

REPUBLIQUE ALGERINNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale polytechnique
département de génie civil



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

**Projet de Fin d'Etude en vue de l'obtention du diplôme
d'Ingénieur d'état en Génie Civil**

Thème

***Matériaux mis en œuvre dans la couche
de surface des chaussées bitumineuses épaisses***

Proposé et dirigé par

Dr. M. MORSLI

Présenté par

REDAOUI Faycel

BOUALIA Fouaz

PROMOTION : juin 2010

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi BP182 El-Harrach

16200 Alger (Algérie)

ملخص

لمواكبة حركة المركبات وزيادة تأثيراتها ، المواد المستخدمة في الطبقة السطحية آخذة في التحسن باستمرار مع مرور الوقت. ومع وصول الزفت عالي القساوة الى الأسواق تم تصنيع اسفلت عالي المعامل ، ووضع منهجية تستند الى الاسفلت عالي المعامل تقوم على أداء عناصر المكونة للأسفلت

في هذه الدراسة ، نقوم بوضع تركيبة من الاسفلت الكلاسيكي وتحسينها بإضافة مزيج من المضادة للتخفر

كلمات البحث : زفت ، مقياس ، مصقول ، زفت قاسي ، إضافات ، الحفر

Résumé

Pour faire face à l'accroissement du trafic poids lourds et de son agressivité, les matériaux mis en œuvre en couche de surface n'ont cesse de s'améliorer à travers le temps. L'arrivée sur le marché des bitumes de grade très dur à permis la fabrication d'enrobés à module élevé. Par ailleurs, la méthodologie de formulation des enrobés bitumineux anciennement basée sur les performances des ses composants repose actuellement sur les performances du mélange.

Dans le cadre de cette étude, nous avons fait un état de l'art des techniques puis procéder à la formulation d'un enrobé classique et d'un enrobé amélioré par ajout d'un anti-orniérage.

Mots clé : module, enrobé, bitume dur, additifs, orniérage,

Abstract

To cope with the increased trucks traffic and its aggressiveness, the materials used in the surface are constantly improving over time. The arrival on the market for bitumen grade very hard to permit the manufacture of coated high modulus. Furthermore, the methodology of formulating asphalt formerly based on the performance of its components is currently based on the performance of the mixture.

As part of this study, we have a state of art technology and proceed with the formulation of a mix of classic and enhanced by adding a mix of anti-rut.

Keywords: module, coated, hard bitumen, additives, rutting,,

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Madame M.MORSLI, MAITRE DE CONFERENCES, ENP, pour nous avoir proposé le sujet et nous avoir guidé, orienté et encouragé tout le long de la période de préparation de ce mémoire.

Ma reconnaissance va également à Monsieur M.BENSAIBI pour m'avoir accueilli dans le Laboratoire Centrale de Travaux Publique(LCTP), et de m'avoir prodigué des conseils et des encouragements.

Je remercie Monsieur M.SENHADJI pour ses conseils, encouragements et recommandations

Mes remerciements s'adressent également aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.

Mes remerciements s'adressent également à Madame D. CHERID, chargée de cours à l'ENP, pour ses conseils et encouragements.

Enfin, mes remerciements s'adressent à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

TABLE DE MATIERES

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Les chaussées bitumineuses épaisses

I.1.Introduction.....	3
I.2.Terminologie.....	3
I.2.1.Description fonctionnelle d'une chaussée.....	4
I.2.2.Définition de la chaussée bitumineuse épaisse.....	4
I.3.L'orniérage des chaussées bitumineuses	5
I.3.1.Facteurs déterminants dans la formation des ornières	6
I.3.2 .Conclusion.....	8
I.4.Les bétons bitumineux.....	8
I.4.1.Evolution des bétons bitumineux.....	9
I. 5.Conclusion.....	11

Chapitre II

Formulation des bétons bitumineux

II.1.Identification des composants d'un béton bitumineux.....	13
II.1.1.Le bitume	13
II.1.2.Les granulats	16
II.2.Formulations des bétons bitumineux.....	19
II.2.1.Méthodologie de formulation LCPC –France-.....	20
II.2.2.Réalisation de l'épreuve de formulation.....	22
II.2.3.Méthodologie de formulation CTTTP–Algérie-.....	24
II.3.Méthodes de formulation.....	27
II.3.1.La méthode LCPC.....	27
II.3.2.La méthode – CTTTP-.....	28

II.3.3.Conclusion	29
II.4.Les Bétons Bitumineux à Module Elevé	29
II.5.Comparaison entre les BBSG et les BBME	31
II.5.1.Béton bitumineux semi grenue	31
II.5.2.Béton bitumineux à module élevé BBME	32
II.6.Conclusion	33

Chapitre III

Evolution des performances du BBSG 0/14 modifié par ajout d'un anti-orniérant

III.1 Introduction.....	35
III.2 Formulation d'un béton bitumineux semi grenu BBSG 0/14.....	35
III.2.1 Provenance des matériaux	35
III.2.2 Etude de laboratoire	35
III.3 Evolution des performances du BBSG 0/14 modifié par ajout d'un anti-orniérant	44
III.3.1 Etude de laboratoire.....	44
III.5 Conclusion.....	48
 Conclusion générale/perspectives.....	 51

Annexes

Bibliographie

LISTES DES FIGURES

Figure 1.1 : Coupe schématique d'une chaussée (Bodin, 2002).....	3
Figure 1.2 : Structure d'une chaussée bitumineuse épaisse.(catalogue de structure type de chaussée, LCPC,1994).....	4
Figure 1.3 : Exemple de chaussée atteinte d'orniérage (Bahsem, 2006).....	5
Figure 1.4 : Types d'ornières dans une chaussée bitumineuse (White et al. 2002).....	5
Figure 2.1 : Les niveaux de l'épreuve de formulation (LCPC, 2007).....	18
Figure 3.1 : Courbes granulométriques de chaque fraction.....	37
Figure 3.2 : Fuseau de référence béton bitumineux 0/14.....	40
Figure 3.3 : La tenue à l'eau.....	45
Figure 3.4 : Fluage à sec 1/10 mm.....	45
Figure 3.5 : Stabilité en KN à sec R.....	46
Figure 3.6 : Stabilité en KN 7 j imm.r.....	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Spécifications des d'un bitume dur fabriqué par distillation.....	15
Tableau 2.2 : Spécifications des granulats (CTTP d'Alger).....	17
Tableau 2.3 : Spécifications des granulats (LCPC France).....	18
Tableau 2.4 : Spécifications des granulats (LCPC France).....	18
Tableau 2.5 : Courbe granulométrique de départ.	27
Tableau 2.6 : Le module de richesse.....	29
Tableau 2.7 : Les caractéristiques d'un BBSG.	31
Tableau 2.8 : Les performances mécaniques des BBSG.....	32
Tableau 2.9 : L'essai PCG sur un BBSG.....	32
Tableau 2.10 : Les caractéristiques des BBME.....	33
Tableau 2.11 : Les performances mécaniques des BBME.....	33
Tableau 3.1 : Caractéristiques intrinsèques des agrégats.....	36
Tableau 3.2 : L'analyse granulométrique des agrégats.....	37
Tableau 3.3 : Les caractéristiques de fabrications des agrégats.....	38
Tableau 3.4 : Les caractéristiques des granulas.....	38
Tableau 3.5 : Les caractéristiques du bitume.	39
Tableau 3.6 : Formule granulaire retenue.....	40
Tableau 3.7 : Teneur en bitume.....	42
Tableau 3.8 : Les résultats de l'essai de Marshall.....	42
Tableau 3.9 : Pourcentages des composants du mélange.....	43
Tableau 3.10 : Expression des résultats d'essai Marshall.....	44

Introduction

La chaussée bitumineuse conçue pour les trafics élevés (>150 poids lourds/Jour/Sens) est le type de chaussée le plus usuel dans la construction routière. Cependant de part leur constitution et de l'évolution du trafic en intensité et en agressivité, ces chaussées subissent divers types de dégradations, notamment l'orniérage qui nuit à la qualité de service de la chaussée.

Pour faire face à ce problème, plusieurs techniques, basées essentiellement sur une amélioration des performances du béton bitumineux, ont vu le jour à travers l'histoire, parmi les récentes on citera celle qui permet de fabriquer des Enrobés à Module Elevé, sous deux composantes : les « EME » et les « BBME » ; les premiers, sont destinés aux assises de chaussées, les seconds -les Béton Bitumineux à Module Elevé- sont destinés aux couches de surface.

Cette technique a vu son introduction en Algérie lors de la réalisation des sections de l'autoroute EST-OUEST et de la ROCADE SUD d'ALGER.

Le thème de notre Projet de Fin d'Etude est inspiré de cette actualité, il traite des *différentes techniques de conception de la couche de roulement* ; une attention particulière est apportée aux BBME .

Le but de notre travail était d'établir un Etat de l'Art des techniques de construction des couches de roulement des chaussées bitumineuses, de faire le point sur les techniques utilisées en Algérie et enfin de mettre en application les connaissances acquises lors de l'étude bibliographique en procédant à une étude expérimentale portant sur la fabrication des BBME.

Cependant, il s'est avéré que la méthodologie de formulation des BBME est identique à celle des enrobés classiques, régie par la méthode du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (méthode LPC).

Or la méthodologie appliquée en Algérie pour les enrobés classiques est établie selon les recommandations du Contrôle Technique des Travaux Publics (recommandations CTTTP).

Les deux méthodes sont totalement différentes.

Par ailleurs, il est pratiquement impossible d'appliquer la méthode LCPC, car les laboratoires algériens ne sont pas équipés en matériels adéquats.

De ce fait, la partie bibliographique va contenir, en plus de l'Etat de l'Art, une étude comparative des deux méthodologies de formulation ;

Quant à la partie expérimentale, le matériau élaboré, bien que ses composants soient ceux d'un BBME, la formulation a été établie selon les recommandations CTTTP, et le produit élaboré nous l'avons appelé Béton Bitumineux à Performances Améliorées – BBPA-

Les travaux ont été réalisés au Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP).

Ce projet nous a permis de nous enquérir des nouvelles techniques de construction routières, de nous familiariser avec les produits noirs et les normes relatives à leur formulation et enfin de nous imprégner du monde du travail.

Chapitre I

Les chaussées bitumineuses épaisses



Chapitre I : Les chaussées bitumineuses épaisses.

I.1 Introduction

Le choix d'une structure de chaussée est lié à l'importance de la liaison à réaliser - appartenance ou non au réseau structurant en relation avec le niveau de service exigé - , à la prévision du trafic qu'elle devra assurer et au choix de la stratégie d'investissement et d'entretien.

Les techniques disponibles ne sont pas toutes équivalentes sur le plan de l'évolution du niveau de service :

- Les structures en béton étant sensibles au sous - dimensionnement, et ne pouvant être entretenues avec des tapis minces, doivent être conçues pour une longue durée.
- Dans le cas d'assises traitées aux liants hydrauliques, le risque d'endommagement avec la remontée des fissures. Une réduction de l'épaisseur de la couche d'enrobé – qui joue en même temps le rôle anti-fissures - compromet rapidement la résistance de l'ensemble de la chaussée.
- Le cas d'assises traitées au bitume – chaussées bitumineuses épaisses - reste le plus adapté aux chaussées du réseau structurant. Cependant l'intensification du trafic et de l'agressivité des poids lourds les rends vulnérables occasionnant une perte relativement précoce du niveau de service requis.

I.2 Terminologie

I.2.1 Description fonctionnelle d'une chaussée

Une chaussée routière se présente comme une structure composite réalisée par empilements successifs de couches de matériaux granulaires liés ou non, le tout reposant sur un sol support. (Figure 1.1).

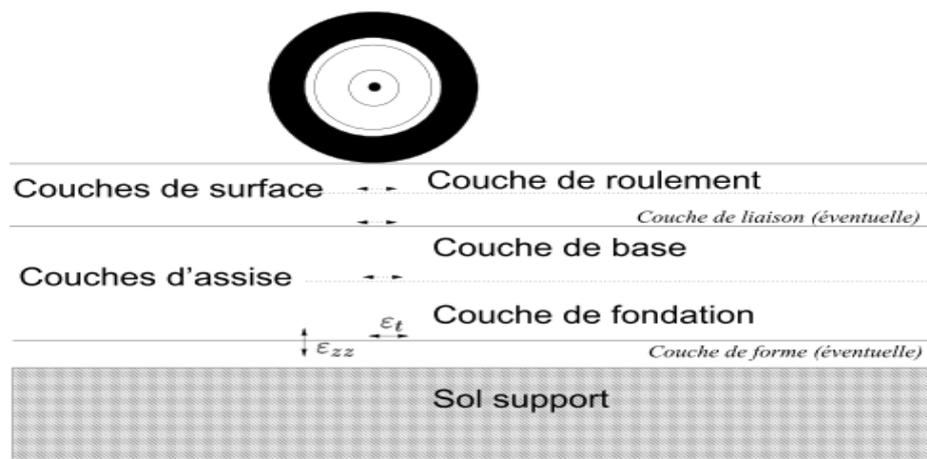


Figure 1.1 : Coupe schématique d'une chaussée (Bodin, 2002)

Chaussée : Structures multicouches, mises en œuvre sur un ensemble appelé plate-forme support de chaussée constituée du sol terrassé ‘ dit sol support ’ surmonté généralement d’une couche de forme.

Couche de forme assure la transition entre sol et corps de chaussée:

Pendant les travaux, elle assure la protection du sol, la qualité de nivellement permettant la circulation des engins pour les approvisionnements en matériaux et construction.

Concernant le fonctionnement mécanique de la chaussée, elle rend plus homogène le remblai ou le terrain en place et protège du gel.

Couche d’assise comporte la couche de fondation et base et la couche de base. Elle est réalisée en matériaux élaborés ; elle apporte la résistance mécanique aux charges verticales, répartissant les pressions sur la plate-forme afin de limiter les déformations à ce niveau au seuil admissible.

Couche de surface : la couche de roulement assure les fonctions d’adhérence avec les pneumatiques, elle doit résister aux actions directes du trafic et du climat et protéger (par imperméabilisation) le corps de chaussée. Le cas échéant une couche de liaison s’interpose entre la surface et l’assise, elle peut être constituée de dispositifs visant à limiter la remontée des fissures de retrait des assises traitées.

1.2.2 Définition de la chaussée bitumineuse épaisse

On désigne par « *chaussées bitumineuses épaisses* » les structures de chaussées comportant une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traité aux liants hydrocarbonés, fait d’une ou de deux couches (base et fondation). (Figure 1.2).

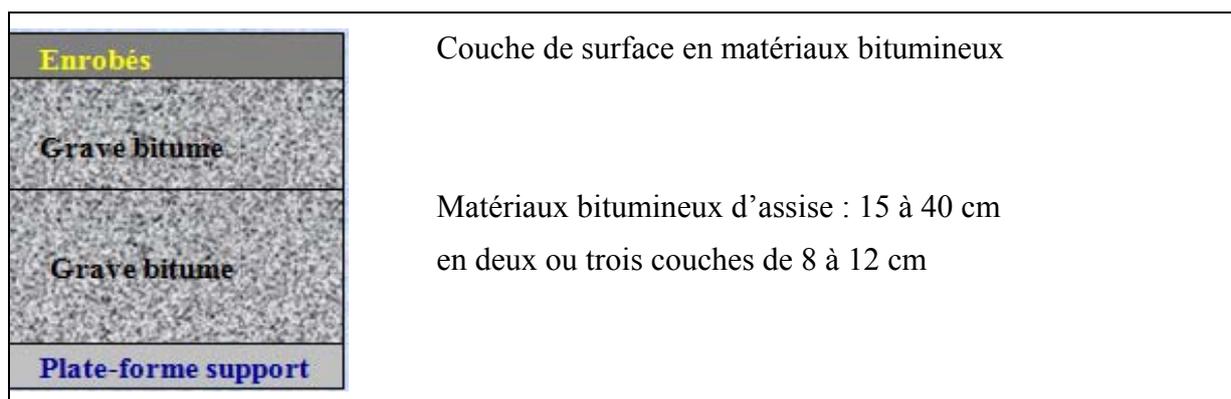


Figure 1.2 : Structure d’une chaussée bitumineuse épaisse.(catalogue de structure type de chaussée, LCPC,1994)

Les chaussées bitumineuses épaisses sont conçues pour des trafics importants (>150PL/J/Sens). Elles sont largement utilisées dans les constructions routières et autoroutières. C’est le type de chaussée retenu dans la réalisation de plusieurs tronçons de l’autoroute EST-OUEST et de la deuxième ROCAD d’Alger.

I.3 L'orniérage des chaussées bitumineuses

La croissance du trafic lourd accélère l'apparition de la dégradation prématurée de la chaussée, notamment l'orniérage. L'orniérage constitue la cause principale de la dégradation des chaussées bitumineuses. L'ornière est une dégradation longitudinale dans les traces du pneu. Elle s'intensifie à température élevée. La sensibilité de chaussées bitumineuses à l'orniérage dépend des caractéristiques des chaussées, de la teneur et du type de liant, du type et de la granulométrie des granulats et de l'humidité des couches inférieures (Bahssem, 2006)



Figure 1.3 : Exemple de chaussée atteinte d'orniérage (Bahssem, 2006)

On distingue trois types d'ornières (White et al. 2002)

- Les ornières d'usure, dues à la perte progressive des particules de granulats de la couche de surface, ce type d'orniérage est causé par la combinaison des facteurs d'environnement et de trafic.
- Les ornières structurelles qui sont dues à la déformation verticale permanente dans les couches inférieures ; elles affectent toute la structure de chaussée.
- Les ornières d'instabilité dues au déplacement latéral des matériaux dans la couche de l'enrobé bitumineux.

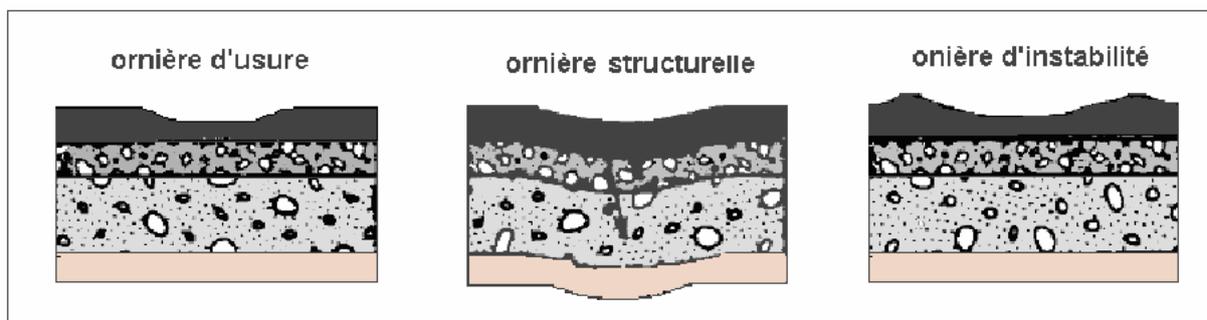


Figure 1.4 : Types d'ornières dans une chaussée bitumineuse (White et al. 2002)

I.3.1 Facteurs déterminants dans la formation des ornières

La complexité (Bodin, 2002) du comportement permanent des matériaux bitumineux provient de la complexité de leur composition. La formation des déformations permanentes des matériaux bitumineux, cause du phénomène d'orniéage, est influencée par plusieurs facteurs, parmi lesquels on peut trouver deux types :

- Les facteurs de formulation des mélanges
- Les facteurs de sollicitations externes,

Les facteurs de formulation

Dans la formulation d'un enrobé bitumineux interviennent les facteurs suivants : le liant, les composants minéraux.

Le liant

La nature : la susceptibilité thermique, qui caractérise le niveau de variation des propriétés mécaniques des matériaux bitumineux, notamment à hautes températures, dépend strictement de la susceptibilité du liant utilisé.

Des études expérimentales (STBA, 1998) montrent que l'utilisation des liants plus durs et moins susceptibles à la température diminue considérablement les risques d'orniéage, par contre elle peut poser des problèmes de fragilisation du mélange à basses températures.

La teneur : le niveau d'enrobage des composants minéraux est directement lié à la teneur en liant. L'introduction d'une quantité de liant excessive va saturer le mélange, ce qui réduit les efforts de contact entre des granulats. Par contre, une quantité insuffisante de liant n'assure pas un bon enrobage des granulats et les composants minéraux perdent cette fois l'adhésivité, la teneur en vide augmente et la stabilité du squelette granulaire diminue. Ceci engendre également une forte susceptibilité aux déformations permanentes due au post-compactage, de faibles cohésions et frottement interne.

Les composants minéraux

Les composants minéraux forment l'ossature rigide du mélange. Comme ils possèdent une forte hétérogénéité et des propriétés géométriques variables, les caractéristiques et propriétés mécaniques des mélanges, y compris la formation des déformations permanentes, varient aussi suivant les composants minéraux utilisés.

Granularité et fraction de sable : la granularité des composants minéraux utilisés est un paramètre important qui influe fortement sur la performance du mélange bitumineux. Les études expérimentales sur différents taux de discontinuité des granulats montrent bien l'influence de la granularité sur l'évolution de l'orniéage. En utilisant une granularité continue, le remplissage des vides entre les grains est assuré par les grains plus petits et le mélange a une meilleure compacité. De plus, ceci peut augmenter les contacts et les blocages inter granulaires. La rigidité, la stabilité et la résistance du mélange sont alors améliorées.

Le rôle du sable dans le mélange est également important. La présence d'une fraction raisonnable de sable contribue au renforcement du mélange contre l'orniérage, car il remplit les vides entre des grains plus gros pour assurer que la quantité de vide ne soit pas trop importante. Par contre, une quantité excessive de sable va diminuer le contact entre des grains plus gros (Les gravillons et les pierres concassées) en créant des rotules entre ces particules qui peuvent favoriser les translations et les rotations des granulats.

Influence du filler : le filler absorbe une partie du liant introduit et forme le mastic qui remplit une partie des vides entre les granulats et réduit la teneur en vide du mélange. le filler est un des composants les plus importants du mélange, la présence du filler fait augmenter le temps de relaxation du liant et rigidifie alors le liant. les expérience ont montré que le mastic est sensible au cisaillement et que ses propriétés mécaniques dépendent de l'amplitude et de la durée d'application des charges. Elles sont fonction de l'historique du chargement.

Les facteurs de Sollicitation externes

la température

L'élévation de la température provoque une diminution de la viscosité du liant et du module ce qui favorise l'apparition de déformations permanentes. La température influence également la forme de l'orniérage, l'augmentation de la température conduit à une déformation irréversible dans la couche de surface. En particulier aux températures élevées.

Puisque les déformations dans les couches en enrobé bitumineux affectent celles dans les couches inférieures, la variation de la température affecte également le développement de la déformation plastique dans les couches inférieures.

Influence de chargement mécanique

Type de pneus : la réponse de la chaussée est également affectée par le type de pneus. On indique que des pneus single produisent plus d'orniérage que les pneus jumeaux. Le pneu super single, récemment apparu, a une largeur entre 400 et 460 mm. Il dépasse de 250 à 305 mm la largeur d'un pneu simple. La surface de contact du pneu super single est moins importante que celle du pneu jumeau. Il en résulte une réduction de la résistance au roulement et une réduction de la consommation de carburant. La réduction de la surface de contact est accompagnée par une augmentation de la contrainte de contact par conséquent l'ornière s'intensifie notamment avec des couches moins épaisses.

Pression de gonflage : les essais à différentes pressions de gonflage montrent que la pression de gonflage a peu d'effet sur l'orniérage. L'augmentation de la pression de gonflage induit une augmentation des contraintes de compression verticale de 40% à proximité de la surface de la chaussée. Cette augmentation induit un plus haut risque de déformations plastiques dans les couches de la chaussée et par conséquent l'apparition d'orniérage. On constate que les couches de surface sont plus sensibles à la pression de gonflage que la couche de support. En conséquence, la pression de gonflage a une influence sur l'orniérage d'instabilité.

Charge/essieu : le passage de véhicules entraîne des déformations élastiques, plastiques et visqueuses dans la chaussée. Les charges élevées causent des déformations permanentes, qui entraînent des ornières dans la chaussée. Les dommages causés ne dépendent pas seulement du poids du véhicule, mais également de la configuration des charges transmises à la chaussée. Les expériences montrent aussi que les contraintes causées par la charge du pneu d'un véhicule lourd est le facteur majeur qui réduit la vie des chaussées.

Le trafic

L'intensité du trafic : l'intensité du trafic se traduit par le nombre de passage des véhicules pendant une unité de temps. Les essais comparatifs entre le caractère répétitif et le fluage des matériaux bitumineux ont montré que non seulement la durée de sollicitation est importante mais que le nombre de sollicitations de charge-décharge est aussi influent.

D'après, l'incrément de la déformation permanente sur un cycle est quasiment non mesurable, elle est "masquée" devant la déformation réversible qui lui est largement

Supérieure en amplitude. Ce n'est que par effet de cumul, cycle par cycle, que la déformation permanente devient mesurable.

Le comportement cyclique et le nombre de passage sont alors des paramètres importants à prendre en compte lors de la modélisation du phénomène d'orniéage des structures routières.

La vitesse de circulation : la diminution de la vitesse de circulation fait augmenter le temps de chargement et par conséquent induit une augmentation de l'orniéage, pour les zones à faible vitesse (intersections routières et zone de stationnement).

I. 3.2 Conclusion

De part leur constitution et les conditions d'exploitation, les chaussées bitumineuses subissent divers types de dégradations, notamment l'orniéage qui nuit à la qualité de service de la chaussée.

Les facteurs de formulation tiennent un grand rôle dans la formation d'ornières, ce qui explique les avancées opérées dans la formulation des enrobés et des bétons bitumineux à travers le temps depuis les enrobés classiques jusqu'aux Enrobés à Module Elevé.

I.4 Les bétons bitumineux

Un béton bitumineux est un enrobé bitumineux appliqué destiné en couches de surface en une ou plusieurs couches. C'est un mélange de graviers, de sable, de fines et de liant, la présence de sable, en quantité plus ou moins importante, permet de favoriser l'imperméabilité du revêtement.

Le secteur des enrobés bitumineux s'est attaché à développer des produits plus respectueux de l'environnement. Les avancées techniques réalisées ces dernières années sont significatives : des revêtements routiers plus silencieux, des enrobés bitumineux plus durables, des enrobés bitumineux à basse température, des couches de roulement présentant une meilleure adhérence (Grand Lyon, 2010) ...Les mélanges à froid permettent d'ores et déjà de réduire de

quelque 30 % la consommation énergétique utilisée dans la fabrication, et l'industrie n'a de cesse d'améliorer encore plus ces résultats.

I.4.1 Evolution des bétons bitumineux

Il s'agit dans le cadre de notre travail des enrobés fabriqués à chaud (aux alentours de 180°C) et appliqués à chaud (aux alentours des 150°C).

L' évolution des performances du mélange est liée à la dimension des grains, au type de liant utilisé (liants modifiés, liants spéciaux ...) et à l'incorporation d'additifs.

On distingue les :

Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG) : Très utilisé en technique routière pour les couches de roulement. Épaisseur de couche d'environ 6 cm.

Béton Bitumineux Ultra Mince (BBUM) : épaisseur de couche de 2 cm, utilisé pour les couches d'accrochage destinées à lier deux couches. Ce sont les derniers-nés de la famille des enrobés à chaud. Les formulations de granularité 0/10 ou 0/6 sont discontinues 2/6 ou 2/4 et comportent 5,2 à 5,5 ppc de liant généralement modifié, avec un dosage en sable de 20 à 25%. Le domaine d'emploi privilégié de BBUM 0/6 est celui des revêtements urbains et des BBUM 0/10 concerne l'entretien des routes secondaires (Grand Lyon, 2010).

Béton Bitumineux Très Mince (BBTM) : Épaisseur de couche de 2,5 cm. Très utilisé en France pour les couches de roulement, elle permet de réaliser une couche d'usure qui, après quelques années, pourra être rabotée et refaite. Les BBTM sont des enrobés 0/10 ou 0/6 présentant une discontinuité bien marquée et un dosage en sable 0/2 assez faible (de 20 à 30%). Le liant est généralement un bitume modifié. Les BBTM ont pour objectifs essentiels de conférer à la surface de la chaussée des Propriétés d'adhérence, de dérivabilité mais également, si nécessaire, de propriétés Acoustiques ou photométriques. La technique des BBTM tend à devenir la plus utilisée pour l'entretien des chaussées à trafic important et rapide (Grand Lyon, 2010).

Béton Bitumineux Mince (BBM) : 3 à 4 cm d'épaisseur, pour lesquels les bitumes modifiés ont permis l'utilisation sur des supports dégradés et déformables, ce qui n'était pas réalisable durablement avec un bitume pur. Leur formulation et leur aspect en font un matériau fermé ce qui signifie que leur surface est entièrement composée de granulats et de liant sans aucun espace entre les particules. Ils restent cependant des matériaux rugueux. (Grand Lyon, 2010)

Bétons Bitumineux à Module Elevé (BBEME) : l'avantage économique recherché par une réduction sensible d'épaisseur a plutôt conduit à l'emploi de bitumes durs afin d'atteindre des modules de rigidité élevés. Ces bitumes dits « spéciaux » (de pénétration 10/20, 15/25, etc..) se sont avérés pour cette application plus économique que les bitumes modifiés malgré la

nécessité d'une teneur en liant forte pour assurer une bonne résistance en fatigue. Ils ont constitué les Bétons Bitumineux à Module Elevé(BBME).

Bétons Bitumineux multi-grades : les préoccupations d'orniérage de la couche de surface, face à un trafic poids lourd croissant et plus agressif ont amené l'invention et le développement, ces dernières années, de bitumes spéciaux de type multigrade, de pénétration semi-dure (40/60, 60/80, ...). Ces bitumes spéciaux présentent une moindre susceptibilité thermique que les bitumes purs de même pénétration à 25 °C, ils ont ainsi une rigidité plus grande aux températures élevées et une moindre fragilité aux basses températures que les bitumes purs durs.

Bétons bitumineux drainant (Grand Lyon, 2010) : la mise en œuvre des bétons bitumineux drainants doit être associée à une sous-couche et à un sous sol entièrement drainants. C'est naturellement un matériau perméable. Constitué de granulats, il est quasi exempt de sable. Leur formulation et leur aspect en font un matériau ouvert ce qui signifie que leur surface est entièrement composée de granulats avec des espaces entre les particules. Ce sont des matériaux rugueux. Leur caractère drainant leur interdit tout traitement de finition au risque de les colmater.

Avant la mise en œuvre d'une structure permettant l'infiltration, il est obligatoire de vérifier :

- la réglementation des eaux pluviales sur la zone d'aménagement.
- les caractéristiques du sol : capacité à infiltrer, sensibilité des sols à l'eau.

Enrobés tièdes (Grand Lyon, 2010) : 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.

Bien entendu, il existe d'autres bétons bitumineux qui ne sont pas cités dans cette rubrique.

I. 5 Conclusion

De part leur constitution et les conditions d'exploitation, les chaussées bitumineuses subissent divers types de dégradations, notamment l'orniérage qui nuit à la qualité de service de la chaussée.

Les facteurs de formulation tiennent un grand rôle dans la formation d'ornières, ce qui explique les avancées opérées dans la formulation des enrobés et des bétons bitumineux à travers le temps depuis les enrobés classiques jusqu'aux Enrobés à Module Elevé.

La technique la plus répandue en Algérie est le Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG) , les Bétons Bitumineux à Module Elevé (BBME), viennent juste de faire leur introduction.

Chapitre II

Formulation des Bétons bitumineux

Chapitre II : Formulation des bétons bitumineux

II.1 Identification des composants d'un béton bitumineux

Un béton bitumineux, comme défini dans le chapitre précédent, est un mélange de granulats, bitume, fillers et ajouts dans certains cas.

II.1.1 Le bitume

Définitions

Le bitume est un matériau d'étanchéité adhésif et non volatil, qui provient des résidus de pétrole brut.

C'est un matériau thermoplastique visqueux et élastique. Il est de couleur marron à noire, très visqueux ou pratiquement solide à température ambiante.

Le bitume peut exister à l'état brut dans la nature (bitume de Judée, bitume du lac Trinidad...) dans ces cas, il est naturellement mélangé à un filler. Quand le bitume imprègne du calcaire, le produit peut souvent être utilisé directement sur la route (avec ou sans correction) il porte alors le nom d'asphalte.

La plus grosse source de bitume est actuellement la distillation des pétroles.

Deux propriétés permettent de définir un bitume :

- La pénétrabilité : mesure de dureté à une température donnée (normalisée à 25°C)
- La température de ramollissement : température maximale d'usage de bitume sur la route.

En France, on distingue cinq catégories de bitumes, caractérisées par leur pénétration standard :

- Les bitumes durs de pénétration 40/50 (35/50 pour normes françaises).
- Les bitumes demi-durs de pénétration 80/120
- Les bitumes demi-mous de pénétration 120/200
- Les bitumes mous de pénétration 280/300
- Les bitumes très mous de pénétration 300/350

Seuls les trois premiers ont des applications routières.

Les bitumes durs, demi-durs ou demi-mous sont généralement utilisés dans les pays chaud à longue saison sèche, les ressuages sont d'ailleurs peu à craindre en générale dans ces pays, car les fines poussières déplacent par les vents secs s'incorporent aux revêtements, et fillérisent et durcissent le liant. On emploie généralement des bitumes plus durs pour les enrobés ouverts que pour les enrobés pleins, et à fortiori pour les stabilisations de sol.

Essais appliqués sur les bitumes

Essai de pénétration : Dans l'essai de pénétration, on détermine la dureté d'un bitume. La pénétration est l'expression de la profondeur en 1/10mm à laquelle pénètre une aiguille de dimensions déterminées, dont le poids avec son support est de 100g, dans un échantillon de bitume au bout d'un temps de 5secondes.

Essai de ramollissement : La consistance des bitumes décroît progressivement lorsque leur température augmente. Ils se transforment graduellement et de façon à peine perceptible, de matériaux excessivement épais et d'une fluidité lente à des matériaux mous et d'une fluidité moins visqueuse.

La température de ramollissement, donnée par la méthode « bille et anneau » est la température à laquelle une bille d'acier placée sur un petit disque de bitume contenu dans un anneau de métal, le tout étant chauffé selon un processus déterminé, imprime à l'échantillon de bitume, une déformation verticale définie.

Mesure de la densité relative à 25°C : La densité relative d'un bitume, qui varie avec la température, est déterminée, à 25°C, par la méthode de pycnomètre. C'est le rapport de la masse d'un volume donné de bitume à la masse d'un égal volume d'eau.

La densité relative d'un bitume, qui varie avec la température, est déterminée, à 25°C, par la méthode de pycnomètre. C'est le rapport de la masse d'un volume donné de bitume à la masse d'un égal volume d'eau.

La densité des produits bitumineux est intéressante à connaître car elle permet de faire les corrections de volumes lorsque ceux-ci sont mesurés à des températures élevées, Elle entre également dans le calcul du pourcentage des vides dans les mélanges bitumineux routiers compactés.

Perte de masse au chauffage : L'essai consiste à chauffer dans une étuve ventilée pendant 5 h à une température de 163°C, une couche de matériau bitumineux.

On détermine, par cette méthode, l'effet de la chaleur et de l'air sur le bitume en appréciant la réduction de la pénétrabilité et la variation de la masse de l'échantillon.

Point d'éclair – point de feu : Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle les vapeurs qui se dégagent d'un échantillon de bitume, chauffé dans les conditions de l'essai, s'enflamment à l'approche d'une flamme.

Le point de feu est la température à partir de laquelle un bitume prend feu et brûle pendant au moins 5 secondes.

Essai de ductilité à 25°C : La ductilité d'un matériau bitumineux est l'allongement qui le caractérise avant qu'il se rompe lorsqu'on l'étire à une vitesse spécifiée et à une température donnée : on étire une briquette en forme de 8 jusqu'à rupture.

Viscosité : La viscosité d'un bitume est la mesure de son frottement interne. Si une lame de liquide d'épaisseur e est prise entre deux plateaux parallèles de surface (S) et que les deux plateaux glissent l'un par rapport à l'autre à une vitesse V , la viscosité est définie par :

η =contrainte de cisaillement/taux de cisaillement.

Spécifications et recommandations

Tableau 2.1 : Spécifications des d'un bitume dur fabriqué par distillation.

Normes /recommandations Caractéristiques	Normes LCPC France	Recommandations CTTP Algérie	Exemple Bitume NAFTAL
Pénétrabilité à 25°C 100g , 5s , 1/10 mm	35/50 EN 1426	40/50	40/50
Point de ramollissement bille et anneau ° C	55/63 EN 1427	52 à 57	50 à 56
Densité relative à 25 °C (au pycnomètre)	1,00 à 1,10 NF EN 1097-7	1,00 à 1,10	1,00 à 1,10
Point d'éclair (vase ouvert) °C	240 EN 22592	> 230	> 250
Ductilité à 25 °C, cm	= 60 NF T66-006	= 60	= 60
Teneur en paraffine %	4,5 EN 12606-2	< 9	< 4,5
Température limite de pompabilité , °C	130 NF P 98-150-1	125	125

- On remarque que les caractéristiques du bitume NAFTAL sont conformes à la recommandation CTTP. Pour les recommandations françaises on remarquera que le grade bitume s'inscrit dans une plage plus restreinte (35/50 au lieu de 40/50) par contre la plage de ramollissement est plus large.
- Par ailleurs, il est à noter que la température ne doit pas descendre en dessous de la température de pompabilité car l bitume doit être réchauffée avec une précaution très

importante à prendre en considération qui est la formation de vapeur d'eau dans les citernes de stockage et donc le risque de moussage ce qui influe négativement sur la qualité des enrobés par la suite.

II.1.2 Les granulats

Définitions

Le terme granulat, au singulier, désigne un ensemble de grains d'un même type, quel que soit le critère de classification utilisé. Le terme granulats, au pluriel, sera utilisé pour désigner un mélange de grains de divers types.

Les granulats utilisés dans les enrobés doivent répondre à des impératifs de qualité et des caractéristiques propres à chaque usage.

Essais sur granulats

Ils ont pour but de déterminer les caractéristiques intrinsèques et les caractéristiques de fabrication :

- Les caractéristiques intrinsèques
- Les caractéristiques de fabrication

Les essais sont joints en annexe.

Spécifications et recommandations

Les spécifications vont portées sur les granulats et les fillers d'un Béton Bitumineux Semi Grenu, le BBSG 0/14, ce dernier étant l'enrobé de surface utilisé en Algérie.

a) En Algérie,

Les fractions granulaires autorisés (recommandations CTTTP) pour fabriquer un BBSG sont : 0/3,3/8, 8/15. La valeur de D_{\max} est de 15 mm.

Tableau 2.2 : Spécifications des granulats (CTTP d'Alger).

Essais		Spécifications		
Coefficient LOS ANGELES (PLMJA=150)		25		
Coefficient MICRO-DEVAL (PLMJA=150)		20		
Coefficient d'aplatissement (PLMJA=150)		20		
Caractéristiques rigidifiant -NF EN 1097-4- Indice de vide Rigden (IVR en %)		40%		
Valeur au bleu de Méthylène		1		
Propreté superficielle		2		
Equivalent de sable à 10 % f (%)		60		
		Tamis	Passant	
Analyse granulométrique		0/3	3/8	8/15
	25	100	100	100
	15	100	100	85-99
	12,5	100	100	
	8	100	85-99	1-15
	5	100		3
	3	85-99	1-15	
	2		3	

La granulométrie des fines est comme suit : Passant au tamis de 0.2 est de 100% et Passant au tamis de 0.08 > 80%

b) En France

Les fractions granulaires autorisées pour la fabrication d'un BBSG 0/14 (NF P98-130 à 141) sont : 2/4, 2/6, 4/6, 4/10, 6/10, 10/14 . La valeur de D_{max} est de 14m.

Tableau 2.3 : Spécifications des granulats (LCPC France).

Essais		Spécifications
Coefficient LOS ANGELES (PLMJA=150)		25
Coefficient MICRO-DEVAL (PLMJA=150)		20
Coefficient d'aplatissement (PLMJA=150)		25
Caractéristiques rigidifiant -NF EN 1097-4- Indice de vide Rigden (IVR en %)		28 à 45
Valeur au bleu de Méthylène		1
Fines nocives (g/kg) - EN 933-9-		10
	Tamis	Passant
Analyse granulométrique	2	100
	0,125	85 à 100
	0,063	= 70

Les sables : les spécifications selon les recommandations RST :

Valeur au bleu = 10

Indice de vide Rigden = 40%

L'incorporation à 10% de sable roulé est admise.

Les fillers d'apport

Tableau 2.4 : Spécifications sur les fillers.

Essais		Spécifications	Normes
Analyse granulométrique	Tamis (mm)	Passant	NFP 18-321
	2	100	
	0,125	85 à 100	
	0,063	= 70	
Fines nocives MBF (g/kg)		= 10	EN 933-9
Caractéristiques rigidifiant IVR (%) Indice de vide Rigden		28 à 45	NF EN 1097-4

Comparaison

Les caractéristiques intrinsèques des granulats exigées par les deux réglementations sont quasiment similaires (voir les deux tableaux).

Les caractéristiques de fabrication (analyse granulométriques) par contre ne sont pas exigées de la même façon :

Dans les recommandations CTPP :

- C'est un fuseau granulométrique qui est suggéré ;
- Pas d'exigence particulière sur la granulométrie des sables
- Des seuils pour les fines
- Pas de recommandations particulières pour les fillers d'apport (par rapport à notre recherche bibliographique)

Dans la réglementation Française :

- C'est des indications de pourcentage de passant au niveau de certain tamis (2mm ; 0,125mm et 0,063mm) qui sont données.
- Exigences dur les fines d'apport ;

Ces différences s'expliquent (notamment concernant la granulométrie) par l'approche de la méthodologie de formulation de chacun des deux pays.

II.2 Formulations des bétons bitumineux

Les méthodes de formulation des enrobés bitumineux se sont développées au cours des quarante dernières années pour répondre à l'évolution des exigences des donneurs d'ordre.

La formulation des mélanges est d'autant plus délicate que souvent, pour les enrobés bitumineux, l'amélioration d'une caractéristique lors d'un changement de composition va influencer défavorablement sur une autre caractéristique. Il est bien connu par exemple que l'augmentation de la teneur en liant est bénéfique pour la résistance en fatigue, mais néfaste à l'égard de la résistance à l'orniérage.

Compte tenu des conditions actuelles de sollicitation des couches bitumineuses des Chaussées et la nécessité qu'il y a, notamment pour des raisons de sécurité et de confort, de garantir les nombreuses qualités qu'elles requièrent davantage : stabilité, durabilité, résistance à la fatigue, flexibilité, résistance à la glissance, imperméabilité, ouvrabilité et compactibilité, les principes mêmes de ces méthodes traditionnelles doivent être repensés.

La principale raison de cette situation est que ces méthodes ne peuvent plus, pour les besoins de la pratique, décrire suffisamment le comportement des mélanges lorsqu'ils sont soumis aux conditions actuelles de circulation et aussi parce qu'il est devenu indispensable d'attacher une attention toute particulière non seulement aux propriétés mécaniques mais aussi aux

caractéristiques volumétriques des enrobés compactés. Une conséquence immédiate est l'importance capitale que jouent le mode et l'intensité du compactage dans la préparation des échantillons utilisés dans les études de formulation.

Les méthodes traditionnelles de formulation mettent en jeu des sollicitations éloignées des sollicitations réelles. Il en résulte que l'interprétation physique des résultats ne peut être que partielle, voir même impossible. De plus, les échantillons utilisés dans les études ne sont pas les mêmes (composition volumique) que les mélanges mis en œuvre.

II.2.1 Méthodologie de formulation LCPC –France-

Elle s'appuie sur la compactibilité ou l'aptitude de l'enrobé au compactage, grâce à la Presse à Cisaillement Giratoire qui permet de donner le pourcentage de vide de l'échantillon en fonction du nombre de rotations représentatives du mode de compactage du chantier.(LCPC, 2007)

C'est cet essai exercé sur le mélange qui est décisif pour la formulation de base. Une fois ce cap passé, les échantillons sont ensuite soumis à d'autres essais pour en définir les caractéristiques.

Les essais (LCPC, 2007)

La Presse à Cisaillement Giratoire

Le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé, foisonné et à la température d'essai (130 °C à 160 °C environ) dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre. On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression, verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1° (externe) ou 0,82° (interne) et soumise à un mouvement circulaire. Ces différentes actions exercent un compactage par pétrissage. On observe l'augmentation de compacité (diminution du pourcentage de vides) en fonction du nombre de tours.

Pour un nombre de rotations donné, fonction du type d'enrobés, de la nature des granulats et de l'épaisseur de mise en œuvre, le formulateur peut prévoir le pourcentage de vides sur le chantier. Dans le cas de couches de roulement très minces, il s'agit plutôt d'approcher la macro-texture que la compacité.

L'essai est très sensible aux facteurs de formulation, comme le "frottement" du squelette granulaire (angularité), la teneur en liant. A partir de cet essai, les risques d'orniérage peuvent être aussi détectés. Grâce à la rapidité de l'essai, la Presse à Cisaillement Giratoire est un instrument précieux pour le formulateur.

Cet essai permet également de déceler les changements imperceptibles par les essais courants sur les granulats. Aussi, la Presse à Cisaillement Giratoire sert à vérifier la constance des formules dans le temps.

Les spécifications s'appliquent à tous types d'enrobés. Elles portent sur une fenêtre de pourcentage de vides à respecter pour un nombre de girations donné.

L'essai DURIEZ

La tenue à l'eau est habituellement mesurée au moyen de l'essai Duriez dans le cadre de la normalisation française. La normalisation européenne a retenu deux modalités d'essai, la compression diamétrale et la compression simple qui est dérivée de l'essai Duriez. Ces deux modalités sont sensées donner des résultats équivalents, cependant la répétabilité et la reproductibilité de l'essai en compression simple (Essai Duriez) sont pratiquement deux fois meilleures que celles de l'essai en compression diamétrale.

Le mélange hydrocarboné est compacté dans un moule cylindrique par une pression statique à double effet. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à température (18 °C) et hygrométrie contrôlées, l'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvettes est écrasé en compression simple.

Le rapport de la résistance après immersion à la résistance à sec donne la tenue à l'eau du mélange. La résistance à sec est une approche des caractéristiques mécaniques, et la compacité constitue un indicateur complémentaire à l'essai de compactage à la Presse à Cisaillement Giratoire.

L'essai d'orniérage

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5 cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence: 1 Hz, charge: 5 KN, pression: 6 bars), dans des conditions sévères de température (60 °C).

La profondeur de la déformation produite dans le passage de roue, est notée en fonction du nombre de cycles. Les spécifications portent sur un pourcentage d'ornière à un nombre de cycles donné, qui dépend du type de matériau, et de sa classe.

Les essais de module

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.

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.

La résistance en fatigue

Une éprouvette trapézoïdale est soumise, à une température et pour une fréquence de chargement fixées, à une déformation imposée. Lorsque la contrainte appliquée pour maintenir la déformation constante est diminuée de moitié, l'éprouvette est considérée comme endommagée au nombre de cycles considéré.

Sur un graphique lg/lg , les différents couples (niveau de chargement, nombre de cycles jusqu'à l'endommagement), se placent sur une droite de fatigue. A 10⁶ cycles, le seuil de chargement relevé sur la droite est la valeur caractéristique de la résistance en fatigue : ϵ .

II.2.2 Réalisation de l'épreuve de formulation (LCPC, 2007)

En fonction de l'utilisation projetée, du type d'enrobé et des sollicitations, les exigences peuvent être différentes. C'est pourquoi l'épreuve de formulation a été divisée en plusieurs niveaux allant de 1 à 4, complétés pour certains matériaux ou certaines utilisations, par des essais complémentaires.

Un niveau 0 a été introduit dans l'avant-propos français des normes EN ainsi que dans la norme générale NF P 98-150-1. Ce niveau correspond à une description de la formule avec la granularité et la teneur en bitume.

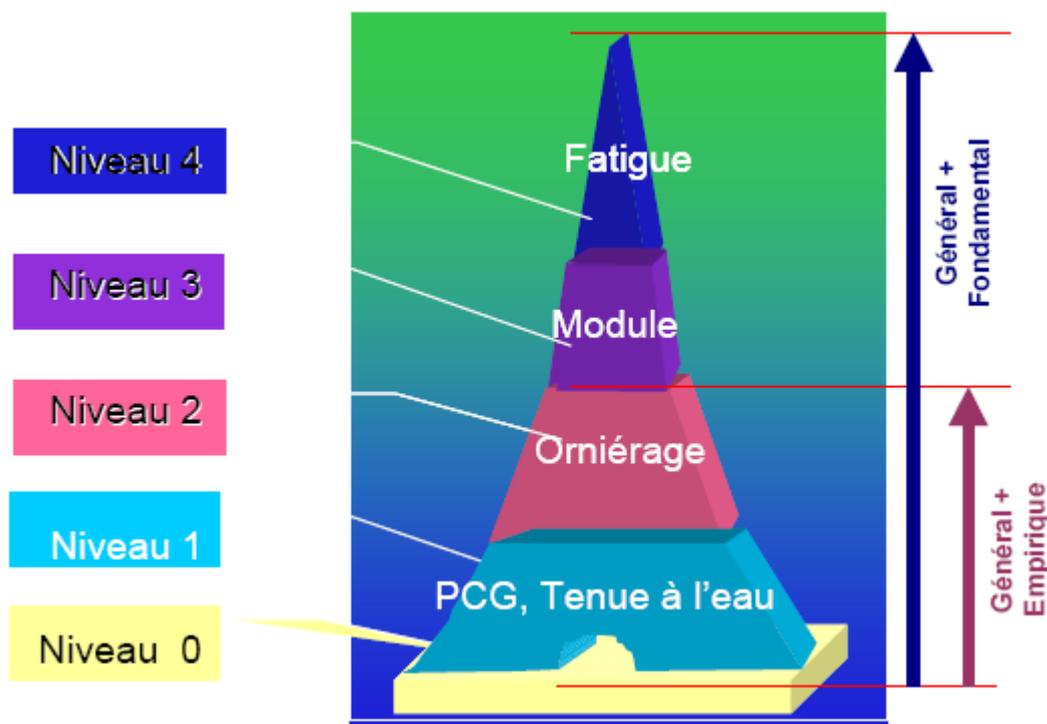


Figure 2.1 : les niveaux de l'épreuve de formulation (LCPC, 2007)

Le niveau 0 (sans essais)

Il correspond aux enrobés destinés aux zones non circulées. Les autres différents niveaux de l'épreuve varient du plus simple (niveau 1) au plus complet (niveau 4), les niveaux supérieurs englobant les exigences des niveaux inférieurs.

Niveau 1

Le mélange doit satisfaire une fenêtre de pourcentages de vides à l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire ainsi que le seuil de tenue à l'eau. À l'exception du niveau 0, ce niveau est commun à toutes les épreuves. Dans le cas d'applications à faible niveau de sollicitation, le niveau 1 peut être suffisant sans essai complémentaire. La tenue à l'eau est mesurée selon NF EN 12697-12, méthode B en compression.

Remarque : pour certains matériaux, il existe une exigence sur le pourcentage de vides à 10 girations pour l'essai PCG. Cette exigence est reprise dans les normes européennes, mais en tant que spécification « empirique » relative à la résistance à l'orniérage. Il n'est donc pas possible de spécifier à la fois une exigence avec l'essai d'orniérage et le pourcentage de vides à 10 girations, il s'agit d'une sur-spécification.

Niveau 2

Ce niveau comporte les essais du niveau 1 (Presse à Cisaillement Giratoire et tenue à l'eau), auxquels on ajoute un essai d'orniérage.

Niveau 3

Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement Giratoire et de tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'orniérage du niveau 2 et la caractérisation du module du mélange. L'essai de module est spécifié dans le cas de chantiers importants et lorsque la couche concernée intervient dans le fonctionnement structurel de la chaussée. Ce niveau implique que le produit est considéré appartenir à l'approche Fondamentale au sens des normes EN. Les valeurs de module à 15°C, 10 Hz ou 0,02s sont directement utilisées dans les modèles de calcul de dimensionnement.

Niveau 4

Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement Giratoire et tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'orniérage du niveau 2, la caractérisation du module du mélange du niveau 3. Il est complété par la détermination de la résistance en fatigue. L'essai de fatigue est à spécifier dans le cas de chantiers très importants et dès que la couche concernée travaille en fatigue.

II.2.3 Méthodologie de formulation CTTP–Algérie-

Elle s'appuie sur le choix de la formulation qui donnerait les meilleures performances pour une teneur en bitume minimale ; en effet c'est trois formulations établies à partir de directives établies par le CTTP (voir méthodes de formulations algérienne II.3.2), qui seront testées tour à tour pour en choisir l'optimale.

Les deux essais normalisés en Algérie pour la détermination des performances mécaniques sont l'essai de Marshall qui est obligatoire, et l'essai Duriez qui est remplacé par l'essai de Marshall pour la détermination de la tenue à l'eau.

L'essai Marshall

L'essai Marshall est largement utilisé par les laboratoires Algériens, il permet d'avoir les caractéristiques suivantes :

- La stabilité qui est la résistance maximale à l'écrasement.
- Le fluage qui est le raccourcissement du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture.
- La compacité.
- La tenue à l'eau.

La préparation des éprouvettes Marshall

Les granulats entrant dans la composition des mélanges hydrocarbonés sont séchés dans une étuve à une température comprise entre 105 et 110 °C jusqu'à masse constante.

Chaque classe granulaire est pesée, à 0.1 près, ainsi que les fines d'apports et les additifs éventuels.

La quantité d'enrobé pesée de chaque éprouvette est d'environ 1200 g.

La température de référence est définie en fonction de la classe de bitume utilisée.

Les granulats secs à mélanger sont maintenus à une température supérieure de 20°C à celle de référence.

La quantité de liant correspondant aux besoins de l'essai est prélevée sans dépasser 100°C.

Le liant prélevé est porté à la température de référence. La quantité de liant chaud est introduite avec une précision de 1.0 g dans la cuve préchauffée du malaxeur à la température de référence. On ajoute ensuite les granulats préchauffés.

L'enrobage s'effectue dans le malaxeur aussi rapidement que possible pour obtenir un mélange dans lequel le bitume est régulièrement réparti. La plaque de base et la hausse sont portées dans l'étuve à la même température que celle des granulats.

En utilisant des gants, on procède à l'assemblage du moule, de la plaque de base et de hausse préchauffés. Un papier anti-collant est utilisé pour empêcher l'adhérence du matériau à la plaque de base et à la dame.

La quantité nécessaire de mélange hydrocarboné (d'environ 1200 g) est versée dans le module à l'aide d'un entonnoir. Le thermomètre est placé au centre de la masse, à 30mm en dessous de la surface.

Dès que la température atteint celle de référence, on retire le thermomètre et on commence le compactage. Ce dernier est réalisé en appliquant, à l'aide de la dame, 75 coups sur la surface de l'éprouvette. le moule et son contenu sont ensuite immédiatement retournés.

La hausse est fixée à l'autre extrémité du moule. Celui-ci est placé à nouveau sur l'enclume et la seconde face de l'éprouvette est compactée de la même manière en appliquant 75 coups de dame.

On prépare 6 éprouvettes de même composition :

- (03) éprouvettes conservées sans immersion.
- (03) éprouvettes immergées pendant 2 heures sous une pression normalisée.

La tenue à l'eau des enrobés bitumineux à chaud

Le présent mode opératoire spécifie une méthode d'essai ayant pour but de déterminer la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir du rapport des stabilités avec et sans immersion des éprouvettes mesurées par l'essai Marshall selon la norme (ASTM-D-1559).

Domaine d'application

Le mode opératoire s'applique aux mélanges hydrocarbonés à chaud fabriqués en laboratoire ou prélevés sur chantier utilisés dans le domaine des travaux publics.

Principe de l'essai

Les éprouvettes utilisées à la réalisation de l'essai sont fabriquées selon la norme Marshall (ASTMD 1559). Concernant la phase d'écrasement pour la mesure des stabilités, les éprouvettes sont soumises à l'essai Marshall après conservation dans des conditions définies : après 24 heures à l'air pour certaines éprouvettes, après 7 jours d'immersion pour d'autres éprouvettes.

Conservation des éprouvettes sans immersion

03 éprouvettes sont conservées sans immersion sur une surface plane à la température ambiante pendant 24 heures.

Conservation des éprouvettes avec immersion

Les 03 autres éprouvettes de même composition, après la phase de maturation sont soumises à un traitement de dégazage qui consiste à appliquer une pression résiduelle de 120 mm Hg. L'eau est ensuite introduite jusqu'à immersion complète des éprouvettes tout en maintenant la pression résiduelle de 120 mm Hg. Ces éprouvettes sont maintenues immergées durant 2 heures sous la même pression. A la fin de cette opération, le volume des éprouvettes est mesuré. Les éprouvettes sont ensuite immergées dans l'eau à la température pouvant varier de 18°C à 25°C pendant 7 jours. A la fin de cette opération, on mesure le volume des éprouvettes.

Mesure des stabilités

Les éprouvettes sont soumises à l'essai Marshall, qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion. Les éprouvettes et les mâchoires sont immergées dans l'eau à 60°C pendant 30 min. la vitesse du plateau de la presse est réglée à 0.85 mm/S.

Expression des résultats

On établit le rapport de la stabilité avec 7 jours en immersion **r** à la stabilité sans immersion **R**, le rapport (**r/R**) est exprimé avec deux chiffres significatifs.

Le gonflement est mesuré après :

- 1 heure sous vide et 2 heures sous vide et dans l'eau ;
- 7 jours d'immersion.

Le pourcentage de gonflement est calculé comme suit :

$$Gi = \frac{Vi - V}{V} \times 100$$

Ou V : volume de l'éprouvette après démoulage ;

Vi : volume de l'éprouvette après 1h sous vide et 2h sous vide et dans l'eau ou après 7 jours d'immersion.

On calculera le volume, puis on fait immerger de nouveau pendant 7 jours (la température varie de 18 à 25 °C).

Les éprouvettes (immergés et non immergés) sont soumises à l'essai Marshall, la vitesse du plateau de la presse est réglée à 0,85 mm/s.

On calcule ensuite le rapport immersion / compression.

En fait, cet essai est largement critiqué pour les raisons suivantes :

- Le mode de confection des éprouvettes n'est pas représentatif du compactage obtenu sur chantier.
- L'optimum en terme de stabilité Marshall n'assure pas la résistance à l'orniérage sous l'effet du trafic.
- Le fluage donné par cet essai ne représente pas réellement ce phénomène sur terrain.

II.3 Méthodes de formulation

Les démarches d'une formulation passent par trois étapes:

- Etape 1 : Identifier les constituants.
- Etape 2 : Détermination des proportions des composants du mélange de base.
- Etape 3 : Déterminer les performances mécaniques.

II.3.1 La méthode LCPC

Etape 1 : Identifier les constituants voir chapitre II.1.

Détermination des proportions des composant du mélange de base

le manuel de formulation LCPC , propose des courbe granulométrique de départ :

Tableau 2.5 : Courbe granulométrique de départ.

Passant tamis en mm	Valeurs habituelles D = 14 mm			Valeurs habituelles D = 10 mm		
	Mini	Visée	Maxi	Mini	Visée	Maxi
10		78			97	
6.3	47	52	58	45	57	68
4		47			52	
2	25	31	35	27	34	39
0,063	6,3	6,8	7,2	6,3	6,7	7,2

Détermination de la teneur en Bitume

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

$$\text{Teneur en liant} = K. a. \sqrt[5]{\Sigma}$$

Ou :

Σ : surface spécifique conventionnelle

$\Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f$ (en m^2/kg) avec les proportions pondérales :

G : des éléments supérieurs à 6.3mm

S : des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm

s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm

f : des éléments inférieur à 0.08 mm

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats,

α : coefficient destiné à tenir en compte de la masse volumique des granulats (MVRg).

Si celle-ci diffère de 2.65 t/m^3 , on utilise la formule :

$$\alpha = \frac{2.65}{MVRg}$$

La masse volumique réelle (MVR) : peut être calculée selon la norme NF EN 12697-5 par la méthode à l'eau :

- On mesure le poids et le volume des éprouvettes.
- On paraffine les éprouvettes.
- On mesure leurs poids hydrostatique.
- On mesure le volume des éprouvettes sachant que la densité des paraffines est 0,9 on calcule après la masse volumique réelle.

Au niveau de cette étape on dispose du squelette granulaire du mélange et de la teneur en bitume, le coefficient k étant donné par les normes en fonction de l'enrobé à formuler.

On passe à l'étape 3: essais de performances comme indiqué au chapitre **II.3.1**

II.3.2 LA METHODE – CTPP-

A partir des directives concernant la granulométrie, on détermine la courbe du mélange.

A partir de différentes valeurs du module de richesse comme indiqué au tableau II.6, on établit quatre formules à tester (selon chapitre II.3) pour aboutir à la formulation optimale ;

Tableau 2.6 : le module de richesse.

BBSG 0/ 14 Formule	Module de richesse (K)			
	A	B	C	D
Valeur de K	3.45	3.6	3.73	5.9

La formulation optimale correspondra à la formule qui répond à toutes les recommandations, et qui présente la meilleure stabilité de Marshall.

II.3.3 Conclusion

En Algérie, les essais recommandés pour la détermination des performances mécaniques restent dans le niveau empirique quelque soit l'importance de la route construite. La formulation optimale est obtenue après avoir réalisés les différents test sur l'ensemble des formulations.

En France, l'essai à la PGC, est un essai plus proche de la réalité de la mise en œuvre de l'enrobé. Il permet d'éliminer rapidement une formule de base qui n'est pas performante. Si le test est concluant on passe aux autres niveaux .

II.4 Les Bétons Bitumineux à Module Elevé

Les Enrobés à Module Elevé sont des enrobés modifié soit par remplacement du bitume classique par un bitume de grade très dur, soit par modification du bitume, soit par ajout direct du modifiant lors de l'opération de malaxage de l'enrobé .

Toutefois, en Algérie, les bitumes spéciaux ne sont pas encore commercialisés, il n'y'a pas d'unités de fabrication des liants modifiés. Il reste donc le troisième procédé.

Les fines

Les fines d'apport peuvent être issues de roches massives : le filler calcaire est utilisé majoritairement. On rencontre également d'autres matériaux tels que le ciment, la chaux vive, le filler activé (mélange de fines calcaires et de chaux éteinte), la chaux éteinte, les cendres volantes, les fillers de cimenterie et les ardoises.

Les additifs

On les utilise pour augmenter les caractéristiques de l'enrobé notamment ; on peut les introduire directement dans les cuves de bitume ou lors du malaxage en doses calculé d'après une formulation faite au niveau du laboratoire, quelques exemples d'additifs sont donnés ci dessous :

PR PLAST S

C'est un polymère particulier d'une granulométrie de 0/4 mm introduit lors du malaxage, sur les granulats chauds avant enrobage en centrale d'enrobage, et conditionné en bige – bag pour les centrales en continue avec une introduction, par l'intermédiaire d'un doseur et en sacs thermo fusibles prédosés pour les centrales discontinues. Cet additif dénommé PR PLAST S offre, au niveau de l'enrobé, un triple effet de renforcement :

A - 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.

B - Un effet d'armature initié par des fibres plastiques présentes en créant des ponts à l'intérieur du squelette granulométrique.

C - 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 effet permet à l'enrobé ainsi amélioré d'obtenir une amélioration importante des performances des chaussées et de leur durée de service.

Dans le cadre du domaine routier traditionnel le taux d'ajout est généralement compris entre 4 et 6 kg par tonne d'enrobé ou plus précisément par tonne de granulats secs et la température de fabrication comprise entre 170°-C et 180°C maximum.

American Gilsonite

C'est un hydrocarbure naturel qui se présente sous forme granulat sec 0/2, ses caractéristiques sont comme suit :

- Masse volumique : 1,05 g/cm³
- Température bille-anneau : 150 °C.
- Pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s, 1/10 mm : 0 (1/10 mm).

Selenizza SLN 120

C'est un additif anti orniérant, livré sous différentes formes (blocs, granulés, poudre) Conditionné en sacs fusibles de poids variables facilitant l'utilisation dans les centrales d'enrobage discontinues dotées d'un malaxeur à pales. Conditionné en « BIG BAGS » de 800 Kg à 1 tonne. Le matériau est traité préalablement par un produit anti-mottant afin d'éviter toute reprise en masse.

Très souple d'utilisation, il peut être introduit soit dans le liant chaud, soit au niveau de l'anneau de recyclage d'une centrale continue, soit dans le tapis enfourneur des centrales à double flux de matériaux.

- Matières insolubles (fines siliceuses): 7 à 15 %
- Pénétrabilité à 25 °C : 0
- Point de ramollissement bille anneau : 120 °C
- Perte de masse à 163 °C pendant 5 h : 0.08%

Il s'agit d'une Asphaltite, d'origine naturelle en provenance de mine de SELENICE en Albanie.

Plastomères de Polyoléfines

C'est un additif anti orniérant pour les bétons bitumineux, il se présente sous forme granulé et qui peut être introduit dans le mélange au moment du malaxage ses caractéristiques sont comme suit

- Densité (g/cm³) : 0,91 à 0,96
- Point de fusion (°C) : 140 à 150
- Granulométrie : 4 mm
- Plastomères (%) : > 95

II.5 Comparaison entre les BBSG et les BBME

II.5.1 Béton bitumineux semi grenue

Les différentes caractéristiques et performances mécaniques d'un BBSG sont dans les tableaux au dessous.

Tableau 2.7 : les caractéristiques d'un BBSG.

Epaisseur	BBSG 0/14	6 à 9 cm
	BBSG 0/10	5 à 7 cm
Module de richesse	BBSG 0/14	>3.2
	BBSG 0/10	>3.4
Granularité : % de passant au tamis de 2 mm	-	28 à 40 %
Teneur en vides	-	4 à 8 %

Tableau 2.8 : les performances mécaniques des BBSG.

	Cl 1	Cl 2	Cl 3
Essai Duriez à 18°C (NF P 98-251-1) (>)	>0,75	>0,75	>0,75
Essai d'orniérage (NF P 98-253-1)	<10 %	<7,5 %	<5 %
Essai de module complexe (NF P 98-260-2)	>5500	>7000	>7000
Essai de traction directe (NF P 98-260-1)	>5500	>7000	>7000
Essai de fatigue (NF P 98-261-1)	>100 µdef	>100 µdef	>100 µdef

Tableau 2.9 : l'essai presse à compactage giratoire.

Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (NF P 98-252)	BBSG 0/10		BBSG 0/14	
	Min	Max	Min	Max
à 10 girations	11		11	
à 60 girations	5	10		
à 80 girations			4	9

II.5.2 Béton bitumineux à module élevé BBME

Les caractéristiques et les performances mécaniques des BBME sont dans les tableaux au dessous.

Tableau 2.10 : les caractéristiques des BBME.

Epaisseur	BBME 0/14	6 à 9 cm
	BBME 0/10	5 à 7 cm
Module de richesse	BBME 0/14	>3.3
	BBME 0/10	>3.5

Tableau 2.11 : les performances mécaniques des BBME.

	Cl 1	Cl 2	Cl 3
Essai Duriez à 18°C (NF P 98-251-1) (>)	>0,8	>0,8	>0,8
Essai d'orniérage (NF P 98-253-1)	<10 %	<7,5 %	<5 %
Essai de module complexe (NF P 98-260-2)	>9000	>12000	>12000
Essai PCG – Teneur en vide BBSG 0/10 (V 60) BBSG 0/14 (V 80)		5 à 10 % 4 à 9 %	
Essai de fatigue (NF P 98-261-1)	>110 µdef	>100 µdef	>100 µdef

II.6 Conclusion

Cette étude bibliographique nous a révélé le retard cumulé que l'Algérie a pris vis-à-vis des avancées réalisées dans les techniques de construction mais aussi dans la méthode de formulation qui reste à un stade archaïque, par ailleurs les essais effectués, les spécifications et performances exigées n'ont pas l'objet de normes.

Chapitre III

Evolution des performances du BBSG 0/14 modifié par ajout d'un anti-orniérant

Chapitre III : formulation d'un BBSG 0/10 et d'un béton bitumineux modifié

III.1 Introduction

Dans cette partie expérimentale nous tenterons de mettre à profit les connaissances acquises dans lors de l'étude bibliographique. Formulation d'un enrobé classique, puis le modifier grâce à un additif anti-orniérant. Les travaux ont été réalisés au Laboratoire Central des Travaux Publics (LCTP).

Matériaux à élaborer

- A. Un enrobé bitumineux classique : un BBSG 0/14
- B. Un enrobé modifié par ajout d'un anti-orniérant

Matériaux utilisés

1. Des granulats de classe 8/15,3/8 et 0/3 ; ils proviennent de la carrière de EURL TIK ZACCAR mis à notre disposition par le LCTP ;
2. Un bitume Naftal, dur, de classe 40/50 mis à notre disposition par NAFTAL ;
3. Un anti-orniérant PR PLAST S mis à notre disposition par l'entreprise CHIMIBAT

Les résultats de notre étude expérimentale sont présentés sous forme de rapport ci-dessous.

Ces résultats seront exploités et comparés selon les recommandations illustrées par le ministère des travaux publics en collaboration du CTPP.

III.2 Formulation d'un béton bitumineux semi grenu BBSG 0/14

III.2.1 Provenance des matériaux

Les différentes fractions qui constitue l'enrobé en étaient apportés par les éléments de l'antenne dont les agrégats fractionnés en 8/15,3/8 et 0/3 proviennent de la carrière de « EURL TIK ZACCAR ».

III.2.2 Etude de laboratoire

L'étude de laboratoire concernera les étapes suivantes :

- Analyse des agrégats.
- Analyse de bitume.
- Etude de composition du BB.
- Essai de performance mécanique du BB.

Identifications des constituants

Granulats

Caractéristiques intrinsèques

Les caractéristiques intrinsèques ont concerné :

- La résistance aux chocs : essai LOS ANGELES (NF EN 1097-2)
- La résistance à l'usure en présence d'eau : essai MICRO DEVAL (NF EN 1097-1)
- Masse volumique réelle (NF EN 1097-6)

Les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableaux au dessous.

Tableau 3.1 : Caractéristiques intrinsèques des agrégats.

Essais	Résultats		
	8/15	3/8	0/3
Coefficient Los ANGELES	28.34	22.56	-
Coefficient MICRO-DEVAL	19.46	22.96	-
Masse volumique g/cm^2	2.66	2.65	2.58

Caractéristiques de fabrication

Les caractéristiques de fabrication ont concerné :

- L'analyse granulométrique (NF EN 933- 1),
- L'essai d'aplatissement (NF EN 933-3),
- La propreté superficielle (NF P18-591),
- L'équivalent de sable (NF EN 933-8),

Les résultats de ces essais sont regroupés dans les tableaux au dessous.

Analyse granulométrique NF P18-560

L'analyse granulométrique par tamisage de chaque fraction a donnée les résultats ci après :

Tableau 3.2 : l'analyse granulométrique des agrégats.

Tamis mm	20	16	12.5	10	8	6.3	5	4	2	1	0.5	0.4	0.31	0.2	0.1	0.08
8/15	99.47	98.67	66.77	15.07	7.20	1.70	0.83	0.67	0.63	0.63	0.63	0.60	0.60	0.57	0.53	0.50
3/8	100	100	99.8	99.1	81.0 6	41.8	26.3	11.6	2.44	2.00	1.94	1.94	1.94	1.88	1.81	1.69
0/3	100	100	100	100	100	100	100	99.9	83.5	58.2	40.0	37.3	35.9	30.2	24.2	22.5

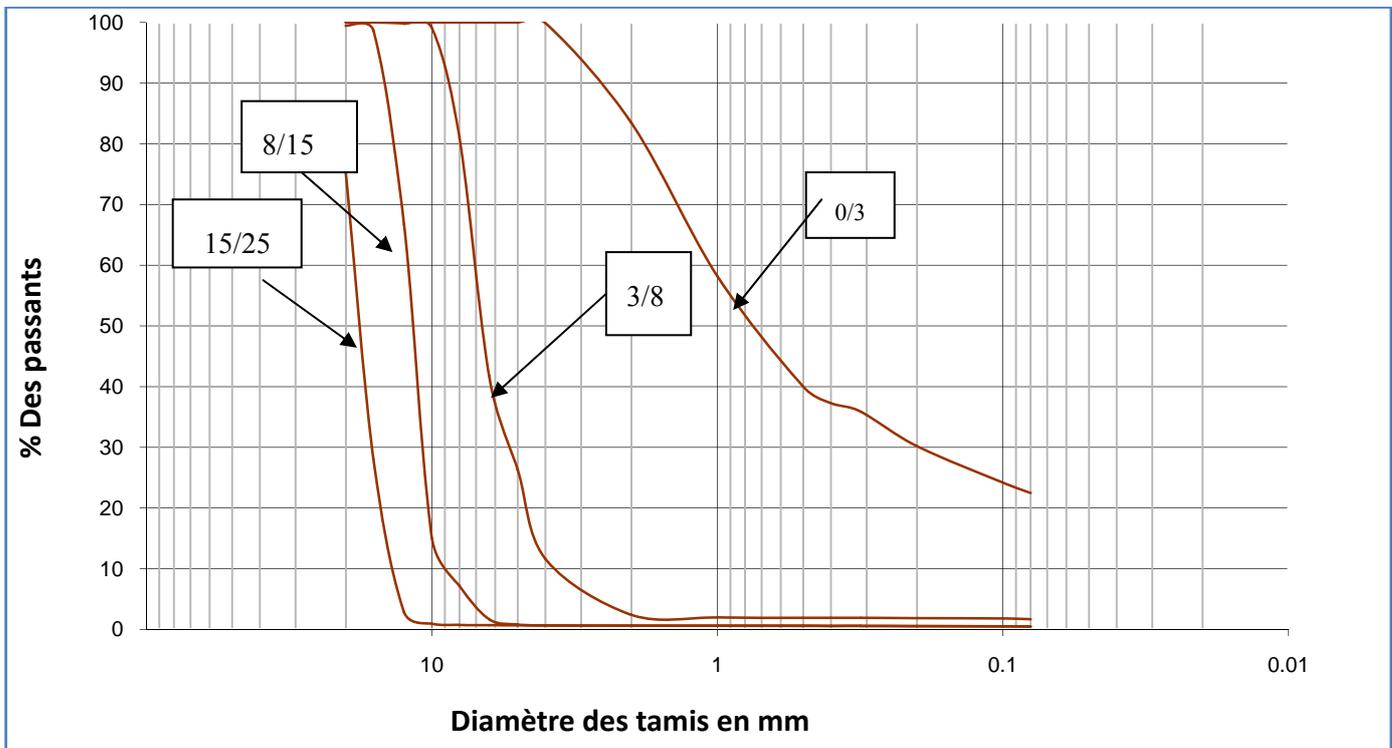


Figure 3.1 : Courbes granulométriques de chaque fraction.

Les résultats obtenus confirment que les fractions 15/25 ,8/15,3/8 et 0/3 correspondent respectivement à leurs classes granulaires.

Tableau 3.3 : les caractéristiques de fabrications des agrégats.

Essais	Résultats			Spécifications
	8/15	3/8	0/3	
Coefficient d'aplatissement	13.20	12.34	-	≤ 25
Propreté superficielle	0.56	1.13	-	≤ 2
Equivalent de sable à 10% de Fines	-	-	60.27	≥ 60
Analyse granulométrique	Voir courbe granulométrique			

Touts les résultats sont regroupés dans le tableau au dessous.

Tableau 3.4 : les caractéristiques des granulas.

Essais	Résultats			Spécifications
Fractions granulaires	0/3	3/8	8/15	
Coefficient LOS ANGELES (PLMJA=150)	-	22.56	28.34	25
Coefficient MICRO-DEVAL (PLMJA=150)	-	22.90	19.46	20
Coefficient d'aplatissement (PLMJA=150)	-	12.34	13.20	20
Propreté superficielle	-	1.13	0.56	2
Equivalent de sable à 10 % f (%)	60.27	-	-	60

Les granulats présentent des caractéristiques intrinsèques satisfaisantes aux exigences de la norme XPP 18 – 545, avec des caractéristiques de fabrication qui les classent dans la catégorie 3. Les caractéristiques de fabrication du sable le classent dans la catégorie a.

Le bitume

L'analyse du bitume au laboratoire a concerné les caractéristiques suivantes :

- Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C (norme EN 1426) ;
- Point de ramollissement billes et anneaux (norme EN 1427) ;
- Densité relative à 25°C (norme EN ISO 2592).

Les résultats des essais sont donnés dans le tableau ci après.

Tableau 3.5 : les caractéristiques du bitume.

<i>Pénétrabilité à 25 °c en 1/10mm, 100gr, 5s</i>	<i>41</i>	<i>spécification 40 à 50</i>
<i>Température de ramollissement (b&a)</i>	<i>50.56 °c</i>	<i>spécification 47 à 60 °C</i>
<i>Densité relative à 25°c</i>	<i>1.03 gr/ml</i>	<i>spécification 1.00 à 1.10 Gr/ml</i>

Les résultats d'analyse obtenus répondent bien aux caractéristiques d'un bitume de classe 35/50, selon la norme EN12591.

Formulation des mélanges bitumineux

La démarche suivie est la suivante :

- Choix de la formule granulaire,
- Détermination des teneurs en bitume,
- Composition des mélanges,
- Essais de performances mécaniques.

Choix de la formule granulaire

L'objectif visé est de maîtriser la disposition granulaire du squelette minérale et de choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage (une meilleure maniabilité) et qui pourrait conférer une meilleure résistance à la déformation permanente ainsi un module de rigidité satisfaisant aux exigences de la norme NF EN 13108- 1.

La composition granulométrique, d'un béton bitumineux 0/14 est obtenue à partir de trois fractions 8/15-3/8-0/3, et ce mélange s'insère dans le fuseau de référence d'un béton bitumineux 0/14 destiné pour une couche de roulement.

Nous avons retenu le mélange granulaire ci dessous vu qu'il s'insère le mieux dans le fuseau de référence BB 0/14.

La formule granulaire retenue est donnée dans le tableau 3.6.

Tableau 3.6 : Formule granulaire retenue.

Fraction granulaire	Pourcentage pondéraux (%)
8/15	30
3/8	30
0/3	40

Le choix des pourcentages pondéraux est établie pour que la courbe granulométrique rentre dans le fuseau de LCPC (appliqué en Algérie).

On varie ces pourcentages jusqu'à que la courbe granulométrique rentre dans le fuseau avec un pourcentage pondéral de sable plus grand que les autres, pour obtenir plus de fines (entre 7 et 10% dans les recommandations).

Les fines jouent un rôle important pour l'adhérence entre les granulats et le bitume et pour la maniabilité du BBSG 0/14.

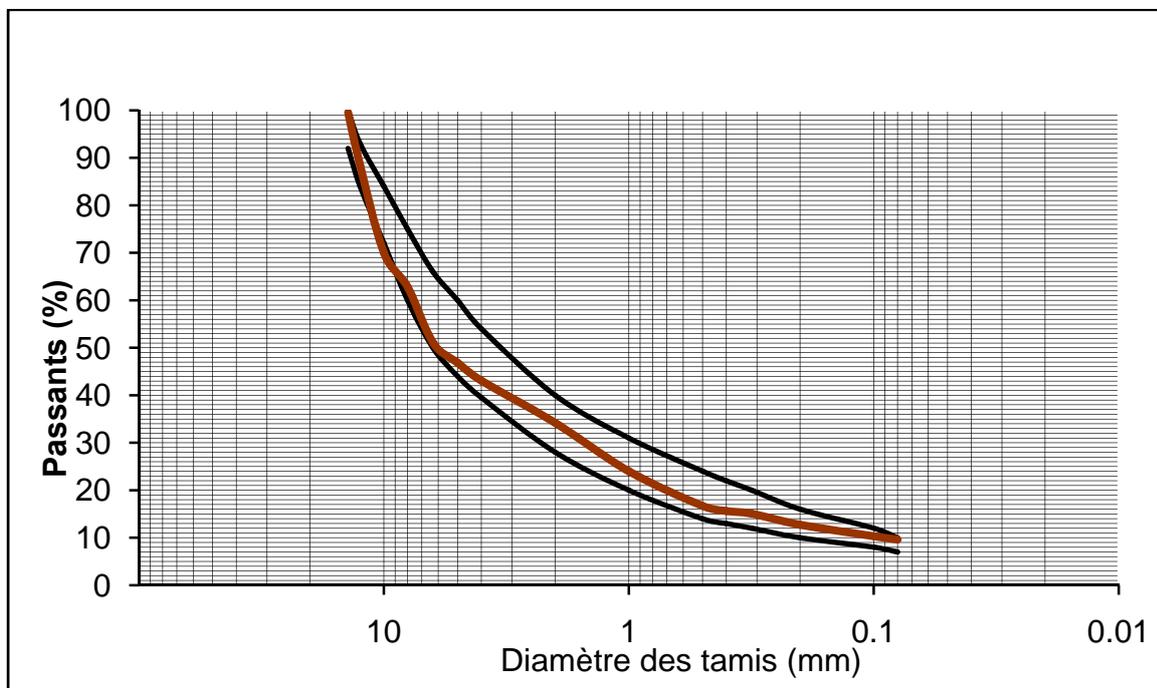


Figure 3.2 : Fuseau de référence béton bitumineux 0/14.

Les deux courbes représentent les limites du fuseau de LCPC ou il faut que toutes les courbes granulométriques des formules granulaires doivent être rentrées.

La courbe en rouge est notre courbe granulométrique de la formule granulaire choisie dans le tableau 3.6 et qui répond aux recommandations.

Les teneurs en bitume sur lesquelles porte l'étude sont évaluées à partir de la formule suivante :

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

Où :

Σ : surface spécifique conventionnelle

$$\Sigma = 0.25G + 2.3S + 12s + 135f = 14.682 \text{ m}^2 / \text{Kg}$$

avec les proportions pondérales :

G : des éléments supérieurs à 6.3mm ;

S : des éléments compris entre 6.3 et 0.315 mm ;

s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08 mm ;

f : des éléments inférieurs à 0.08 mm ;

α : coefficient destiné à tenir en compte de la masse volumique des granulats (MVRg).

Si celle-ci diffère de 2.65 g/cm^3 , on utilise la formule :

$$\text{MVRg} = 2,626 \text{ g/cm}^3$$

$$\alpha = \frac{2.65}{\text{MVRg}} = 1,009$$

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats,

Pour trouver les teneurs en bitume en fonction du module de richesse K, les résultats sont regroupés dans le tableau 3.7.

Tableau 3.7 : Teneur en bitume.

Formule	K	%L
A	3.45	5.96
B	3.60	6.22
C	3.75	6.48
D	3.90	6.74

Essais de performances mécaniques

L'essai utilisée en Algérie pour établir les performances mécaniques est l'essai de Marshall.

Tableau 3.8 : Les résultats de l'essai de Marshall.

	RESULTATS OBTENUS AU LABORATOIRE				Recommandations CTTP
	A	B	C	D	
Module de richesse	3.45	3.60	3.75	3.90	-
Teneur en liant %	5.96	6.22	6.48	6.74	-
Densité théorique	2.41	2.40	2.39	2.38	-
Densité apparente	2.27	2.28	2.29	2.30	-
Compacité en %	94.19	95.00	95.81	96.63	≤97%
Stabilité en KN à sec R	9.33	10.46	13.33	12.00	≥ 10.5
Stabilité en KN 7 j imm.r	8.16	9.99	10.08	11.05	-
Tenue à l'eau r/R	0.87	0.95	0.75	0.92	>0.75
Fluage à sec 1/10 mm	02.01	02.75	03.50	03.45	≤ 4

Commentaires

Les principaux résultats d'essais réalisés au laboratoire, sur les agrégats en provenance de la carrière Eurl Tik Zaccar montrent qu'ils ont de bonnes caractéristiques intrinsèques, et les essais réalisés sur le mélange granulats et liant permet de recommander la combinaison « C » pour le mélange béton bitumineux, car elles présentent la stabilité Marshall tout en ayant une tenue à l'eau qui est vérifiée.

Composition du mélange

Les pourcentages des composants sont donnés dans le tableau suivant

Tableau 3.9 : Pourcentages des composants du mélange.

Composition de mélange retenue		
Composants	MVR (g/cm ³)	%
0/3	2.58	40
3/8	2.65	30
8/15	2.66	30
Bitume 35/50 (% ext)	1.030	6.48 ppc
MVR des granulats	2.626	

III.3 Evolution des performances du BBSG 0/14 modifié par ajout d'un anti-orniérante

III.3.1 Etude de laboratoire

On utilise la formule C qui est retenue de la paragraphe (III.2.2.1) pour faire les différentes essais.

Le PR PLAST S est introduit dans le mélange granulaire avec les dosages suivants : 0.5,0.6, 0.7, 0.9 par apport au mélange des granulats.

Essais de performances mécaniques

On a utilisé l'essai Marshall pour observer l'évolution des performances mécaniques en fonction du taux d'ajout.

Tableau 3.10 : Expression des résultats d'essai Marshall.

	Les quantités de PRPLAST S (%)				Spécifications Recommandations MTP
	0.5	0.6	0.7	0.9	
Module de richesse	3.75	3.75	3.75	3.75	-
Teneur en liant %	6.48	6.48	6.48	6.48	-
Densité théorique	2.34	2.38	2.39	2.44	-
Densité apparente	2.32	2.34	2.37	2.41	-
Compacité en %	95.69	95.96	96.40	97.73	≤ 97%
Stabilité en KN à sec R	14.00	15.33	17.00	14.50	≥ 10.5
Stabilité en KN 7 j imm.r	12.46	14.10	15.98	13.34	
Tenue à l'eau r/R	0.89	0.92	0.94	0.92	>0.75
Fluage à sec 1/10 mm	02.51	02.25	01.90	02.05	≤ 4

Les résultats du tableau 3.10 sont exprimées par les graphes suivants.

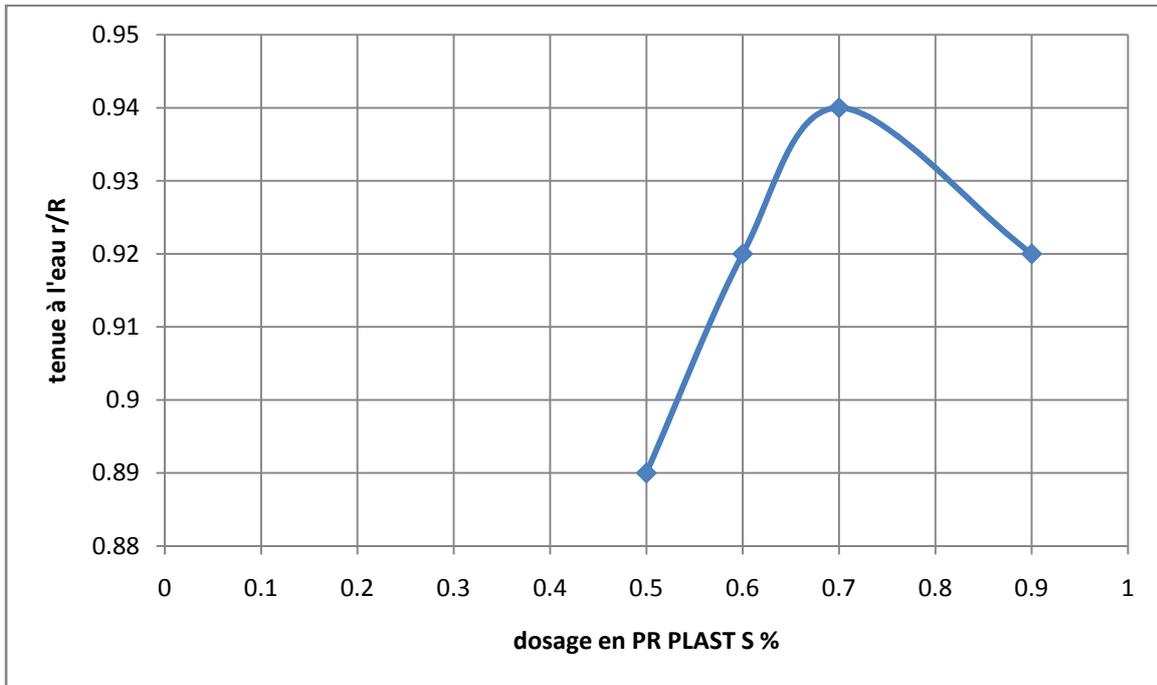


Figure 3.3 : la tenue à l'eau.

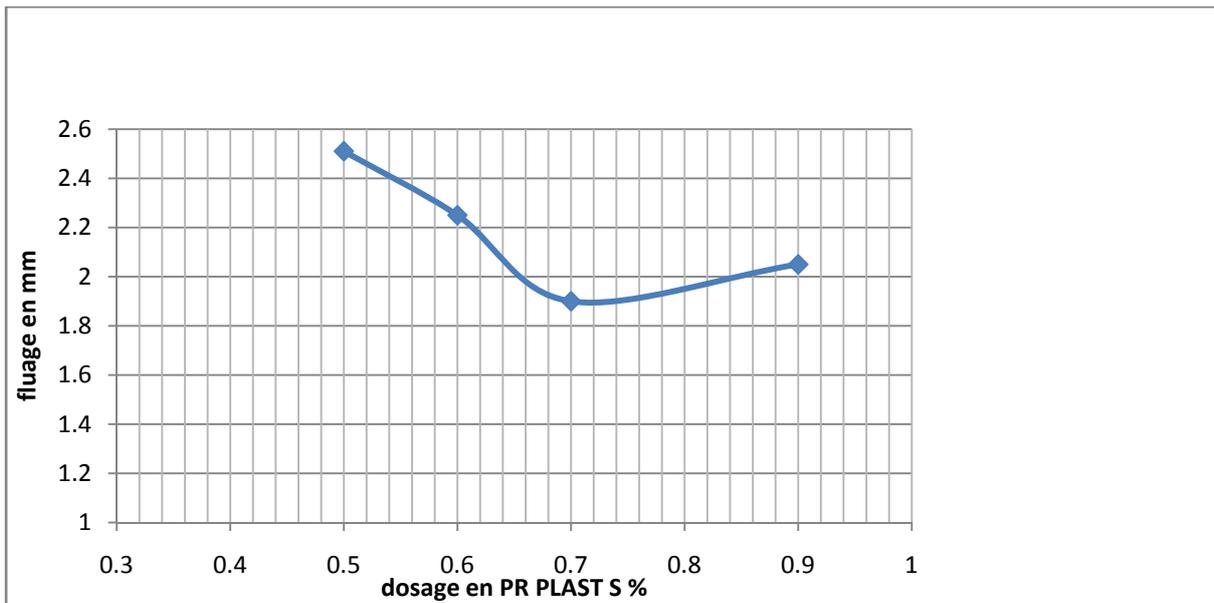


Figure 3.4 : Fluage à sec 1/10 mm.

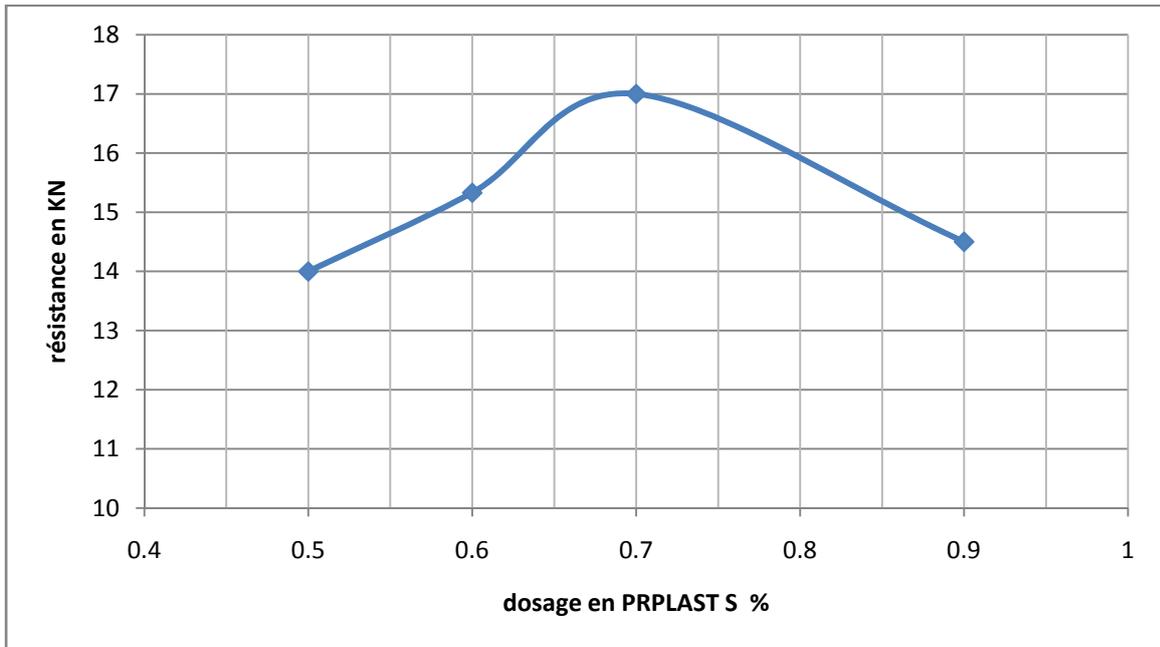


Figure 3.5 : Stabilité en KN à sec R.

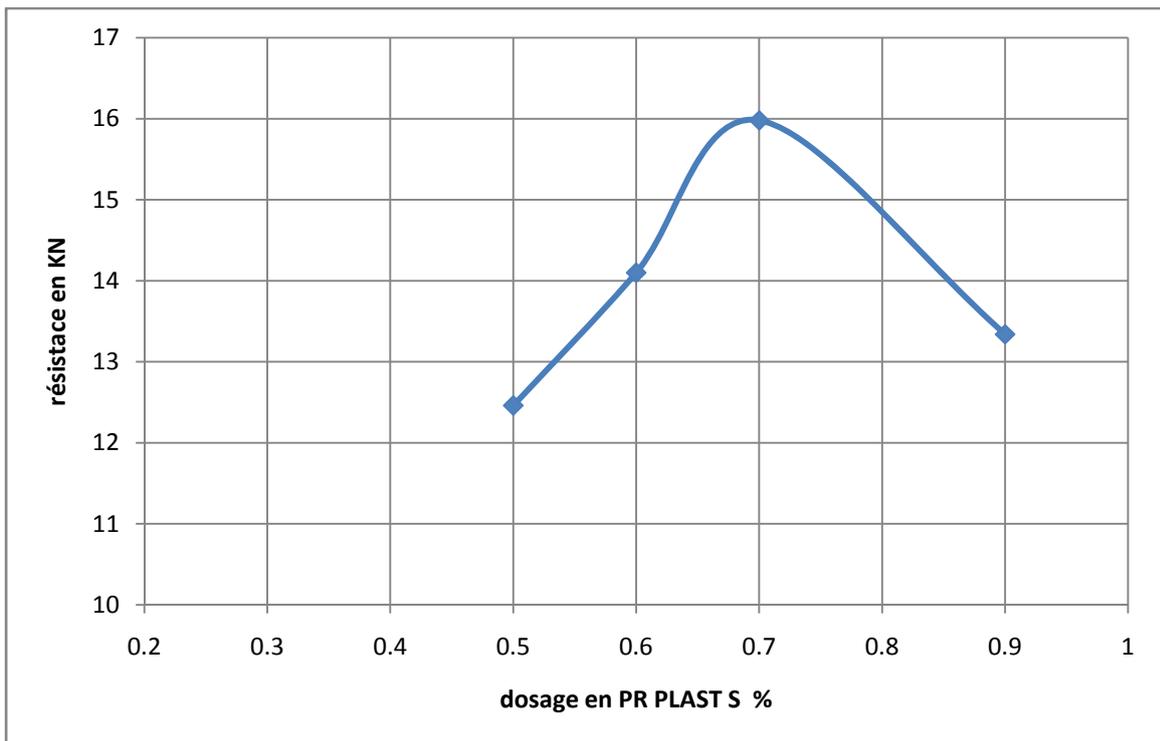


Figure 3.6 : Stabilité en KN 7 j imm.r.

Conclusions et recommandations

- La résistance augmente en fonction de l'ajout et elle atteint sa valeur max pour un pourcentage de 0,7.
- Ainsi la résistance se diminue pour un ajout de 0,9 %.
- A chaque fois qu'augmente le pourcentage de PR PLAST S, le pourcentage de vide diminue jusqu'à atteindre moins de 3% ; ce qui influe négativement sur la résistance du béton bitumineux qui atteint le 13.34.
- Les résultats obtenus ne semblent pas justifier l'intervalle (0,4 à 0,6 %) proposé dans la fiche technique) des PR PLAS S.

III.5 Conclusion

A la lumière des résultats de laboratoire, nous pouvons tirer les conclusions et donner les recommandations suivantes :

- ✓ L'analyse des agrégats a montré une qualité acceptable de point de vue caractéristiques intrinsèques et de fabrication pour une utilisation dans la confection du BBME 0/14,
- ✓ Les essais de performances mécaniques ont révélé une maniabilité de l'enrobé satisfaisante, ainsi qu'une tenue à l'eau conforme.

Les résultats obtenus au laboratoire concernent la production de matériaux. il est recommandé de :

- ✓ Accorder une attention particulière quant à la régularité des matériaux du point de vue qualité de fabrication et caractéristiques intrinsèques.
- ✓ Veillez à la conformité du bitume et de l'additif.
- ✓ Respecter la disposition granulaire du squelette minérale et les teneurs en bitume.
- ✓ Respecter les températures de chauffage du bitume, additif et de fabrication de l'enrobé.
- ✓ Veillez à la conformité du matériel de mise en œuvre.
- ✓ Réaliser une planche d'essai avant d'entamer les travaux afin de fixer les modalités de mise en œuvre et respecter ces modalités pendant toute la durée des travaux.
- ✓ L'ajout du PR PLAST S, confirme l'amélioration des caractéristiques mécaniques, cependant en l'absence d'essai d'orniérage on ne peut pas confirmer cet aspect qui pourtant devrait justifier l'usage de tel additifs.
- ✓ L'effet des ajouts à long terme n'est pas toujours maîtrisé.
- ✓ La bibliographie sur l'entretien des routes en BBME n'est pas très fournie et l'est encore moins sur l'effet des additifs à long terme.

Conclusion générale/perspectives

Des techniques innovantes en techniques routières sont souvent régulièrement mis au point dans différents continents et à travers le temps.

En Algérie, nous avons pris un certain retard dans :

- ✓ La normalisation des spécifications et des essais.
- ✓ La mise à jour des la méthodologie de formulation.
- ✓ La mise en œuvre de variétés d'enrobés et de bétons bitumineux en réponses à des besoins spécifiques.
- ✓ La valorisation des matériaux locaux

Les perspectives

- ✓ Equiper les laboratoires en matériels répondant aux exigences des formulations modernes.
- ✓ Unifier les méthodes de formulation sur le territoire nationale.
- ✓ Lancer des axes de recherches d'envergure nationale en vue d'établissement de normes propres à nos matériaux et à notre environnement.
- ✓ Développer une coopération avec les pays avancés dans le domaines.
- ✓ Développer une coopération avec les qui expriment les memes besoins (pays du Maghreb par exemple.

Annexes

Annexe 1 : La préparation des éprouvettes Marshall

Les granulats entrant dans la composition des mélanges hydrocarbonés sont séchés dans une étuve à une température comprise entre 105 et 110 °C jusqu'à masse constante. Chaque classe granulaire est pesée, à 0.1 près, ainsi que les fines d'apports et les additifs éventuels.

La quantité d'enrobé pesée de chaque éprouvette est d'environ 1200 g.

La température de référence est définie en fonction de la classe de bitume utilisée.

Les granulats secs à mélanger sont maintenus à une température supérieure de 20°C à celle de référence.

La quantité de liant correspondant aux besoins de l'essai est prélevée sans dépasser 100°C.

Le liant prélevé est porté à la température de référence. La quantité de liant chaud est introduite avec une précision de 1.0 g dans la cuve préchauffée du malaxeur à la température de référence. On ajoute ensuite les granulats préchauffés.

L'enrobage s'effectue dans le malaxeur aussi rapidement que possible pour obtenir un mélange dans lequel le bitume est régulièrement réparti. La plaque de base et la hausse sont portées dans l'étuve à la même température que celle des granulats.

En utilisant des gants, on procède à l'assemblage du moule, de la plaque de base et de hausse préchauffés. Un papier anti-collant est utilisé pour empêcher l'adhérence du matériau à la plaque de base et à la dame.

La quantité nécessaire de mélange hydrocarboné (d'environ 1200 g) est versée dans le module à l'aide d'un entonnoir. Le thermomètre est placé au centre de la masse, à 30mm en dessous de la surface. Dès que la température atteint celle de référence, on retire le thermomètre et on commence le compactage. Ce dernier est réalisé en appliquant, à l'aide de la dame, 75 coups sur la surface de l'éprouvette. le moule et son continu sont ensuite immédiatement retournés. La hausse est fixée à l'autre extrémité du moule. Celui-ci est placé à nouveau sur l'enclume et la seconde face de l'éprouvette est compactée de la même manière en appliquant 75 coups de dame.

La plaque de base est retirée et le moule contenant l'éprouvette est refroidi à l'air pendant 2 à 3 heures. L'éprouvette est démoulée à l'aide d'une presse et est placée sur une surface plane où elle est conservée à température ambiante pendant 24 heures. On prépare 4 éprouvettes de même composition.

**Annexe 2 : Épreuve de formulation Quantités de matériaux nécessaires –
Durée approximative des essais.**

Niveau d'épreuve	Essai	Quantité de matériau	Durée		Durée globale incluant la préparation
			Essai	Préparation et opérations connexes	
Préparation	Masse volumique réelle du mélange	5 kg pour le mélange	1 j	séchage + essai	2 j
Identification des constituants	Analyse granulométrique	3 kg par fraction granulaire	1 j	séchage + essai	2 j
1	ITSR Méthode B en compression	20 kg (Φ 80) 40 kg (Φ 120)	8 j	séchage + mélange + essai	10 j
	Presse à Cisaillement Giratoire	30 kg	1 j	séchage + mélange + essai	2 j
Total niveau 1		40 kg à 60 kg			12 j
2	Orniérage (2 plaques) Grand-Modèle	50 kg	2 pl. 30 000 cycles 3j	confection + mûrissement + MVa + essai	7 j
Total niveau 2		110 kg			15 j
3	Module en traction directe	80 kg	3 températures 3 ou 4 temps de charge 4 j	confection+ carottage mûrissement + MVa + collage + essai	21 j
	Module complexe	80 kg	1 températures 3 ou 4 fréquences 4 j	confection + sciage mûrissement + MVa + collage + essai	18 j
Total niveau 3		200 kg			21 j
4	Fatigue Trapézoïdale 2 points	200 kg	15 j	confection + sciage + mûrissement + Mva + collage + essai	25 j
Total niveau 4		400 kg			30 j

Annexe 3 : Exemple de formulation d'un BBME 0/14

Identification des constituants

Provenance des matériaux

Les matériaux ont été acheminés au laboratoire par les soins du client.

Etude de laboratoire

L'étude de laboratoire concernera les étapes suivantes :

- Analyse des agrégats.
- Analyse de bitume.
- Etude de composition du BB.
- Essai de performance mécanique du BB.

Identifications des constituants

Granulats

Caractéristiques intrinsèques

Les caractéristiques intrinsèques ont concerné :

- La résistance aux chocs : essai LOS ANGELES (NF EN 1097-2)
- La résistance à l'usure en présence d'eau : essai MICRO DEVAL (NF EN 1097-1)
- Masse volumique réelle (NF EN 1097-6)

Les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableau 1.

Tableau 1 : caractéristiques intrinsèques des agrégats.

Essais	Résultats		
	8/15	3/8	0/3
Coefficient Los ANGELES	23.16	26.7	-
Coefficient MICRO-DEVAL	21.76	19.26	-
Masse volumique Kg/ ²	2705	2707	2733

Caractéristiques de fabrication

Les caractéristiques de fabrication ont concerné :

- L'analyse granulométrique (NF EN 933- 1),
- L'essai d'aplatissement (NF EN 933-3),

- La propreté superficielle (NF P18-591),
- L'équivalent de sable (NF EN 933-8),

Les résultats de ces essais sont regroupés dans le tableau 2.

Tableau 2 : les caractéristiques de fabrications des agrégats.

Essais	Résultats			Spécifications
	8/15	3/8	0/3	
Coefficient d'aplatissement	12	16	-	≤ 25
Propreté superficielle	1.13	2.4	-	≤ 2
Equivalent de sable à 10% de Fines	-	-	58.35	≥ 60
Analyse granulométrique	Voir courbe granulométrique			

Commentaires

Les granulats présentent des caractéristiques intrinsèques satisfaisantes aux exigences de la norme XPP 18 – 545, avec des caractéristiques de fabrication qui les classent dans la catégorie 3. Les caractéristiques de fabrication du sable le classent dans la catégorie a.

La propreté des granulats est acceptable ainsi l'équivalent de sable et ça suite aux résultats d'essai de bleu de méthylène qui a donné une valeur de 0.72.

Le Bitume

L'analyse du bitume au laboratoire a concerné les caractéristiques suivantes :

- Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C (norme EN 1426) ;
- Point de ramollissement billes et anneaux (norme EN 1427) ;
- Densité relative à 25°C (norme EN ISO 2592).

Les résultats des essais sont donnés dans le tableau ci après.

Tableau 3 : les caractéristiques de bitume.

Essais	Valeurs	Moyenne	Spécifications EN 12591
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	40-40	40	35-50
Point de ramollissement Billes et Anneaux (°C)	53	53	50-58
Densité relative (g/cm ³) à 25°C	1.02	1.02	1.0 à 1.05

Commentaire

Les résultats d'analyse obtenus répondent bien aux caractéristiques d'un bitume de classe 35/50, selon la norme EN12591.

Formulation des mélanges bitumineux

La démarche suivie est la suivante :

- Choix de la formule granulaire,
- Détermination des teneurs en bitume,
- Composition des mélanges,
- Essais de performances mécaniques.

Choix de la formule granulaire

L'objectif visé est de maîtriser la disposition granulaire du squelette minérale et de choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage (une meilleure maniabilité) et qui pourrait conférer une meilleure résistance à la déformation permanente ainsi un module de rigidité satisfaisant aux exigences de la norme NF EN 13108- 1.

La formule granulaire retenue est donnée dans le tableau 4.

Tableau 4 : Formule granulaire retenue.

Fraction granulaire	Pourcentage pondéraux (%)
8/15	35
3/8	25
0/3	40

Détermination de la teneur en bitume :

Le module de richesse minimale utilisé pour la composition du BBME est de 3.3.

Composition du mélange

La fabrication de l'enrobé au niveau de laboratoire a été réalisée conformément à la norme NFP 98-250-1 (EN 12697-35).

L'additif PR PLAST S est introduit dans le mélange granulaire avec un dosage moyen de 0.65% par apport au mélange des granulats.

Les pourcentages des composants sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau 5 : Pourcentages des composants du mélange.

Composition de mélange		
Composants	MVR (kg/m ³)	%
0/3	2733	40
3/8	2707	25
8/15	2705	35
Bitume 35/50 (% ext)	1020	5.3 ppc
PRPLAST S (% ext)	950	0.65 ppc
MVR des granulats	2716	
MVR de l'enrobé	2482	

Essais de performances mécaniques

Les essais réalisés pour tester les performances mécaniques du BBME 0/14 sont comme suit :

➤ Niveau 0 :

- courbe granulométrique et teneur en liant.

➤ Niveau 1 :

- Essai PCG (NF EN 12697-31) : Maniabilité
- Essai de tenue à l'eau à 18 °C (NF EN 12697-12) : Sensibilité à l'eau

➤ Niveau 2 :

- Essai PCG (NF EN 12697-31) : Maniabilité
- Essai de tenue à l'eau à 18 °C (NF EN 12697-12) : Sensibilité à l'eau
- Essai d'orniérage (NF EN 12697-22) : Déformation permanente

➤ Niveau 3 :

- Essai PCG (NF EN 12697-31) : Maniabilité
- Essai de tenue à l'eau à 18 °C (NF EN 12697-12) : Sensibilité à l'eau
- Essai d'orniérage (NF EN 12697-22) : Déformation permanente
- Essai de module complexe (NF EN 12697-26) : Mesure du module

Essai à la presse de compactage giratoire PCG

Le mélange hydrocarboné a été soumis aux essais à la presse à compactage giratoire conformément à la norme NF EN 12697 -31. L'essai nous permis de vérifier d'une part les critères de l'éprouve de formulation à différents nombres de girations spécifiées.

Les résultats obtenus récapitulés dans le tableau ci après.

Tableau 6 : Expression des résultats d'essai à la presse de compactage giratoire.

Nbr des girations	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100	120
% de vides	15.9	13.3	11.7	10.6	9.7	9.0	7.8	6.9	6.2	5.2		
Compacité %	84.1	86.7	88.3	89.4	90.3	91	92.2	93.1	93.8	94.8		
Pente K	3.85			V1 =		22						

Commentaire

Suite aux résultats de l'essai PCG qui sont conforme à la norme NF EN 131086- 1, le pourcentage des vides à 10 girations est supérieur à 11% tan dis que à 80 girations le pourcentage de vide est de 5.2%, en effet la maniabilité de l'enrobé est satisfaisante.

Essai statique sur le mélange hydrocarboné (Essai DURIEZ)

L'essai statique Duriez réalisé selon la norme NF P98-251-1 sur le mélange hydrocarboné vise à la vérification de la tenue à l'eau. Cependant, il permet d'approcher les caractéristiques mécaniques et le pourcentage de vides sous compactage statique.

L'essai a donné les résultats regroupés dans le tableau suivant ;

Tableau 7 : Expression des résultats d'essai DURRIEZ.

Essais	Résultats
Résistance à la compression à 18°C r (immersion) Mpa	13.51
Résistance à la compression à 18°C R (sec) Mpa	14.38
Rapport (r/R)	0.94
% d'imbibition à 1 jour	1.00
% d'ambition à 7 jours	1.40
% de vides	3.90

Commentaire

La valeur du rapport de compression (immersion/sec) est satisfaisante aux exigences de la norme.

Résistance à la déformation permanente (Essai d'orniérage)

L'objectif de cet essai est de vérifier que le mélange a bien le comportement espéré lors de la phase d'étude de compactibilité. L'effet de la nature de liant et d'additifs est pris en compte.

L'essai est réalisé sur 2 plaques à un niveau de compacité requis selon la norme NF EN12697-33 et NF EN12697-22. Les résultats d'essai sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Expression des résultats d'essai orniérage.

% des vides Avant essai	Plaque1		Plaque2		Moyenne	
	8.00		7.90		7.95	
Profondeur des ornières en % de l'épaisseur des plaques						
Nbr	100	200	1000	3000	10000	30000
Plaque 1	0.29	0.42	0.54	0.65	0.97	1.32
Plaque 2	0.31	0.47	0.62	0.80	1.09	1.30
Moyenne	0.30	0.45	0.58	0.73	1.03	1.31

Commentaire

La valeur de profondeur d'ornièrre à 7.95% de vide et à 30000 cycles est conforme à la norme NF EN 13108- 1.

Détermination du module de rigidité

Cet essai a pour but de mesurer un ensemble de caractéristiques mécaniques et notamment le module de rigidité (en Mpa) des enrobés à différents températures et temps de charge.

Le module de rigidité déterminé par cet essai est le module sécant défini comme étant la relation entre la contrainte et la déformation au temps de charge (t) pour un matériau soumis à une charge et une vitesse de déformation contrôlé.

L'essai est réalisé suivant la norme NF EN 12697 -26.

La masse volumique apparente moyenne des quatre éprouvette est de $2,354 \text{ g/cm}^3$, correspondant à une teneur en vides moyenne de 5,2% (MVR de l'enrobé est de $2,482 \text{ g/cm}^3$), le tableau ci après présente les résultats des essais réalisés sur les quatre éprouvettes.

Tableau 9 : Expression des résultats d'essai du module de rigidité.

Eprouvettes	1(1-4)	2(2-1)	3(1-3)	4(2-4)
E1	10387	11078	10080	10298
E2	2454	2491	2366	2396
Microdéformation	48	49	48	49
Angle de phase ϕ	12.8	12.7	13.2	13.1
E	11111	11355	10354	10573

Commentaire

La valeur moyenne de module de rigidité de BBME 0/14 de 10848 Mpa, cette valeur confirme à la norme NF EN 13108-1.

Conclusions et recommandations

A la lumière des résultats de laboratoire, nous pouvons tirer les conclusions et donner les recommandations suivantes :

Tableau 10 : Expression des résultats d'essais sur le BBME 0/14.

Essais sur BBME 0/14	Résultats D'essais	Spécifications BBME 0/14
Essai de compactage à la presse de cisaillement Giratoire : à 80 girations	5.2	4 à 9
Essai Duriez à 18 °C (NF P 98-251-1) Rapport = r/R	0.98	>0.80
Essai d'orniérage (NF P 98-253-1) Profondeur d'orniérage en pourcentage de l'épaisseur de la dalle pour une dalle de 10cm d'épaisseur à 30000cycles et à 60°C, à un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%	1.31	<10
Essai de module complexe (NF P 98-260-2) Module, en Mpa, à 15°C, 10 Hz à un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%	10848 Mpa	>9000 Mpa

- L'analyse des agrégats a montré une qualité acceptable de point de vue caractéristiques intrinsèques et de fabrication pour une utilisation dans la confection du BBME 0/14,
- Les essais de performances mécaniques ont révélé une maniabilité de l'enrobé satisfaisants, ainsi une tenue à l'eau conforme.
- La valeur de profondeur d'ornière à 7.95% de vide et à 30000 cycles est conforme ainsi la valeur moyenne de rigidité est conforme à la norme NF EN 13108-1 qui est de 10848 Mpa pour un BBME 0/14.

Composition du mélange

Les résultats obtenus au laboratoire concernent une production de matériaux. De ce fait, pour assurer une bonne qualité du mélange hydrocarboné, il est recommandé :

- Accorder une attention particulière quant à la régularité des matériaux du point de vue qualité de fabrication et caractéristiques intrinsèques.
- Veillez à la conformité du bitume et de l'additif.
- Respecter la disposition granulaire du squelette minérale et les teneurs en bitume.

- Respecter les températures de chauffage du bitume, additif et de fabrication de l'enrobé.
- Veillez à la conformité du matériel de mise en œuvre.

Réaliser une planche d'essai avant d'entamer les travaux afin de fixer les modalités de mise en œuvre et respecter ces modalités pendant toute la durée des travaux.

Bibliographie

- [1] Manuel LCPC d'aide à la formulation des enrobés à chaud, Groupe de travail RST, Septembre 2005.
- [2] Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud, fascicule1 (Les bitumes), CTTTP, Février 2004.
- [3] Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud, fascicule2 (La formulation), CTTTP, Février 2004.
- [4] Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud, fascicule3 (La fabrication), CTTTP, Février 2004.
- [5] Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud, fascicule4 (La mise en œuvre), CTTTP, Février 2004.
- [6] Recommandations sur l'utilisation des bitumes et des enrobés bitumineux à chaud, fascicule5 (Le contrôle), CTTTP, Février 2004.
- [7] JUNOD.A, G. DUMONT Formulation et optimisation des formules d'enrobés, EPFL, LAVOC, Décembre 2004.
- [8] OULD-HENIA M & SOUAMI S: Amélioration des performances d'un béton bitumineux, Projet de fin d'études, ENP 1999.
- [9] BRARA .A, KETTAB.R thèse de magister : Contribution à l'étude du comportement d'un béton bitumineux modifié à la poudre de caoutchouc, ENP 2004
- [10] BERTHE-J, DONGMO-E , thèse de doctorat :Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses ,Institut national des sciences appliquées de LYON 2005
- [11] MORSLI.M polycopie de cours infrastructure de transport département génie civil ENSP
- [12] NORME FRANÇAISE, Essais Marshall, projet de mode opératoire, Paris-France 1973
- [13] NORME FRANÇAISE, Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés, Partie 1 : Essai Duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud, NFP 98-251-1, juillet 1991.
- [14] NORME FRANÇAISE, Granulats-Essai Los Angeles, NF P18-573, Octobre 1978.
- [15] NORME FRANÇAISE, Granulats- Essai d'usure Micro- Deval Humide, NF P18-572, Octobre 1978.