development of High Modulus Asphalt Concrete (HMAC). The additive has been incorporated at various rates: 0.3%, 0.6%, 0.9% and 1.2% of the total weight of the mix. The optimal addition of the additive PR PLAST S retained in this study rate is 0.6%, this rate: stability wins 7%, the quotient Marshall, permanent deformation index increases by 47%. The modulus of rigidity increased from 8277 MPa to 10666 MPa, to exceed the threshold recommended for High Modulus Asphalt.

**Keywords:** formulation, modified asphalt concrete, high modulus asphalt concrete , additive PR PLAST S, modulus of rigidity.

**TABLES DES MATIERES**

<b>INTRODUCTION GENERALE</b>	1
<b>CHAPITRE I : LES BETONS BITUMINEUX A MODULE ELEVE -BBME-</b>	
I.1. Introduction	3
I.2. Quelques techniques innovantes	4
I.2.1. Béton Bitumineux Minces (BBM)	4
I.2.2. Les bétons bitumineux très minces BBTM	5
I.2.3. Les bétons bitumineux ultras minces BBUM	6
I.2.4. Les enrobés drainants BBDr	6
I.2.5. Les enrobés à l'émulsion	7
I.2.6. Les enrobés tièdes	7
I.2.7. Les Bétons Bitumineux à Module Elevé –BBME	8
I.3. Les BBME	9
I.3.1. Définition	9
I.3.2. Les classes de BBME	9
I.3.3. L'objectif visé par un BBME	10
I.3.4. Domaine d'emploi	10
I.3.5. Caractéristiques des BBME	10
I.3.6. Propriétés des BBME	11
I.3.7. Avantages des BBME	11
I.4. Formulation des BBME	11
I.4.1. Contenu de l'épreuve de formulation	11
I.4.2. Objectifs d'une épreuve de formulation	12
I.4.3. Niveau d'étude	12
I.5. Comment obtenir un BBME	12
I.6. Procédés de fabrication des BBME	13
I.6.1. BBME obtenue en utilisant des Bitumes modifiés par des Polymère	13
I.6.2. Les BBME obtenues par un additif	14
I.6.2.1. L'additif PR PLAST Sahara	15

I.6.2.2. L’additif PR PLAST S .....	16
I.6.2.3. L’additif PR PLAST Module .....	17
I.7. Mesure des déformations permanentes d’un BBME .....	18
I.7.1. Le comportement visco-élastique d’un BBME .....	18
I.7.1.1. Module complexe d’un Enrobé .....	18
I.7.1.2. Méthodes d’essai .....	21
1. Essai de module complexe .....	22
2. Essai de traction Nottingham Asphalt Tester (NAT) .....	23
I.8. Conclusion .....	27

### **CHAPITRE II : ETUDE EXPERIMENTALE**

II.1. But et procédure expérimentale .....	28
II.2. Rappel des résultats d’identification des matériaux .....	28
II.2.1. Les granulats .....	28
II.2.2. Le bitume.....	32
II.3. Formulation du béton bitumineux à module amélioré (BBMA/014) .....	33
II.3.1. Etude de formulation de BBSG0/14 .....	33
II.3.1.1. Choix du mélange granulaire.....	34
II.3.1.2. Teneurs en bitume .....	35
II.3.1.3. Résultats des essais de performances mécaniques .....	36
II.3.1.4. Choix de formule optimale .....	38
II.3.2. Amélioration de la tenue à l’eau et du pourcentage des vides par la chaux hydratée .....	38
II.3.2.1. Résultats des essais de performances mécaniques et l’essai d’adhésivité.....	39
II.3.3. Amélioration du module de rigidité par ajout de PR PLAST S .....	40
II.3.3.1. Identification de l’additif.....	40
II.3.3.2. Résultats d’essais de performances mécaniques et du module NAT .....	41
1. Mélange avec 0% de PR Plast S.....	41
2. Mélange avec 0.3% de PR Plast S.....	42
3. Mélange avec 0.6% de PR Plast S.....	43
4. Mélange avec 0.9% de PR Plast S.....	44
5. Mélange avec 1.2% de PR Plast S .....	44
II.3.3.3. Influence du taux de PR PLAST S sur les performances du BBMA .....	46

1. Influence sur la stabilité .....	46
2. Influence sur le fluage .....	47
3. Influence sur le quotient Marshall .....	48
4. Influence sur le % de vides .....	49
5. Influence sur la tenue à l'eau .....	50
6. Influence sur le module complexe .....	51
II.3.4. Formulation optimale de BBMA .....	52
II.4. Comparaison entre les performances du BBMA et un BBME équivalent .....	53
II.5. Conclusion .....	54
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>55</b>
<b>REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE .....</b>	<b>56</b>
<b>ANNEXES</b>	
<b>Annexe I .....</b>	<b>59</b>
<b>Annexe II .....</b>	<b>61</b>
<b>Annexe III .....</b>	<b>63</b>
<b>Annexe IV .....</b>	<b>65</b>
<b>Annexe V .....</b>	<b>67</b>

**LISTE DES FIGURES**

Figure I.1. PR PLAST Sahara .....	15
Figure I.2. PR PLAST S .....	16
Figure I.3. PR PLAST Module .....	17
Figure I.4. Représentation du module complexe.....	19
Figure I.5. Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé Sous sollicitation cyclique .....	20
Figure I.6. Déformation d'une éprouvette -Essai de traction indirecte NAT .....	23
Figure I.7. Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps .....	24
Figure I.8. Exemple d'appareillage d'essai .....	25
Figure I.9. Châssis d'alignement LVDT .....	26
Figure II.1. Les trois fractions granulaires .....	29
Figure II.2. Courbes granulométriques des fractions granulaires .....	31
Figure II.3. Fuseau spécifique de la courbe granulométrique du mélange BBSG 0/14.....	35
Figure II.4. Granules de PR PLAST S .....	40
Figure II.5. Variation de la stabilité Marshall en fonction de % de PR Plast S .....	46
Figure II.6. Variation de fluage Marshall en fonction de % de PR Plast S .....	47
Figure II.7. Variation de quotient Marshall en fonction de % de PR Plast S .....	48
Figure II.8. Variation de % de vide en fonction de % de PR Plast S .....	49
Figure II.9. Variation de la tenue à l'eau en fonction de % de PR Plast S .....	50
Figure II.10. Variation de module de rigidité en fonction de % de PR Plast S .....	51

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau I.1. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P 98-132) .....	5
Tableau I.2. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P98-137) .....	5
Tableau I.3. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P98-134) .....	7
Tableau I.4. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P 98-141).....	9
Tableau I.5. Propriétés des bétons bitumineux à module élevé .....	11
Tableau I.6. Niveaux de formulation en fonction des objectifs recherchés .....	12
Tableau I.7. Méthodes d'essai normalisées pour la détermination du module complexe des enrobés .....	22
Tableau II.1. Résultats de l'analyse chimique de la roche .....	29
Tableau II.2. Caractéristiques de fabrication des granulats .....	30
Tableau II.3. Résultats de l'analyse granulométrique .....	31
Tableau II.4. Caractéristiques intrinsèques des granulats .....	32
Tableau II.5. Résultats des essais sur bitume .....	33
Tableau II.6. Les pourcentages des fractions granulaires pour le mélange .....	34
Tableau II.7. Valeurs de module de Richesse et les teneurs en liants correspondants. ....	36
Tableau II.8. Valeurs de la teneur en liant et MVR du mélange .....	36
Tableau II.9. Résultat des essais Marshall et tenue à l'eau de différents mélanges .....	37
Tableau II.10. Récapitulatif des résultats d'essais Marshall et AKZOO des différents mélanges .....	39
Tableau II.11. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0% de PR Plast S .....	41
Tableau II.12. Résultats de module de rigidité avec 0% de PR Plast S .....	42
Tableau II.13. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.3% de PR Plast S.....	42
Tableau II.14. Résultats de module de rigidité avec 0.3% de PR Plast .....	43

Tableau II.15. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.6% de PR Plast S .....	43
Tableau II.16. Résultats de module de rigidité avec 0.6% de PR Plast S .....	43
Tableau II.17. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.9% de PR Plast S .....	44
Tableau II.18. Résultats de module de rigidité avec 0.9% de PR Plast S .....	44
Tableau II.19. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 1.2% de PR Plast S .....	45
Tableau II.20. Résultats de module de rigidité avec 1.2% de PR Plast S .....	45
Tableau II.21. Récapitulatif des résultats des essais de différents mélanges .....	52
Tableau II.22. Comparaison des résultats entre BBMA et BBME .....	53

---

# ***INTRODUCTION***

# ***GENERALE***

## INTRODUCTION GENERALE

Le caractère répété du chargement des chaussées conduit à des phénomènes de fatigue. Les passages successifs des charges roulantes entraînent une dégradation progressive des matériaux qui peut mener à la ruine de la structure.

Les fermetures fréquentes de routes pour réparation et remise en état constituent un problème croissant, car elles contribuent de manière importante à l'augmentation des encombrements : les travaux sont de plus en plus difficiles, en raison des gênes et des temps d'attente qu'ils occasionnent aux usagers. Aussi le maintien en état de service des autoroutes et routes principales sans perturber le flux de circulation représente un défi majeur pour les maîtres d'ouvrage et les équipes opérationnelles qui gèrent la construction et l'entretien des routes. De ces faits sont nés les **enrobés nouveaux**, qui permettent de réaliser une structure de chaussée dont la circulation automobile se déroule dans les meilleures conditions.

L'évolution des enrobés a porté essentiellement sur l'épaisseur des couches et sur leurs performances et plus exactement les constituants de ces derniers. La mise au point des bitumes plus durs ou bitumes modifiés et d'additifs a contribué à la naissance des enrobés plus performants : « *Les Enrobés à Module Elevé* ».

L'invention des EME est attribuée à la France où ils ont fait leur apparition à grande échelle il y a plus de 20 ans. Ces matériaux font l'objet d'une norme et ils sont couramment appliqués sur des chaussées fortement sollicitées. L'expérience s'est étendue en Belgique, en République Tchèque, Irlande, Suisse, Pologne et récemment en Algérie. C'est principalement la mise au point du bitume dur - bitumes 10/20, 15/25 ou 20/30, dans les années 1990, qui a permis l'émergence des EME. Un bitume dur possède des caractéristiques remarquables, pour apporter aux couches d'assise (enrobé à module élevé EME) et couche de roulement (BBME) les hautes performances attendues.

Lorsque ce type de bitume fait défaut, un bitume de grade traditionnel (40/50) peut être utilisé avec des additifs de nature organique (gilsonite, asphalte dur,...) sous forme de fines ou de granulés, pour durcir le liant et augmenter la rigidité de l'enrobé. Ce pourrait

être une solution pour réaliser des EME dans les pays du Maghreb où le bitume dur fait encore défaut.

Les performances d'un enrobé est liée directement à sa formulation donc à ses constituants ; l'évaluation des performances s'effectue au laboratoire au moyen d'une séquence d'essais bien déterminés avec des spécifications normalisées. La séquence d'essai étant elle-même directement lié à la méthode de formulation.

Notre sujet s'inspire de «*La technique des EME\_BBME*». Toute fois, la formulation utilisée est celle encore en vigueur en Algérie, à savoir la Méthode Marshall.

Le travail s'est déroulé en deux principales étapes : recherche bibliographique et partie expérimentale :

**Chapitre I** : Une recherche bibliographique sur les BBME.

**Chapitre II** : Formulation d'un béton bitumineux à module amélioré par la méthode Marshall.

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

---

# CHAPITRE I

## LES BETON BITUMINEUX A MODULE ELEVE -BBME-

## CHAPITRE I.

### LES BETONS BITUMINEUX A MODULE ELEVE -BBME-

#### I.1. INTRODUCTION :

Le caractère répété du chargement et l'agressivité accrue du trafic poids lourds conduisent à des phénomènes de fatigue entraînant une dégradation progressive des matériaux de chaussées qui peut mener à la ruine de la structure [1-2-3]. La durabilité d'une chaussée passe par l'amélioration des caractéristiques mécaniques des enrobés qui la constituent, amélioration qui peut être obtenue soit par incorporation d'additifs dans l'enrobé, soit par utilisation de bitume de grade dur. L'incorporation d'additifs permet de fabriquer des enrobés spécifiques, éprouvés, agréés et mis en œuvre dans de nombreux pays. Les additifs sont généralement des polymères. Les élastomères, les plastomères et les fibres sont les plus utilisés [4]. Pour les élastomères, c'est le Styrène-Butadiène-Styrène (SBS) qui est le plus performant [5]: il augmente l'élasticité du bitume, améliore les propriétés mécaniques des mélanges et la tenue au vieillissement [6-7] et réduit à la fois la déformation permanente [8-9], la fissuration à basse température [10-11] et les dégâts causés par l'humidité [12-13]. Dans le cas des plastomères, on citera le Semi-Cristallin d'Ethylène Acétate de Vinyle (EVA), son rôle est d'améliorer la maniabilité des enrobés pendant la mise en œuvre. Il se caractérise aussi par la grande résistance à la déformation qu'il confère à l'enrobé bitumineux [13-14]. Quand aux fibres, elles renforcent la résistance à l'orniérage, on citera les fibres en polyester, les fibres en polyacrylonitrile ou en amiante (ces dernières sont retirées du marché) [15-16]. L'utilisation de liant pur de grade dur (bitume 10/20) prêt à l'emploi est liée à la technique des Enrobés à Module Elevés (EME) [17]. Un bitume de grade traditionnel (bitume 40/50) peut être utilisé avec des additifs de nature organique (gilsonite, apshalte dur,...) sous forme de fines ou de granulés, pour durcir le liant et augmenter la rigidité de l'enrobé [18]. Toutes ces avancées ont donné naissances à différentes techniques.

## I.2. QUELQUES TECHNIQUES INNOVANTES

L'évolution des enrobés bitumineux a apporté de nouvelles techniques à travers le monde. Ces techniques sont développées durant les années quatre-vingt, les évolutions ont porté essentiellement sur la formulation des mélanges et les épaisseurs des couches, on citera :

### I.2.1. Béton Bitumineux Minces (BBM)

#### **Définition :**

Les BBM sont obtenus à partir d'un mélange de bitume pur ou modifié, de granulats fabriqués dans une centrale d'enrobage. Ils sont destinés à la réalisation des couches de liaison ou roulement.

Ils se caractérisent par une faible résistance à l'orniérage. Ils assurent une bonne adhérence et leur emploi en deux couches assure un bon uni.

On distingue cinq types de bétons bitumineux minces en fonction de leur granulométrie :

- Béton bitumineux mince A 0/10 mm (BBM A 0/10) ;
- Béton bitumineux mince A 0/14 mm (BBM A 0/14) ;
- Béton bitumineux mince B 0/10 mm (BBM B 0/10) ;
- Béton bitumineux mince B 0/14 mm (BBM B 0/14) ;
- Béton bitumineux mince C 0/10 mm (BBM C 0/10).

Les types **A** se caractérisent par une courbe granulométrique discontinue entre 2 mm et 6,3 mm.

Les types **B** se caractérisent par une courbe granulométrique discontinue entre 4 mm et 6,3 mm.

Le type **C** se caractérise par une courbe granulométrique continue.

Chaque type peut se situer dans trois classes numérotées 1, 2 et 3 définies par la performance à l'essai d'orniérage.

Ces classes de performances sont définies au moyen d'une épreuve de formulation, dont le niveau est en fonction de l'utilisation du produit.

#### **Epaisseur d'utilisation :**

Les épaisseurs moyennes d'utilisation et les épaisseurs minimales en tout point sont représentées dans le tableau I.1 :

Tableau I.1. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P 98-132).

Valeurs en centimètre.

Type de BBM	Epaisseur totale en tout point	Epaisseur moyenne d'utilisation
BBM A, B ou C 0/14	3 à 4	2.5
BBM A ou B 0/14	3.5 à 5	3

## Domaine d'emploi

Les bétons bitumineux minces sont principalement utilisables en voiries urbaines, ils sont parfaitement adaptés aux chargements des tapis vieillissants pour rétablir la rugosité de la chaussée et pour des contraintes de gabarit [19].

## I.2.2. Les bétons bitumineux très minces BBTM

### Définition :

Ce sont des enrobés à chaud dont la formule est de granularité discontinue (2/4 ou 2/6), le liant utilisé peut être un bitume pur mais généralement il est modifié. Ils sont employés pour des routes dont la vitesse est élevée. Ils se caractérisent par une adhérence bonne et durable, une amélioration sensible de l'uni.

On distingue deux types de bétons bitumineux très minces en fonction de leur granulométrie :

- Béton bitumineux très mince 0/6 mm (BBTM 0/6) ;
- Béton bitumineux très mince 0/10 mm (BBTM 0/10).

Chaque type peut se situer dans deux classes numérotées 1 et 2, et définies par le pourcentage de vides obtenu à la PCG.

Ces classes de performances sont définies au moyen d'une épreuve de formulation, dont le niveau est en fonction de l'utilisation du produit [19].

Les épaisseurs d'utilisation sont mentionnées dans le tableau I.2 :

Tableau I.2. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P98-137).

Valeurs en centimètres.

Type de BBTM	Epaisseur totale en tout point	Epaisseur moyenne d'utilisation
BBTM 0/6 et 0/10	2 à 3	1.5

### I.2.3. Les bétons bitumineux ultras minces BBUM

#### Définition :

Ils peuvent se définir comme des enduits superficiels dont les gravillons ont été pré-enrobés à chaud avec un mortier bitumineux. Leur emploi est surtout destiné aux routes à vitesse élevée, ils se caractérisent par une adhérence excellente et durable, une amélioration de l'uni très légère.

Comme toutes les techniques minces son emploi est conditionné par un support en bon état. L'épaisseur des couches en BBTM est de l'ordre de 1 cm qui correspond à la dimension du plus grand granulat [19].

#### Domaine d'emploi des BBTM et BBUM

Les bétons bitumineux très minces et ultras minces sont mis au point et développés pour améliorer les caractéristiques de surface et/ou régénérer l'intégrité d'une couche de roulement d'une chaussée en bon état structurel et non déformée. Elles sont aussi utilisées en « Construction » et « Renforcement » pour mieux dissocier les fonctions entre couches de roulement et assises [19].

### I.2.4. Les enrobés drainants BBDr

#### Définition :

Il s'agit d'enrobés dont le pourcentage des vides et la forme des vides sont tels que les eaux pluviales peuvent circuler dans les vides communicants. Pour obtenir cette caractéristique, les BBDr ont une granularité discontinue, qui se caractérise par l'absence d'une fraction de granulats de taille intermédiaire (par exemple, pas de gravillons 2/4). D'autre part, leur formulation contient peu de sable et de filler et moins de liant qu'un enrobé classique en couche de roulement. Ainsi, lors du compactage de la couche de BBDr, l'arrangement des gros éléments crée des vides interstitiels qui ne peuvent pas être complètement comblés par des éléments plus petits et le mastic constitué par le mélange du sable, du filler et du liant [19].

On distingue deux types de bétons bitumineux drainants en fonction de leur granulométrie :

- Béton bitumineux drainant 0/6 mm (BBDr 0/6) ;
- Béton bitumineux drainant 0/10 mm (BBDr 0/10).

Chaque type peut se situer dans deux classes numérotées 1 et 2 définies par le pourcentage de vides obtenu à la PCG.

Ces classes de performances sont définies au moyen d'une épreuve de formulation.

### Avantage :

Par chaussée mouillée l'enrobé drainant présente les avantages suivants :

- Diminution de la réflexion de la lumière des phares sur chaussée mouillée, d'où une meilleure visibilité ;
- Amélioration de l'adhérence pour des vitesses supérieures à 90 km/h.

Par chaussée sèche l'enrobé drainant présente les avantages suivants par rapport aux enrobés conventionnels de surface :

- Réduction du bruit : un enrobé drainant en bon état réduit le niveau sonore.
- Bonne résistance aux déformations permanentes.

Tableau I.3. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P98-134)

Valeurs en centimètres

Type de BBDr	Épaisseur totale en tout point	Épaisseur moyenne d'utilisation
BBDr 0/10	3 à 4	2.5
BBDr 0/14	3.5 à 5	3

### I.2.5. Les enrobés à l'émulsion

Les études débutent avec la réalisation de chantiers expérimentaux utilisant un procédé à l'émulsion de bitume. Ce type d'enrobés est en fait pour l'instant dédié à la réalisation de couches de roulement minces sur des chaussées de trafic faible à moyen. Son domaine standard est l'utilisation en monocouche de reprofilage ou de roulement avec une épaisseur moyenne de 3 à 4 cm. Il est caractérisé par des formulations en granulométrie 0/10. Son utilisation doit être quasi immédiate après la fabrication [21].

### I.2.6. Les enrobés tièdes

Les enrobés à basses températures ou enrobés tièdes sont fabriqués à une température de 125 °C, inférieure de 40 °C à la température classique de fabrication des enrobés. Ils sont étendus à la température de 120 °C et le compactage s'effectue à moins de 100°C.

Cette réduction de 40° entraîne une très forte réduction de toutes les émissions observées. Mais probablement qu'un abaissement de température plus important peut être recherché [21].

### **I.2.7. Les Bétons Bitumineux à Module Elevé –BBME-**

Les Bétons Bitumineux à Module Elevé font partie de la famille des Enrobés à Module Elevé. On y distingue ceux destinés à la couche de base, on les nomme Enrobés à Module Elevé –EME- et ceux destinés aux couches de surface (roulement et liaison) on les nomme Béton Bitumineux à Module Elevé -BBME- . Ils sont caractérisés par un module élastique dont la valeur est largement supérieure à celles des enrobés classiques. Ils sont destinés à la réalisation des couches de chaussées destinées à reprendre un trafic lourd [20].

#### **Définition.**

Le EME et BBME sont des enrobés préparés à partir d'un mélange de liant hydrocarboné, de granulats (éventuellement de dopes) et/ou d'additifs minéraux ou organiques, dosés, chauffés et malaxés dans une installation appelée centrale d'enrobage. Ils sont destinés à la réalisation des assises dans le cadre de travaux neufs ou de renforcements de chaussées [20].

Ils se caractérisent par un module de rigidité élevé atteignant 17000MPa et une plus grande résistance à la fatigue que les enrobés classiques.

On distingue deux classes de performance classe 1 et classe 2. Les granularités utilisées sont 0/10, 0/14 et 0/20.

Chaque type d'EME comprend deux classes granulaires qui diffèrent entre elle notamment par leur teneur en liant et la dureté. On distingue :

**EME Classe 1** : correspond à des graves bitumes à module élevé obtenues par l'emploi d'un bitume dur, aux dosages voisins de ceux des graves bitumes (GB).

**EME Classe 2** : correspond à un enrobé à module élevé comportant, de plus, un très bon comportement en fatigue, du fait du dosage élevé en bitume dur, généralement quand on parle d'EME, c'est cette classe qui est désignée.

Les BBME, objet de cette étude sont définis dans le paragraphe qui suit (I.3).

## I.3. LES BBME

### I.3.1. Définition

Les BBME sont obtenus à partir d'un mélange de bitume pur ou modifié, et de granulats fabriqués dans une centrale d'enrobage. Ils sont destinés à la réalisation des couches de liaison et de roulement. Dans le cas de cette dernière généralement pour un trafic lourd et rapide, ils se caractérisent par un module de rigidité E plus élevé que les enrobés classiques et par une bonne tenue à l'orniérage. On peut les définir aussi comme des bétons bitumineux semi-grenus qui présentent des niveaux de performance (module de rigidité, résistance à l'orniérage) élevés et une meilleure tenue à l'eau [19].

On distingue deux types de bétons bitumineux à module élevé :

- Béton bitumineux à module élevé 0/10 mm (BBME 0/10) ;
- Béton bitumineux à module élevé 0/14 mm (BBME 0/14).

Les épaisseurs moyennes d'utilisation et les épaisseurs minimales en tout point sont représentées dans le tableau I.4 :

Tableau I.4. *Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P 98-141).*

*Valeurs en centimètres.*

Type de BBME	Epaisseur totale en tout point	Epaisseur moyenne d'utilisation
BBME 0/10	5 à 7	4
BBME 0/14	6 à 9	5

### I.3.2. Les classes de BBME

On distingue trois classes de BBME selon leur comportement mécanique :

Classe 1 : % ornière à 30000 cycles < 10 %, E 9000MPA

Classe 2 : % ornière à 30000 cycles < 7.5 %, E 11000MPA

Classe 3 : % ornière à 30000 cycles < 5%, E 11000MPA

Tel que E : le module de rigidité [22].

### I.3.3. L'objectif visé par un BBME

Les BBME constituent une évolution des enrobés épais permettant de mieux répondre aux attentes en matière de résistance à l'orniérage et de comportement mécanique face à l'accroissement des sollicitations lourdes.

L'augmentation des performances s'est faite par l'emploi de bitume de grade plus dur, d'ajouts de polymères, d'additifs spéciaux tels que poudre d'asphalte ou fibre. Les granularités sont identiques à celles de BB. La teneur en bitume des BBME est généralement plus élevée que celle des BBSG [23].

### I.3.4. Domaine d'emploi

Le domaine d'emploi des BBME est celui des travaux neuf (chaussée neuve) et de renforcement (entretien) ou la chaussée est fortement sollicitée et cela en couche de liaison (EME ou BBME) ou de roulement (BBME) [23].

On l'emploi donc dans :

- Les routes ordinaires,
- Autoroutes,
- Les quais et aires de manœuvres des ports,
- Pistes et voies de circulation des aéroports,
- Routes à vitesse élevée.

### I.3.5. Caractéristiques des BBME

**Rigidité :** les BBME font appel à des liants et des additifs qui leur confèrent des modules de rigidité largement supérieurs à ceux des BB classiques. Les contraintes du trafic transmises au sol s'en trouvent réduites, et pour une même durée de vie, les épaisseurs de chaussée peuvent être diminuées.

**Endurance :** la sélection des liants et des additifs, ainsi que le réglage adéquat de leur teneur, permettent d'atteindre des niveaux de tenue en fatigue très élevés et d'assurer ainsi la longévité de la chaussée sous tous types de trafics.

**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 [24].

## I.3.6. Propriétés des BBME

Tableau I.5. Propriétés des bétons bitumineux à module élevé [22].

produit	normes	classification		K min	Epaisseur (cm)	
		Classe ou type	granulométrie		moyenne	min
BBME	NF P	classe 1,2 ou 3	0/10	3,5	5 à 7	4
	98- 141 (11/99)	selon performances. mécaniques	0/14	3,3	6 à 9	5

## I.3.7. Avantages des BBME :

### Les atouts qui font la différence

- Une réduction de l'épaisseur des chaussées.
- Une économie de ressources naturelles.
- Une fabrication réalisable avec les procédés ordinaires [25].

### BBME et développement durable

La comparaison des caractéristiques des BBME vis-à-vis des BBSG classe 2 ou 3 montre le niveau de performance élevé (imperméabilité (%vide), tenue à l'eau, déformation, rigidité et fatigue). Le dimensionnement des corps de chaussée en utilisant ces matériaux amène à l'adoption d'épaisseurs de couches moins importantes et par la suite de faire des gains considérables : jusqu'à 25% sur l'épaisseur totale, 30% pour les quantités des granulats et 20% pour les quantités de liants, plus le gain en logistique (transport et stockage). Cela amène à une économie financière des projets, avec une Protection de l'environnement (moins de granulats fabriqués et utilisés pour une ressource non renouvelable) et moins de gêne pour les utilisateurs de la route (intervalle de temps entre les moments d'entretien plus long) [25].

## I.4. FORMULATION DES BBME

### I.4.1. Contenu de l'épreuve de formulation

- Choix des constituants et vérification de leurs propriétés ;
- Définition des compositions minérales ;

- Définition du module de richesse minimal (dosage minimal de liant selon la surface spécifique du mélange minéral) ;
- Niveau d'étude ;
- Vérification des performances fixées [24].

### I.4.2. Objectifs d'une épreuve de formulation

Etablissement, pour une composition donnée, les caractéristiques suivantes :

- Pourcentage des vides.
- Tenue à l'eau (Duriez).
- Résistance à la déformation permanente.
- Performances mécaniques si nécessaire : orniérage, module et fatigue [24].

### I.4.3. Niveau d'étude

Le niveau d'épreuve de formulation est spécifique en fonction des objectifs recherchés, de l'enjeu du chantier, de son volume et de l'importance des diverses sollicitations auxquelles sera soumis l'enrobé, Plus l'enrobé sera sollicité mécaniquement, plus le niveau d'épreuve de formulation devra être élevé [24].

#### Approche pratiquée à ce jour

Tableau I.6. Niveaux de formulation en fonction des objectifs recherchés.

Niveau de l'épreuve de formulation	Tenue à l'eau (NF P 98-251-1)	PCG (NF P 98-52)	Orniérage (NF P 98-260-2)	Module (NF P 98-261-1)	Résistance en fatigue (NF P 98-261-1)
Niveau1	X	X			
Niveau2	X	X	X		
Niveau3	X	X	X	X	
Niveau4	X	X	X	X	X

## I.5. COMMENT OBTENIR UN BBME

Un BBME peut être obtenue par la modification du liant employé par un des matériaux suivant :

- Huiles Spéciales ;

- Huiles Fluxantes (Aromatiques) ;
- Bases pour lubrifiants (Aliphatiques) ;
- Additifs Chimiques ;
- Dope d'adhésivité ;
- Additifs pour bitumes tièdes.

Ou par l'ajout de polymères (additif anti-orniérant) comme granulés au bitume dans le mélange, cet ajout entraine un changement de la consistance du mélange, alors d'un certain nombre de ses propriétés [26].

### **I.6. PROCEDES DE FABRICATION DES BBME**

#### **I.6.1. BBME obtenu en utilisant des Bitumes modifiés par des Polymères**

##### **Qu'est ce qu'un polymère**

Un polymère se construit un peu comme un train. Par synthèse chimique, on accroche de multiples «wagons» identiques, des monomères (voir annexe I), molécules à base de carbone et d'hydrogène. Ainsi est née la matière plastique, connue pour ses qualités isolantes [27].

##### **Rôle de polymère dans un liant bitumineux**

L'apport des polymères modifie la viscoélasticité du liant et réduit ainsi sa susceptibilité thermique [27].

##### **Notion de compatibilité bitume polymère**

Bitume quelconque + Polymère quelconque conduit à:

- Mélange hétérogène car le polymère et le bitume sont incompatibles.
- Solubilisation du Polymère conduit à une compatibilité parfaite, mais la viscosité augmente.

##### **Compatibilité – Processus d'interaction**

Généralement, aux températures de service, les bitumes + polymères = milieux biphasiques micro- hétérogènes constitués de:

- **Phase polymère**, solvatée par une partie des maltènes du bitume ;
- **Phase bitume** regroupant les constituants n'intervenant pas dans le processus de solvation du polymère [28].

### **Nature du mélange bitume polymère :**

Le mélange bitume polymère est dit :

- A matrice bitume si Polymères < 3 % ;
- A deux phases continues si Polymères ~ 5 % ;
- A matrice polymère si Polymères > 7 % .

### **Type de polymères ajouté au bitume**

- Famille Styrène-Butadiène-Styrène (SBS) le plus utilisé (voir annexe I).
- Styrène-Butadiène-Rubber (SBR) (voir annexe I).
- Éthylène-Vinyle-Acétate (EVA) (voir annexe I).
- Acide poly-phosphorique (PPA) (voir annexe I) [26].

### **Les facteurs influent les bitumes modifiés aux polymères**

Les bitumes modifiés sont des ‘systèmes moléculaires organisés complexes’

#### **– Ils sont très dépendants du polymère**

- de sa nature ;
- de sa structure ;
- de sa concentration.

#### **– Ils dépendent aussi :**

- de la nature (composition, structure, origine) et de la classe du bitume de base ;
- du procédé de mélange ;
- de l’ajout éventuel d’agent de comptabilisation ou de réticulation [26].

### **I.6.2. Les BBME obtenus par un additif**

Un bitume de grade traditionnel (35/50) peut être utilisé avec des additifs de nature organique (Gilsonite « voir annexe », asphalte dur,...) sous forme de fines ou de granulés, pour durcir le liant et augmenter la rigidité de l’enrobé. Ce moyen est employé dans les zones géographiques où les classes de bitume dur ne sont pas disponibles. Ça pourrait être une solution pour réaliser des EME ou BBME dans les pays du Maghreb [18].

### I.6.2.1. L'additif PR PLAST Sahara

#### Présentation :

Le PR PLAST Sahara a une granulométrie de 2.5 mm. Issu d'un mélange de polyoléfinés et pré-gave au bitume' c'est un produit de fluidité constante traité avec un anti- retrait.

Il est utilisé pour la fabrication d'enrobés bitumineux en couche de roulement et de liaison dans des régions chaude ou désertiques [29].



Figure I.1. PR PLAST Sahara [29].

#### Procédé :

Injecter le PR PLAST Sahara dans le malaxeur des post d'enrobage avant ou juste après l'injection du bitume.

Dosage : taux d'ajout généralement compris entre 0.2 et 0.6% par tonne d'enrobé.

Le temps de malaxage est identique à un enrobé traditionnel.

La température de fabrication doit être comprise entre 170° et 180°, le compactage doit être terminer entre 100° et 110°.

#### Principaux avantages :

- Améliore considérablement la résistance à l'orniérage et le module d'élasticité de l'enrobé.
- Permet de conserver la fatigue du bitume d'origine.
- Souplesse de stockage d'utilisation, de fabrication et de dosage.
- Réduction de la consommation énergétique et des émissions dans l'atmosphère liées à l'absence d'usine de liant modifié.
- Pérennise et augmente la durée d'utilisation des chaussées de 30% compte tenu des performances mécaniques obtenues

- Grace à son traitement anti-retrait et au pré-gavage des granulés de bitume il permet de formuler des enrobés résistants à l'orniérage et à la fissuration de surface dans les zones chaudes et arides.

### I.6.2.2. L'additif PR PLAST S

#### Présentation :

C'est un additif particulier d'une granulométrie de 2/4 mm, issu d'un mélange de polyoléfines, pré-gavé au bitume spécial et traité avec un agent anti-retrait, introduit lors du malaxage, sur les granulats chauds avant enrobage en centrale d'enrobage, pré dosés de 7 à 12 kg pour les postes discontinus [29].

Il se caractérise par :

- Une densité généralement varie 0,91 - 0,965 gr/cm<sup>3</sup>.
- Un Point de fusion entre 140 – 150 °C.

Au niveau de l'enrobé, il a un triple effet de renforcement :

- Un effet de **liant** obtenu par dissolution d'une certaine partie du polymère offrant notamment un abaissement de la pénétrabilité, une augmentation de la température bille et anneau, un abaissement de la susceptibilité thermique.
- Un effet **d'armature** initié par des fibres plastiques présentes en créant des ponts à l'intérieur du squelette granulométrique.
- Un effet **bloquant** dû aux particules ramollies provisoirement lors de la mise en œuvre et qui seront ainsi thermoformées lors du compactage en remplissant les vides du squelette granulométrique.

L'ensemble de ces trois effets permet à l'enrobé ainsi amélioré d'obtenir une amélioration importante des performances des chaussées et de leur durée de service.



Figure I.2. PR PLAST S [29].

### Principaux avantages :

- résistance élevée au fluage.
- amélioration considérable de la tenue à la fatigue de l'enrobé.
- résistance très élevée à l'orniérage de l'enrobé notamment à haute température.
- amélioration de la souplesse et de la cohésion de l'enrobé.
- diminution de l'épaisseur de la couche de roulement d'environ 25%.
- souplesse d'utilisation et de fabrication.
- utilisable avec tous les grades de bitume.
- gain économique.

### Domaines d'applications

- autoroutes, routes à fort trafic.
- circulation agressive.
- voirie urbaine –voies de bus.
- piste des aéroports.
- sols industriels et zones portuaires.
- aires de stockage des containers.

### I.6.2.3. L'additif PR PLAST Module

#### Présentation :

PR PLAST S de couleur noir, d'une granulométrie de 5 mm. Le taux d'ajout est généralement compris entre 5 et 8 kg par tonne d'enrobé compris de 0,5 à 0,8 % de l'enrobé. Il est injecté dans le malaxeur des postes d'enrobage.

La température de fabrication est de 180 °C [29].

Il présente:

- Une densité généralement varie de 0,93 – 0,965 gr/cm<sup>3</sup>.
- Un Point de fusion de 175 °C.



Figure I.3. PR PLAST Module [29].

### Principaux avantages

- la fabrication des enrobés hauts modules avec des bitumes classiques.
- la réduction d'épaisseur de 20 à 30%.
- en rappel, la réduction du coût.

### Domaines d'applications

- couche de roulement BBME (bitume 50/70)
- couche de base EME – BBME (bitume 35/50 ou 50/70)
- couche de fondation EME – BBME (bitume 35/50 ou 50/70).

## I.7. MESURE DES DEFORMATIONS PERMANENTES D'UN BBME

Pour de diverses raisons, les chantiers comportant des BBME sont de plus en plus couramment réalisés. Les performances de ces enrobés, notamment en termes de résistance mécanique (module de rigidité) font l'objet de spécifications qui s'inscrivent dans un cadre normalisé. **La rigidité de l'enrobé** ou du béton bitumineux à module élevé se mesure à travers plusieurs paramètres, parmi lesquels, figure le module de rigidité appelé également **module complexe** du l'enrobé bitumineux lui-même.

### I.7.1. Le comportement visco-élastique d'un BBME

#### I.7.1.1. Module complexe d'un Enrobé

Le module complexe ( $E^*$ ) est l'expression de la rigidité d'un matériau viscoélastique sous **chargement cyclique**, tel qu'un enrobé. La déformation d'un matériau viscoélastique dépend du temps de chargement et elle est différée dans le temps, contrairement à un matériau élastique dont la déformation est instantanée. De plus, **l'enrobé est un matériau thermosensible**, ce qui signifie que le  $E^*$  varie également en fonction de la température. Le  $E^*$  permet de généraliser des méthodes de résolution de problèmes mécaniques développées pour les matériaux élastiques aux matériaux viscoélastiques [30].

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'Équation I.1. Le  $E^*$  peut également se décomposer en deux paramètres sous sa forme vectorielle, soit son module ( $|E^*|$ ) (norme du vecteur) à l'équation I.2 et son argument ( $\phi$ ) (angle du vecteur) à l'Équation I.3, tel que représenté dans le plan complexe de la figure I.4.

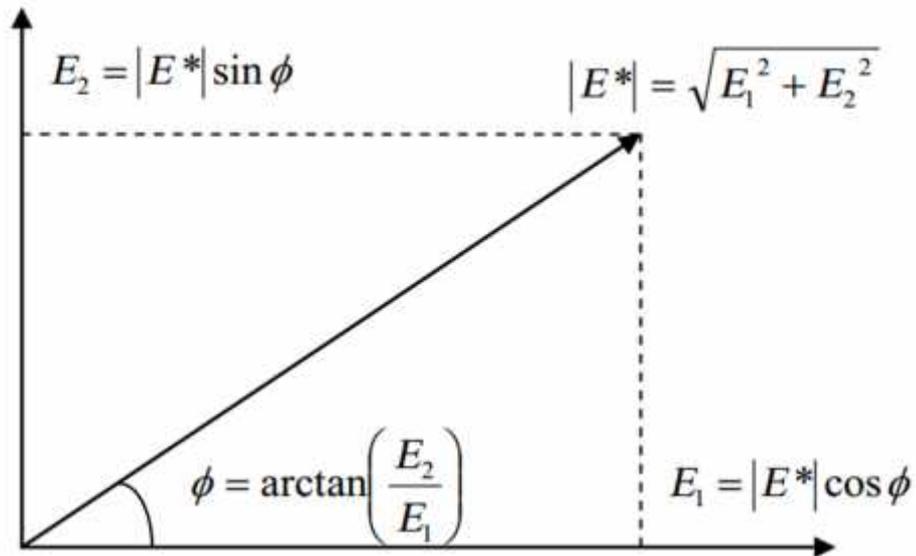


Figure I.4. Représentation du module complexe [30].

$$E^* = E_1 + iE_2 = |E^*| \cos \phi + i|E^*| \sin \phi \quad \text{Équation I.1}$$

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad \text{Équation I.2}$$

$$\phi = \arctan(E_2 / E_1) \quad \text{Équation I.3}$$

Où :

$E^*$  = module complexe (MPa),  $|E^*|$  = module du module complexe (MPa),

$\phi$  = argument du module complexe (rad),

$E_1$  = partie réelle du module complexe (MPa),

$E_2$  = partie imaginaire du module complexe (MPa),

$i$  = nombre imaginaire ( $\sqrt{-1}$ ).

Le  $E^*$  d'un enrobé est déterminé à l'aide d'essais cycliques à petites déformations ( $< 100 \mu\text{m/m}$ ), soit dans le domaine linéaire du comportement mécanique, où la rigidité de l'enrobé est indépendante de l'état de contrainte ou de déformation.

La figure I.5 montre un cycle de sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé.

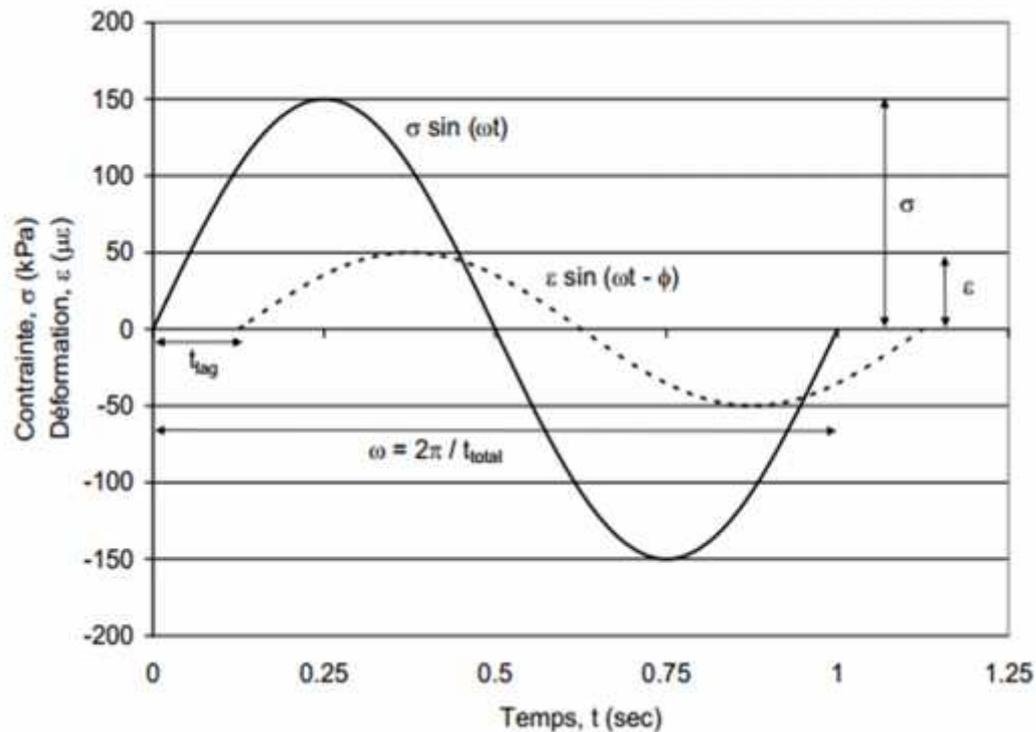


Figure I.5. Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé  
Sous sollicitation cyclique [30].

Le  $E^*$  est le rapport entre la contrainte cyclique et la déformation cyclique, tel que présenté à l'Équation I.4. La déformation accuse un retard sur la contrainte, ce qui introduit un déphasage dans l'équation qui s'exprime alors sous forme de nombre complexe.

Le  $|E^*|$  de l'enrobé est nommé « *module dynamique* » en mécanique de chaussée, il est déterminé selon l'équation I.5. Le  $\phi$  est nommé « angle de phase », il est déterminé selon l'Équation 6 :

$$E^* = \frac{\sigma \sin(\omega t)}{\epsilon \sin(\omega t - \phi)} = |E^*| \cos \phi + i |E^*| \sin \phi \quad \text{Équation I.4}$$

$$|E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$
$$= \omega t_{lag}$$

Équation I.5

Équation I.6

Où :

$E^*$  = module complexe (MPa),

$|E^*|$  = module dynamique (MPa),

= angle de phase (rad),

= contrainte (MPa),

= déformation (m/m),

= période (rad/s),

$t$  = temps de chargement (s),

$t_{lag}$  = temps de déphasage entre  $\sigma$  et  $\varepsilon$  (s).

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  $|E^*|$  est une approximation du module élastique d'un matériau viscoélastique, qui peut être utilisée pour le dimensionnement des chaussées lorsque les lois de l'élasticité sont employées.

Le  $t_{lag}$  représente le décalage dans le temps entre la contrainte et la déformation. Il varie de  $0^\circ$  pour un matériau purement élastique (réaction instantanée) à  $90^\circ$  pour un matériau purement visqueux.

Le  $|E^*|$  est nommé « *module dynamique* » en Amérique du Nord AASHTO 'American association of states highway officials' et « *module de rigidité* » en Europe (EN 12697-26). Le  $E^*$  est nécessaire pour décrire le comportement viscoélastique complet de l'enrobé [30].

### I.7.1.2. Méthodes d'essai de module complexe

Le  $E^*$  d'un enrobé est déterminé à différentes fréquences et températures, à petite déformation, afin de caractériser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé. L'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), l'American Society for Testing and Materials (ASTM) et le Comité Européen de Normalisation (CEN) proposent différentes méthodes d'essai pour déterminer le  $E^*$  des enrobés. Ces méthodes d'essai sont présentées au tableau I.7, où des essais de traction ou de compression, directe ou indirecte, sont proposés, ainsi que des essais de flexion en différents points.

Tableau I.7. Méthodes d'essai normalisées pour la détermination du module complexe des enrobés.

Norme	Méthode d'essai	Statut
AASHTO TP 62-07	Compression directe	Modifiée en 2007
ASTM D 3497-79	Compression directe 2003	Ré-approuvée en 2003
ASTM D 4123-82	Traction indirecte	Retirée en 2003
EN 12697-26	Flexion en deux points Flexion en trois points Flexion en quatre points Traction indirecte Traction-compression directe Traction directe	Éditée en 2004

Le module élastique est un paramètre fondamental, le caractériser est essentiel pour le dimensionnement de la chaussée. Il existe divers essais de module dont l'essai de module complexe utilisé par les laboratoires français est l'essai de « *traction indirecte* » qui est fait au CTTTP d'Alger, parmi ces divers essais, on cite :

## 1. Essai de module complexe

**Principe** : La rigidité du mélange est déterminée soit par un essai de module complexe (solicitation sinusoïdale sur éprouvette trapézoïdale ou parallélépipédique) soit par un essai de traction uni-axial (sur éprouvette cylindrique ou parallélépipédique). La charge est appliquée dans un domaine de petites déformations, en contrôlant le temps ou la fréquence, la température, la loi de chargement [21].

**Interprétation** : Le module (rapport de la contrainte à la déformation) est calculé pour chaque essai élémentaire. Grâce à l'équivalence temps-température, on trace la courbe maîtresse du module à une température donnée.

Cette représentation permet de connaître le comportement du mélange sur un large spectre de temps de charge ou de fréquences. La spécification porte sur le module à 15 °C et une fréquence de 10 Hz ou un temps de charge de 0,02 s.

### 2. Essai de traction Nottingham Asphalt Tester (NAT)

L'essai de détermination de module complexe en Algérie (CTTP) est un essai de traction indirecte répétée au NAT. Le principe de l'essai de traction indirecte répétée (figure I.6) consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de façon répétée à une charge verticale de compression le long d'un diamètre, provoquant ainsi une contrainte de traction le long du diamètre perpendiculaire à la direction du chargement. La déformation transitoire (horizontale) due à cette contrainte est mesurée. Le module élastique est une fonction de la charge de compression et de la déformation de traction [26].

La contrainte de traction ( $\sigma_{ti}$ ) et le module élastique ( $E_{ti}$ ) sont donnés respectivement par les équations suivantes :

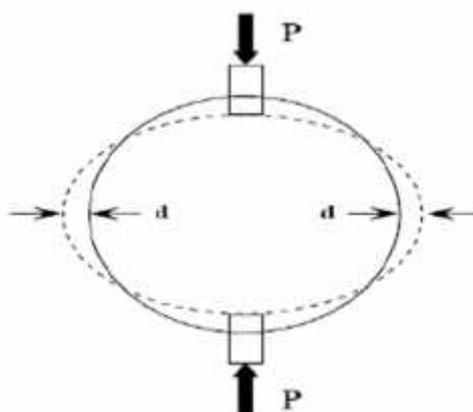


Figure I.6. Déformation d'une éprouvette -Essai de traction indirecte NAT-[8].

$$\sigma_{ti} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot e} \quad \text{Equation I.7}$$

$$E_{ti} = \frac{P(\nu+0,27)}{\Delta D \cdot e} \quad \text{Equation I.8}$$

Avec :

$t_i$  : contrainte de traction indirecte.

$E_{ti}$  : module d'élasticité de traction indirecte.

$P$  : effort vertical appliqué

$D$  : diamètre de l'éprouvette.

$\Delta D$  : variation du diamètre (déformation horizontale).

$e$  : épaisseur de l'éprouvette.

$\nu$  : coefficient de Poisson.

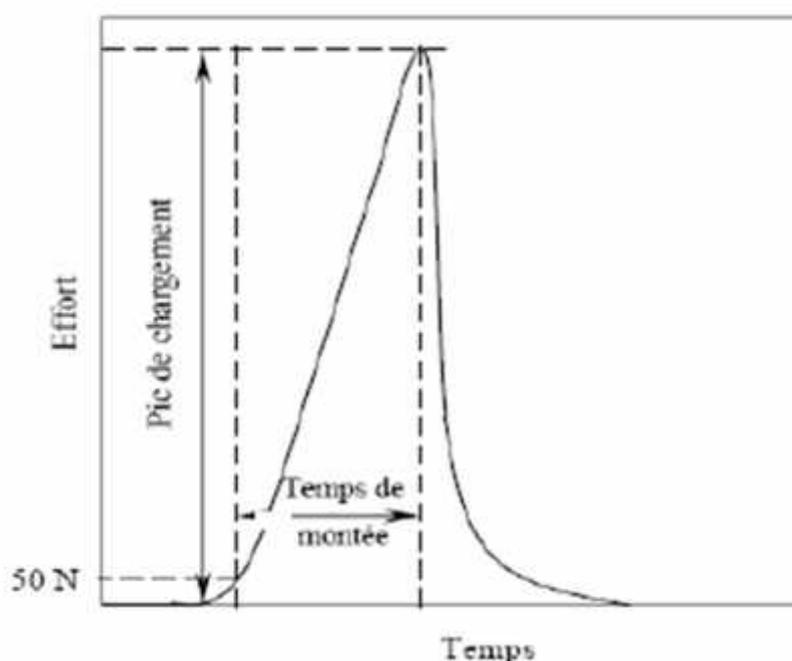


Figure I.7. Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps.

Avant l'essai proprement dit, l'éprouvette est soumise à 5 pulsations de conditionnement, dont le but est la stabilisation des barres de chargement par l'intermédiaire desquelles l'effort est transmis à l'échantillon. Cinq pulsations d'essai (figure I.7) sont ensuite réalisées à une fréquence imposée avec mesure du module élastique à chaque pulsation. Le module obtenu est la moyenne de ces 5 valeurs. Le coefficient de poisson est estimé et la valeur communément utilisée est **0,35 à 20°C** à **0,25 à 10°C**.

### Conditions d'essai

- Sur éprouvette cylindrique (Éprouvette Marshall ou PCG, Carotte du chantier) ;
- En principe 20°C (approche anglaise) ;
- Sollicitations diamétrales par impulsion [27].

### Matériels utilisé

La figure I.8 montre le dispositif de chargement NAT pour l'essai de traction indirecte.

Le contrôle et l'acquisition de données sont reliés via une interface à un ordinateur.

Les dimensions de l'éprouvette (160mm maxi pour le diamètre et 80mm maxi pour l'épaisseur), le niveau de déformation de traction 5 à 10 microns, le temps de montée en charge 60 à 160 millisecondes ainsi que le coefficient de poisson sont des saisies comme données d'entrée.

Les éléments constitutifs du système de montage de l'éprouvette et les capteurs de déformation sont représentés par les figures (I.8), (I.9) et (I.10). L'ordinateur ajuste le régulateur de pression d'air de manière à stocker dans le réservoir une quantité d'air à la pression nécessaire pour la génération des pulsations. L'activation de la valve permet ensuite au vérin d'appliquer l'effort requis à l'échantillon. L'effort est contrôlé par l'ordinateur de telle sorte que toute déviation est corrigée par un ajustement automatique de la pression de régulation réalisant ainsi un système en boucle fermée [26].

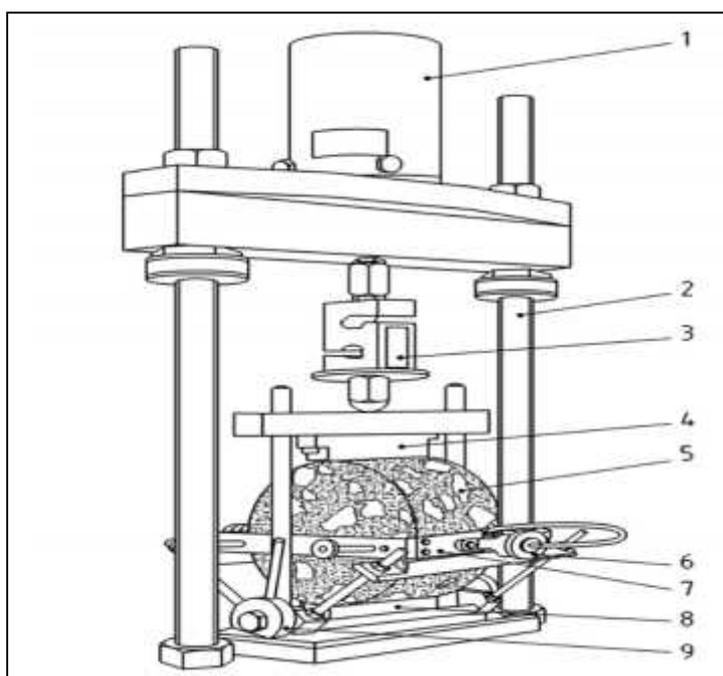
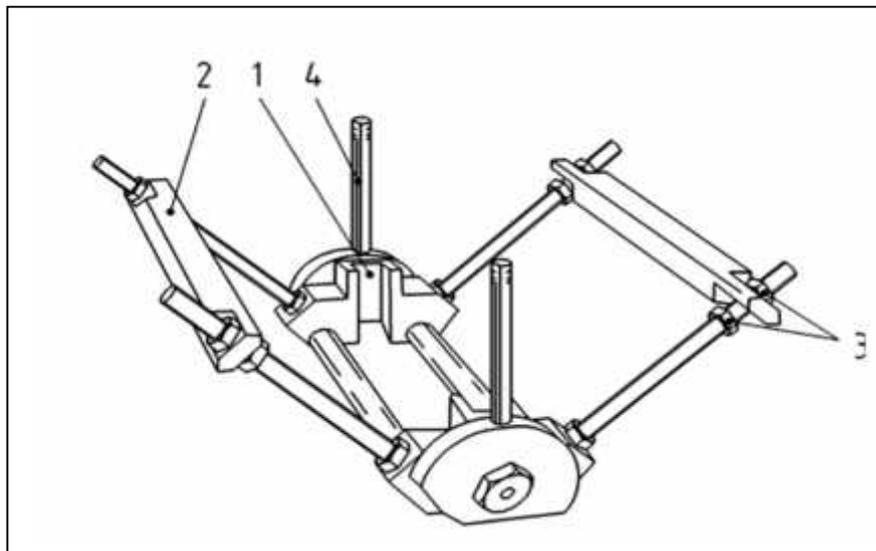


Figure I.8. Exemple d'appareillage d'essai [26].

### *Légende*

- 1 : Vérin de chargement pneumatique.
- 2 : Cadre de chargement en acier.
- 3 : Peson.
- 4 : Platine de chargement supérieure.
- 5 : Éprouvette soumise à essai.
- 6 : Réglage LVDT.
- 7 : Châssis de montage LVDT.
- 8 : Platine de chargement inférieure.
- 9 : Châssis d'alignement LVDT.



*Figure I.9. Châssis d'alignement LVDT [26].*

### *Légende*

- 1 : Canal de centrage du châssis de charge.
- 2 : Châssis d'alignement de châssis LVDT.
- 3 : Écrous de réglage de barre d'alignement.
- 4 : Levier de libération de barre d'alignement.

### **I.8. CONCLUSION**

Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) constituent une technique moderne, particulièrement performante, pour faire face aux problèmes d'accroissement de l'agressivité du trafic, tout en contribuant au concept du développement durable. La réduction des épaisseurs induit une économie des ressources non renouvelables, une réduction des travaux de décaissement en milieu urbain, ou de mise à niveau des accotements. La diversité de ses applications routières, industrielles (quais, aires de main œuvre) voir dans le domaine des pistes et voies de circulation des aéronefs est un autre atout majeur de son développement. Pour rappel la technique des EME a été utilisée lors de la construction de l'autoroute EST-OUEST.

La formulation de ce type d'enrobé est principalement régie par des normes relatives à la méthode LCPC. La méthode Marshall ne prévoit de formulation que pour les enrobés conventionnels.

---

# CHAPITRE II

## Etude Expérimentale

---

**CHAPITRE II.****ETUDE EXPERIMENTALE****II.1. BUT ET PROCEDURE EXPERIMENTALE**

Cette partie expérimentale consiste en l'étude de l'effet de l'ajout d'un polymère -PR PLAST S- sur les performances d'un béton bitumineux déjà modifié par ajout de chaux hydratée (formulation faite déjà dans le cadre de projet de fin d'étude).

A défaut de laboratoires algériens équipés de matériel adéquat pour la formulation d'un BBME, notre formulation sera établie par la méthode Marshall ; notre mélange ne sera donc pas un BBME, on le désignera par « *BBMA* ».

L'ajout étant destiné spécialement à augmenter le module complexe des bétons bitumineux, on procédera à la détermination du module de rigidité par le NAT pour les différents taux de PR PLAST S : 0%, 0.3%, 0.6%, 0.9%, et 1.2%.

On a proposé ensuite une formulation optimale donnant la plus grande valeur du module tout en respectant les seuils exigés des autres performances par la méthode Marshall.

Une comparaison avec le module d'un BBME (formulation LCPC) équivalent sera établie.

**II.2. RAPPEL DES RESULTATS D'IDENTIFICATION DES MATERIAUX****II.2.1. LES GRANULATS**

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des enrobés bitumineux destinés aux couches de roulement.

Les différentes fractions granulaires (0/3, 3/8 et 8/15) proviennent du concassage d'une dolomie comme le confirment les résultats de l'analyse chimique qui sont donnés dans le tableau II.1.

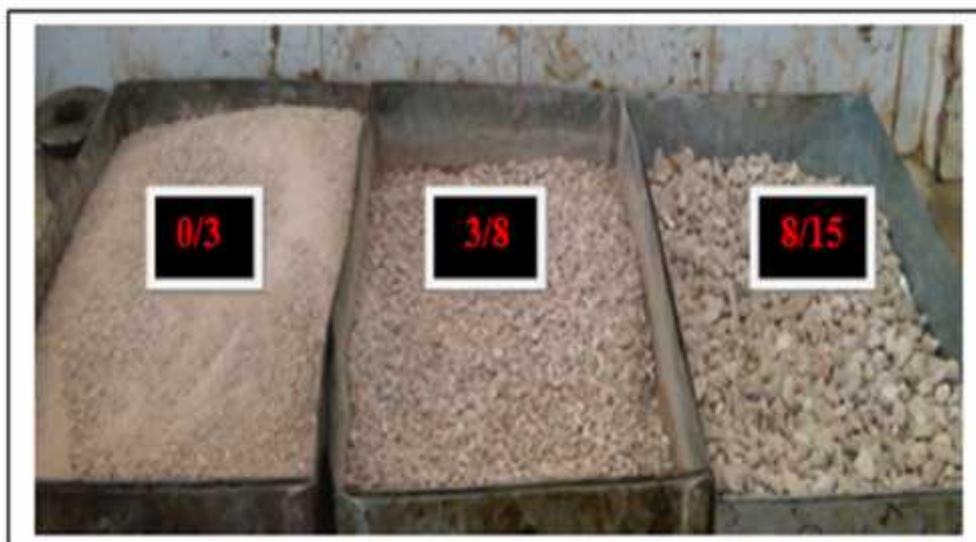


Figure II.1. Les trois fractions granulaires

Tableau II.1. Résultats de l'analyse chimique de la roche.

Essai	Norme	Résultat
Teneur SO4 (%)	NA 461	0.1612
PH	NA 10390-2005	6.00
Teneur Cl (%)	NA 9297-1989	0.259
Teneur en carbonate (%)	XP P 94-048	26.25
Classification	XP P 94-011	Une dolomie calcaire

Les granulats sont classés dans la catégorie de la dolomie calcaire, avec cependant une teneur en calcaire relativement faible (< 50%). Par ailleurs son PH = 6 < 7, donc les granulats sont chargés négativement, ce qui présage d'une mauvaise adhésivité liant-granat.

### Caractérisation

Les analyses effectuées sur les granulats sont composées en deux catégories :

- Caractéristiques de fabrications des granulats.
- Caractéristiques intrinsèques des granulats.

**Caractéristiques de fabrications des granulats :**

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

- L'analyse granulométrique (NF P 18-560),
- L'essai d'aplatissement (NF EN 933-3),
- L'équivalent de sable (NF EN 933-8),
- Essai bleu de méthylène (NF EN 933-9).

**Caractéristiques intrinsèques des granulats :**

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

- La masse volumique réelle (NF P 18-554),
- La résistance aux chocs : essais LOS ANGELES (NF P 18-573),
- La résistance à l'usure en présence d'eau : essai MICRO-DEVAL (NF P 18-572).

**Résultats et commentaires :**

Les résultats des caractéristiques de fabrications des granulats sont regroupés dans le tableau II.2 :

*Tableau II 2. Caractéristiques de fabrication des granulats.*

Essais	Résultats			Spécifications
	0/3	3/8	8/15	
Coefficient d'aplatissement (%)	-	19.18	21.44	≤ 25
Equivalent de sable	69,6	-	-	≥ 60
Valeur au bleu de méthylène	1	-	-	< 2

Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés par le tableau II.3, et ils sont illustrés par la figure II.2 :

Tableau II.3. Résultats de l'analyse granulométrique.

Tamis	Fractions				Mélange proposé
	Fillers	Sable 0/3	Gravier 3/8	Gravier 8/15	
20	100	100	100	100	100,00
16	100	100	100	95	98,00
14	100	100	100	82	93,00
12,5	100	100	100	68	88,00
10	100	100	100	33	74,00
8	100	100	96	10	64,00
6,3	100	100	64	2	55,00
5	100	100	32	1	48,00
4	100	100	10	0	43,00
3,15	100	98	7	0	42,00
2	100	81	4	0	34,00
1	100	56	3	0	24,00
0,63	100	43	0	0	18,00
0,315	100	30	0	0	12,00
0,25	99	0	0	0	0,00
0,16	97	23	0	0	9,00
0,08	95	17	0	0	7,00

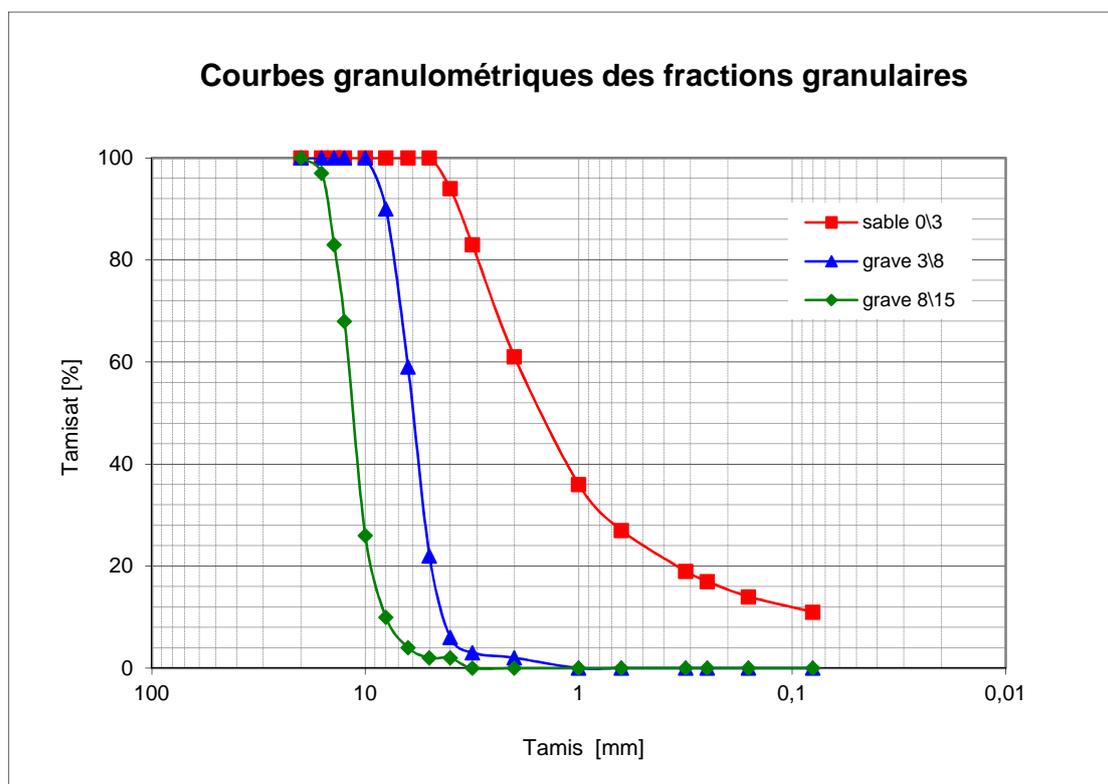


Figure II.2. Courbes granulométriques des fractions granulaires.

Les résultats de caractéristiques intrinsèques des granulats sont donnés par le tableau II.4 :

Tableau II.4. Caractéristiques intrinsèques des granulats.

Essais	Références	0/3	3/8	8/15
Masse volumique réelle (t/m <sup>3</sup> )	NF P 18-554	2.67	2.66	2.64
LA [%]	NF P 18-573	-	24.46	20.82
MDE [%]	NF P 18-572	-	19	18.28

### Commentaires :

Du point de vue caractéristiques intrinsèques des granulats : les résultats obtenus en fonction de leur utilisation en béton bitumineux semi grenue sont conformes aux spécifications de la classe « C », donc ils sont admis pour une couche de roulement et un trafic faible selon la norme **NF P18-101**.

Pour ce qui est des caractéristiques de fabrication des granulats : les résultats sont conformes aux spécifications exigées vis-à-vis de la forme, la propreté, et la granulométrie, donc les granulats sont classés dans la catégorie « **III** » selon la norme (NF P 18-545).

Les caractéristiques de fabrication du sable répondent aux spécifications de la catégorie « **a** » selon la même norme.

### Conclusion

De ce fait, les granulats analysés peuvent être utilisés dans la confection d'un béton bitumineux semi grenu BBSG0/14 selon la norme (NF P 98 - 130).

### II.2.2. LE BITUME

C'est un bitume pur commercialisé par NAFTAL.

Les essais d'identification du bitume sont :

- Pénétrabilité à 25°C (NF EN 1426),
- Point de ramollissement (NF EN 1427),
- Densité relative - méthode au pycnomètre (EN ISO 3838).

Tableau II.5. Résultats des essais sur bitume.

Type d'essai	Résultats	Spécifications
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	48.66	35 - 50
Point de Ramollissement « TBA » (°C)	52.75	50 - 58
Densité relative à 25°C (g/cm <sup>3</sup> )	1.02	1.0 - 1.1

**Commentaire :**

Les résultats obtenus confirment la classe du bitume analysé.

C'est un bitume 40/50. (Spécifications des bitumes purs 'voir annexe II').

### II.3. FORMULATION DU BETON BITUMINEUX A MODULE AMELIORE (BBMA/014)

**Etapas suivies :**

- 1) Formulation du BBSG0/14.
- 2) Formulation du BBSG0/14 modifié à la chaux.
- 3) Modification du « BBSG0/14 modifié à la chaux » par ajout de polymère à différents taux.
- 4) Choix du taux d'ajout donnant la formule présentant la valeur la plus élevée du module complexe « BBMA » tout en respectant les seuils exigés des autres performances mécaniques.

#### II.3.1. ETUDE DE FORMULATION DE BBSG0/14

L'étude de la formulation consiste à choisir la courbe granulométrique qui s'insère dans un fuseau granulaire. Le mélange granulaire étant fixé, la méthodologie consiste à concevoir plusieurs formules avec des modules de richesses différents en vue d'avoir une bonne stabilité du mélange hydrocarboné et une bonne tenue au désenrobage. Ainsi seuls les essais Marshall et Marshall à la tenue à l'eau sont au programme.

Les étapes de travail suivies par les laboratoires Algériens sont :

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

- Essai Marshall (stabilité et fluage Marshall)
- % de vide
- Essai Duriez (tenue à l'eau), l'essai Duriez est remplacé par l'adaptation de l'essai Marshall à la tenue à l'eau.

4. Choix de la formule optimale.

### II.3.1.1. Choix du mélange granulaire

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 à ce que le mélange s'insère dans un fuseau granulaire de référence.

Le fuseau de référence utilisé est celui d'un béton bitumineux semi grenu 0/14 (BBSG0/14).

A partir des analyses granulométriques des différentes fractions (0/3, 3/8, et 8/15), on attribue un pourcentage pour chaque fraction, ensuite on fait une combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que la courbe de mélange s'insère dans le fuseau de référence, la combinaison de différentes fractions granulaire est faite à l'aide d'un logiciel sur Excel disposé au niveau de CTPP, voir tableau II.6 :

Tableau II.6. Les pourcentages des fractions granulaires pour le mélange.

Fractions	Pourcentage des constituants (%)
Fillers	0
sable 0/3	40
gravier 3/8	20
gravier 8/15	40
Total	100

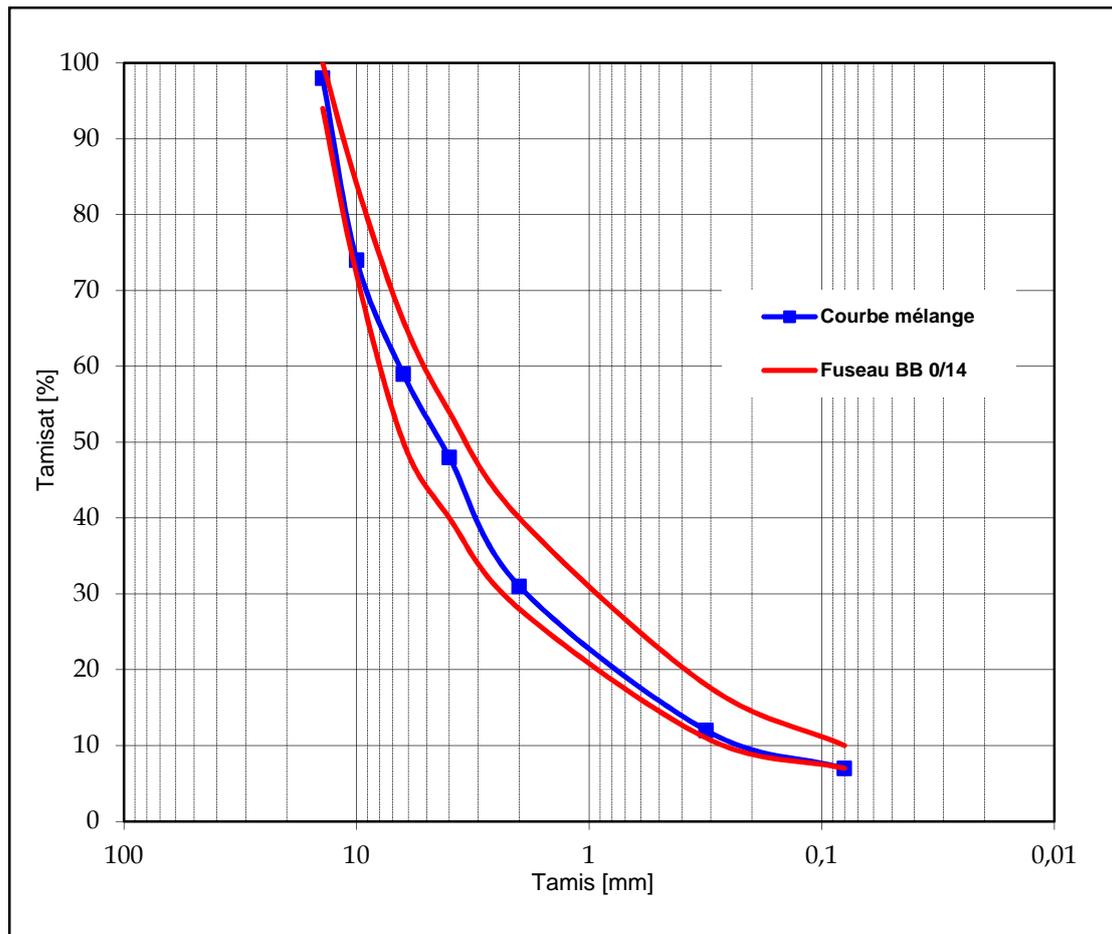


Figure II.3. Fuseau spécifique de la courbe granulométrique du mélange BBSG 0/14.

### II.3.1.2. Teneurs en bitume

On appelle teneur en bitume la masse de liant sur la masse des granulates secs exprimé en pourcentage, pour déterminer cette teneur en liant, on introduit la notion de surface spécifique des granulates notée  $S$  en  $m^2/kg$  selon l'équation :

$$100 = 0.17 G + 0.33 g + 2.3 S + 12 s + 135 f$$

Le dosage en liant est calculé avec les trois modules de richesse comme le montre le tableau II.7.

*Tableau II.7. Valeurs de module de richesse et les teneurs en liants correspondants.*

<b>Formule</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Module de richesse</b>	3,45	3,6	3,75
<b>Teneur en liant (%)</b>	5,58	5,82	6,06
<b>Poids du bitume (g)</b>	536	559	582

Le tableau II.8 montre les valeurs des teneurs en liants et leurs valeurs MVR correspondants du mélange.

*Tableau II.8. Valeurs de la teneur en liant et MVR du mélange.*

<b>Teneur en liant (%)</b>	<b>MVR du mélange (t/m<sup>3</sup>)</b>
<b>5,58</b>	<b>2,45</b>
<b>5,82</b>	<b>2,44</b>
<b>6,06</b>	<b>2,43</b>

### **II.3.1.3. Résultats des essais de performances mécaniques**

Les résultats des essais Marshall et Marshall à la tenue à l'eau de différents mélanges sont représentés dans le tableau II.9.

Tableau II.9. Résultat des essais Marshall et tenue à l'eau de différents mélanges.

Formule	A	B	C	Spécifications
Teneur en bitume (%)	5.58	5.82	6.06	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2.23	2.22	2.22	-
Densité réelle (t/m <sup>3</sup> )	2.45	2.44	2.43	-
% Vide	8.97	9.01	8.64	3 - 5
Stabilité Marshall (KN)	13.52	10.83	11.58	10.5
Fluage (mm)	2.76	2.83	3.85	2 - 4
Quotient Marshall(S/F) (KN/mm)	4.90	3.82	3.01	-
RCsec (KN)	17.40	17.61	19.61	> 7
RCimm (KN)	10.67	12.50	15.46	-
Rapport RCimm / RCsec	0.61	0.71	0.78	0.75 – 1

**Commentaire :**

D'après les résultats des essais Marshall stabilité, fluage et tenue à l'eau effectués, nous remarquons que :

- ✓ Les pourcentages de vide des trois éprouvettes des différents mélanges « A », « B » et « C », ne sont pas acceptables, ils dépassent tous le 5%, ce qui n'est pas conformes aux spécifications.
- ✓ Les stabilités et les résistances aux fluages Marshall sont conformes aux spécifications.
- ✓ Le quotient Marshall du mélange hydrocarboné « A » représente la plus grande valeur du quotient ce qui indique que le mélange « A » est plus résistants aux déformations permanentes.
- ✓ Le rapport résistance immersion sur résistance à sec (la tenue à l'eau) n'est pas acceptable pour la formule « A » par rapport aux spécifications SETRA-LCPC.

- ✓ Les mélanges hydrocarbonés ont montré une tenue à l'eau non satisfaisante à l'exception du mélange hydrocarboné « C ».

#### II.3.1.4. Choix de formule optimale :

Les essais de performance mécaniques ont révélé que les meilleures performances (stabilité, fluage, et quotient Marshall) ont été obtenues avec :

La formule « A » c'est-à-dire la teneur en bitume est de 5.58 % pour le béton bitumineux semi grenu 0/14. A condition d'améliorer la tenue à l'eau et de réduire le pourcentage des vides à des valeurs admises par les spécifications en vigueur.

#### Formule optimale retenue pour notre BBSG0/14

- Sable 0/3 : 40%
- Grave 3/8 : 20%
- Grave 8/ 15 : 40%
- Bitume 40/50 : 5.58%

### II.3.2. AMELIORATION DE LA TENUE A L'EAU ET DU POURCENTAGE DES VIDES PAR LA CHAUX HYDRATEE

La modification des enrobés par l'ajout d'un additif (chaux hydratée), offre une solution pour corriger le problème d'adhésivité, elle consiste à ajuster les caractéristiques du liant d'apport et des granulats d'apports.

Les étapes de formulation sont les suivantes :

- On reprend la formule optimale obtenue dans la première formulation.
- On incorpore la chaux respectivement à raison de : **1, 1.5, 2, et 2.5% du poids total du sable (0/3).**
- On maintient la même méthode de formulation : méthode Marshall.
- On estime l'effet de la chaux, pour chaque taux d'ajout, sur l'adhésivité des mélanges par l'essai AKZOO.
- On choisit le pourcentage de chaux hydratée qui donne les meilleures performances mécaniques ainsi que la meilleure adhésivité granulats – liant.

### II.3.2.1. Résultats des essais de performances mécaniques et l'essai d'adhésivité

L'évolution des caractéristiques mécaniques et l'adhésivité selon différents taux de chaux hydraté est représenté dans le tableau II.10 :

Tableau II.10. Récapitulatif des résultats d'essais Marshall et AKZOO de différents mélanges.

Formule	A	A'	B'	C'	D'	Spécifications
% de chaux hydraté	0	1	1.5	2	2.5	-
Densité apparente	2.23	2.33	2.34	2.32	2.34	-
% de Vides	8.97	4.89	4.48	4.42	4.40	3 - 5
Stabilité Marshall (KN)	13.52	14.76	19.79	13.56	10.51	> 10.5
Fluage (mm)	2.76	3.37	2.90	3.75	3.43	2 - 4
Quotient Marshall (KN/mm)	4.90	4.38	6.74	3.61	3.06	-
Tenue à l'eau (rapport $R_{Cimm}/R_{Csec}$ )	0.61	0.90	0.90	0.86	0.74	0.75 - 1
Taux de granulats recouverts par le liant (Essai AKZOO) (%)	63	97.22	97.37	97.27	97.33	90

#### Commentaires :

Le pourcentage optimal retenu de chaux hydratée est de 1% comme l'exige la norme **NF P 98-141**, et à ce taux on remarque que :

- ✓ Le % de vide est ramené à un taux acceptable par les recommandations CTPP.
- ✓ La tenue à l'eau est également bonne (> 0.75) comme le laissait présager le test AKZOO qui passe de 63 à 97.22%.
- ✓ La stabilité Marshall gagne 10%.

Les dosages en constituants de la formule optimale retenue pour la formulation des BBMA sont :

- Sable 0/3 : 39%
- Grave 3/8 : 20%
- Grave 8/ 15 : 40%
- Bitume 40/50 : 5.58%
- 1% de chaux hydratée.

### II.3.3. AMELIORATION DU MODULE DE RIGIDITE PAR AJOUT DE PR PLAST S

La modification des enrobés par des polymères ou par déchets polymériques offre une solution pour corriger les problèmes de fatigue et d'orniérage sur des formules d'enrobés, afin d'augmenter les caractéristiques physique et mécanique.

L'étude se fait sur une formulation optimale (la formule optimale retenue dans la partie précédente II.3.2) ; L'ajout du PR Plast S s'est opéré aux taux suivants : - **0.3 ; 0.6 ; 0.9 et 1.2%** - du poids total de l'enrobé afin de constater son influence sur les performances de l'enrobé ainsi modifié.

En cas d'utilisation de filler d'apport (chaux hydratée), la teneur en chaux hydratée ne doit pas excéder 1 % de la masse totale des sables 0/3.

#### II.3.3.1. Identification de l'additif

##### Présentation :

L'additif qui a nomenclature PR PLAST S. C'est un additif particulier d'une granulométrie de 0/4 mm introduit lors du malaxage, sur les granulats chauds avant enrobage en centrale d'enrobage, ce produit a été élaboré pour obtenir les caractéristiques des EME à partir d'un bitume 40/50 ou 50/70.

Le taux d'ajout est généralement compris entre 0.3% à 0.6% en poids des granulats, il est injecté dans le malaxeur des postes d'enrobage.



*Figure II.4. Granules de PR PLAST S.*

**Principaux avantages :**

- Réduction de l'épaisseur.
- Permet de fabriquer des enrobés haut module avec un bitume normal 40/50 ou 50/70.
- Augmente le module d'élasticité et permet de conserver la fatigue du bitume d'origine.
- Améliore la résistance à l'orniérage.
- Réduction du cout.

**II.3.3.2. Résultats d'essais de performances mécaniques et du module NAT**

Les performances de différents mélanges sont déterminées par les essais Marshall et l'essai de module au NAT.

Pour le module au NAT, après avoir conservé l'éprouvette dans une enceinte pendant 24 heures à la température de l'essai de 15°C, deux d'essai sont ensuite réalisées à une fréquence de 10 Hz (définie par la norme EN 12697-26:2004).

On mesure le module de rigidité à chaque essai. Le module obtenu est la moyenne de ces valeurs (des deux essais). La valeur communément utilisée pour le coefficient de poisson est 0,35 (définie par la norme EN 12697-26:2004), le module mesuré est le module complexe d'enrobé bitumineux ( $|E|$ ).

**1. Mélange avec 0% de PR Plast S**

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec une teneur en PR Plast S de 0% sont représentées sur le tableau II.11.

*Tableau II.11. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0% de PR Plast S.*

<b>Densité apparente (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2.33</b>
<b>% de vide</b>	<b>4.89</b>
<b>Stabilité (KN)</b>	<b>14.76</b>
<b>Fluage (mm)</b>	<b>3.37</b>
<b>Quotient Marshall (KN/mm)</b>	<b>4.38</b>
<b>Tenue à l'eau</b>	<b>0.90</b>

**Le module :**

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé sans ajout de PR PLAST S sont représentés dans le tableau II.12, à noter que nous prenons comme valeur du module la moyenne des résultats trouvés.

*Tableau II.12. Résultats de module de rigidité avec 0% de PR Plast S.*

N° d'essai	Charge verticale (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontale (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	2.05	196.2	2.38	125	8386
2	2.05	196.2	2.42	125	8168
moyenne	2.05	196.2	2.40	125	8277

**2. Mélange avec 0.3% de PR Plast S**

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec une teneur en PR Plast S de 0.3% sont représentées sur le tableau II.13.

*Tableau II.13. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.3% de PR Plast S.*

<b>Densité apparente (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2.34</b>
<b>% de vide</b>	<b>4.48</b>
<b>Stabilité (KN)</b>	<b>15.30</b>
<b>Fluage (mm)</b>	<b>2.90</b>
<b>Quotient Marshall (KN/mm)</b>	<b>5.27</b>
<b>Tenue à l'eau</b>	<b>0.92</b>

**Le module :**

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé avec ajout de 0.3% de PR PLAST S sont représentés dans le tableau II.14 :

Tableau II.14. Résultats de module de rigidité avec 0.3% de PR Plast.

N° d'essai	Charge verticale (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontale (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	3.83	389.8	3.64	124	10151
2	3.80	386	3.62	125	10053
moyenne	3.81	387.9	3.63	124.5	10102

### 3. Mélange avec 0.6% de PR Plast S

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec une teneur en PR Plast S de 0.6% sont représentées sur le tableau II.15.

Tableau II.15. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.6% de PR Plast S.

<b>Densité apparente (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2.35</b>
<b>% de vide</b>	<b>4.08</b>
<b>Stabilité (KN)</b>	<b>15.77</b>
<b>Fluage (mm)</b>	<b>2.45</b>
<b>Quotient Marshall (KN/mm)</b>	<b>6.43</b>
<b>Tenue à l'eau</b>	<b>0.94</b>

#### Le module :

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé avec ajout de 0.6% de PR PLAST S sont représentés dans le tableau II.16 :

Tableau II.16. Résultats de module de rigidité avec 0.6% de PR Plast S.

N° d'essai	Charge verticale (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontale (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	3.79	378.9	3.46	121	10677
2	3.76	376.9	3.40	123	10655
moyenne	3.78	377.9	3.43	122	10666

#### 4. Mélange avec 0.9% de PR Plast S

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec une teneur en PR Plast S de 0.9% sont représentées sur le tableau II.17.

Tableau II.17. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.9% de PR Plast S.

<b>Densité apparente (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2.36</b>
<b>% de vide</b>	<b>3.67</b>
<b>Stabilité (KN)</b>	<b>16</b>
<b>Fluage (mm)</b>	<b>2.24</b>
<b>Quotient Marshall (KN/mm)</b>	<b>7.14</b>
<b>Tenue à l'eau</b>	<b>0.96</b>

#### Le module :

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé avec ajout de 0.9% de PR PLAST S sont représentés dans le tableau II.18 :

Tableau II.18. Résultats de module de rigidité avec 0.9% de PR Plast S.

N° d'essai	Charge verticale (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontale (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	3.77	377	3.10	122	11741
2	3.76	376.2	3.10	124	11757
Moyenne	3.75	376.6	3.10	123	11749

#### 5. Mélange avec 1.2% de PR Plast S

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec une teneur en PR Plast S de 1.2% sont représentées sur le tableau II.19.

Tableau II.19. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 1.2% de PR Plast S.

<b>Densité apparente (t/m<sup>3</sup>)</b>	<b>2.35</b>
<b>% de vide</b>	<b>4.08</b>
<b>Stabilité (KN)</b>	<b>16.79</b>
<b>Fluage (mm)</b>	<b>2.20</b>
<b>Quotient Marshall (KN/mm)</b>	<b>7.63</b>
<b>Tenue à l'eau</b>	<b>0.97</b>

**Le module :**

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé avec ajout de 1.2% de PR PLAST S sont représentés dans le tableau II.20 :

Tableau II.20. Résultats de module de rigidité avec 1.2% de PR Plast S.

N° d'essai	Charge verticale (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontale (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	3.43	337.9	2.50	124	13247
2	3.43	338.3	2.50	122	13235
moyenne	3.43	338.1	2.50	123	13241

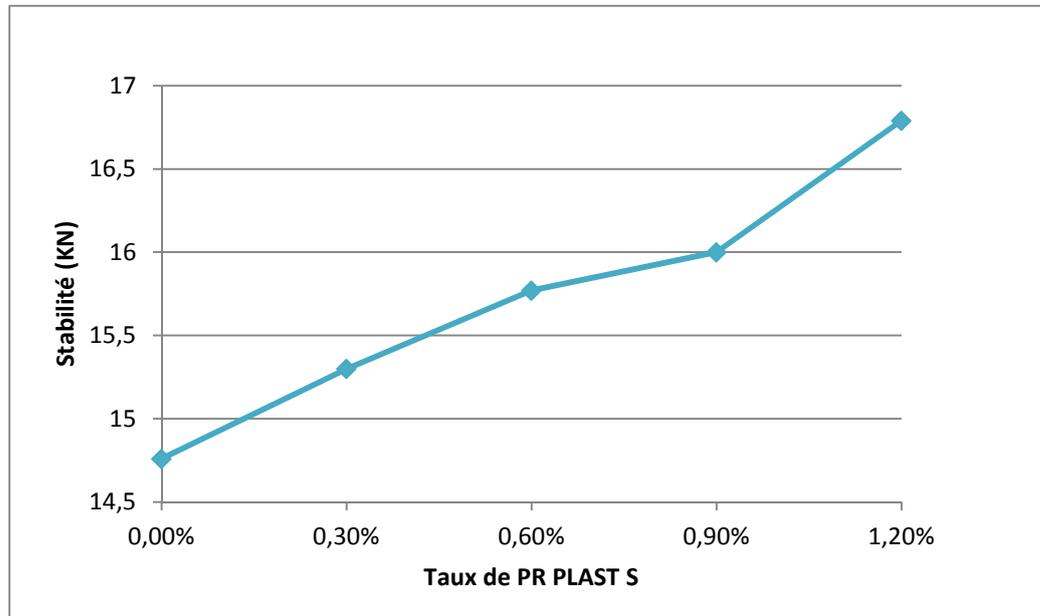
**II.3.3.3. Influence du taux de PR PLAST S sur les performances du BBMA****1. Influence sur la stabilité**

Figure II.5. Variation de la stabilité Marshall en fonction de % de PR Plast S.

La figure II.5 montre la variation de la stabilité Marshall en fonction de % PR Plast S. On remarque que la stabilité Marshall est proportionnelle avec la teneur en PR Plast.

- Dans le cas de 0% de PR Plast S, la stabilité est de 14.76;
- Dans le cas de 0.6% de PR Plast S l'amélioration est estimée à 7% par rapport à l'enrobé sans ajout.
- Alors que pour 1.2% de PR Plast S elle est de 14%.

## 2. Influence sur le fluage

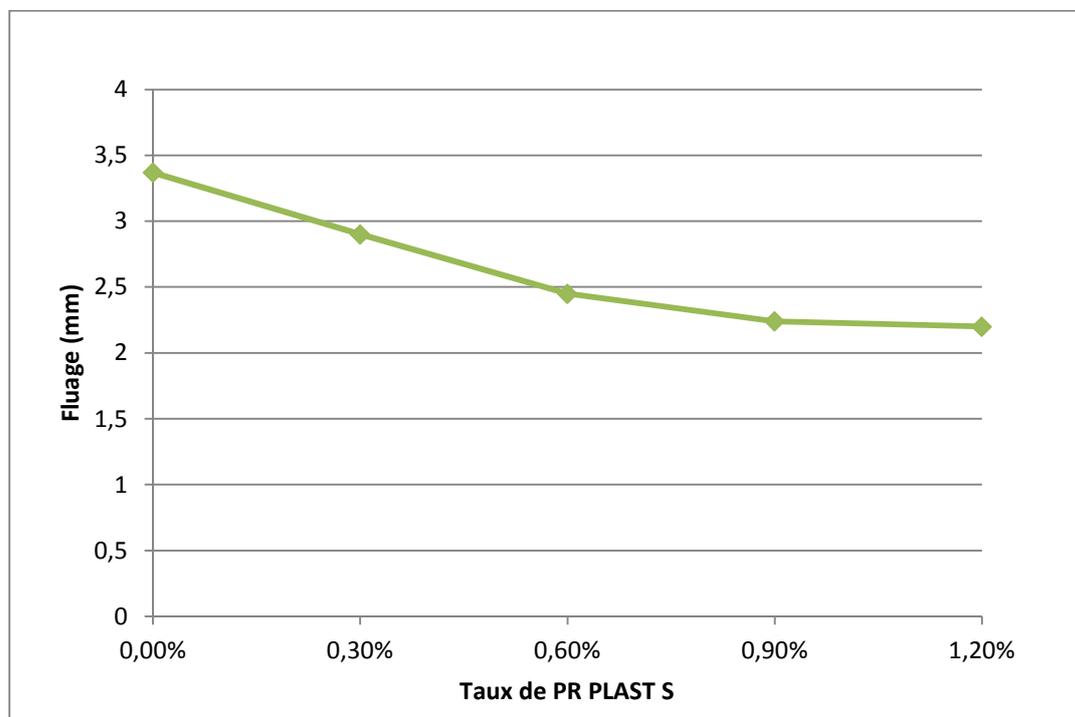


Figure II.6. Variation de fluage Marshall en fonction de % de PR Plast S.

La figure II.6 montre la variation du fluage Marshall en fonction de PR Plast S. On observe une diminution du fluage en fonction de l'augmentation du taux d'ajout qui peut être expliqué par le fait que le PR Plast S augmente la rigidité de l'enrobé.

Les spécifications [CTTP 2004] préconisent dans le cas de l'utilisation d'un bitume 40/50, un fluage inférieur à 4 mm, donc les fluages obtenus avec tous les mélanges répondent aux spécifications algériennes.

La modification de l'enrobé par le PR Plast S améliore la résistance au fluage. Cette amélioration est de l'ordre de 14% pour une teneur de 0.6%, et de 35% pour une teneur de 1.2%.

### 3. Influence sur le quotient Marshall

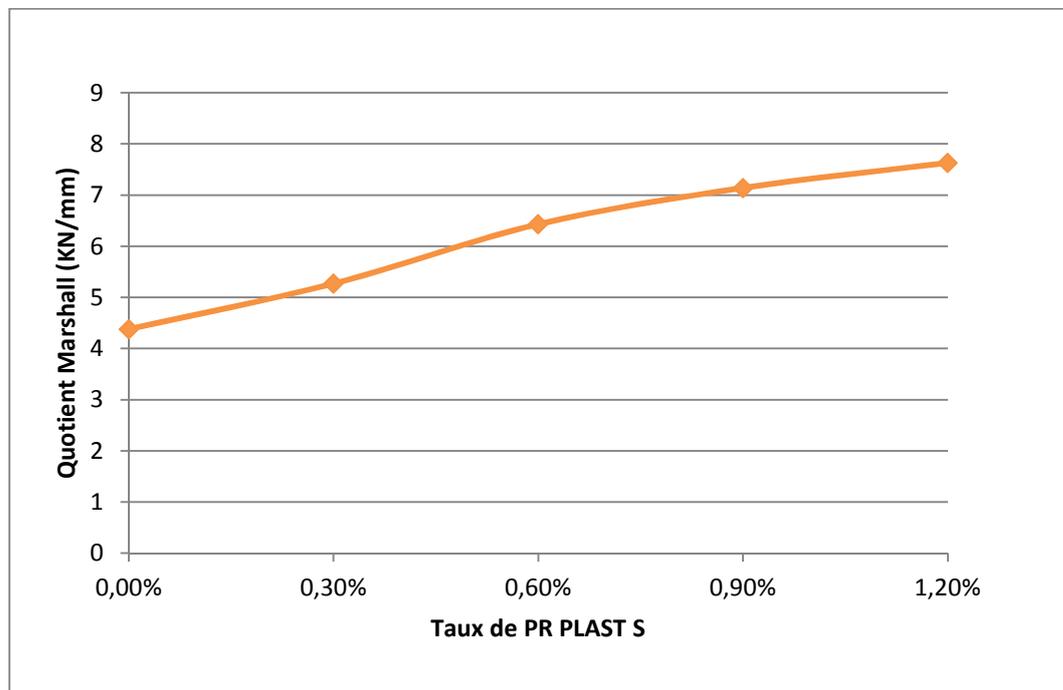


Figure II.7. Variation de quotient Marshall en fonction de % de PR Plast S.

La valeur du quotient Marshall des mélanges augmente avec l'augmentation du taux d'ajout de PR Plast S.

Le mélange avec 0.6% de PR Plast S présente pratiquement une amélioration de l'ordre de 47%.

Pour 1.2% de PR Plast S l'amélioration est de l'ordre de 74%, ceci montre tout l'intérêt d'utiliser ce type d'ajout.

#### 4. Influence sur le % de vides

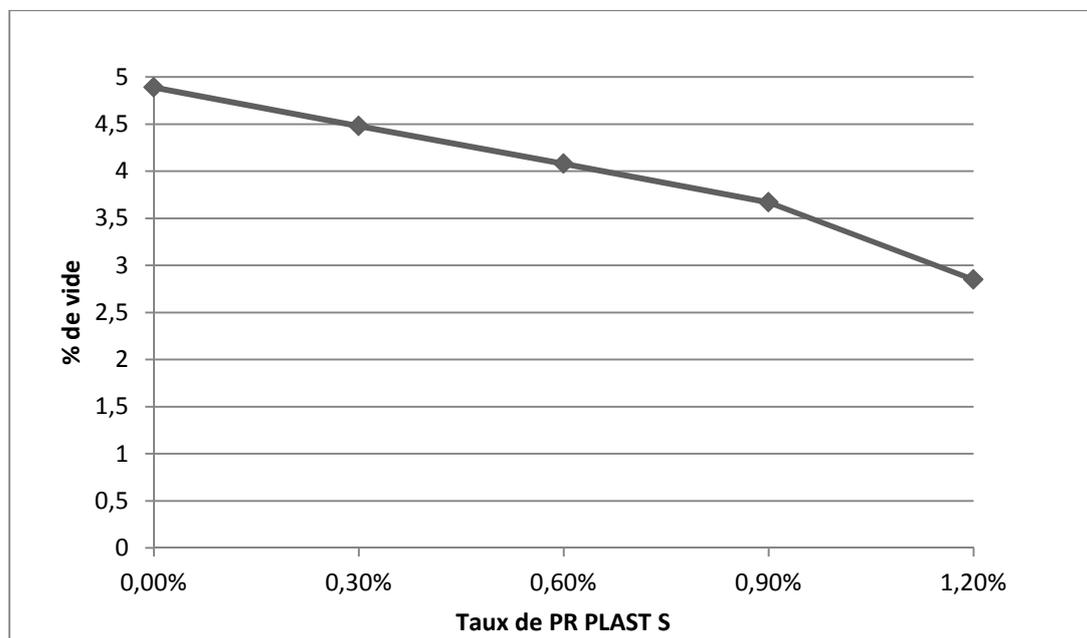


Figure II.8. Variation de % de vide en fonction de % de PR Plast S.

On remarque que le pourcentage de vide pour les taux de 0.3% à 0.6% est conforme aux spécifications exigées par la recommandation algérienne [4-8], mais pour les autres taux (0.9% à 1.2%), le pourcentage de vide est dehors de l'intervalle spécifié par la recommandation algérienne [4-8].

Nous cherchons toujours un enrobé dense (moins de vides) mais il faut un pourcentage de vide minimal pour l'auto-compactage, et pour éviter le ressuage.

### 5. Influence sur la tenue à l'eau

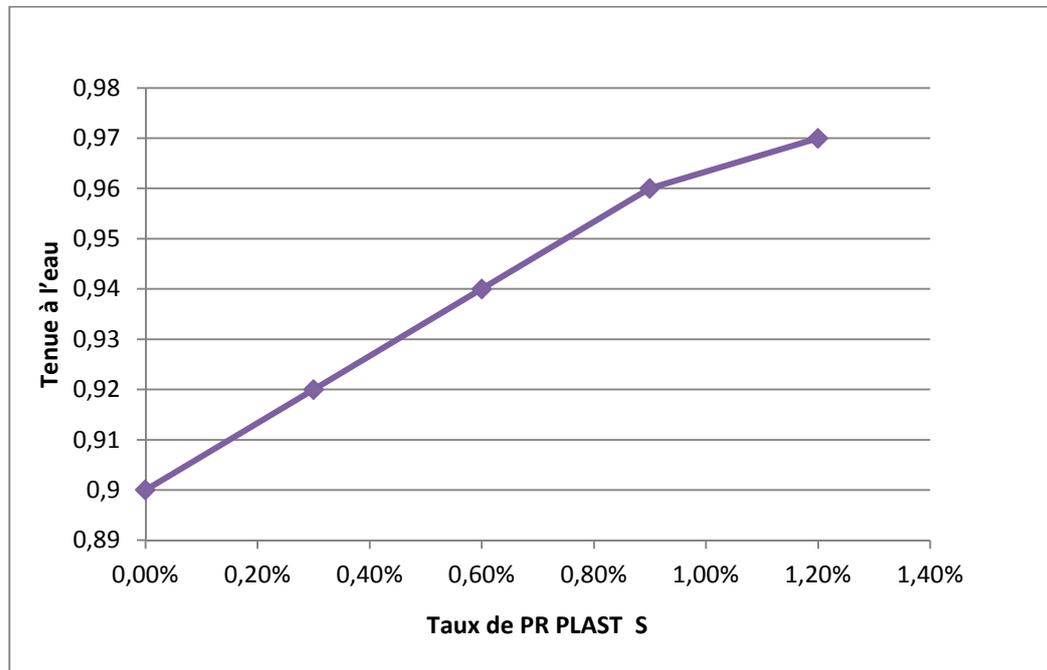


Figure II.9. Variation de la tenue à l'eau en fonction de % de PR Plast S.

La figure II.9 montre la variation de la tenue à l'eau en fonction de % PR Plast S.

La tenue à l'eau augmente avec l'augmentation de pourcentage de l'ajout. Il est à noter que le mélange avait déjà une bonne tenue à l'eau (0.9).

La tenue à l'eau est améliorée de 3% pour 0.6% de PR Plast S d'autre part l'amélioration est de 8% pour 1, 2% de l'ajout.

## 6. Influence sur le module complexe

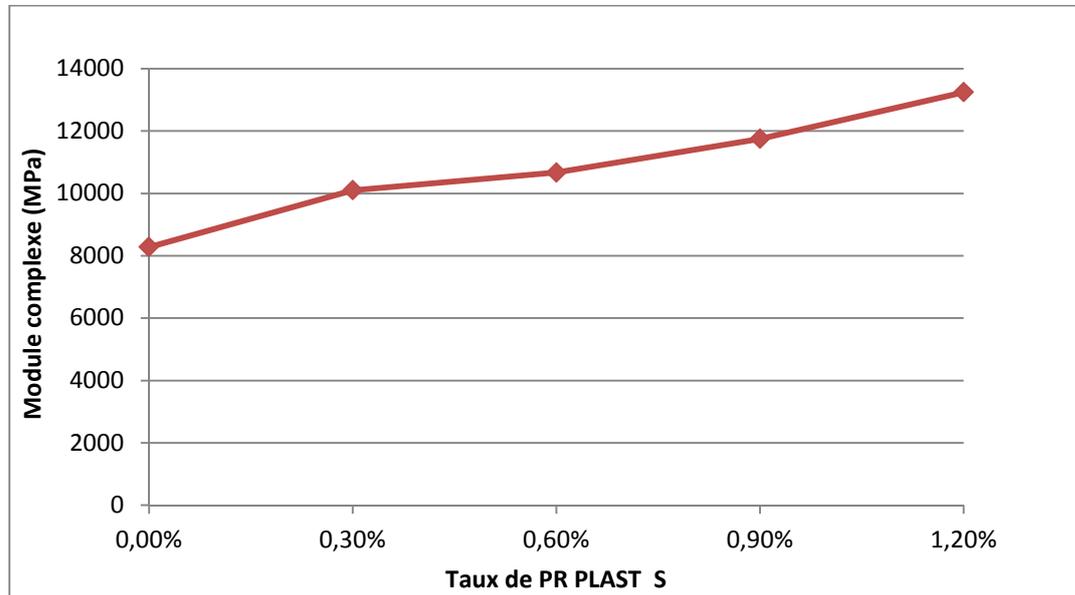


Figure II.10. Variation de module de rigidité en fonction de % de PR Plast S.

Les résultats expérimentaux obtenus sur les enrobés bitumineux testés montrent que le module de rigidité augmente avec l'augmentation de pourcentage de PR PLAST S.

On constate :

- ✓ Une amélioration du module de rigidité du mélange au fur et à mesure que le dosage en PR PLAST S augmente.
- ✓ Le module est amélioré de 31% avec un ajout de 0.6%, et de 60% avec un ajout de 1.2% de PR Plast S,
- ✓ L'ajout de PR PLAST S a amélioré le module de notre enrobé modifié de telle manière que du point de vue valeur du module, notre BBMA se rapproche de BBME.

### II.3.4. Formulation optimale de BBMA

Le tableau II.21 est un récapitulatif des performances de l'enrobés par l'ajout de différents teneurs en PR Plast S.

Tableau II.21. Récapitulatif des résultats des essais de différents mélanges.

PR Plast S	0%	0.3%	<u>0.6%</u>	0.9%	1.2%	Spécifications CTPP
Teneur en bitume (%)	5.58	5.58	5.58	5.58	5.58	-
Densité apparente (t/m <sup>3</sup> )	2.33	2.34	2.35	2.36	2.38	-
% de vide	4.89	4.48	4.08	3.67	2.85	4 - 8
Stabilité (KN)	14.76	15.30	15.77	16	16.79	10.5
Fluage (mm)	3.37	2.90	2.45	2.24	2.20	2 - 4
Quotient Marshall (KN/mm)	4.38	5.27	6.43	7.14	7.63	-
Tenue à l'eau	0.90	0.92	0.94	0.96	0.97	0.80
Module (MPa)	8277	10102	10666	11749	13241	9000

Du point de vue valeur du module, la teneur optimale -dans notre intervalle d'étude- serait 1.2% ; mais à ce taux la compacité est trop élevée (% vides < 4%) de même pour 0.9% d'ajout. La teneur optimale en PR Plast S est donc 0.6% (comme souligné dans la littérature), à ce taux :

- Le % de vide est ramené à un taux acceptable par les recommandations CTPP.
- La tenue à l'eau est également bonne (> 0.8).
- La stabilité Marshall gagne 7 %.
- Le module complexe est ramené à une valeur conforme aux recommandations CTPP (> 9000MPa).

## II.4. Comparaison entre les performances du BBMA et un BBME équivalent

Les caractéristiques du BBME reportées dans ce tableau correspondent aux résultats d'une formulation établie par la société C.R.C.C. CHINE, dans le cadre de la construction d'autoroute Est-Ouest Algérie Lot M5/M7.

Les fractions granulaires, les différents caractéristiques et les performances mécaniques du BBME sont données dans l'annexe V.

Tableau II.22. Comparaison des résultats des BBMA et BBME.

	BBMA0/14	BBME0/14	Comparaison BBMA/ BBME
<b>PR Plast S (%)</b>	<u>0.3</u>	<u>0.38</u>	Quasi identique
<b>Teneur en bitume (%)</b>	5.58	5.19	Différence de 0.39%
<b>Masse volumique apparente (t/m<sup>3</sup>)</b>	2.33	2.41	Légère différence
<b>Masse volumique réelle (t/m<sup>3</sup>)</b>	2.45	2.55	Légère différence
<b>% Vides</b>	4.89	5.49	Légère différence
<b>Résistance à sec (MPa)</b>	15.25	15.88	Légère différence
<b>Résistance imm. (MPa)</b>	14.03	14.40	Légère différence
Tenue à l'eau	0.92	0.90	Même ordre de grandeur
Module (MPa)	10102	9414	Une différence de 6.8%

On note que :

- Le taux d'ajout de PR Plast S utilisé dans la formulation du BBME0/14 par la méthode LCPC est très proche à celle utilisé dans la formulation du BBMA0/14 par la méthode Marshall.
- La teneur en bitume de la formulation du BBMA0/14 par la méthode Marshall est légèrement plus élevé (0.39%).
- Les résultats de Duriez, essai commun aux deux formulations sont comparables.
- Le module de rigidité obtenu avec la formulation de BBMA (Marshall) est supérieur à celui de BBME (LCPC).

## II.5. CONCLUSION

L'enrobé de base utilisé dans cette étude est un BBSG0/14, modifié par substitution par la chaux hydratée de 1% du poids totale du sable; la mise au point d'un béton bitumineux à module amélioré par ajout de PR Plast S à différents taux a montré une amélioration de la stabilité, du fluage, du quotient Marshall et du module de rigidité des mélanges en question.

Les taux qui pourraient être utilisés ne sauraient dépasser les 0.6% comme préconisé dans la fiche technique de l'additif. L'ajout de 1.2% donne de bons résultats pour la stabilité, quotient Marshall et le module complexe, mais il donne un pourcentage de vide inférieur à la valeur minimale exigée par les recommandations.

Le taux maximal retenu dans cette étude est de 0.6%. A ce taux, la stabilité gagne 7%, le quotient Marshall 47% et le module de rigidité soit 31% dépassant la valeur seuil exigée des BBME.

Une comparaison entre les performances obtenues du BBMA formulé par la méthode Marshall et un BBME équivalent (taux d'ajout quasi identique) formulé par la méthode LCPC, on a constaté que les valeurs sont très proches.

En conclusion on peut dire qu'en attendant la mise en place de laboratoires dotés de matériels adéquats pour la formulation des EME, on peut bénéficier des avantages des additifs comme le PR Plast S qui pourraient être utilisés pour améliorer les enrobés conventionnels sans prétendre élaborer des EME.

Cependant, comme tout ajout, le PR Plast peut avoir des inconvénients sur le long terme, inconvénients que ne sont pas spécifiés sur la fiche technique de PR Plast S. Cette remarque reste valable tant pour la fabrication des EME et BBME que pour l'amélioration des enrobés conventionnels. Il faut rester prudent, procéder à des études relatives à un éventuel vieillissement prématuré des mélanges et autres, avant de généraliser leur utilisation.

---

# ***CONCLUSION GENERALE***

### CONCLUSION GENERALE

Cette étude a permis, dans un premier temps, de résoudre le problème de la tenue à l'eau résultant d'une mauvaise affinité liant – granulats issus du concassage d'une roche dolomie. Dans un deuxième temps, nous avons amélioré le module de rigidité du mélange en utilisant un polymère désigné sous le nom commercial par « PR PLAST S ». À l'origine, cet additif a été proposé pour la fabrication des Enrobés à Module Elevé (EME) lorsque les bitumes de grade dur font défaut.

D'une manière globale l'ajout du polymère, sous forme de granulés dans le squelette du mélange, a amélioré les performances du produit final au fur et à mesure que le taux d'ajout augmente. L'ajout du PR Plast S s'est opéré aux taux suivants : - **0.3 ; 0.6 ; 0.9 et 1.2%** du poids total de l'enrobé.

- A 0.9% et 1.2% d'ajout, les mélanges obtenus présentent une compacté trop élevée par rapport aux exigences normatives.
- A 0.6% d'ajout, toutes les exigences sont satisfaites, avec un gain de stabilité de 7% ; 47% pour le quotient Marshall et le module de rigidité passe de 8277 MPa à 10666 MPa, soit une augmentation de 31% dépassant le seuil exigé pour les BBME.
- Une comparaison entre les performances obtenues du BBMA formulé par la méthode Marshall et un BBME équivalent (taux d'ajout quasi identique) formulé par la méthode LCPC, on a constaté que les valeurs sont très proches.

En attendant la mise en place de laboratoires dotés de matériels adéquats pour la formulation des EME, le PR Plast S pourrait être utilisé comme additif pour améliorer les enrobés conventionnels.

Par ailleurs, la méthode Marshall semble répondre, au même titre que pour les enrobés conventionnels, aux exigences de la formulation des Enrobés à Module Elevé. Cette conclusion est conditionnée par des études complémentaires et une mise au point de normes adaptées.

---

***REFERENCES***

***BIBLIOGRAPHIQUES***

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **S. M. Abtahi, M. Sheikhzadeh S. M. Hejazi**, Fiber-reinforced asphalt-concrete, *a review Construction and Building Materials*, 24, pp. 871–877, 2010.
- [2] **I. Harizi, M. Bensaibi, M. Morsli**, Modélisation de Chaussée Souple sous une Charge Roulante, *Acte de la 29eme Rencontre de l'AUGC, Tlemcen, Algérie, 29-31 Mai 2011*.
- [3] **I. Harizi, M. Bensaibi, M. Morsli**, Modélisation des Déformations d'une Chaussée Souple sous Chargement Complexe, *Actes du 1er Congrès International le Génie Civil et le Développement Durable, Tébessa, Algérie, 17-19 Octobre 2011*.
- [4] **P. Radziszewski**, Modified asphalt mixtures resistance to permanent deformations, *journal of civil engineering and management*, 13, vol. 4, (2007) 307–315.
- [5] **U. Isacsson, X. Lu**, Testing and appraisal of polymer modified road bitumens—state of the art, *Mater Struct*, 28 (1995) 139–59.
- [6] **M.S. Cortizo, D.O. Larsen, H. Bianchetto, J.L. Alessandrini**, Effect of the thermal degradation of SBS copolymers during the ageing of modified asphalts, *Polym Degrad Stab*, 86 vol.2 (2004) 275–282.
- [7] **B. Sengoz, G. Isıkyakar**, Analysis of styrene–butadiene–styrene polymer modified bitumen using fluorescent microscopy and conventional test methods, *Journal Hazard. Mater* 150 (2008) 424–432.
- [8] **S. Tayfur, H. Ozen, A. Aksoy**, Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers, *Construction and Building Materials* 21 (2007) 328–337.
- [9] **S.S. Galooyak, B. Dabir, A.E. Nazarbeygi, A. Moeini**, Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites, *Constr Build Mater* 24 (2010) 300–7.
- [10] **G.D. Airey**, Rheological properties of styrene–butadiene–styrene polymer modified road bitumens, *Fuel* 82 (2003) 1709–19.
- [11] **S. Gupta, A. Veeraragavan**, Fatigue behaviour of polymer modified bituminous concrete mixtures, *Journal of the Indian Roads Congress* (2009) Paper No. 548.
- [12] **U. Isacsson, H.Y. Zeng**, Relationships between bitumen chemistry and low temperature behavior of asphalt, *Constr Build Mater* 11(2) (1997) 83–91.

- [13] **S. Shuler, I. Douglas**, Improving durability of open-graded friction courses, *Transport Res Rec 1259 (1990)* 35–41.
- [14] **B. V. Kok, M. Yilmaz**, The effects of using lime and styrene–butadiene–styrene on moisture sensitivity resistance of hot mix asphalt, *Construction and Building Materials 23 (2009)* 1999–2006.
- [15] **C. Gorkem, B. Sengoz**, Predicting stripping and moisture induced damage of asphalt concrete prepared with polymer modified bitumen and hydrated lime, *Construction and Building Materials 23 (2009)* 2227–2236.
- [16] **H. Behbahani, H. Ziari, S. Noubakhat**, The use of polymer modification of bitumen for durant hot asphalt mixtures, *Journal of Applied Sciences Research 4(1) (2008)* 96–102.
- [17] **NF P 98-138**, Enrobés Bitumineux.
- [18] **Y. Brosseaud**, Les Enrobés à Module Elevé : bilan de l’expérience française et transfert de technologie.
- [19] **S. NAHI, H. LATEF** : « Application avec les Enrobés à Module Elevé. Etude technico-économique », Projet fin d’étude à Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics, Garidi. Kouba. 2011.
- [20] **Observatoire des Techniques de Chaussées** : « Les Enrobés à Module Elevé », note d’information, **Avril 1997**.
- [21] **B. HARKAT** : « Technique innovante en construction routière pour assise de chaussée ». Mémoire d’Ingéniorat à l’Ecole Nationale Polytechnique d’Alger ENP, juin 2010.
- [22] **EUROVIA**, « Les Enrobés Bitumineux : formulation, fabrication, mise en place », Montréal 2006.
- [23] [http://www.planete-tp.com/img/pdf/enrobes\\_epais\\_couche\\_surface\\_cle5158b8.pdf](http://www.planete-tp.com/img/pdf/enrobes_epais_couche_surface_cle5158b8.pdf)
- [24] **R. NABAOU**, « Enrobés à Module Elevé (EME) et Bétons Bitumineux à Module Elevé (BBME), évolutions d’utilisation, Ingénieur au LPEE/CERIT.
- [25] **MODULOVIA**, « Béton Bitumineux à Module Elevé », Septembre 2009.
- [26] [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/30f7640dde8445f\\_file.pdf06](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/30f7640dde8445f_file.pdf06) Les enrobés bitumineux.

- [27] [http://www.liberation.fr/sciences/1996/01/10/qu-est-ce-qu-un-polymere\\_160549](http://www.liberation.fr/sciences/1996/01/10/qu-est-ce-qu-un-polymere_160549)
- [28] [http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/f835cbae0aad0ed\\_file.pdf](http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/f835cbae0aad0ed_file.pdf)
- [29] **R. Guy**, « Techniques Innovantes d'Enrobés en Infrastructures Routière », P.R.Industrie Maroc.
- [30] **D. Félix, ing. A. Bruno, tech** : « Détermination du module complexe des enrobés, Matériaux et Infrastructures », Service des matériaux d'infrastructures direction du laboratoire des chaussées, Ministère des Transports du Québec.

---

# ***ANNEXES***

---

# **Annexe I**

## ***LA DEFINITION DES TERMES DIFFICILES***

---

## LA DEFINITION DES TERMES DIFFICILES

### Monomère

Molécule utilisée pour la synthèse des polymères pouvant être associée à une autre molécule identique (= dimérisée), à deux autres identiques (= trimérisée), à une dizaine de molécules identiques (= oligomérisée) ou à plusieurs centaines de molécules identiques (= polymérisée).  
Molécule libérée lors de l'hydrolyse d'un polymère, tel le glucose et les acides aminés.

### Le poly (styrène-butadiène-styrène) :

SBS, est un caoutchouc dur, qui est utilisé pour des objets comme les semelles des chaussures, la gomme des pneus, et à d'autres endroits où la longévité est importante. C'est un copolymère appelé copolymère bloc. Sa chaîne principale est faite de trois segments. Le premier segment est une longue chaîne de polystyrène, le segment du milieu est une longue chaîne de polybutadiène, et le dernier segment est une autre longue section de polystyrène. Voir figure ci - contre:

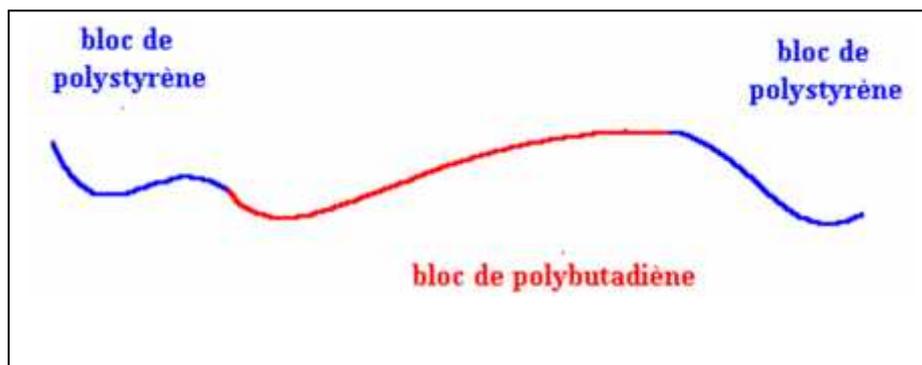


Figure 1 : Schéma de poly (styrène-butadiène-styrène)

### Styrène-butadiène-rubber (SBR)

Styrène caoutchouc butadiène (SBR) est l'un des plus polyvalents copolymère composés de caoutchouc. Il est constitué de styrène et de composé organique du butadiène chimique, avec la quantité de butadiène étant habituellement environ trois fois plus que la quantité de styrène. SBR est un synthétique stable, qui est résistant à l'abrasion. Il est utilisé dans une grande variété de produits, tels que les pneus d'automobiles, les jouets d'enfants, des semelles de chaussures et même la gomme à mâcher .

Ce composé est produit soit par l'intermédiaire ionique polymérisation d'une solution ou d'une émulsion par polymérisation radicalaire.

Aussi connu comme le caoutchouc styrène-butadiène émulsion (E-SBR), ce produit a été développé dans les années 1930 par IG Farben en Allemagne. Il a été créé par une procédure d'émulsion utilisée polymérisation que les moyens de production d'un matériau qui a une réaction faible viscosité, mais avait tous les attributs de caoutchouc naturel. Il était très rentable et a été utilisé pour étirer la diminution des ressources en caoutchouc naturel, en particulier dans la fabrication de pneus à un moment où les pneus ont été faits de caoutchouc solide.

### **Ethylène-vinyle-acétate**

L'acétate de vinyle d'éthylène (EVA) est le copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle. Il s'agit d'un matériau très élastique qui peut être frittée pour former un matériau poreux similaire à du caoutchouc, mais avec une excellente ténacité. Il est trois fois plus souple que le polyéthylène basse densité (LDPE), montrant l'allongement en traction de 750%, avec un pic de température de fusion de 250 ° F (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.

### **Acide poly phosphorique**

Deux ou plus molécules d'orthophosphorique peuvent être liées par condensation pour former des molécules plus grandes en éliminant l'eau. De cette façon, une série d'acides polyphosphoriques peut être obtenue.

L'acide poly phosphorique peut être obtenu en déshydratant la bonne qualité d'acide phosphorique. La matière première utilisée pour produire l'acide poly phosphorique est une solution d'acide phosphorique concentrée à environ 50% - 60% P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Pour la déshydratation, notre Pulvaporizator® est utilisé pour pulvériser, vaporiser et amener la molécule à la température désirée, pour que le phénomène de déshydratation puisse se produire. Le mélange d'acide phosphorique et des gaz est ensuite refroidi et séparé; les gaz sont lavés et rejetés à l'atmosphère, et l'acide poly phosphorique est récupéré.

### **Gilsonite :**

Gilsonite, ou Asphaltum est un hydrocarbure naturel résineux trouvé dans le bassin Uintah dans le nord de l'Utah. Cet asphalte naturel est semblable à un asphalte de pétrole.

---

# **Annexe II**

## ***CLASSIFICATION DES MATERIAUX***

## LES CATEGORIES DE SABLE ET DE GRAVILLON

Les différentes catégories de sable et de gravillon sont présentés dans les tableaux 1 et 2 selon la norme NF P 18- 545 :

Tableau 1. Les catégories de sables.

Catégorie	Granularité		ES 10%	VB si ES 10% non obtenu
	Position du fuseau	Etendue maximale du fuseau		
<b>a</b>	Refus à 1.58D = 0	10% à D et à 0.5 mm 15% à 2 mm et 4mm	≥ 60	≤ 1
<b>b</b>	Refus à D=1 à 15%	4% à 0.08mm si fines <12% 6% à 0.08mm si fines ≥ 12%	≥ 50	≤ 1.5
<b>c</b>			≥ 40	≤ 2

Tableau 2. Les catégories des gravillons.

Catégorie	Passants (%) à						A <sup>3)</sup>	P
	2D	1.58D	D	(d+D)/2 <sup>2)</sup>	d	0.63d		
<b>I</b>							10	0.5
<b>II</b>	Vsi 100	Vsi 99	Li 85 <sup>1)</sup>	Li 30	Li 1	Vss 5	15	1
<b>III</b>			Ls 99	Ls 70	Ls 15 <sup>1)</sup>		20	2
			e 10	e 25	E 10			

1) Si  $D \leq 1.6 d$ ,  $Li = 80$  à  $D$  et  $Ls = 20$  à.  
2) Ne s'applique que si  $D \geq 2 d$  (voir paragraphe 5.4).  
3) Les Vss de A sont majorées de 5 points si  $D \leq 10$  mm.

**CLASSEMENT DES GRANULATS :**

A partir des essais de **Los Angles** et **Micro-Deval** sur les granulats destinés aux travaux routiers, les granulats sont classés suivant cinq catégories :

L'appartenance à une catégorie, nécessite de satisfaire simultanément :

- à la somme des valeurs de **LA** et de **MDE**.
- et aux valeurs de **LA** et **MDE** du tableau.

*Tableau 3. Classement des granulats selon la norme P18-101.*

<b>Catégories</b>	<b>LA+MDE</b>	<b>LA</b>	<b>MDE</b>
<b>A</b>	<b>≤ 25</b>	<b>≤ 20</b>	<b>≤ 15</b>
<b>B</b>	<b>≤ 35</b>	<b>≤ 25</b>	<b>≤ 20</b>
<b>C</b>	<b>≤ 45</b>	<b>≤ 30</b>	<b>≤ 25</b>
<b>D</b>	<b>≤ 55</b>	<b>≤ 35</b>	<b>≤ 30</b>
<b>E</b>	<b>≤ 80</b>	<b>≤ 45</b>	<b>≤ 45</b>
<b>F</b>	<b>&gt; 80</b>	<b>&gt; 45</b>	<b>&gt; 45</b>

**CLASSIFICATIONS DES BITUMES PURS :**

Le tableau 4 présente la classification des bitumes purs suivant leur pénétrabilité

*Tableau 4. Classification des bitumes routiers purs.*

<b>Spécifications des bitumes routiers de grade 20/30 à 160/220</b>	<b>Désignation des classes appropriées</b>				
	<b>Normes</b>	<b>20/30</b>	<b>35/50</b>	<b>50/70</b>	<b>70/100</b>
<b>Pénétrabilité à 25 °C (1/10mm)</b>	NF EN 1426	20 à 30	35 à 50	50 à 70	70 à 100
<b>Température bille et anneau (°C)</b>	NF EN 1427	55 à 63	50 à 58	46 à 54	43 à 51
<b>Densité à 25 °C</b>	EN ISO 2592	1 à 1.1	1 à 1.1	1 à 1.1	1 à 0.07

---

# **Annexe III**

## ***LES SPECIFICATIONS DES BB ET DES BBSG***

## LES SPECIFICATIONS ALGERIENNES DES BB

### Les performances mécaniques des BB

Les spécifications relatives aux caractéristiques mécaniques des bétons bitumineux à chaud sont données, selon la classe du bitume, dans le tableau 5 :

Tableau 5. Les performances mécaniques des BB 0/14.

Caractéristiques	Classes du bitume							
	80/100		60/70		40/50		20/30	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
<b>Sm</b>	8.5	-	9.5	-	10.5	-	12.5	-
<b>Fm</b>	-	4	-	4	-	4	-	4
<b>% vide des BB 0/14 (couche de roulement)</b>	3	5	3	5	3	5	3	5

Les spécifications liées à la tenue à l'eau des enrobés bitumineux à chaud sont données, en fonction des zones climatique et du trafic :

Tableau 6. Performances liées à la tenue à l'eau des BB 0/14 (Zones I et II).

Type d'enrobé	Caractéristiques	Zones I et II	
		Trafic (PL.MJA) < 150	Trafic (PL.MJA) 150
<b>BB 0/14</b>	RCimm/RCsec	> 0.70	> 0.75

Tableau 7. Performances liées à la tenue à l'eau des BB 0/14 (Zone III).

Type d'enrobé	Caractéristiques	Zone III	
		Trafic (PL.MJA) < 150	Trafic (PL.MJA) 150
<b>BB 0/14</b>	RCimm/RCsec	> 0.40	> 0.45

**LES SPECIFICATIONS EUROPEENNES DES BBSG :****Caractéristiques minimales des granulats pour les BBSG**

La catégorie des granulats est spécifiée en fonction des objectifs recherchés et du contexte propre au chantier. Elle ne peut pas être inférieure aux caractéristiques du tableau 8 :

*Tableau 8 : Caractéristiques minimales des granulats pour BBSG utilisés en couche de roulement ou en couche de liaison (NF P 98 - 130).*

	<b>Couche de roulement</b>	<b>Couche de liaison</b>
<b>Résistance mécanique des gravillons</b>	C	D
<b>Caractéristiques de fabrication des gravillons</b>	III	III
<b>Caractéristiques de fabrication des sables</b>	a	a

**Module de richesse**

Pour chaque type de BBSG, le module de richesse K doit avoir une valeur supérieure ou égale à celle donnée dans le tableau 9 :

*Tableau 9. Valeurs du module de richesse (NF P 98 - 130).*

<b>Type de BBSG</b>	<b>BBSG 0/10</b>	<b>BBSG 0/14</b>
<b>K</b>	$\geq 3.4$	$\geq 3.2$

**Épaisseur d'utilisation**

Les épaisseurs d'utilisation sont mentionnées dans le tableau 10 :

*Tableau 10. Épaisseurs d'utilisation par couche (NF P 98 - 130).  
(Valeurs en centimètres)*

<b>Type de BBSG</b>	<b>Épaisseur moyenne d'utilisation</b>
<b>BBSG 0/10</b>	5 à 7
<b>BBSG 0/14</b>	6 à 9

**Granularité**

Continue en général

---

# **Annexe IV**

## ***LES SPECIFICATIONS EUROPEENNES DES BBME***

## LES SPECIFICATIONS EUROPEENNES DES BBME

### Caractéristiques minimales des granulats pour les BBME

La catégorie des granulats est spécifiée en fonction des objectifs recherchés et du contexte propre au chantier. Elle ne peut pas être inférieure aux caractéristiques du tableau 11 :

*Tableau 11. Caractéristiques minimales des granulats pour BBME utilisés en couche de roulement ou en couche de liaison (NF P 98 - 141).*

	<b>Couche de roulement</b>	<b>Couche de liaison</b>
<b>Résistance mécanique des gravillons</b>	C	D
<b>Caractéristiques de fabrication des gravillons</b>	III	III
<b>Caractéristiques de fabrication des sables</b>	a	a

### Module de richesse

Pour chaque type de BBME, le module de richesse K doit avoir une valeur supérieure ou égale à celle donnée dans le Tableau 12 :

*Tableau 12. Valeurs du module de richesse (NF P 98 - 141).*

<b>Type de BBSG</b>	<b>BBME 0/10</b>	<b>BBME 0/14</b>
<b>K</b>	$\geq 3.5$	$\geq 3.3$

### L'ajout de la Chaux hydratée

En cas d'utilisation de filler d'apport présentant une certaine teneur en chaux hydratée, la teneur en chaux hydratée de la masse totale des sables 0/3 ne doit pas excéder 1 %.

## Performances mécaniques des BBME

Tableau 13. Evaluation des performances mécaniques des BBME (NF P 98 - 141).

Essais sur BBME 0/10 ou 0/14	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1) Rapport : $\frac{r \text{ (en MPa) après immersion}}{R \text{ (en MPa) à sec}}$	≥ 0,80	≥ 0,80	≥ 0,80
Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) Profondeur d'ornière en pourcentage de l'épaisseur de la dalle pour une dalle de 10 cm d'épaisseur à 30 000 cycles et à 60 °C, à un pourcentage de vides compris entre 5 % et 8 %	≤ 10 %	≤ 7,5 %	≤ 5 %
Essai de module complexe (NF P 98-260-2) Module, en mégapascals, à 15 °C, 10 Hz à un pourcentage de vides compris entre 5 % et 8 %	≥ 9 000	≥ 12 000	≥ 12 000
Essai de traction directe (NF P 98-260-1) Détermination du module et de la perte de linéarité à un pourcentage de vides compris entre 5 % et 8 % Module, en mégapascals, à 15 °C, 0,02 s	≥ 9 000	≥ 12 000	≥ 12 000
Essai de fatigue (NF P 98-261-1) Déformation relative à 10 <sup>6</sup> cycles, 10 °C et 25 Hz et pour un pourcentage de vides compris entre 5 % et 8 %, $\epsilon_6$	— ≥ 110 $\mu$ def	≥ 100 $\mu$ def	≥ 100 $\mu$ def

---

# **Annexe V**

## ***RAPPORT DES RESULTATS D'ESSAIS D'IDENTIFICATION DES COMPOSANTS ET DES ETUDES DE FORMULATION DES BBME***

## LES RESULTATS D'ESSAIS D'IDENTIFICATION DES COMPOSANTS

### 1. Les granulats :

Caractéristiques de fabrication des granulats pour les BBME :

Tableau 14. Caractéristiques de fabrication des granulats.

Essais	Résultats			Spécifications
	0/2	2/6.3	6.3/10	
Coefficient d'aplatissement (%)	-	15.60	20.00	$\leq 25$
Valeur au bleu de méthylène	0.64	-	-	$< 2$

Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés par le tableau 15, ils sont illustrés par la figure 2.

Tableau 15. Résultats de l'analyse granulométrique.

Granulats						
Tamis (mm)	ROUINA 0/2	ROUINA 2/6	ROUINA 6/10			Reconstitution granulométrique
20	100.0	100.0	100.0			100.0
16	100.0	100.0	100.0			100.0
14	100.0	100.0	100.0			100.0
12.5	100.0	100.0	100.0			100.0
10	100.0	100.0	99.0			99.6
8	100.0	100.0	92.0			96.4
6.3	100.0	100.0	56.0			80.2
4	100.0	81.0	4.5			51.7
2	98.0	17.0	1.2			31.8
1	79.0	1.1	1.2			22.2
0.315	48.0	0.9	1.2			13.8
0.250	42.0	0.9	1.2			12.1
0.08	27.0	0.8	1.2			8.1
0.063	25.0	0.8	1.1			7.5

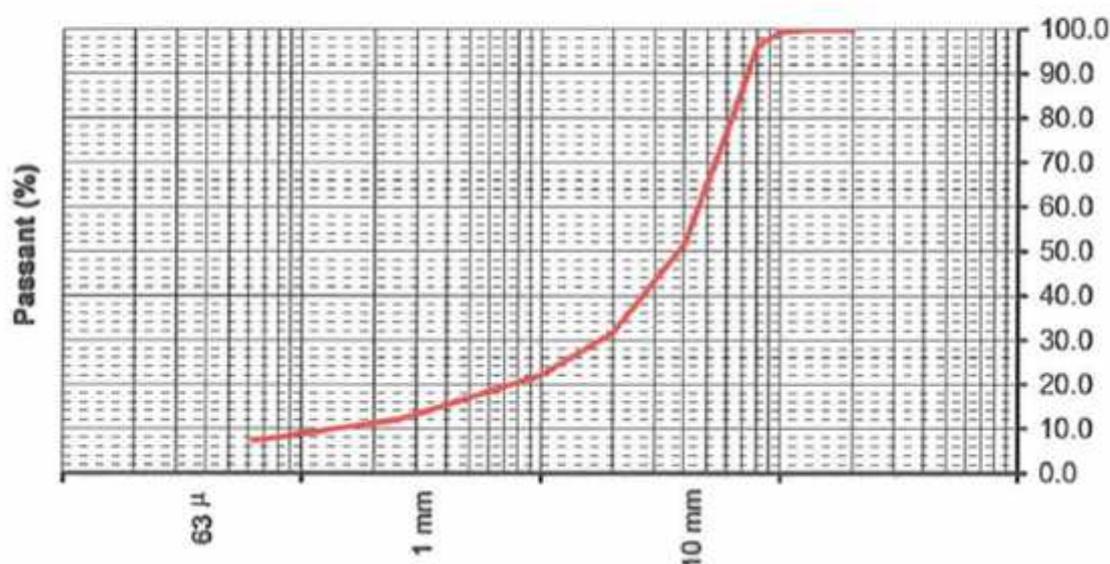
Courbe granulométrique du mélange

Figure 2. Courbe granulométrique du mélange.

Caractéristiques intrinsèques des granulats pour les BBME :

Tableau 14. Caractéristiques intrinsèques des granulats.

Essais	Résultats			Spécifications
	0/2	2/6.3	6.3/10	
Masse volumique réelle (t/m <sup>3</sup> )	2.84	2.84	2.83	> 2.6
LA [%]	-	23.60	21.80	≤ 25
MDE [%]	-	18.20	16.70	≤ 20

**Commentaires**

- ✓ Du point de vue caractéristiques intrinsèques des granulats, les résultats obtenus en fonction de leur utilisation en enrobé à module élevé sont conformes aux spécifications de la classe « C » selon la norme NF P 18 - 545.
- ✓ Concernant les caractéristiques de fabrication des granulats, les résultats sont conformes aux spécifications exigées vis-à-vis de la forme, de la granulométrie et de la propreté. Ces caractéristiques de fabrication les classent dans la catégorie « III ». Les caractéristiques de fabrication du sable le classent dans la catégorie « a ».

## 2. Le bitume :

Tableau 15. Résultats des essais sur bitume.

Type d'essai	Résultats	Spécifications
Pénétrabilité à 25 °C (1/10 mm)	44.20	35 - 50
Point de Ramollissement « TBA » (°C)	53.20	50 - 58

Le bitume est commercialisé par NAFTAL, d'après les résultats des essais c'est un bitume pur 40/50.

## LES RESULTATS D'ESSAIS DES ETUDES DE FORMULATION

<u>COMPOSANTS</u>	Dosage
0/2 c. ROUINA	25.5%
2/6 c. ROUINA	26.44%
6/10 c. ROUINA	42.49%
Bitume 40/50 NAFTAL	5.19 %
PR Plast S	0.38 %

MODULE DE RICHESSE

	Valeur déterminée	Spécification
K	3.59	≥3.5

CARACTERISTIQUES DURIEZ ET MODULE COMPLEXE

	Résultats	Spécifications
Résistance à sec (MPa)	15.88	-
Résistance imm. (MPa)	14.40	-
Tenue à l'eau	0.90	≥ 0.80
Module (MPa)	9414	≥ 9000