



Ecole Nationale Polytechnique
Département de Génie Civil

Projet de fin d'études

En vue d'obtention du diplôme de Master en Génie Civil

Thème

**Formulation par la méthode Marshall d'un
béton bitumineux à module amélioré par
ajout de PR PLAST SAHARA**

Réalisé par :
Mlle. DINE Hafsa

Proposé par :
Unité de Recherche en Ingénierie &
Environnement



Soutenu le 02 juillet 2014 devant le jury :

Président : A. BALI, Professeur, ENP
Examineurs : R. KETTAB, directrice de recherche, ENP
: R. BOUTMEUR, Professeur, ENP
Directrice de Thèse : M. MORSLI, Professeur, ENP

Promotion juin 2014

REMERCIEMENTS

Toute ma gratitude et remerciements vont à ALLAH le tout puissant pour m'avoir donné force, patience, courage et volonté pour bien mener et achever ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Prof. M.MORSLI pour son suivi durant l'évolution de ce travail, ainsi que ses précieux conseils avisés, et ses remarques pertinentes et qui a mis à ma disposition ses compétences afin de bien mener ce projet.

Je remercie également le président et les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer mon modeste travail.

Je tiens à remercier tous les enseignants de l'ENP qui ont contribué de près ou de loin à mes années de formation.

Un spécial merci à ami SALAH pour ses précieux conseils et encouragements.

J'adresse mes plus sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Enfin, je ne saurais terminer mes remerciements sans les adresser à ma famille pour les sacrifices qu'elle a faits pour que je termine mes études.

DEDICACE

Je commence par rendre grâce à dieu et sa bonté, pour sa patience, sa compétence, et le courage qu'il m'a donné pour arriver à ce stade.

Je dédie ce modeste travail

À mes très chers PARENTS, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et bien être.

À mes sœurs et mon petit frère, pour leur soutien patience et amour.

À ma famille, pour ses encouragements.

À tous mes amis (es).

Hafsa

الملخص :

هذا العمل هو اختبار لفعالية تصنيع الخرسانة البيتومينية ذات المعامل العال ، وذلك باستخدام طريقة مارشال نسبة إلى صياغة الخرسانة البيتومينية المعمول بها في الجزائر. المادة المضافة هو مضاد للتخدد من البوليمرات للمناطق القاحلة. لقد تم حقنه في الهيكل الحبيبي لتحسين الأداء و خاصنا تلك المتعلقة بمرونة الإسفلت. وأظهرت النتائج تحسنا في استقرار مارشال ب 30% و حاصل مارشال يفوز ب171%. مقاومة المياه تصل إلى 0.95 وهو قريب جدا من 1, بالإضافة إلى معامل صلابة (E) الذي أدرك عتبة الفئة 2 من الخرسانة البيتومينية ذات المعامل العال بطريقة LCPC و هذا بفضل 0.6% من بلاست الصحراء(مضاد للتخدد).

الكلمات المفتاح : الخرسانة الإسفلتية ذات المعامل العالي, طريقة مارشال, اختبار مارشال, إضافة, التخدد, PR بلاست الصحراء.

Résumé :

Ce travail consiste à tester l'efficacité d'un additif destiné à fabriquer des Bétons Bitumineux à Module Elevé (BBME) en l'utilisant la formulation Marshall relative aux enrobés conventionnels en vigueur en Algérie. L'additif est un polymère anti-ornière pour les régions arides. Il a été injecté dans le squelette granulaire à raison d'améliorer ses performances surtout ceux liés à sa viscoélasticité de l'enrobé. Les résultats Marshall ont montré Une amélioration de la stabilité de 30%, du quotient Marshall qui gagne 171% la tenue à l'eau arrive à 0.95 qui s'avère très proche de 1 ainsi que du module de rigidité (E) qui atteint le seuil de module de la classe 2 des BBME LCPC ,tous sa avec 0.6% de PR PLAST SAHARA .

Mots clés : béton bitumineux a module élevé, méthode de Marshall, Essais Marshall, Additif. Orniéage. PR PLAST SAHARA ;

Abstract:

This work is to test the effectiveness of an additive for manufacturing Bituminous Concrete High Modulus (BCHM), using the Marshall method relative to conventional coated formulation in Algeria. The additive is an anti-rutting polymer for arid areas. It was injected into the granular skeleton to improved performances especially those related to its viscoelasticity. Marshall results showed an improvement in the stability of 30% , the quotient Marshall wins 171% ,holding a water arrives to 0.95 which is very close to 1, and the stiffness modulus (E) get the threshold module of class 2 of the Bituminous Concrete High Modulus formula by the LCPC method, all those with 0.6% of PR PLAST SAHARA.

Keywords: asphalt concrete has high modulus, method Marshall, Marshall experience, additive, rutting, PR PLAST SAHARA.

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
I. GENERALITES SUR LES BBME	3
I.1.Introduction	3
I.2. Les enrobes nouveaux	3
I.2.1. Les enrobés mince	3
I.2.2. Les enrobés drainant	4
I.2.3. L'enrobé tiède	5
I.2.4. L'enrobé à froid	6
I.2.5. l'enrobé à module élevé (EME)	7
I.2.6. Les bétons bitumineux à modules élevé (BBME)	8
I.3. Généralités sur les bétons bitumineux à module élevé (BBME):	8
I.3.1. Historique d'apparition des EME et BBME	8
I.3.2. Pour quoi faire un BBME	9
I.3.3. Caractéristiques	9
I.3.4. Propriétés des BBME	10
I.3.5. Domaine d'emploi	10
I.3.6. Formulation de BBME	10
I.3.7. La durée de validité des études de formulation	11
I.3.8. Fabrication de l'enrobe	11
I.3.9. Mise en œuvre	12
I.3.10. Performances	12
I.3.11. Avantages	13
I.4. Comment obtenir un BBME	13
I.4.1. Procédés de fabrication	14
I.4.2. Propriétés recherchées a travers le mélange BBME	17
I.5. Conclusions	18
II. LE PHENOMENE DE FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX	19
II.1. Introduction	19
II.2. Définitions de phénomène de fatigue et critère d'évaluation	19
II.2.1. Fonctionnement de la chaussée soumise à des sollicitations répétées	20

TABLE DES MATIERES

II.2.2. Mécanisme de la fatigue : _____	21
II.3. Les paramètres qui donnent naissance au phénomène de la fatigue _____	21
II.3.1. Effet de trafic _____	21
II.3.2. Effet des paramètres de formulations sur la fatigue _____	22
II.4. Les phénomènes résultants de la fatigue de la chaussée _____	24
II.4.1. Orniérage _____	24
II.4.2. Fissuration _____	25
II.5. Le comportement viscoélastique d'un BBME _____	26
II.5.1. Module complexe d'un enrobe _____	26
II.6. Conclusion _____	30
III. Synthèse sur les différents essais de fatigue _____	31
III.1. Introduction _____	31
III.2. L'essai de traction Nottingham asphalt tester ou indirect tension test (NAT) _____	31
III.2.1. Essai normalisé _____	33
III.2.2. Conditions d'essai _____	33
III.2.3. Matériels utilisés _____	33
III.2.4. Avantages / Limitations _____	35
III.3. Essais de flexion _____	36
III.3.1. Flexion deux points _____	36
III.3.2. Flexion trois points _____	37
III.3.3. Flexion quatre points _____	37
III.3.4 Flexion supportée _____	38
III.4. Essais de traction – compression _____	38
III.4.1. Traction directe a la "MAER" _____	38
III.4.2. Traction – compression _____	39
III.5. L'essai triaxial _____	40
III.6. Conclusion _____	41
IV. Etude expérimentale _____	41
IV.1. Introduction _____	41
IV.2. Résultats de la formulation du béton bitumineux modifié à la chaux hydratée _____	42
IV.2.1. Rappels des caractéristiques des matériaux _____	42
IV.2.2. Résultats de la formulation du BBSG0/14 + 1% de chaux hydratée _____	43
IV.3. Formulation du béton bitumineux a module amélioré – BBMA- _____	44

TABLE DES MATIERES

IV.3.1. Résultats des performances Marshall du BBMA _____	44
IV.3.2. Résultats du Module de rigidité pour le BBMA _____	47
IV.3.3. La formulation de BBMA optimale _____	48
IV.4. Conclusions _____	48
CONCLUSION GENERALE _____	49
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES _____	50
ANNEXES _____	52
Annexe A : Lexique utile _____	52
Annexe B : Les spécifications des composants des BBME (NF P 98-141 Novembre 1999) _____	55

LISTE DES FIGURES

<u>I. GENERALITES SUR LES BBME</u>	3
Figure I.1. PR PLAST Sahara	15
<u>II. LE PHENOMENE DE FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX</u>	19
Figure II.1. Schématisation des sollicitations induites par le trafic	20
Figure II.2. Distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue	21
Figure II.3. Influence de la teneur en fines sur la droite de fatigue	22
Figure II.4. Influence de la teneur en bitume sur la droite de fatigue	23
Figure II.5. Influence de la teneur en vides sur la droite de fatigue	24
Figure II.6. Schéma d'une fissuration longitudinale dans les bandes de roulement et exemple d'une fissuration grave ramifiée avec départ de matériaux	25
Figure II.7. Représentation du module complexe	27
Figure II.8. Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé	28
<u>III. Synthèse sur les différents essais de fatigue</u>	31
Figure III.1. Déformation d'une éprouvette -Essai de traction indirecte NAT- [25]	31
Figure III.2. Forme de l'impulsion de chargement, indiquant le temps de montée et la valeur crête de charge [25]	32
Figure III.3. Exemple d'appareillage d'essai [25]	34
Figure III.4. Châssis d'alignement LVDT [8]	35
Figure III.5. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 2 points [27]	36
Figure III.6. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 3 points	37
Figure III.7. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 4 points	38
Figure III.8. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai de traction directe	39
Figure III.9. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai traction-compression	40
Figure III.10. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai triaxial	40
<u>IV. Etude expérimentale</u>	41
Figure IV.1. Position de courbe granulométrique dans le fuseau granulaire	43
Figure IV.2. L'évolution de la stabilité du mélange avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA	45
Figure IV.3. L'évolution du quotient Marshall du mélange avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA	45
Figure IV.4. L'évolution du pourcentage de vide avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA	46
Figure IV.5. L'évolution de la tenue à l'eau du mélange avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA	46
Figure IV.6. L'évolution de module complexe du mélange avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA	47
<u>Annexe A : Lexique utile</u>	52
Figure A.1. Schématisation du Le poly (styrène-butadiène-styrène)-----	53

LISTE DES TABLEAUX**I. GENERALITES SUR LES BBME _____ 3**

Tableau I.1. Les avantages et les inconvénients de l'enrobé à froid _____ 7

Tableau I.2. Propriétés des bétons bitumineux à module élevé _____ 10

Tableau I.3. Les essais expérimentaux selon les niveaux d'études _____ 11

Tableau I.4. Température enrobes selon la catégorie du bitume employé _____ 12

Tableau I.5. Températures des enrobés _____ 12

Tableau I.6. Propriétés de PR PLAST Sahara _____ 16

II. LE PHENOMENE DE FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX _____ 19

Tableau II.1. Évolution de la teneur en vide en fonction de nombre de cycle de chargement 24

Tableau II.2. Méthodes d'essai normalisées pour la détermination du module complexe des enrobés _____ 30

IV. Etude expérimentale _____ 41

Tableau IV.1. Les proportions des fractions granulaires _____ 43

Tableau IV.2. La teneur en bitume employé _____ 43

Tableau IV.3. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0% de PR Plast _____ 44

Tableau IV.4. Résultats des essais Marshall _____ 44

Tableau IV.5. Résultats de l'essai NAT _____ 47

Annexe B : Les spécifications des composants des BBME (NF P 98-141 Novembre 1999) _____ 55

Tableau B.1. Caractéristiques minimales des granulats pour BBME ----- 55

Tableau B.2. Valeurs du module de richesse----- 56

Tableau B.3. Evaluation des caractéristiques des BBME----- 56

Introduction

Générale

INTRODUCTION GENERALE

L'orniérage est un des principaux modes de dégradations des bétons bitumineux. Il est associé au comportement irréversible des matériaux et se traduit par l'apparition de déformations permanentes longitudinales sous le passage répété des véhicules, déformations souvent accompagnées de bourrelets sur les côtés. Ce phénomène pose des problèmes de sécurité routière : par temps sec un orniérage important peut causer une gêne lors du changement de file, en temps de pluie, l'eau dans les ornières peut provoquer des risques d'aquaplanage.

Actuellement, les méthodes prédictives de l'orniérage des bétons bitumineux se basent sur les modèles empiriques ou semi-empiriques et la performance vis-à-vis de l'orniérage est principalement caractérisée par des essais de laboratoire.

Ainsi, on cherche à limiter ce phénomène par la recherche de formulation d'enrobés pour couche de roulement, résistants aux déformations permanentes tout en restant performantes vis-à-vis de la fissuration par fatigue, ce qui rend la tâche difficile, compte tenu des ces exigences contradictoires, en termes de dureté de bitume ou de teneur en liant par exemple, nécessitées par la lutte contre ces différentes pathologies.

La présente étude se situe dans le cadre de la recherche d'une solution au problème de l'orniérage d'une route au sud algérien. Selon les expériences à l'étranger, les BBME (Béton Bitumineux à Module Elevé) constituent un excellent compromis pour la durée de vie globale (orniérage, fissuration, etc.). Par ailleurs, grâce à performances le dimensionnement qui résulte conduit à des épaisseurs plus faibles donc plus économiques et plus intéressantes. Selon une étude de Yves Brosseau sur les *les enrobés à module élevé*;

l'Algérie aurait suffisamment de ressources en granulats, comme ceux déjà utilisés dans la technique des graves bitumes GB pour la mise au point des EME. Quand aux liants, des additifs pourront être incorporés aux bitumes couramment utilisés pour durcir «moyennement» le bitume de classe usuelle ou dans le squelette granulaire de sorte à augmenter le module de l'enrobé et réduire sa sensibilité à l'orniérage.

Cette étude se veut une tentative de formulation d'un BBME par ajout d'un polymère au squelette granulaire.

Le choix de l'additif s'est porté sur un additif destiné pour la région Saharienne –PR PLAST SAHARA- car le projet est implanté au sud de l'Algérie (Zone climatique II, Wilaya de LAGOUAT).

INTRODUCTION GENERALE

La formulation est faite par la méthode Marshall (pas accès aux rares laboratoires disposant de l'équipement adéquat pour ce type de formulation) en conséquence notre enrobé ne sera pas désigné par BBME mais par Béton Bitumineux à Module Amélioré (BBMA).

Notre étude porte donc sur les techniques d'amélioration des enrobés bitumineux (module et orniérage) en zone aride.

Les paramètres de jugement seront les performances Marshall et le module de rigidité (qui n'est pas une exigence de la formulation Marshall) sera mesuré par le NAT (NOTTINGHAM ASPHALTE TESTER).

L'étude s'articule autour de quatre chapitres plus une conclusion.

- I. Généralités sur les Béton Bitumineux à Module Elevé –BBME-
- II. Phénomène de fatigue des Enrobés Bitumineux.
- III. Synthèse des différents essais de fatigue.
- IV. Etude expérimentale

Chapitre I

Généralités sur les BBME

I. GENERALITES SUR LES BBME

I.1.Introduction

Les recherches scientifiques ont permis de développer de nouveaux types d'enrobés et d'optimiser les ceux existants. Ceci donne souvent lieu à la mise en œuvre et au suivi de planches expérimentales sur routes, à des recommandations et à des propositions de prescriptions. Le chapitre présent donne un aperçu sur les enrobés nouvelle en génération, et plus particulièrement sur les bétons bitumineux à module élevé.

Cette bibliographie comporte de même les dopes employer généralement pour obtenir les BBME, spécialement le polymère PR PLAST Sahara utilisé dans les transsahariennes, et d'autre part les changements que apportent a l'enrobé.

I.2. Les enrobes nouveaux

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

Description et domaine d'activité des enrobé nouveaux :

Les exemples les plus actuels sont :

I.2.1. Les enrobés mince

I.2.1.a. Nouveaux types d'enrobés pour des couches de profilage minces

En vue d'une application dans les systèmes d'interfaces anti-fissures; Les enrobés minces sont aujourd'hui largement utilisés pour la réalisation de couches de roulement sur chaussées neuves ou en entretien de chaussées.

Ils n'ont pas d'effet structurel particulier et leur rôle est d'apporter ou de restaurer des caractéristiques de surface telles que l'adhérence, l'uni ou une réduction du bruit de contact pneu/chaussée.

Dans la famille des enrobés mince, on distingue [1] :

- Les bétons bitumineux minces (BBM)
- Les bétons bitumineux drainant (BBDr)

I.2.1.b. Béton Bitumineux Mince (BBM)

Les épaisseurs moyennes sont de 3,0 à 4,0 cm pour les BBM 0/10 et 3,5 à 5,0 pour les 0/14. Les liants utilisés sont essentiellement des bitumes purs dosés de 5,4 à 5,8 %. Toutefois, pour améliorer le comportement sous fort trafic, des liants spéciaux ou modifiés sont aussi utilisés.

Les performances des BBM sont jugées pour l'ensemble des critères que sont l'orniérage, l'adhérence, l'imperméabilisation et l'uni. Cette technique est fréquemment utilisée sur route nationale.

I.2.1.c. Bétons Bitumineux Très Minces (BBTM)

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.

Épaisseur faible : 2 à 2,5 cm (45 à 65 kg/m²). En moyenne elle est de 2,0 à 3,0 cm.

Les BBTM ont pour objectifs essentiels de conférer à la surface de la chaussée des propriétés d'adhérence, de drainabilité 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.

I.2.1.d. Bétons Bitumineux Ultra Minces (BBUM)

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 % de liant généralement modifié, avec un dosage en sable de 20 à 25%.

Cette couche est appliquée en épaisseur de 1 à 1,5cm.

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

I.2.1.e. les couches bitumineuses minces et ultraminces

D'une épaisseur maximale de 3 cm. Les enrobés très minces de 2,5 cm d'épaisseur se sont développés au début des années 1980.

Au début des années 1990, sont apparus les enrobés ultra minces dont l'épaisseur correspond à celle du granulat, soit 1,5 cm. [2]

I.2.2. Les enrobés drainant

I.2.2.a. Bétons Bitumineux Drainant (BBDr)

Aujourd'hui, les BBDr classiques présentent une teneur en vides de 20%.

Les formulations sont principalement de granularité 0/10 discontinues 2/6, comportant 10 à 14% de sable 0/2 et une très faible proportion de fines de 3 à 4%. Les liants sont des bitumes modifiés à des dosages de 4,4 à 5,2 %.

Le BBDr éliminent l'eau superficielle et réduisent le bruit de contact pneu/chaussée au jeune âge.

Les BBDr constituent des revêtements particulièrement performants lorsque l'on recherche :

- une adhérence élevée et durable à grande vitesse.
- une amélioration de la visibilité par temps de pluie
- une conservation du profil transversal
- une diminution sensible du bruit de roulement au jeune âge.

Le domaine d'emploi se situe principalement sur les autoroutes et voie express.

I.2.2.b. l'enrobé drainant bicouche : [3]

Revêtement composé de deux couches superposées d'enrobés drainants destiné à améliorer les performances (principalement acoustiques et hivernales) ainsi que la durabilité des revêtements drainants classiques (monocouches);

I.2.3. L'enrobé tiède

Où l'on tente d'obtenir une diminution des températures de production de 30 à 50 °C;

L'enrobé tiède rencontre toutes les spécifications de l'enrobé à chaud, mais il est produit et mis en œuvre à une température inférieure de 30° à 60°C par rapport à l'enrobé à chaud.

- L'enrobé tiède est produit en centrale d'enrobage à une température inférieure de 30° à 60°C, par moussage du bitume ou par l'ajout d'additif.
- Il est recommandé de vérifier l'ajustement du régime thermique de la centrale lors de la production de l'enrobé tiède.

L'utilisation de l'enrobé tiède compte plusieurs avantages :

- augmentation de la durée de vie du revêtement grâce à la diminution des températures de production ;
- diminution des émissions de gaz à effet de serre ;
- réduction de la consommation énergétique ;
- diminution des odeurs et des émissions de bitume lors de la production en centrale et de la mise en œuvre ;
- augmentation potentielle du taux de granulats bitumineux recyclés (GBR) en centrale.

L'enrobé tiède est utilisé en couche de roulement et de liaison, soit en construction ou en entretien. Il répond à tous les types de trafic, au même titre que les enrobés à chaud.

-Limites d'emploi

Les limites d'emploi pour l'enrobé tiède sont les mêmes que les enrobés à chaud.

-Mise en œuvre

L'enrobé tiède se pose de la même manière que l'enrobé à chaud. Voici quelques particularités :

- La température minimale de compaction est généralement autour de 90°C ;

- La température du mélange étant plus basse, celui-ci devient donc potentiellement plus raide. Il est plus difficile d'effectuer du travail manuel (râtelage) pour un grade de bitume élevé, par exemple. [4]

I.2.4. L'enrobé à froid

Mélange entièrement fabriqué et mis en œuvre à la température ambiante et destiné aux couches de roulement des routes à faible trafic;

-technique de fabrication et de mise en œuvre :

L'enrobé à froid est un mélange de granulats, de sable et de bitume utilisé comme liant. L'enrobé à froid, contrairement à l'enrobé chaud qui nécessite une température de 130 °C environ, se met en œuvre à température ambiante (entre 10 et 20°C).

Certains enrobés sont fabriqués avec des granulats ayant déjà été enrobés : il s'agit alors d'un enrobé à froid à double enrobage.

La technique de mise en œuvre nécessite un finisseur si l'enrobé à froid a été complété avec de la résine ou s'applique directement dans les trous pour les réparations :

Nettoyer le trou ou nid de poule : ôter les gravillons, déchets de végétaux, etc.

Remplir le trou généreusement en faisant déborder de la surface initiale.

Compacter l'enrobé à froid à l'aide :

- D'un rouleau,
- D'une « dame »,
- D'une plaque vibrante, etc.

Le durcissement s'effectue après le compactage et se renforce dans le temps.

L'épaisseur d'application est de 1 à 5 cm par couche : au-delà, elle doit être réalisée en deux couches. :

-Différentes utilisations de cet enrobé

L'enrobé à froid est plutôt utilisé lors de la rénovation des chaussées ou de leur entretien. On l'utilise fréquemment pour :

Comblent les trous et nids de poule,

Réparer les fissures et les tranchées,

Réparer les dégâts dus au gel, etc.

-L'enrobé à froid durable

Certains enrobés à froid sont suffisamment résistants pour être utilisés sur des ouvrages neufs.

Ils sont alors qualifiés d'« enrobé à froid durable ».

La plupart du temps, de la résine spéciale y a été injectée pour le rendre plus solide.

Cet enrobé à froid durable est appliqué au finisseur et doit être soigneusement compacté.

La chaussée ainsi recouverte peut être rouverte tout de suite après l'application.

Les avantages et les inconvénients de l'enrobé à froid [5]

Vous trouverez dans le tableau ci-dessous un tableau représentatif des avantages et des inconvénients de l'enrobé à froid :

I.2.5. l'enrobé à module élevé (EME)

Tableau I.1. Les avantages et les inconvénients de l'enrobé à froid [5]

AVANTAGES	INCONVÉNIENTS
Fabrication aisée : épargne les contraintes de température de l'enrobé chaud.	Qualité souvent médiocre :
Facilite le transport.	Peu de résistance,
Respectueux de l'environnement :	Marque facilement,
Economie d'énergie,	Mauvaise élasticité,
Pas de CO ₂ ,	Faible cohésion de surface.
Aucune fumée ni odeur lors de la fabrication,	Faible maniabilité.
Pas de gaz à effet de serre.	Stockage possible sur un court laps de temps uniquement.
Prix moins élevé que l'enrobé à chaud.	

Un mélange destiné aux couches de liaison soumises à un trafic lourd (principalement pour diminuer l'orniérage); Ce sont des Enrobés préparés à partir d'un mélange de liant hydrocarboné, de granulats (éventuellement de dopes) et/ou d'additifs minéraux ou organiques, dosés, chauffés et malaxés dans une installation appelée centrale d'enrobage. Ils sont destinés à la réalisation des assises dans le cadre de travaux neufs ou de renforcements de chaussées.

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

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

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

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

EME Classe 2 : correspond à un enrobé à module élevé comportant, de plus, un très bon comportement en fatigue, du fait du dosage élevé en bitume dur, généralement parlent de l'EME, c'est cette classe qui est désignée. [6]

I.2.6. Les bétons bitumineux à modules élevé (BBME)

Les BBME sont Généralement employés dans les couches de surface ou on fait appel aux enrobés qui ont une épaisseur moyenne de mise en œuvre comprise entre 5 à 10 cm.

On distingue trois familles des enrobés employer dans les couches de surface:

- Les bétons bitumineux semi grenus (BBSG),

❖ **Les bétons bitumineux à module élevé (BBME),**

- Les bétons bitumineux souples (BBS).

I.3. Généralités sur les bétons bitumineux à module élevé (BBME):

Béton bitumineux à module élevé : BBME est un enrobé hydrocarboné à chaud caractérisé par un module de rigidité plus élevé que celui du béton bitumineux, et destiné à la réalisation des couches de surface (roulement ou liaison). L'épaisseur moyenne d'utilisation est d'au moins 5 cm. [7]

Il existe deux types de BBME :

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

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

Selon **NF P 98-141**

L'épaisseur varie entre 5 et 7 cm pour BBME 0/10

Et 6 à 9 cm pour BBME 0/14.

I.3.1. Historique d'apparition des EME et BBME

A la fin des années 1970, les problèmes d'apparition des ornières sur les enrobes

Dus a l'augmentation du nombre des poids lourds et de leurs agressivité ont pousse pour la recherche d'un enrobe plus rigide .Cela a été possible grâce a l'utilisation de bitume plus dur.

L'enchainement des dates suivantes donne une idée sur l'évolution des techniques d'enrobes et l'apparition des EME et BBME:

- 1912 : Première application significative des enrobes

- 1924 : Utilisation des bitumes de raffinage

- A partir de 1945 :l'utilisation des enrobes a connu un essor considerable avec la mécanisation de la mise en œuvre et l'évolution de l'agressivité du trafic.

- Années 1960 : Les techniques d'enrobes ont commence à être codifiées (Directives)

- 1968 : Apparition de la GB et du BBSG

- 1975 : Les bitumes modifiés feront leur entrée, ces bitumes seront normalisés en 2003
- 1982 : Utilisation du bitume dur 10/20 en Europe pour enrobe en couche de base (EME) qui sera généralisé en 1988, les bitumes durs seront normalisés en 2003
- 1990 : Les enrobes feront l'objet de normalisation en France
- 1991 : Edition de la norme française sur l'EME
- 1993 : Edition de la norme française sur le BBME
- 2007 : Apparition des normes européennes pour les enrobes [8]

I.3.2. Pour quoi faire un BBME

les BBME constituent une évolution des enrobés épais permettant de mieux répondre aux attentes en matière de résistance à l'orniérage et de comportement mécanique face à l'accroissement des sollicitations lourdes. L'augmentation des performances s'est faite par l'emploi de bitume de grade plus dur, d'ajouts de polymères, d'additifs spéciaux tels que poudre d'asphalte ou fibre. Les granularités sont identiques à celles de BB. La teneur en bitume des BBME est généralement plus élevée que celle des BBSG. [9]

I.3.3. Caractéristiques [8]

I.3.3.a. Rigidité

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

I.3.3.b. Endurance

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

I.3.3.c. Stabilité

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

I.3.4. Propriétés des BBME**Tableau I.2. Propriétés des bétons bitumineux à module élevé [7]**

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

❖ compacités sur chantier : 4 à 8% de vides

I.3.4.a. Les classes de BBME [7]

Trois classes selon leur comportement mécanique :

Classe 1 : % ornière à 30000 cycles < 10 % , $E \geq 9000 \text{MPa}$

Classe 2 : % ornière à 30000 cycles < 7.5 % , $E \geq 11000 \text{MPa}$

Classe 3 : % ornière à 30000 cycles < 5% , $E \geq 11000 \text{MPa}$

E c'est le module de rigidité. (Voir chapitre III)

I.3.5. Domaine d'emploi

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

On l'emploi donc dans :

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

Pour un Support en bon état pas d'ornière (1cm), de fissures, ni de faïençage.

I.3.6. Formulation de BBME [8]

Les BBME sont formulés par la méthode de laboratoire central des ponts et chaussées LCPC

I.3.6.1 Contenu de l'épreuve de formulation

- Choix des constituants et vérification de leurs propriétés
- Définition des Compositions minérales
- Définition du module de richesse minimal (Dosage minimal de liant selon la surface spécifique du mélange minéral)

- Niveau d'étude
- Vérification des performances fixées

I.3.6.2 Objectifs d'une épreuve de formulation

Etablissement, pour une composition donnée (K donné), les caractéristiques suivantes :

Pourcentage de vides

Tenue à l'eau (Duriez)

Resistance a la déformation permanente

Performances mécaniques si nécessaire : orniérage, module et fatigue.

I.3.6.3 Niveau d'étude

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

Approche pratiquée à ce jour

Tableau I.3. Les essais expérimentaux selon les niveaux d'études [8]

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

I.3.7. La durée de validité des études de formulation [8]

Elle dépend de la réglementation dans chaque pays, elle est de trois ans en France et de cinq ans en Europe.

I.3.8. Fabrication de l'enrobe

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

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

Température granulats : Min : min exige pour le bitume utilise ; Max : 180°C [10]

Température enrobes sur les tableaux ci-dessous :

Tableau I.4. Température enrobes selon la catégorie du bitume employé [10]

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

Le teneur en bitume liée directement au module de richesse K doit être au minimum [11] :

-Béton bitumineux à module élevé 0/10 mm (BBME 0/10) ≥ 3.5

-Béton bitumineux à module élevé 0/14 mm (BBME 0/14) ≥ 3.3

On fait en Moyenne de quatre échantillons, tolérances par rapport a la formule du Mélange de l'étude

I.3.9. Mise en œuvre

La mise en œuvre des enrobes intervient pour une part importante dans les qualités requises pour une couche de chaussée .Après réception du matériel de mise en œuvre et de transport des enrobes, la réalisation des planches d'essai et de référence [10], les caractéristiques a contrôler sont comme suit :

-Préparation du support :

Re-profilage ou fraisage préalable

Exécution d'une couche d'accrochage

-Température enrobes

Tableau I.5. Températures des enrobés

Catégorie du bitume	Température min de répannage (°C)	Température de fin de compactage (°C)
40/50	130	110
20/30	140	115
15/25-10/20	145	Dépond de fournisseur

I.3.10. Performances

Dans le cas de la couche de roulement, un béton bitumineux à module élevé (BBME) utilisé en remplacement d'un béton bitumineux semi-grenu (BBSG), présente des performances supérieures en termes de résistance en fatigue et de module de rigidité.

Il participe plus activement au pouvoir structurant en réduisant notablement l'endommagement par fatigue des couches liées de la chaussée.

En conséquence, il est possible de réduire les épaisseurs de renforcement lors du calcul du dimensionnement. L'intérêt économique et environnemental de cette structure de chaussée est également largement avéré. [12]

I.3.11. Avantages

I.3.11.1. Les atouts qui font la différence

- Une réduction de l'épaisseur des chaussées
- Une économie de ressources naturelles
- Une fabrication réalisable avec les procédés ordinaires [12]

I.3.11.2. BBME et développement durable

La comparaison des caractéristiques des enrobes BBME vis-à-vis de des BBSG classe 2 ou 3 montre le niveau de performance élevé (imperméabilité (%vide), tenue à l'eau, déformation, rigidité et fatigue). Le dimensionnement des corps de chaussée en utilisant ces matériaux amène à l'adoption d'épaisseurs de couches moins importantes et par la suite de faire des gains considérables : jusqu'à 25% sur l'épaisseur totale, 30% pour les quantités des granulats et 20% pour les quantités de liants, plus le gain en logistique (transport et stockage).

Cela conduit à une économie financière des projets, avec une Protection de l'environnement (moins de granulats fabriqués et utilisés pour une ressource non renouvelable) et moins de gêne pour les utilisateurs de la route (intervalle de temps entre les moments d'entretien plus long). [8]

I.4. Comment obtenir un BBME [13]

Un BBME peut être obtenue par :

1- La modification du liant employé par un des matériaux suivant :

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

2- Ou par l'ajout de **additifs en polymères**, comme granulés au bitume dans le mélange, cet ajout entraîne un changement de la consistance du mélange, alors d'un certain nombre de ses propriétés, on cite quelque exemple :

- **Additif anti-ornierant**
- **Additif haut module**

- **Bitume modifié en granulés (bitume modifié concentré)**
- **Additif anti kérosène**

I.4.1. Procédés de fabrication

I.4.1.1. Les bitumes modifiés par des polymères

a) Qu'est ce que un polymère:

Un polymère se construit un peu comme un train. Par synthèse chimique, on accroche de multiples «wagons» identiques, des monomères (voir annexe A), molécules à base de carbone et d'hydrogène. Ainsi est née la matière plastique, connue pour ses qualités isolantes. [14]

b) Role de polymère dans un liant bitumineux :

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

c) Notion de compatibilité bitume polymère

- Bitume QUELCONQUE + Polymère QUELCONQUE conduit à:
 - Mélange HETEROGENE car Polymère et Bitume incompatibles
 - SOLUBILISATION du Polymère conduit a une **Compatibilité** parfaite, mais la viscosité augmente [15]

d) Compatibilité – Processus d'interaction

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

- **Phase polymère**, solvatée par une partie des maltènes du bitume
- **Phase bitume** regroupant les constituants n'intervenant pas dans le processus de solvation du polymère
- La phase bitume est sensiblement enrichie en asphaltènes par rapport au bitume de départ. [15]

e) Nature du mélange bitume polymère [15]

Le mélange bitume polymère est dit

A matrice bitume si Polymères < 3 % ;

A deux phases continues si Polymères ~ 5 % ;

A matrice polymère si Polymères > 7 %

f) Type de polymères ajouté au bitume [13]

- Famille Styrène-Butadiène-Styrène (SBS) (Voir annexe A), le plus utilisé
- Styrène-Butadiène-Rubber (SBR) (Voir annexe A)
- Evaloy® (Dupont) (Voir annexe A)

- Éthylène-Vinyle-Acétate (EVA) (Voir annexe A)

- Acide poly-phosphorique (PPA) (Voir annexe A)

g) Les facteurs influencent les bitumes modifiés aux polymères

Les bitumes modifiés sont des 'systèmes moléculaires organisés' complexes

- **Ils sont très dépendants du polymère**

- ◆ De sa nature

- ◆ De sa structure

- ◆ De sa concentration.

Mais pas seulement.

- **Ils dépendent aussi :**

- ◆ De la nature (composition, structure, origine) et de la classe du Bitume de base

- ◆ Du Procédé de Mélange

- ◆ De l'ajout éventuel d'agent de comptabilisation ou de réticulation

I.4.1.2. Les BBME obtenues par un additif Anti-ornierant

a) L'additif PR PLAST Sahara (Anti-ornierant) [16]

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

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



Figure I.1. PR PLAST Sahara

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

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

Le temps de malaxage est identique a un enrobé traditionnel.

La température de fabrication doit être comprise entre 170° et 180°.

Le compactage doit être terminé entre 100° et 110°.

-Environnement et développement durable :

Réduction de la consommation énergétique et des émissions dans l'atmosphère liées a l'absence d'usine de liant modifié.

Pérennise et augmente la durée d'utilisation des chaussées de 30% compte tenu des performances mécaniques obtenues.

-Principaux avantages :

Améliore considérablement la résistance a l'orniérage et le module d'élasticité de l'enrobé.

Permet de conserver la fatigue du bitume d'origine.

Souplesse de stockage d'utilisation, de fabrication et de dosage.

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

-Domaines d'application :

BBME (NF EN 13108-1), BBM (NF EN 13108-1) ;BBSG (NF EN 13108-1)

Autoroute, route a fort trafic, carrefours, giratoire, voies de bus, piste d'aéroports, aires de stockage de centenaire.

-Propriétés de PR PLAST Sahara :

Tableau I.6. Propriétés de PR PLAST Sahara

Propriétés	Valeur type
Point de fusion (ISO 11357-1)	110-130°C
Granulométrie	2.5 mm
Fluidité à 150° sur 5 Kg de charge (ISO 1133)	>1 Gr / 10 min

b) Adaptation aux pays du Maghreb [17]

Dans les zones sahariennes :

Un bitume de grade traditionnel (35/50) peut être utilisé avec des additifs de nature organique (Gilonite « Voir annexe A », Apshalte dur,...) sous forme de fines ou de granulés, pour durcir le liant et augmenter la rigidité de l'enrobé.

Ce moyen est employé dans les zones géographiques où les classes de bitume dur ne sont pas disponibles. Ça pourrait être une solution pour réaliser des EME ou BBME dans les pays du Maghreb.

En effet, les EME, en association avec des BBME, permettent d'améliorer la sécurité des usagers par de meilleures propriétés de surface (rugosité, uni), sur un support résistant à la fatigue et aux déformations permanentes (le profil de la chaussée est conservée sous trafic lourd).

De plus ces EME (BBME) contribuent aux préoccupations actuelles du développement durable. Car s'ils sont plus performants, ils autorisent une réduction des épaisseurs des couches de chaussées. Les gains en terme de consommation de granulats peuvent représenter, pour les très forts trafics, jusqu'à 30% d'économie de ressources non renouvelables. La diminution des consommations de bitume peut atteindre de 20%, ce qui est un gain très appréciable dans la conjoncture actuelle. A ces économies de consommation, il faut rajouter les gains sur la logistique, le transport et le stockage des matières premières économisées.

Pour la mise au point des formules, **les pays du Maghreb** disposent d'un atout majeur, celui de la connaissance et de l'usage de la méthode française de formulation des enrobés à chaud. Des laboratoires de l'administration sont équipés des moyens d'essai de formulation.

Les ressources en granulats suffisamment durs, existent. Pour les liants, des adaptations sont vrai semblablement à envisager dans un premier temps. **Des additifs** pourront être incorporés aux bitumes couramment utilisés pour durcir «moyennement» le bitume de classe usuel et par conséquent augmenter le module de l'enrobé et réduire sa sensibilité à l'orniérage sous haute température. Des grades de bitume «mi dur» comme le 20/30 pourront, par la suite, mieux répondre aux attentes de ces BBME.

I.4.2. Propriétés recherchées a travers le mélange BBME

- Amélioration de la cohésion
- Diminution de la susceptibilité thermique
- Augmentation des capacités d'allongement (sans fissurations)
- Amélioration des caractéristiques viscoélastiques
- Amélioration de l'adhésivité passive (meilleure résistance au désenrobage sur la chaussée)

I.5. Conclusions

Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) constituent une technique moderne, particulièrement performante, pour faire face aux problèmes d'accroissement de l'agressivité du trafic, tout en contribuant au concept du développement durable. La réduction des épaisseurs induit une économie des ressources non renouvelables, une réduction des travaux de décaissement en milieu urbain, ou de mise à niveau des accotements.

La diversité de ses applications routières, industrielles (quais, aires de main œuvre) voire dans le domaine des pistes et voies de circulation des aéronefs est un autre atout majeur de son développement.

Son utilisation dans des transsahariennes est sans conteste un indicateur de l'extension de son emploi surtout dans des conditions climatiques extrêmes.

Chapitre II

Le phénomène de fatigue des enrobés bitumineux

II. LE PHENOMENE DE FATIGUE DES ENROBES BITUMINEUX

II.1. Introduction

L'orniérage est un des principaux modes de dégradations des bétons bitumineux. Il est associé au comportement irréversible des matériaux et se traduit par l'apparition de déformations permanentes longitudinales sous le passage répété des véhicules, déformations souvent accompagnées de bourrelets sur les côtés. Ce phénomène pose des problèmes de sécurité routière : par temps sec un orniérage important peut causer une gêne lors du changement de file, en temps de pluie, l'eau dans les ornières peut provoquer des risques d'aquaplanage.

Actuellement, les méthodes prédictives de l'orniérage des bétons bitumineux se basent sur les modèles empiriques ou semi-empiriques et la performance vis-à-vis de l'orniérage est principalement caractérisée par des essais de laboratoire [18]

Par ailleurs, des mélanges bitumineux adaptés -anti-orniérants- destinés aux routes fortement circulées et/ou exposées à des températures extrêmes sont proposés [19]

Dans ce chapitre, avant de décrire les principaux essais de fatigue qui sont consignés dans le chapitre III., nous donnons quelques notions sur le phénomène de fatigue des matériaux de chaussées à l'origine de l'orniérage. Un paragraphe sera consacré au module complexe, paramètre déterminant dans l'appréciation de la qualité des mélanges bitumineux.

II.2. Définitions de phénomène de fatigue et critère d'évaluation

Le phénomène de fatigue d'un matériau se caractérise par sa rupture après application.

Répétée d'un grand nombre de sollicitations (en pratique supérieur à 10^4 cycle charge décharge) dont l'amplitude est inférieure à la résistance à la rupture instantanée du matériau.

Par définition, une éprouvette est dite fatiguée lorsque son module E (Voir paragraphe II.5.1) atteint la moitié de sa valeur initiale mesurée au premier cycle de chargement dans les mêmes conditions d'essai (même température et même fréquence).

La fatigue de la chaussée entraîne des certain nombre de dégradations comme la fissuration par fatigue thermique ou l'orniérage du principalement aux déformations permanentes irréversibles entraînées par les cycles répété du au passage des véhicules. [21]

II.2.1. Fonctionnement de la chaussée soumise à des sollicitations répétées

Le passage d'un véhicule engendre des contraintes de traction et de compression dans les différentes directions des couches de la chaussée. Chaque couche de la chaussée est assimilée à une poutre qui subit des flexions sous l'effet du trafic (figure II.1).

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent induire des déformations permanentes qui, si elles sont importantes, se traduisent par un orniéage à la surface de la chaussée. Les tractions répétées à la base des couches d'une chaussée, sous l'effet du passage des véhicules lourds, engendrent des "micros" dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau par fatigue. Alors, la direction de contrainte qui est principalement à l'origine des fissurations par fatigue, est celle qui se trouve parallèle à l'axe de roulement (ou l'axe de la chaussée). « **Traction par flexion** » [20]

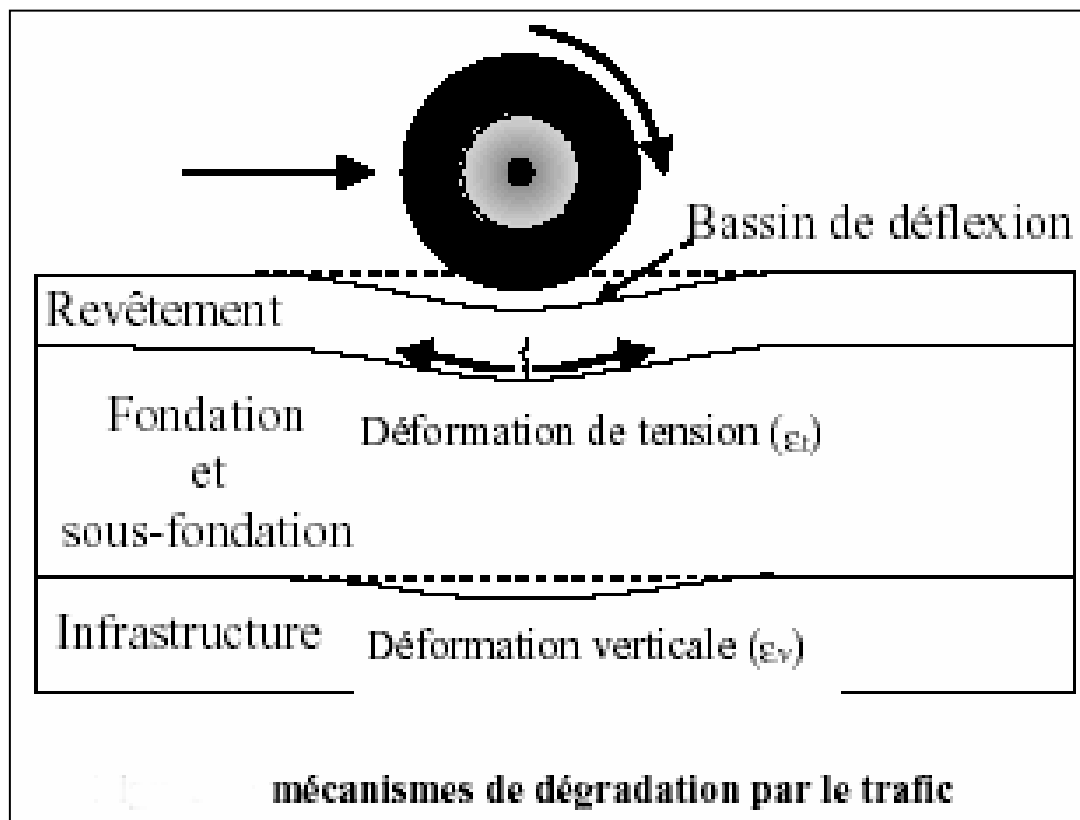


Figure II.1. Schématisation des sollicitations induites par le trafic

A chaque passage de roue, la chaussée subit donc un chargement du même type :

"**Contraction – extension – contraction**". C'est la répétition de ces sollicitations qui est à l'origine de la fatigue de la chaussée.

II.2.2. Mécanisme de la fatigue

Dans un essai de fatigue, quelle que soit la sollicitation imposée, on distingue trois phases dans l'évolution du module en fonction du temps ou de nombre de cycles (figure II.2)

- Phase **I** ou phase d'échauffement : cette phase se traduit par une chute rapide de la valeur du module.
- Phase **II** ou phase de fatigue : un plateau légèrement incliné traduit l'établissement d'un régime stable et quasi-linéaire et une lente évolution de dommage.
- Phase **III** ou phase de rupture : décroissance accélérée du module, une concentration brutale des contraintes dans le voisinage des zones endommagées, développement rapide des fissures et macro fissuration, perturbation thermique et endommagement jusqu'à la rupture de l'éprouvette.

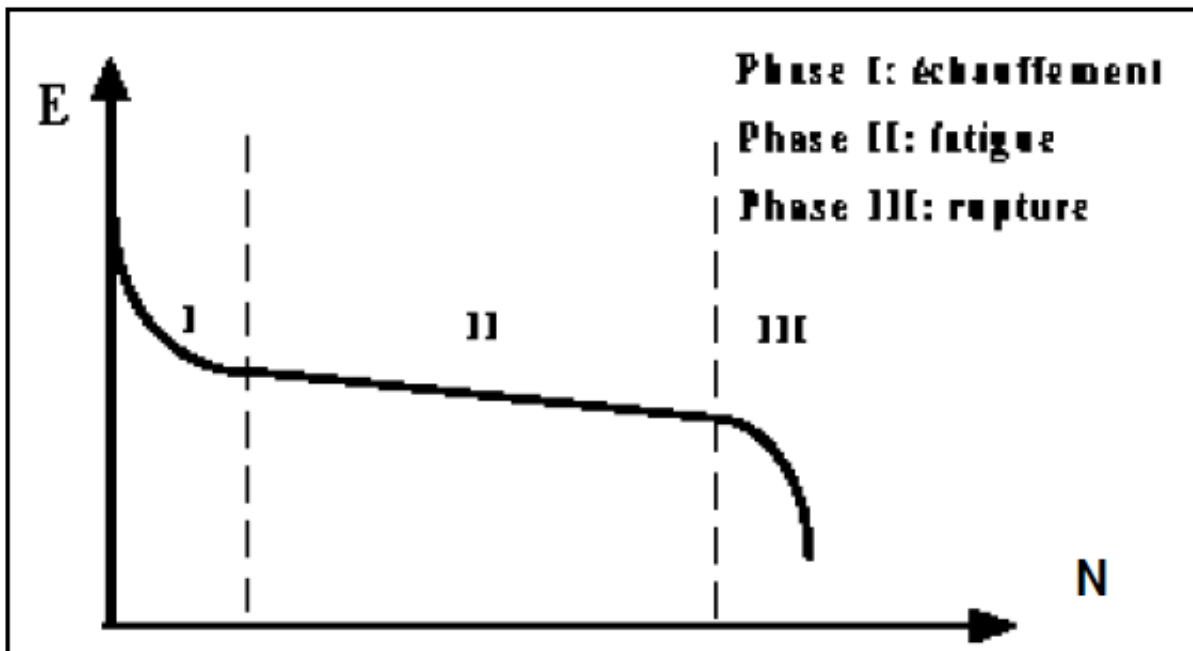


Figure II.2. Distinction de trois phases différentes dans un essai de fatigue

II.3. Les paramètres qui donnent naissance au phénomène de la fatigue

II.3.1. Effet de trafic

Les tractions répétées à la base des couches, sous l'effet du passage des véhicules, créent des micro-dégradations qui s'accumulent et peuvent entraîner la ruine du matériau. Il s'agit du phénomène de fatigue qui s'observe pour de nombreux matériaux. Une fissure peut également apparaître et se propager dans la chaussée.

Les compressions répétées sous le passage de la charge peuvent créer des déformations permanentes qui induisent parfois un orniérage à la surface de la chaussée.

Cet orniérage peut être dû au tassement des couches de béton bitumineux mais peut aussi être dû éventuellement aux déformations de couches inférieures non traitées. [20]

II.3.2. Effet des paramètres de formulations sur la fatigue

Les paramètres de formulation qui influencent la loi de fatigue des bétons bitumineux sont :

II.3.2.a. Les granulats

- Aspects de la courbe granulométrique :

Il semble que la courbe granulométrique ne soit pas un paramètre facilement étudiable, puisqu'il ne peut être considéré isolement, dans la mesure où il conditionne la teneur en filler et la teneur en bitume. Cependant tous les résultats montrent qu'une courbe granulométrique continue est meilleure qu'une courbe discontinue.

-Teneur en fines :

Il a été montré qu'un sous dosage en fine est moins défavorable qu'un excès. Ainsi, pour une teneur en bitume égale à 3.5%, le meilleur comportement à la fatigue est obtenue pour une teneur en fine égale à 7%, voir figure II.3.

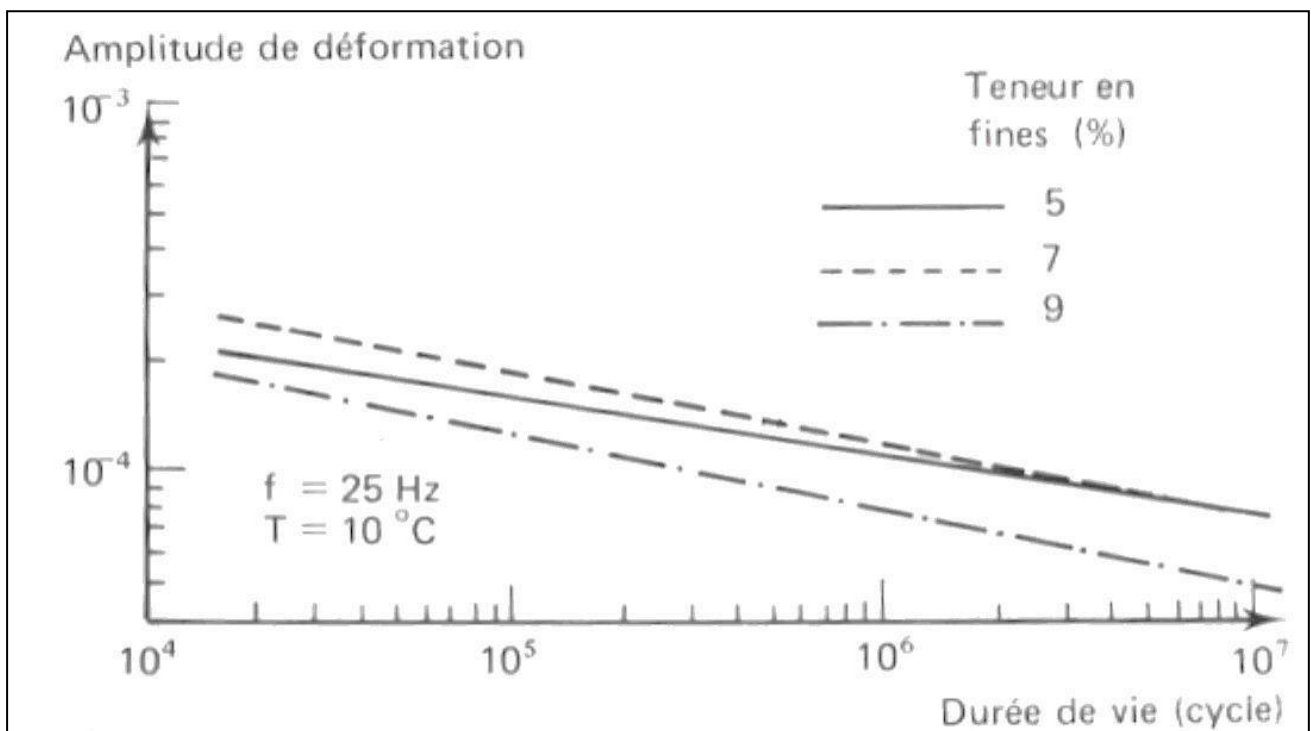


Figure II.3. Influence de la teneur en fines sur la droite de fatigue

II.3.2.b. Le bitume

- La teneur en bitume :

Il a été montré qu'une teneur en bitume élevée améliore l'enrobage, augmente la déformabilité et est favorable à la résistance à la fatigue. Mais en revanche, il y'a un désaccord sur l'existence d'une teneur optimale.

La figure II.4 montre pour deux teneurs en bitume l'effet de l'augmentation de la teneur en liant. Inversement, une diminution de la teneur en bitume entraîne une chute importante de la résistance à la fatigue.

Il est important de savoir que le bitume influe aussi par sa pénétrabilité. Un bitume trop dur peut conduire par temps froid à une fragilité excessive. Ceci impose de bien prendre garde au moment de la fabrication à la surchauffe. [21]

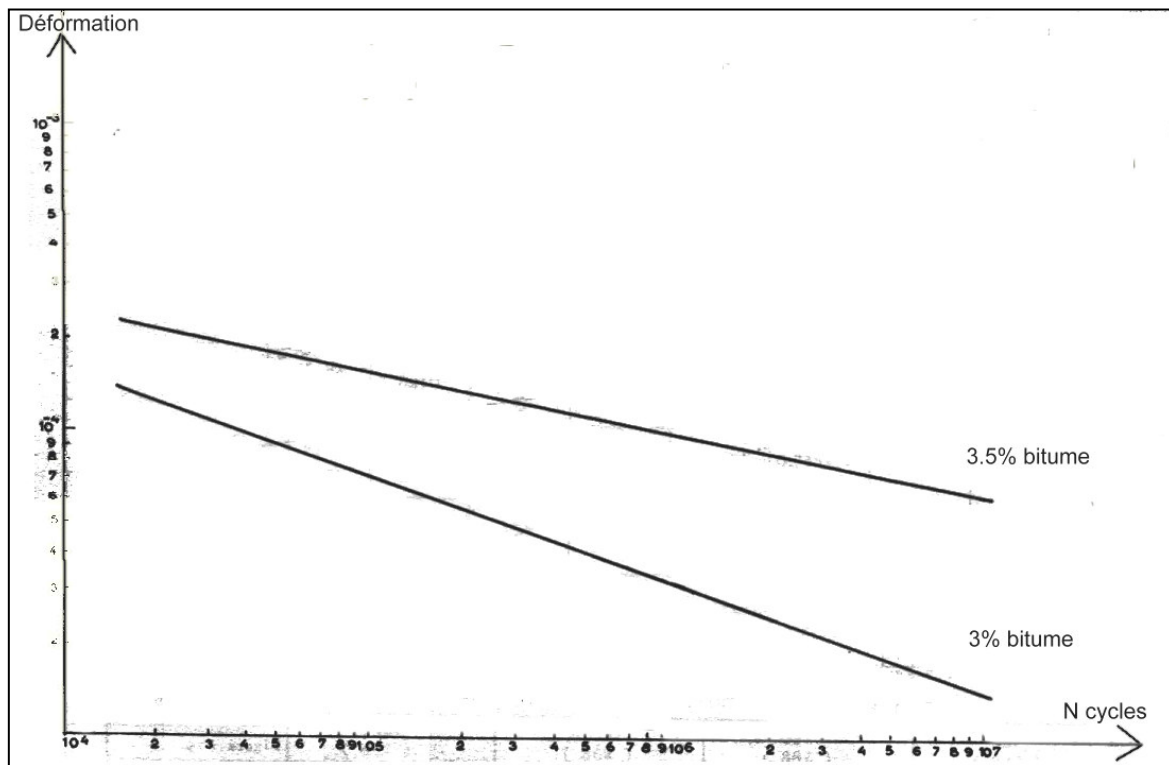


Figure II.4. Influence de la teneur en bitume sur la droite de fatigue

- La dureté du bitume :

Ce facteur est tout à fait déterminant, car, en conditionnant la rigidité de l'enrobé, il conditionne de même sa durée de vie en fatigue. Certaines recherches ont jusqu'à estimer que dans l'expression de la loi de fatigue, il faudrait prendre en compte non pas la déformation de l'enrobé, mais la déformation du bitume, obtenue par application d'un facteur de proportionnalité égal à la concentration de bitume dans l'enrobé. Toutes les études menées sur le sujet, montrent que le rôle de la nature du liant est très important sur la résistance en fatigue de l'enrobé.

Les résultats montrent aussi que les enrobés préparés avec les bitumes modifiés par les élastomères donnent des durées de vie plus élevées et des modules de rigidité plus faibles.

[21]

II.3.2.c. La compacité

La compacité est estimée par tous comme un des facteurs les plus déterminants, à déformation constante ou à contrainte constante, il a été montré que les durées de vie augmentent avec la compacité. Le tableau II.1 et la figure II.5 illustrent bien cette influence. Ainsi à déformation égale à $1,5 \cdot 10^{-4}$, les durées de vie pour trois teneurs en vides, montrent qu'un gain de compacité de 3% augmente la durée de vie d'environ $6 \cdot 10^4$ cycles. [21]

Tableau II.1. Évolution de la teneur en vide en fonction de nombre de cycle de chargement

Enrobés (Teneur en vides en %)	N (Cycle) * 10^5
10	4.420
14	4.410
17	0.768

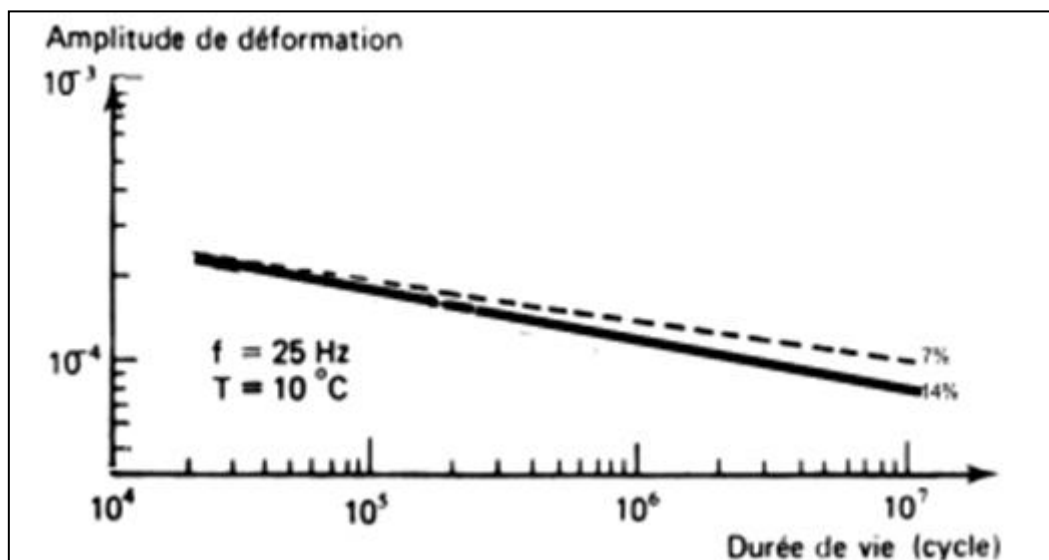


Figure II.5. Influence de la teneur en vides sur la droite de fatigue

II.4. Les phénomènes résultants de la fatigue de la chaussée

II.4.1. Orniérage

L'orniérage désigne de façon générale les phénomènes de déformations permanentes du a la fatigue de profil transversal des chaussées, qui apparaissent dans les chaussées fatiguée et croissent sous l'effet du trafic.

L'observation de coupes transversales de différents types de chaussées, fortement orniérées, montre que les déplacements de surface peuvent provenir de deux sources : soit du tassement des couches structurales de matériaux non liés (plate forme support, couches de graves non traitées), soit de la déformation des couches bitumineuses plutôt proches de la surface.

Le premier cas s'observe principalement sur des chaussées souples et se traduit généralement en surface par des ornières dites à grand rayon, qui englobe chaque voie de circulation. Ce type d'orniérage est parfois appelé « orniérage structurel ». Le second cas se produit plutôt sur les chaussées bitumineuses épaisses et se manifeste par des ornières à « petit rayon », de la largeur des bandes de roulement avec formation de bourrelets latéraux. Les facteurs déclenchant ou aggravant sont bien connus : fortes températures, charges et pressions de pneus élevées, vitesses lentes, poids lourd répété (pentes, zones de freinage, etc.). De plus, l'usage de matériaux recyclés dans les couches de plus en plus proches de la surface de la chaussée pose le problème du comportement à long terme de ces matériaux vis-à-vis de l'orniérage.

Les conséquences de l'orniérage des chaussées ont au-delà des considérations économiques. Les conditions de sécurité du trafic sont en cause et il n'est pas possible de retarder la réhabilitation d'une surface déformée, en particulier, face au danger de l'aquaplaning. Cependant, le plus important est surtout de prévoir l'orniérage et de comprendre son évolution dans le temps. [22]

II.4.2. Fissuration

II.4.2.a. Fissures longitudinales dans les bandes de roulement

Il s'agit de fissures sensiblement parallèles à l'axe de la chaussée, apparaissant exclusivement dans une bande de roulement (Figure II.6).

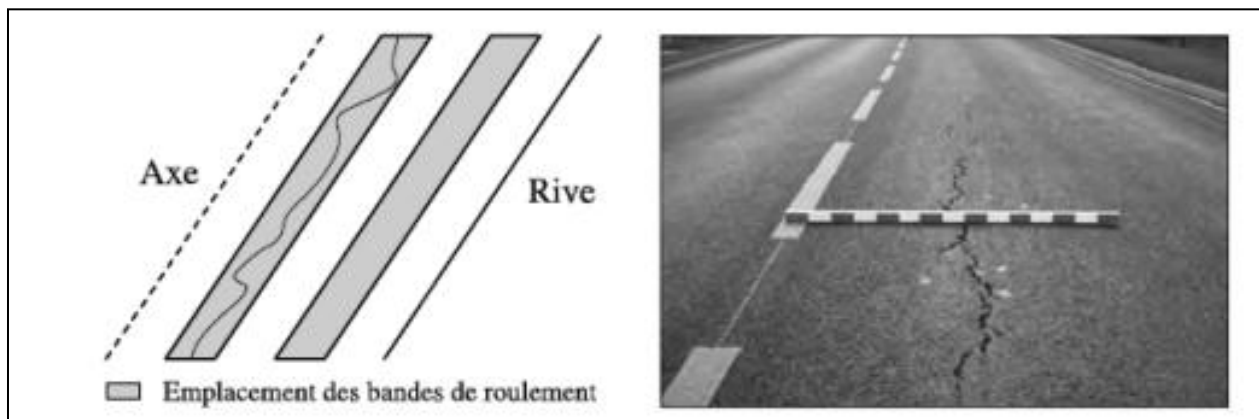


Figure II.6. Schéma d'une fissuration longitudinale dans les bandes de roulement et exemple d'une fissuration grave ramifiée avec départ de matériaux [Di Benedetto et Corté 2005]

Ce type de fissuration est caractéristique d'un phénomène de fatigue de la structure par répétition des charges à la base des couches traitées.

Ce type de dégradation peut être observé sur les structures souples traditionnelles, les chaussées bitumineuses épaisses et les structures à assise traitée aux liants hydrauliques et mixtes. [23]

II.4.2.b. La fissuration due à la fatigue thermique.

Lorsqu'une structure est soumise cycliquement à des variations locales de température, des dilatations et compressions empêchées apparaissent, Création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des ces contractions et dilatations thermiques lors des changements de température donnant lieu à des chargements mécaniques.

Ces chargements répétés peuvent conduire à un endommagement et finalement à une fissuration du matériau, principalement sous la forme de réseaux de fissures ou faïençage thermique dans les zones courantes.

La fissuration thermique peut être facilement évitée si l'on utilise un bitume de grade élevé, c'est-à-dire un bitume "dur".

Néanmoins, un bitume de grade trop élevé se révèle néfaste vis-à-vis des problèmes d'orniérage (déformations permanentes du a la fatigue de la chaussée) à température élevée. Le bitume idéal doit donc être à la fois le moins susceptible possible aux phénomènes de fissuration thermique (à basse température) et d'orniérage (à température élevée).

Plus simplement, on doit donc exiger des enrobés deux qualités principales en rapport direct avec la dépendance du liant utilisé vis-à-vis de la température :

- La stabilité, *i.e.* la résistance à la déformation permanente qui est aggravée à haute température,
- La flexibilité, soit l'aptitude à supporter sans fissures thermiques les basses températures.

Ces conditions ont notamment amené les différents groupes pétroliers à développer de nouveaux bitumes pour couvrir ce large intervalle de température (-30°C à 60°C) : les bitumes modifiés aux polymères. [23]

II.5. Le comportement viscoélastique d'un BBME

II.5.1. Module complexe d'un enrobe [24]

Le module complexe (E^*) est l'expression de la rigidité d'un matériau viscoélastique sous **chargement cyclique**, tel qu'un enrobé. La déformation d'un matériau viscoélastique dépend du temps de chargement et est différée dans le temps, contrairement à un matériau élastique dont la déformation est instantanée. De plus, **l'enrobé est un matériau thermosensible**, ce qui signifie que le E^* varie également en fonction de la température.

Le E^* permet de généraliser des méthodes de résolution de problèmes mécaniques développées pour les matériaux élastiques aux matériaux viscoélastiques.

Le E^* est un nombre complexe composé d'une partie réelle (E_1) et d'une partie imaginaire (E_2), tel que présenté à l'Équation II.1. Le E^* peut également se décomposer en deux paramètres sous sa forme vectorielle, soit son module ($|E^*|$) (norme du vecteur) à l'Équation II.2 et son argument (ϕ) (angle du vecteur) à l'Équation II.3, tel que représenté dans le plan complexe de la Figure 2.

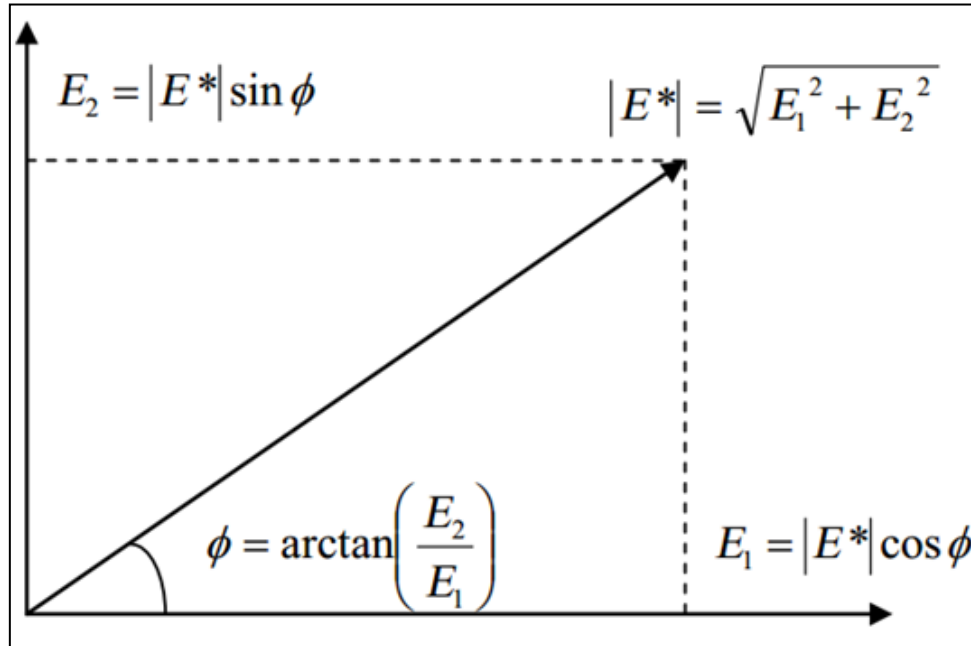


Figure II.7. Représentation du module complexe [24]

$$\text{Equation II.1 : } E^* = E_1 + i E_2 = |E^*| \cos(\phi) + i |E^*| \sin(\phi)$$

$$\text{Equation II.2 : } |E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

$$\text{Equation II.3 : } \phi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right)$$

Où

E^* = module complexe [MPa], $|E^*|$ = module du module complexe [MPa],

ϕ = argument du module complexe (radians), E_1 = partie réelle du module complexe [MPa],

E_2 = partie imaginaire du module complexe [MPa], i = nombre imaginaire ($\sqrt{-1}$).

Le E^* d'un enrobé est déterminé à l'aide d'essais cycliques à petites déformations ($< 100 \mu\text{m/m}$), La Figure II.8 montre un cycle de sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé.

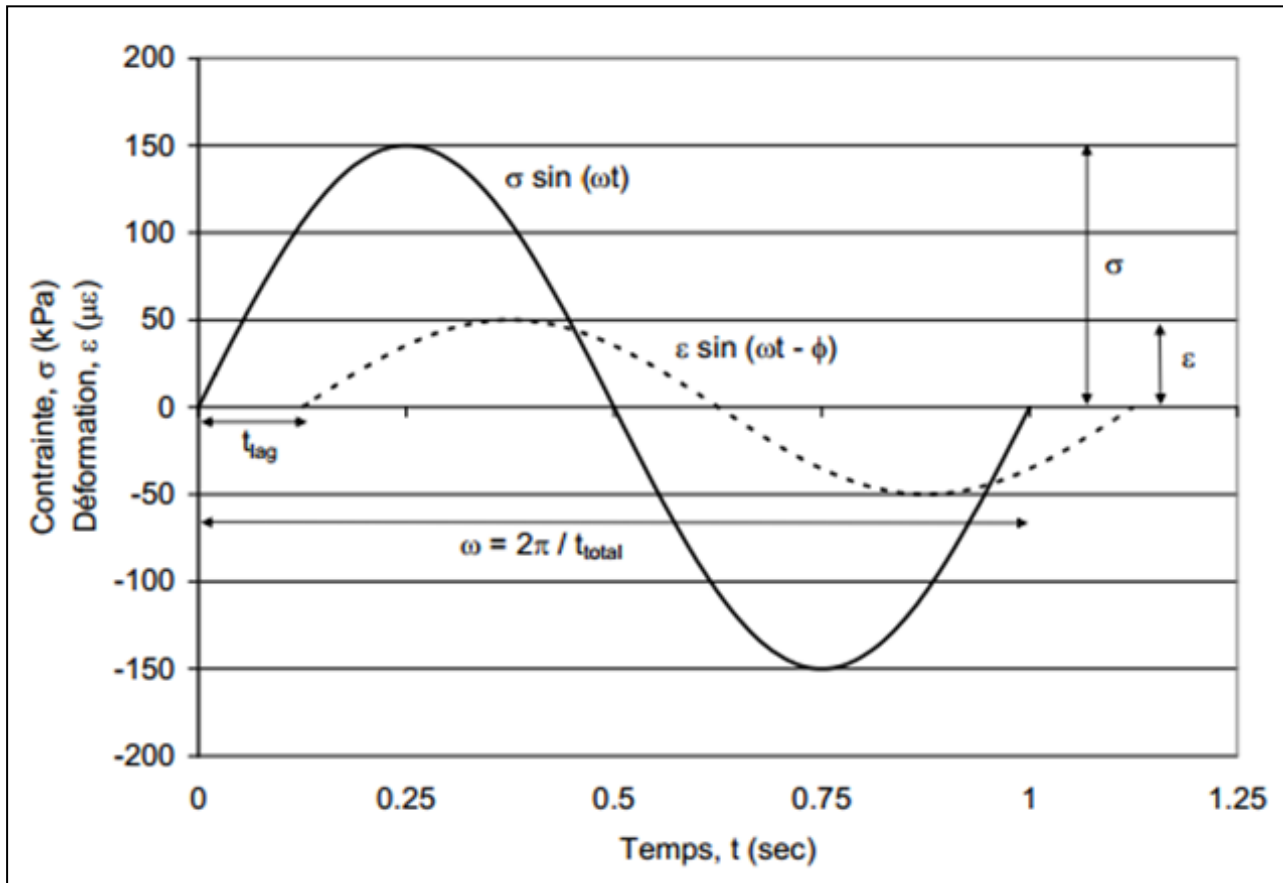


Figure II.8. Sollicitation sinusoïdale en traction-compression alternée sur un enrobé [24]

Sous sollicitation cyclique, le E^* est le rapport entre la contrainte cyclique et la déformation cyclique, tel que présenté à l'Équation II.4. La déformation accuse un retard sur la contrainte, ce qui introduit un déphasage dans l'équation qui s'exprime alors sous forme de nombre complexe. Le $|E^*|$ de l'enrobé est nommé « **module dynamique** » en mécanique de chaussée, il est déterminé selon l'Équation II.5. Le ϕ est nommé « **angle de phase** », il est déterminé selon l'Équation II.6.

$$\text{Equation II.4 : } E^* = \frac{\sigma \sin(\omega t)}{\varepsilon \sin(\omega t - \varphi)} = |E^*| \cos(\varphi) + i |E^*| \sin(\varphi)$$

$$\text{Equation II.5 : } |E^*| = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

$$\text{Equation II.6 : } \varphi = \omega t_{lag}$$

Où

E^* = module complexe [MPa], $|E^*|$ = module dynamique [MPa],

φ = angle de phase (rad), σ = contrainte [MPa],

ε = déformation (m/m), ω = période (rad/s),

t = temps de chargement (s), t_{lag} = temps de déphasage entre σ et ε (s).

Le $|E^*|$ est le rapport entre la contrainte totale (maximale) et la déformation totale (Maximale), bien qu'elles ne se produisent pas en même temps. Le $|E^*|$ est une Approximation du module élastique d'un matériau viscoélastique, qui peut être utilisée Pour le dimensionnement des chaussées lorsque les lois de l'élasticité sont employées.

Le φ représente le décalage dans le temps entre la contrainte et la déformation. Il varie de 0° pour un matériau purement élastique (réaction instantanée) à 90° pour un matériau purement visqueux. Le $|E^*|$ est nommé « module dynamique » en Amérique du Nord (AASHTO « american association of states highway officials ») et « module de rigidité » en Europe (EN 12697-26). Le E^* est nécessaire pour décrire le comportement viscoélastique complet de l'enrobé. [24]

❖ Méthodes d'essai

Le E^* d'un enrobé est déterminé à différentes fréquences et températures, à petite déformation, afin de caractériser le comportement viscoélastique linéaire de l'enrobé. L'American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), l'American Society for Testing and Materials (ASTM) et le Comité européen de normalisation (CEN) proposent différentes méthodes d'essai pour déterminer le E^* des enrobés.

Ces méthodes d'essai sont présentées au Tableau II.2, où des essais de traction ou de compression, directe ou indirecte, sont proposés, ainsi que des essais de flexion en différents points.

Tableau II.2. Méthodes d'essai normalisées pour la détermination du module complexe des enrobés [24]

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

II.6. Conclusion

Pour la formulation d'un enrobé pour une route à fortes sollicitations (trafic poids lourd élevé) ou dans des conditions météorologiques aride, il faut prendre les précautions pour réduire les dégradations entraîné par la fatigue de la chaussée.

Le présent chapitre nous a permis de connaître certains des conséquences de problème d'orniérage de la chaussée qui résultat principale de phénomène de la fatigue, voir l'aquaplaning et l'inconfort des passagers ;

Cependant la mesure de module de rigidité d'une chaussée a nous aidé pour prédire sont comportement .toujours est il que connaître les cause de problème nous permettra de proposé les meilleures solutions.

Chapitre III

Synthèse sur les différents essais de fatigue

III. Synthèse sur les différents essais de fatigue

III.1. Introduction

Afin d'étudier le comportement à la fatigue des enrobés, divers essais ont été pratiqués. Parmi lesquels, nous distinguons les essais de simulation du comportement mécanique et les essais de simulation routière (modèles réduits). Les essais de simulation du comportement mécanique visent directement le comportement des chaussées à la fatigue et utilisent davantage de simulations surtout au niveau des sollicitations que les dernières cités. Les essais de simulation routière sont des essais empiriques. Ils font une copie, petite ou grande, de la route et demandent donc moins de modélisation.

Nous présentons dans ce chapitre les différents essais de simulation du comportement mécanique utilisés au laboratoire pour étudier la fatigue des enrobés bitumineux.

III.2. L'essai de traction Nottingham asphalt tester ou indirect tension test (NAT)

C'est un essai de traction indirecte répétée au NAT Le principe de l'essai de traction indirecte répétée (figure III.1) consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de façon répétée à une charge verticale de compression le long d'un diamètre, provoquant ainsi une contrainte de traction le long du diamètre perpendiculaire à la direction du chargement. La déformation transitoire (horizontale) due à cette contrainte est mesurée. Le module élastique est une fonction de la charge de compression et de la déformation de traction. [25] La contrainte de traction (σ_{ti}) et le module élastique (E_{ti}) sont donnés respectivement par les relations suivantes :

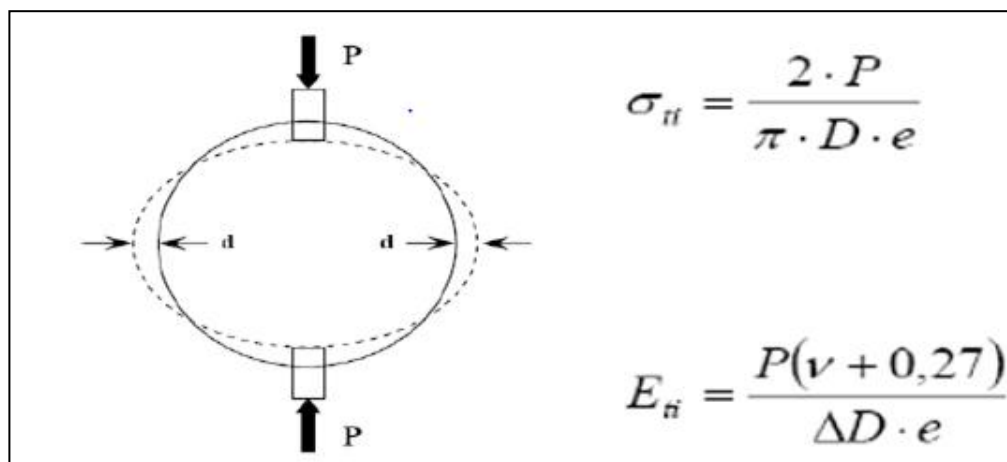


Figure III.1. Déformation d'une éprouvette -Essai de traction indirecte NAT- [25]

Chapitre III : Synthèse sur les différents essais de fatigue

Avec :

σ_{ti} : Contrainte de traction indirecte.

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

P : Effort vertical appliqué

D : Diamètre de l'éprouvette.

ΔD : Variation du diamètre (déformation horizontale).

e : Epaisseur de l'éprouvette.

ν : Coefficient de Poisson

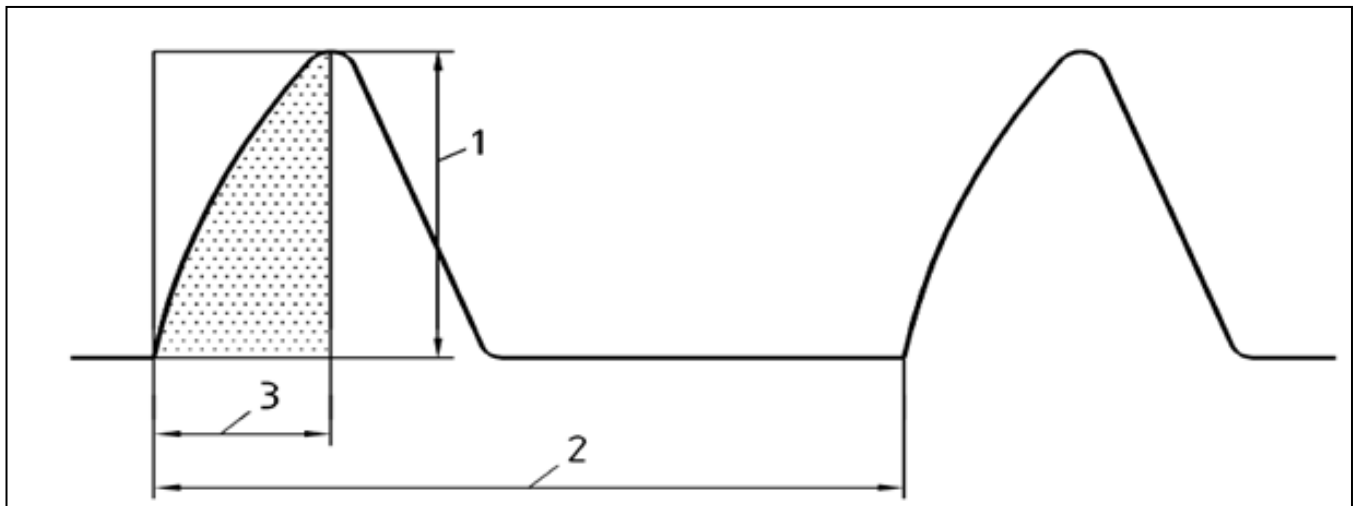


Figure III.2. Forme de l'impulsion de chargement, indiquant le temps de montée et la valeur crête de charge [25]

Légende

1 : Valeur crête de la charge

2 : Période de répétition des impulsions

3 : Temps de montée

Avant l'essai proprement dit, l'éprouvette est soumise à 5 pulsations de conditionnement, dont le but est la stabilisation des barres de chargement par l'intermédiaire desquelles l'effort est transmis à l'échantillon. Cinq pulsations d'essai (Figure III.2) sont ensuite réalisées à une fréquence imposée avec mesure du module élastique à chaque pulsation. Le module obtenu est la moyenne de ces 5 valeurs. Le coefficient de poisson est estimé et la valeur communément utilisée est **0,35 à 20°C à 0,25 à 10°C.**

III.2.1.Essai normalisé

EN 12697-26, Détermine la résistance en traction [26]

III.2.2.Conditions d'essai

- Sur éprouvette cylindrique :(Éprouvette Marshall ou PCG, Carotte du chantier)
- En principe 20°C (approche anglaise)
- Sollicitations diamétrales par impulsion [26]

III.2.3. Matériels utilisés

La figure III.3 montre le dispositif de chargement NAT pour l'essai de traction indirecte.

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

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

L'ordinateur ajuste le régulateur de pression d'air de manière à stocker dans le réservoir une quantité d'air à la pression nécessaire pour la génération des pulsations. L'activation de la valve permet ensuite au vérin d'appliquer l'effort requis à l'échantillon. L'effort est contrôlé par l'ordinateur de telle sorte que toute déviation est corrigée par un ajustement automatique de la pression de régulation réalisant ainsi un système en boucle fermée. [25]

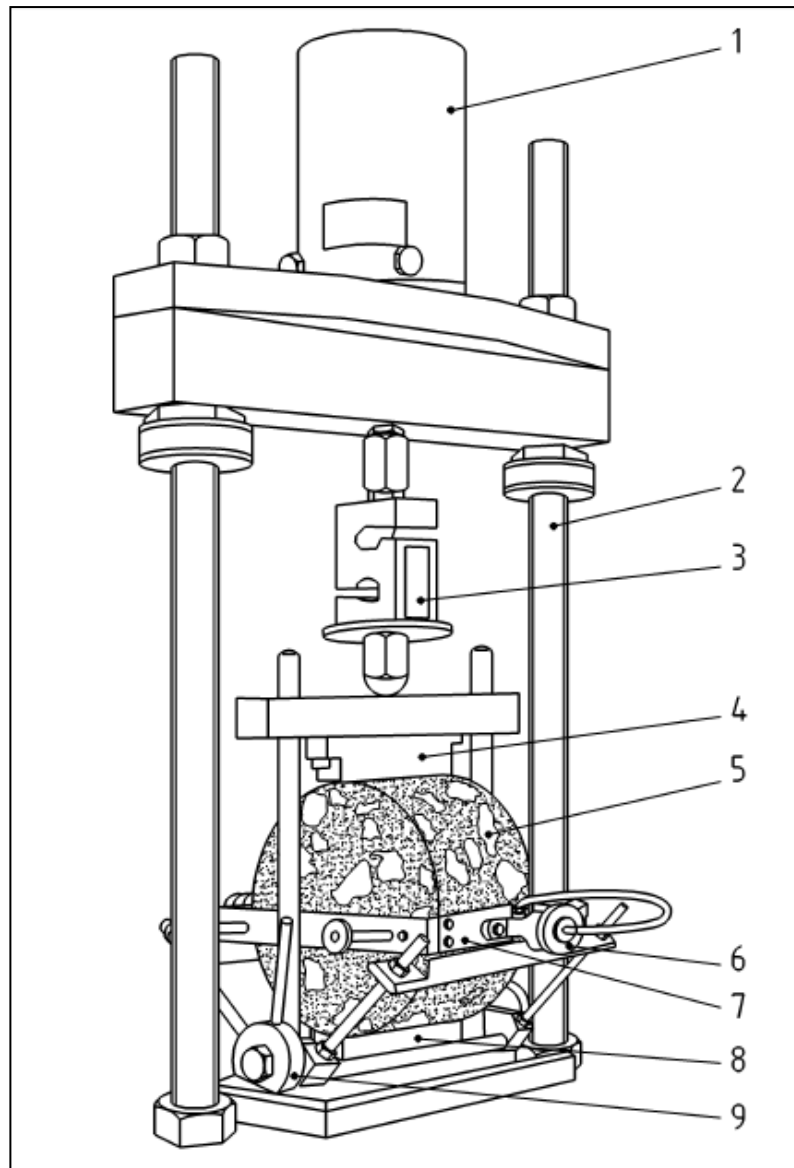


Figure III.3. Exemple d'appareillage d'essai [25]

Légende

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

(Voir Figure III.4).

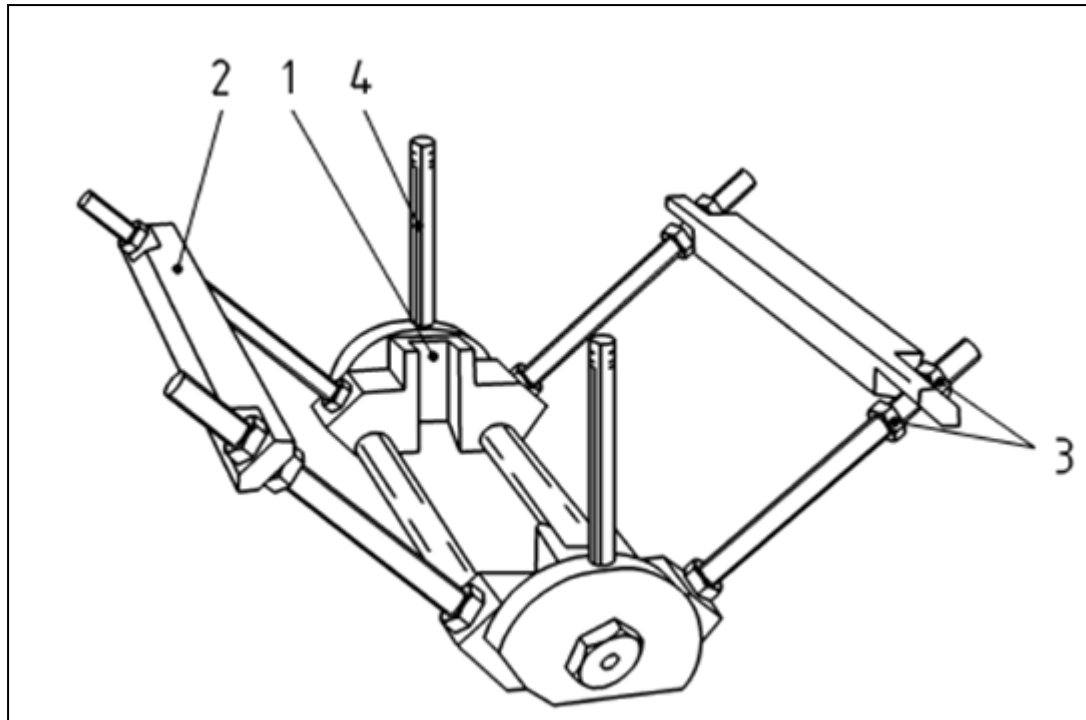


Figure III.4. Châssis d'alignement LVDT [8]

Légende

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

III.2.4. Avantages / Limitations [26]

➤ Permet l'utilisation des carottes « chantier »

➤ Hypothèse sur la valeur du coefficient de Poisson

$$E = P(v+0,27)/h\Delta h$$

III.3. Essais de flexion

III.3.1. Flexion deux points

C'est l'essai de fatigue développé au **LCPC** depuis 1965. L'étude de l'influence des paramètres de l'essai comme la température et le mode de sollicitation (force ou déplacement) a été faite par **DOAN** (1970). L'essai est répandu en Europe et normalisé en France. Ses résultats sont utilisés dans la méthode française pour le dimensionnement des chaussées.

L'éprouvette trapézoïdale est encastrée à sa grande base et sollicitée à son sommet (Figure III-5). Les sollicitations peuvent être en force ou en déplacement imposé. L'intérêt d'une éprouvette trapézoïdale est d'éloigner la section la plus sollicitée de l'encastrement et du point d'application de la charge. Ainsi, on peut éviter les effets parasites de bord et de concentration de contraintes sous le point d'application de la charge dans l'apparition des fissures. La nouvelle machine utilisée au LCPC exerce 4 essais simultanés [27].

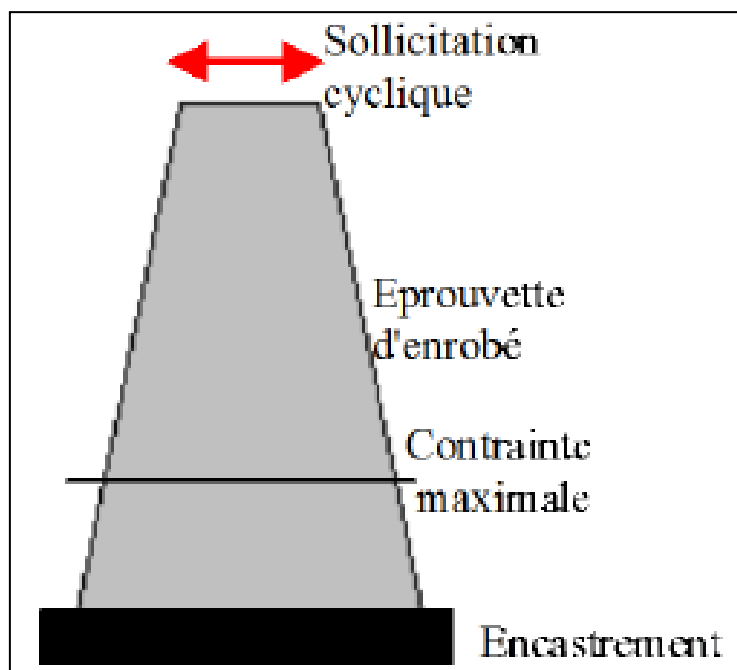


Figure III.5. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 2 points [27]

III.3.2. Flexion trois points

L'éprouvette est une poutre qui se repose sur deux appuis simples (Figure III.6). La sollicitation est appliquée au centre de la poutre en mode de contrainte ou de déformation imposée.

Le moment de flexion est nul au droit des appuis et varie linéairement pour atteindre sa valeur maximale au centre de l'éprouvette. Le plan de rupture est généralement localisé sur ce même point ou très proche de celui-ci. [27]

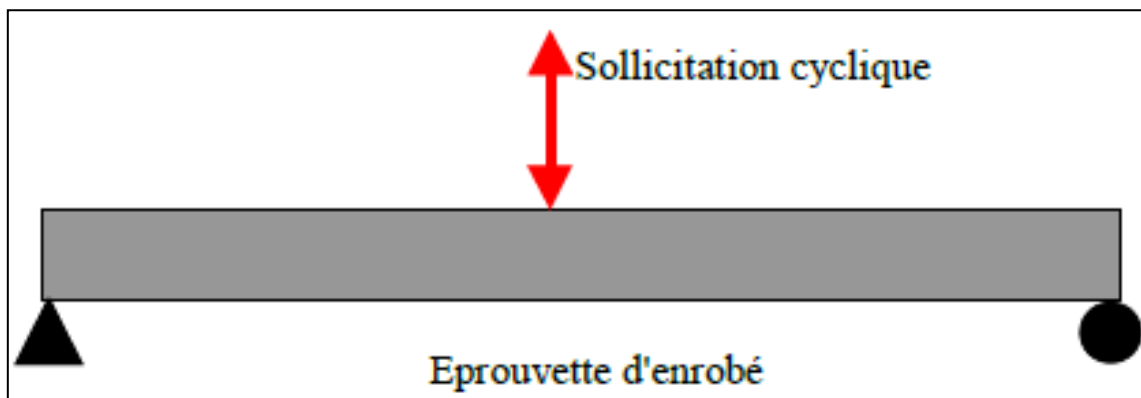


Figure III.6. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 3 points

III.3.3. Flexion quatre points

Cet essai est largement utilisé aux Etats Unis. Il a été choisi suite au programme **SHRP** pour l'étude de la fatigue des enrobés bitumineux. Cet essai a été conçu pour éviter la concentration des dommages au centre de la poutre observée lors de l'essai de flexion trois points. La sollicitation est exercée sur deux points symétriques, partageant l'éprouvette en trois travées (Figure III.7). En absence d'effort tranchant entre ces deux points, on peut profiter d'une zone assez longue sous moment uniforme. [27]

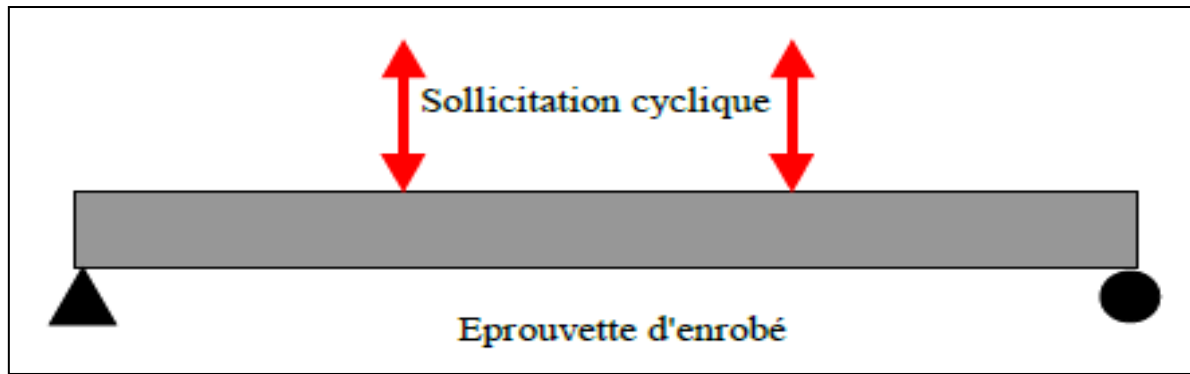


Figure III.7. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai flexion 4 points

III.3.4 Flexion supportée

L'essai de flexion supportée porte une amélioration très importante par rapport aux essais de flexion 3 et 4 points. Dans cet essai et pour une meilleure simulation des conditions de la chaussée, l'éprouvette est placée sur une membrane du caoutchouc ou une couche d'air en pression. La géométrie de l'éprouvette est celle d'une poutre ou d'une plaque rectangulaire ou circulaire. [27]

III.4. Essais de traction – compression

III.4.1. Traction directe a la "MAER"

L'essai de traction directe normalisé français (NF T 98-260-1) est réalisé sur la **MAER** (**M**achine **A**sservie pour **E**ssais **R**héologiques). Cet essai a été mis en place par **LINDER** (1977) et développé par **MOUTIER** (1990). Il consiste, pour une température donnée, à soumettre une éprouvette cylindrique à un chargement en traction jusqu'à une valeur donnée en déformation axiale en suivant une loi de chargement contrôlée en déformation du type $\epsilon_{\max} \epsilon = at$. Avec $0.5 < n < 2$ (Figure III.8). L'essai est reconduit pour plusieurs temps de chargement t_i (même valeur de ϵ_{\max}) [27]

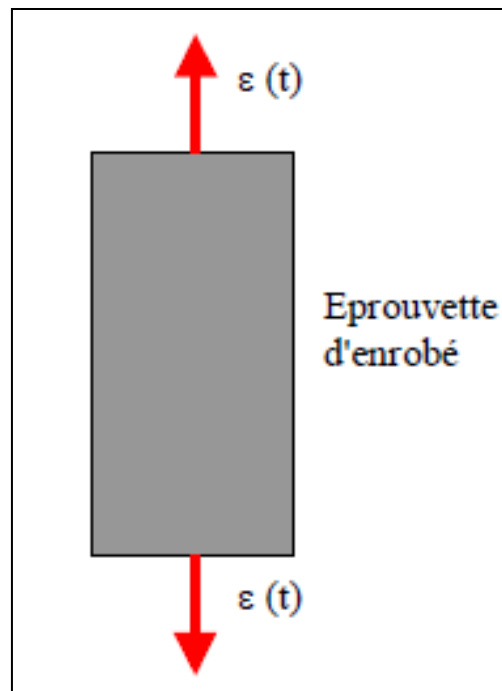


Figure III.8. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai de traction directe

D'après **LINDER [28]**, l'essai est considéré complet du fait de sa structure qui permet d'effectuer facilement sur chaque éprouvette une suite d'essais fournissant l'ensemble des grandeurs utiles au dimensionnement.

III.4.2. Traction – compression

L'essai peut être réalisé sur des éprouvettes de forme cylindrique ou prismatique. L'éprouvette est soumise à des sollicitations axiales de type traction-compression alternée (Figure III.9). Pour éloigner la fissuration des bords et améliorer l'essai, on peut évider l'éprouvette cylindrique en son milieu.

L'essai est homogène dans la partie centrale de l'éprouvette. Il peut être réalisé en contrôle de déformation ou de contrainte, ce qui est rarement le cas des autres essais de fatigue. Le module de rigidité, le coefficient de Poisson et d'autres caractéristiques mécaniques peuvent être tirées de l'expérience. [27]

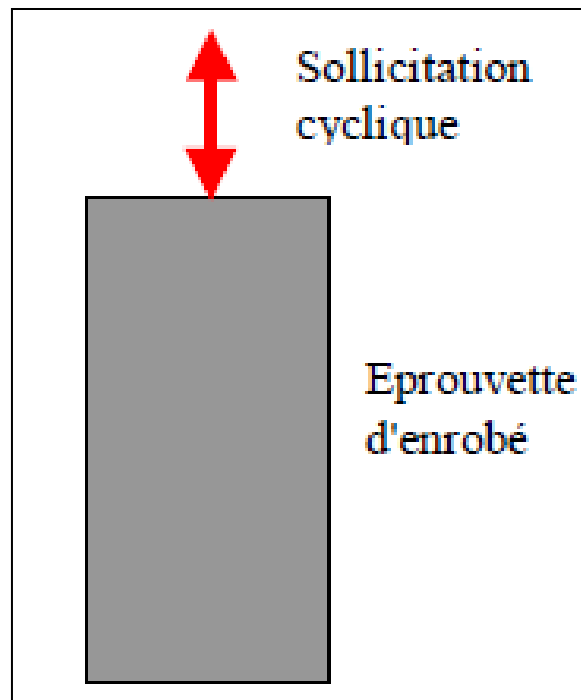


Figure III.9. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai traction-compression

III.5. L'essai triaxial

En plus de la sollicitation de traction – compression de l'essai précédent, une pression de confinement sur l'éprouvette est appliquée (Figure III.10). Cette pression de confinement permet de mieux simuler le comportement de la chaussée. En effet, l'essai triaxial permet d'appliquer des efforts latéraux qui existent dans le cas d'une chaussée réelle. Dans des essais plus complexes de ce domaine, l'application de la pression latérale peut être également cyclique. [27]

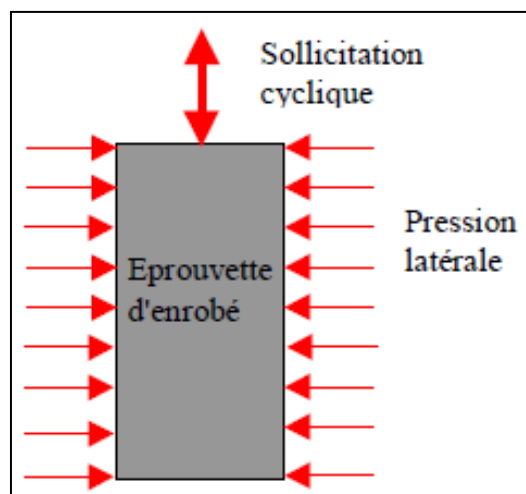


Figure III.10. Schématisation de l'éprouvette et de la sollicitation dans l'essai triaxial

III.6. Conclusion

Les essais de fatigue ont été créés pour caractériser le comportement en fatigue des enrobés bitumineux et les résultats issus des essais de fatigue sont employés pour le dimensionnement des couches d'enrobé d'une structure de chaussée.

Les essais avec période de repos permettent systématiquement un gain de durée de vie par rapport aux essais de fatigue continue, ce gain est fonction de la durée de temps de repos et de la température car la capacité de liant constitutif des enrobés a recollé ses fissures internes en dépend.

Chapitre IV

Etude expérimentale

IV. Etude expérimentale

IV.1. Introduction

L'orniérage des couches bitumineuses représente ainsi, aux côtés de l'endommagement et de la fissuration par fatigue, l'un des principaux modes de dégradation potentiel des chaussées. Sur les routes à circulation rapide, il ne peut être toléré en trop forte intensité pour des causes d'inconfort au roulement et de sécurité (risques accrus d'aquaplanage notamment). On cherche donc à limiter ce phénomène par la recherche de formulation d'enrobés pour couches de roulement, résistants aux déformations permanentes. Bien entendu, cette formulation doit également rester performante vis-à-vis de la fissuration par fatigue, ce qui rend la tâche difficile, compte tenu des exigences contradictoires, en termes de dureté de bitume par exemple.

La formulation des bétons bitumineux à Module amélioré (BBMA), vient contribuer à la résolution de ce problème. La principale différence avec la formulation de enrobés classiques réside dans le choix du liant ; il faut un liant de grade dur (10 à 20), si ce type de liant n'existent pas, des ajouts sont proposer pour rigidifier le liant habituellement utilisé pour les enrobés classiques.

Par ailleurs, les normes régissant de type d'enrobés font références aux performances obtenues selon la méthode de formulation LCPC, pas de normes pour la formulation Marshall généralement utilisée en Algérie.

Notre étude est une contribution à la formulation d'un béton bitumineux à Module amélioré (BBMA 0/14)- par un plan d'expériences qui applique la méthode Marshall complétée par l'essai au NAT pour la détermination du module de rigidité.

L'étude de formulation est proposée en deux étapes :

1. formulation de l'enrobé d'un BBSG0/14 + chaux hydratée.
2. Formulation d'un Béton Bitumineux à Module Amélioré – BBMA- par incorporation d'un additif -PR Plast-Sahara à différents taux.
3. Analyse des performances en fonction du taux d'ajout.
4. Proposition d'une formulation optimale.

Le BBMA 0/14 est destiné en couche de roulement pour un trafic de faible circulation (< 300 PL/J/SENS) sur une route communale, dans la Zone climatique II (WILAYA DE LAGHOAT)

Les matériaux utilisés sont :

- un bitume 35/50 et
- des granulats de sud algérien « dolomie calcaire » ayant des problèmes d'adhésivité (déjà réglé avec 1% de la proportion pondérale des granulats en chaux hydratée).
- un additif anti-orniérant à base de polyoléfines et pré-gavé au bitume, nommé PR PLAST SAHARA.

IV.2. Résultats de la formulation du béton bitumineux modifié à la chaux hydratée

Cette formulation a fait l'objet d'une étude dans le cadre du projet de fin d'étude [29] ;

L'identification des matériaux et la formulation du BBSG0/14 ont montré une mauvaise tenue à l'eau des mélanges, ce qui a nécessité l'ajout de la chaux hydratée. La teneur a été estimée à **1%** en substitution au poids du sable. Selon la norme **NF P 98-141** qui régit l'emploi de la chaux (**voir annexe B**)

IV.2.1. Rappels des caractéristiques des matériaux

Les matériaux ont été confectionnés par l'entreprise « ALTRO » :

- ✓ l'échantillon comprend les fractions granulaires suivantes : 0/3, 3/8, 8/15, 15/25, proviennent de la carrière « ALTRO » à Wilaya de LAGHOUAT
- ✓ Le bitume est de classe 40/50 provient de NAFTAL.
- ✓ **Analyse chimique a montrée que**

Les granulats sont classés dans la catégorie de la dolomie calcaire.

PH (NA 10390-2005) = **6.00**

Teneur en carbonate (XP P 94-048) = **26.25%**

- ✓ **L'identification des matériaux a donné comme résultats :**

Pour ce qui est des caractéristiques de fabrication des granulats

-Les granulats sont classés dans la catégorie « III » selon la norme (NF P 18-545), et d'après les caractéristiques intrinsèques, les granulats sont classés dans la catégorie « B » selon la norme P18-101.

-Les caractéristiques de fabrication du sable répondent aux spécifications de la catégorie « a » selon la norme (NF P 18-545).

-Le bitume est de classe 40/50.

IV.2.2. Résultats de la formulation du BBSG0/14 + 1% de chaux hydratée

IV.2.2.1. Squelette granulaire du mélange

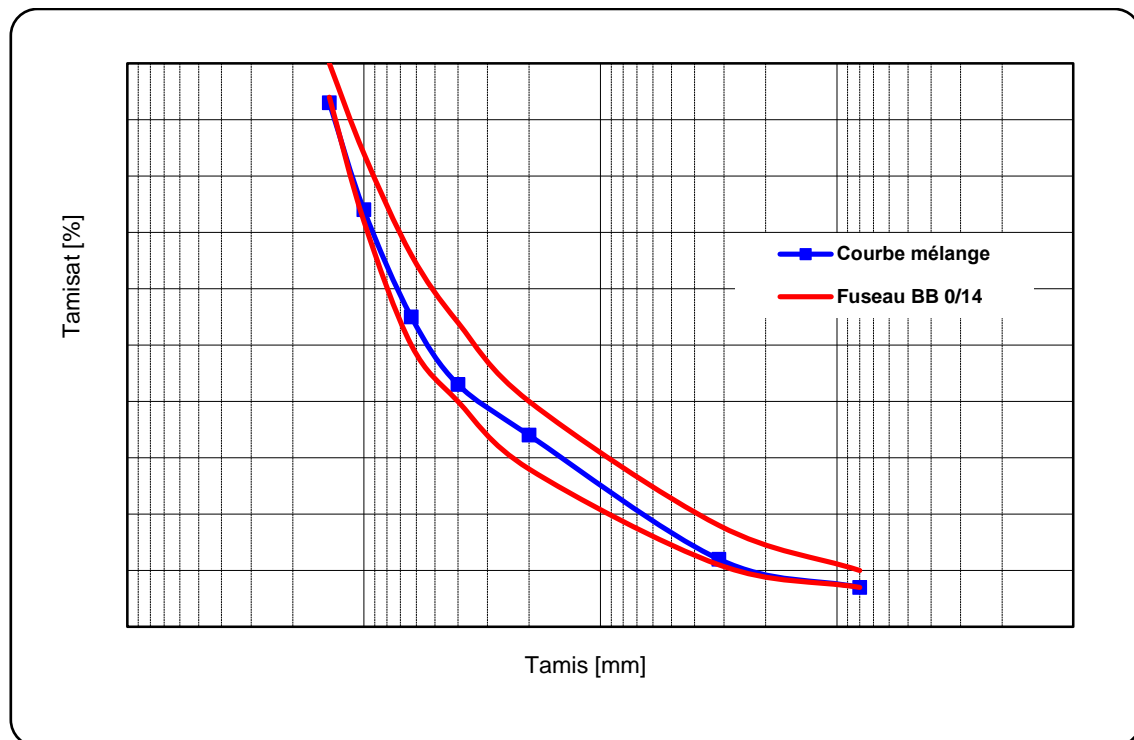


Figure IV.1. Position de courbe granulométrique dans le fuseau granulaire

Tableau IV.1. Les proportions des fractions granulaires

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

Tableau IV.2. La teneur en bitume employé

% Bitume	Poids (g)
5,57	602

IV.2.2.2. Performances Marshall

Les résultats des essais Marshall sur la formulation classique avec 1% de chaux hydraté sont présentés sur le tableau IV.3.

Tableau IV.3. Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0% de PR Plast

Essais	Résultats	Spécifications Marshall
Densité apparente	2.33	--
% de vide	4.89	3-5
Stabilité (kN)	14.76	≥ 10.5
Fluage (mm)	3.37	< 4
Quotient Marshall (kN/mm)	4.38	--
Tenue à l'eau	0.9	0.75 – 1

IV.3. Formulation du béton bitumineux a module amélioré – BBMA-

Par l'incorporation de L'Additif : PR PLAST Sahara qui est introduit à différents taux pondéraux (0.2%, 0.4% et 0.6% du poids total de l'enrobé)

IV.3.1. Résultats des performances Marshall du BBMA

❖ Les résultats de des essais Marshall sont représentés sur le *Tableau IV.4*

Tableau IV.4. Résultats des essais Marshall

	Mélange à 0.2% de PR PLAST SAHARA	Mélange à 0.4% de PR PLAST SAHARA	Mélange à 0.6% de PR PLAST SAHARA	Spécifications
Densité apparente	2.32	2.34	2.36	--
% de vide	5%	4.50%	3.50%	3-5
Stabilité (kN)	16.94	20	21	>10.5
Fluage (mm)	3.15	2.5	2.5	<4
Quotient Marshall (kN/mm)	5.37	8	8.4	--
Tenue à l'eau	0.92	0.92	0.95	0.75 – 1

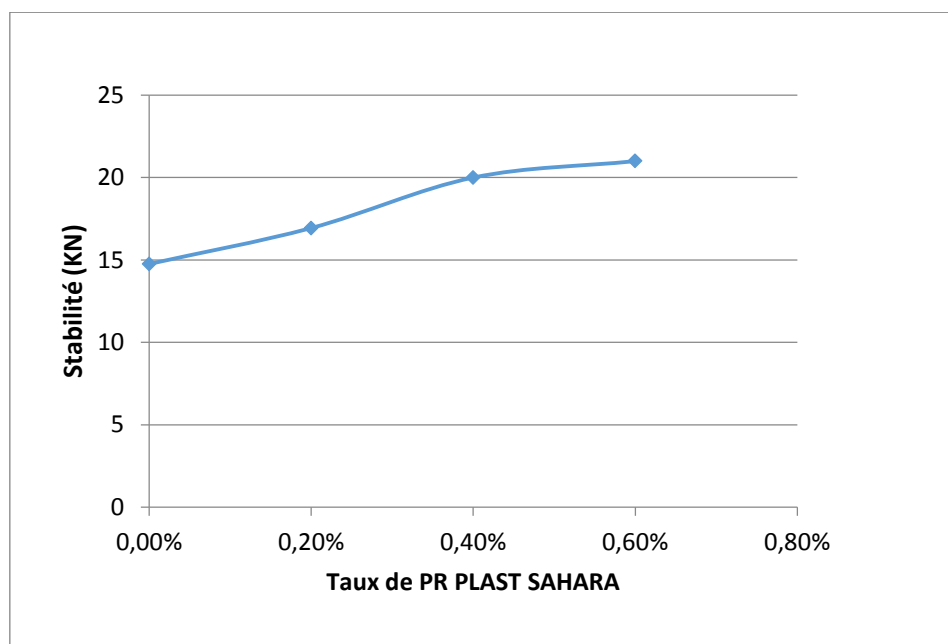
IV.3.1.1. Effets de l'ajout sur la stabilité

Figure IV.2. L'évolution de la stabilité du mélange avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA

Commentaire : la stabilité Marshall de l'enrobé s'améliore avec l'introduction de PR PLAST SAHARA pour atteindre les 21KN avec le taux de 0.6

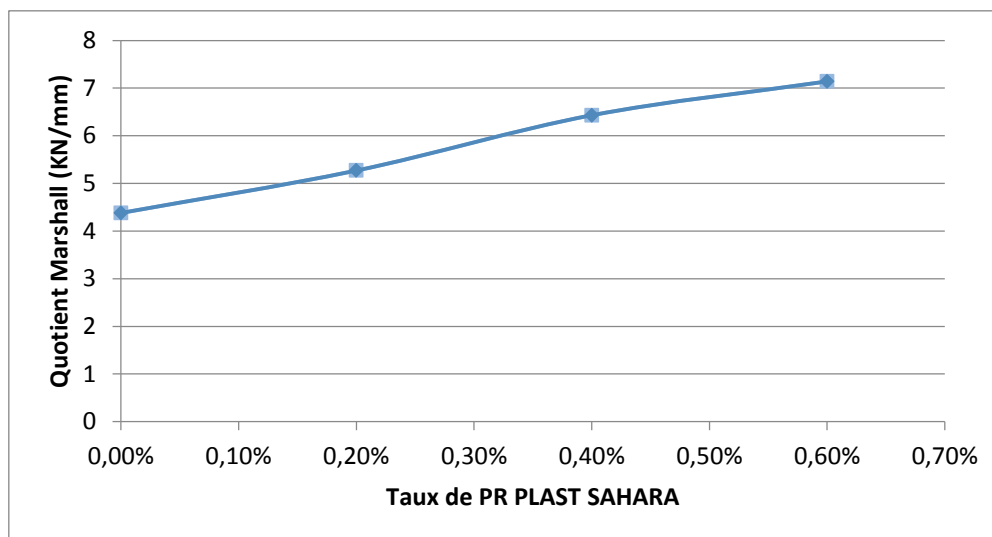
IV.3.1.2. Effets de l'ajout sur le quotient Marshall

Figure IV.3. L'évolution du quotient Marshall du mélange avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA

Commentaire : le quotient Marshall (indice de résistance aux déformations permanentes) a de même évolué avec l'introduction de PR PLAST SAHARA se qu'il est conséquence directe de l'augmentation de module complexe (Voir figure IV.6)

IV.3.1.3. Effets de l'ajout sur la compacité

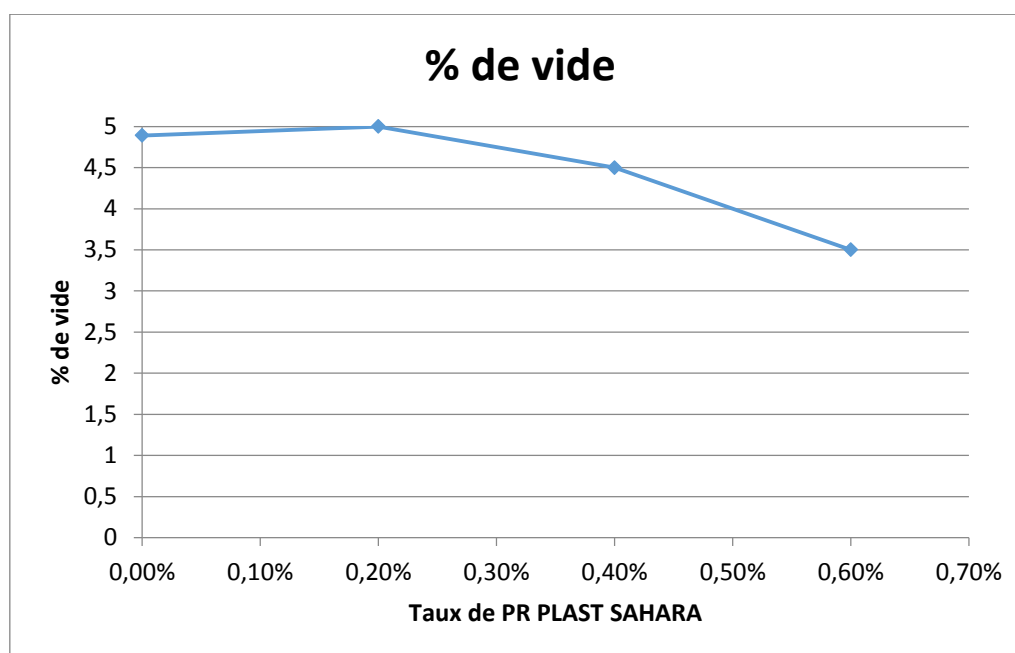


Figure IV.4. L'évolution du pourcentage de vide avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA

Commentaire : on remarque une chute libre de pourcentage de vide de mélange à partir de l'utilisation de à 0.4% de PR PLAST SAHARA, mais toujours dans la fourchette des spécifications, se qu'il prédit une meilleur compacité de l'enrobé a long terme.

IV.3.1.4. 1Effets de l'ajout sur la tenue a l'eau

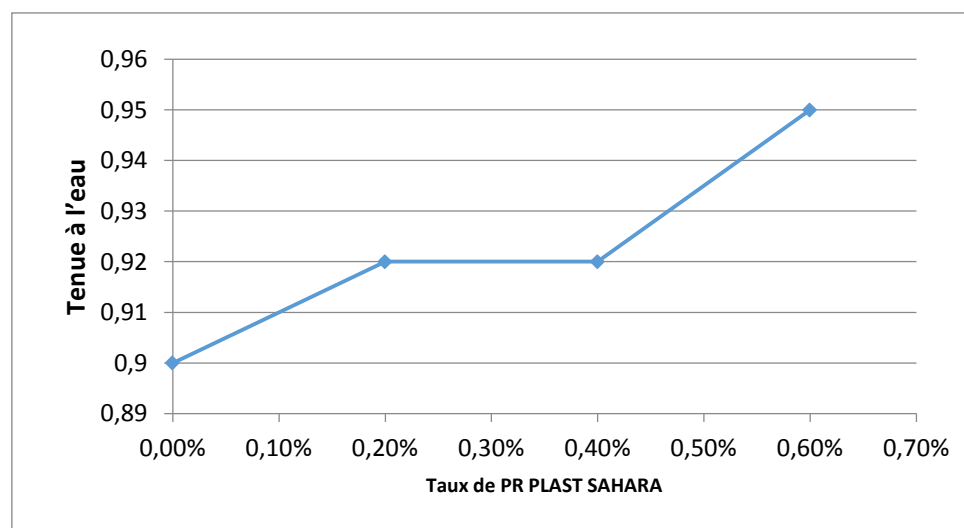


Figure IV.5. L'évolution de la tenue a l'eau du mélange avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA

Commentaire : la tenue a l'eau de l'enrobé évolue avec l'introduction de PR PLAST SAHARA de 0.9 pour atteindre les 0.95 avec le taux de 0.6%, ce qui est aussi conforme aux spécifications de norme NF P 98-150 pour des BBME (voir annexe B)

IV.3.2. Résultats du Module de rigidité pour le BBMA

Tableau IV.5. Résultats de l'essai NAT

Taux de PR PLAST SAHARA	Epaisseur de l'éprouvette (cm)	Charge verticale moyenne (KN)	Effort horizontal moyenne (K Pa)	Déformation horizontale moyenne (micron)	Temps de l'évaluation moyenne (ms)	Module de rigidité moyenne (NAT) (M Pa)	Spécifications BBME 0/10 ou 0/14 classe 1 selon NF P 98-150
0.0%	6.46	2.05	195.7	2.1	123.5	9 105	--
0.2%	6.46	2.05	196.0	1.7	123.5	10 937	9 000
0.4%	6.41	2.05	195.6	1.6	124.0	12 600	9 000
0.6%	6.42	2.05	196.0	1.5	124.0	12 900	9 000

IV.3.2.1. Effets de l'ajout sur le Module complexe

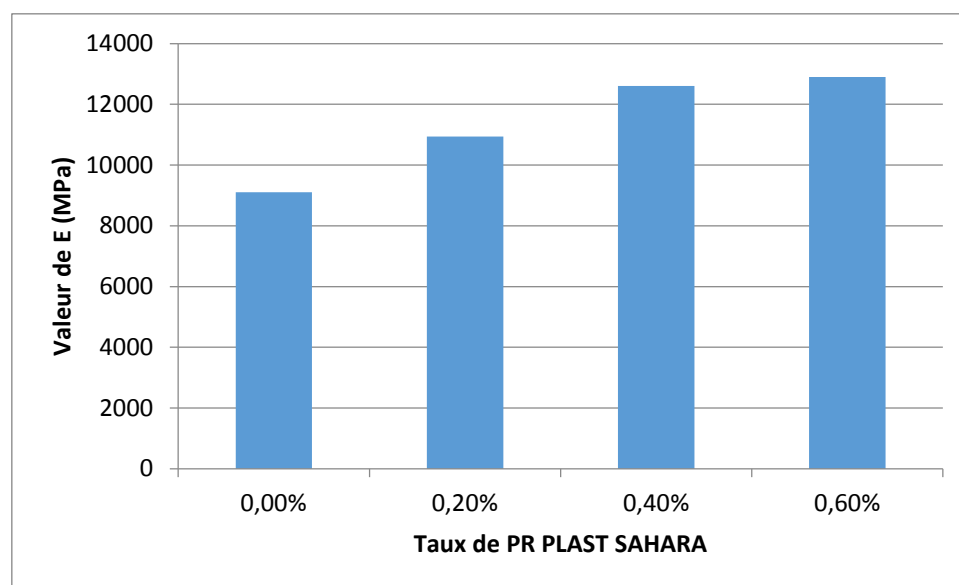


Figure IV.6. L'évolution de module complexe du mélange avec l'ajout de différents taux de PR PLAST SAHARA

Commentaire :

D'après la figure IV.6, on remarque que :

- A 0.2% d'ajout de PR PLAST SAHARA, le module complexe E a dépassé le seuil de 9000 MPa, alors d'après les spécifications de la norme NF P 98-150 (voir annexe II) le enrobé avec 0.2% de PR PLAST SAHARA peut être équivalent à la classe 1 de BBME, alors que les enrobés avec 0.4% et 0.6% sont équivalents aux BBME de classe 2.

IV.3.3. La formulation de BBMA optimale

D'après le plan d'expérimentations décider ,on opte pour le choix du mélange contenant 1% de chaux hydraté et 0.6% de PR PLAST SAHARA ,car en premier lieu se conforme au choix de la formule optimal par la méthode Marshall (vis-a-vis d'une meilleure stabilité d'un fluage < 4 ,puis d'une la tenue a l'eau conforme aux spécifications) ;mais aussi a ce taux la, les résultats du l'essai NAT montrent une équivalence de caractéristiques avec les BBME(par la méthode LCPC).

IV.4. Conclusions

L'ajout de PR PLAST SAHARA a modifié d'une manière favorable des performances de l'enrobé étudié, quelque soit le taux d'ajout.

La tenue à l'eau est quasi la même ; elle atteint les à 0 .95 à 0.60% d'ajout.

Le module de rigidité augmente et atteint la valeur préconisée pour un BBME selon la NF P 98-150.

Par ailleurs il est à remarquer que le taux d'ajout ne semble pas connaitre d'optimum dans l'intervalle d'étude : les performances s'améliorent avec l'augmentation du taux d'ajout ; cependant, à 0.60% le pourcentage des vides tend vers la valeur limite imposée par les spécifications présageant d'un taux tendant vers la limite d'ajout.

L'étude a montré l'efficacité de l'ajout du PR PLAST SAHARA. Le manque de laboratoire équipés en matériel adéquat pour la formulation des EME ne nous a pas permis de testé le comportement de l'enrobé modifié à l'orniérage, à la fatigue. Cependant une formulation par la méthode Marshall nous a parmi de constater que les performances Marshall ont augmentée et l'essai au NAT a donné un module de rigidité élevé, équivalent à ceux des EME ;

En résumé, on peut conclure qu'en attendant d'équiper nos laboratoires, nous pouvons bénéficier des avantages des techniques des EME pour fabriquer des enrobés améliorés sans toutefois prétendre avoir des EME puisqu'ils n'auront pas été testés à ce titre.

CONCLUSION
GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Par cette étude, nous avons ciblé le but de tester dans un autre cadre, un additif anti orniérant utilisé pour fabriquer des bétons bitumineux a module amélioré (BBMA) dans les pays a fortes intempéries mais aussi où les bitumes de grade dur font défaut comme l'Algérie,

Nous avons tenté l'introduction de l'additif anti orniérant PR PLAST SAHAR dans la formulation d'un enrobe conventionnel. Les performances ont été évaluées selon un plan d'essais de la méthode Marshall plus un essai NAT a faute d'équipement adéquat pour un BBME LCPC.

L'enrobé de base est une BBSG 0/14 plus 1% de la proportion pondérale de la fraction granulaire 0/3 en dope d'adhésivité qui est « la chaux hydraté ». Les résultats de l'étude expérimentale ont montré:

Une amélioration de la stabilité, du fluage et du quotient Marshall: ainsi que du module de rigidité (E) qui atteint le seuil de la classe 2 des BBME LCPC avec 0.6% de PR PLAST SAHARA de même le quotient gagne 171%

A ce taux le module de rigidité augmente respectivement de 70% par apport a l'enrobé de base (BBSG 0/14), et la tenue a l'eau de l'enrobé s'est amélioré on s'approchant beaucoup de 1 (elle atteint les 0.95),

En attendant la mise en place de laboratoires dotés de matériels adéquats pour la formulation des BBME, le PR Plast SAHARA révèle être un additif anti orniérant de qualité pour améliorer les enrobés conventionnels.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] http://www.planetetp.com/IMG/pdf/enrobés_minces_couche_surface_cle081189.pdf
- [2] http://www.planete-tp.com/IMG/pdf/enrobés_tres_minces_couche_surface_cle5913a7.pdf
- [3] http://www.brrc.be/crr/f15/f15_05d1.php
- [4] Fiche Technique enrobé bitumineux (JUILLET 2013), Bitume Québec, CANADA, 1 p, 978-2-923714-22-6.
- [5] <http://bitume.comprendrechoisir.com/comprendre/enrobe-froid>
- [6] Observatoire des Techniques de Chaussées (Avril 1997), Note d'information : les enrobés à module élevé, SETRA.
- [7] NF P 98-141 1999
- [8] Redouane NABAOUI Ingénieur au LPEE/CERIT, enrobés à module élevé (EME) et bétons bitumineux à module élevé (BBME) évolutions d'utilisation, Algérie.
- [9] http://www.planete-tp.com/img/pdf/enrobés_epais_couche_surface_cle5158b8.pdf
- [10] (NF P 98-150-1 de janv. 2008)
- [11] YOUSSEFI Taoufiq, ADM EL OTMANI KARIM, LPEE, Congrès National de la Route (2010) Thème 3 : Techniques innovantes et développement Durable Expérience Marocaine dans l'utilisation des enrobés et béton bitumineux à modules élevés (EME & BBME).
- [12] <http://www.google.com/patents/EP2382273A1?cl=fr>
- [13] http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:http://www.bitumequebec.ca/assets/application/events/files/30f7640dde8445f_file.pdf
- [14] http://www.liberation.fr/sciences/1996/01/10/qu-est-ce-qu-un-polymere_160549
- [15] Les Liants Hydrocarbonés Montréal 15-17/11/2005, Polymères et Bitumes Modifiés par des Polymères Jean-Pascal Planche – Total France PIARC C8 Rome 1998 Petersen Asphalte Research Conference 2004 Publications Total & LCPC 2004 et al.
- [16] Fiche technique de PR PLAST Sahara.
- [17] Yves BROSSEAUD (Directeur de Recherche au LCPC), les enrobés à module élevé : bilan de l'expérience de française et transfert de technologie.
- [18] Grimaux, 1977, Brown et al., 2001, Gubler et al., 2004, THESE D. T. NGUYEN.
- [19] <http://www.stac.aviation-civile.gouv.fr>.
- [20] THÈSE de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Relations entre les propriétés du liant et de l'enrobé, France.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [21] Mohamed AFECHKAR, La fatigue des enrobés bitumineux, impact de la température et de la nature des granulats, CNER, Maroc.
- [22] Prédiction des déformations permanentes des matériaux de chaussées (2007), Unité technique Division Matériaux et Structures de Chaussées, Conseillers d'étude LCPC : Pierre Horny, Didier Bodin, Ecole centrale Nantes, France.
- [23] Thèse de Doctorat, Etude de la fissuration et de la fatigue des enrobés bitumineux présentée devant L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- [24] Détermination du module complexe des enrobés au ministère des Transports du Québec, Matériaux et Infrastructures, Félix Doucet, ing. M. Sc. A. et Bruno Auger, tech. spéc., Canada.
- [25] NF EN 12697-26_Décembre 2006
- [26] Performances rhéologiques désenrobés et des enrobés spéciaux Yvan Paquin, ing. Directeur Technique de Construction DJL inc. 24 novembre 2010.
- [27] Hassan BAAJ, Thèse de doctorat présentée devant l'institut national des sciences appliquées de Lyon, France.
- [28] LINDER R., MOUTIER F., PENET M., et al. "La machine d'essais rhéologiques asservie (MAER-LPC) et son utilisation pour l'essai de traction LPC sur enrobés" Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées, mars-avril 1986, n°142, p.132-138.
- [29] DINE Hafsa, CHETTOUF Lynda (Juin 2014), L'influence de l'ajout de la chaux hydratée sur le phénomène de désenrobage, Projet de Fin d'Etude, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 123 p.

ANNEXES

ANNEXES

Annexe A : Lexique utile

A.1. Adhérence (CFL) :

La mesure d'un coefficient de frottement longitudinal (CFL) entre le revêtement et un pneumatique selon le principe d'une roue freinée avec un taux de glissement constant de l'ordre de 15 % proche de l'optimum des systèmes anti bloquants. Ce taux de glissement, générateur de la force d'adhérence, est obtenu par entraînement mécanique entre les deux roues porteuses et la roue de mesure.

A.2. Adhérence CFT :

L'axe de la roue de mesure est équipé d'un système de capteur de forces permettant l'évaluation de la réaction transversale pneu – chaussée « N », déduite de la mesure de l'effort encaissé par le moyeu de la roue de mesure et la charge verticale « P » supposée constante imposée au sol par l'intermédiaire de la roue de mesure.

Le coefficient de frottement transversal mesuré par le SCRIM, appelé CFT, est proportionnel au rapport N sur P.

La roue de mesure, équipée d'un pneu spécial standard, fait un angle d'environ 20° avec la direction du véhicule.

Le laser permettant l'évaluation du HS est disposé devant la roue et mesure dans la même trace que la roue de mesure.

La mesure est effectuée sur surface mouillée.

Le coefficient de frottement transversal calculé par la chaîne d'acquisition est affiché en temps réel et stocké.

A.3. Monomère :

Molécule utilisée pour la synthèse des polymères pouvant être associée à une autre molécule identique (= dimérisée), à deux autres identiques (= trimérisée), à une dizaine de molécules identiques (= oligomérisée) ou à plusieurs centaines de molécules identiques (= polymérisée).

Molécule libérée lors de l'hydrolyse d'un polymère, tels que le glucose et les acides aminés.

A.4. Le poly (styrène-butadiène-styrène) :

Ou SBS, est un caoutchouc dur, qui est utilisé pour des objets comme les semelles des chaussures, la gomme des pneus, et à d'autres endroits où la longévité est importante. c'est un copolymère appelé copolymère bloc. Sa chaîne principale est faite de trois segments. Le premier segment est une longue chaîne de polystyrène, le segment du milieu est une longue

ANNEXES

chaîne de polybutadiène, et le dernier segment est une autre longue section de polystyrène. Voici la figure:

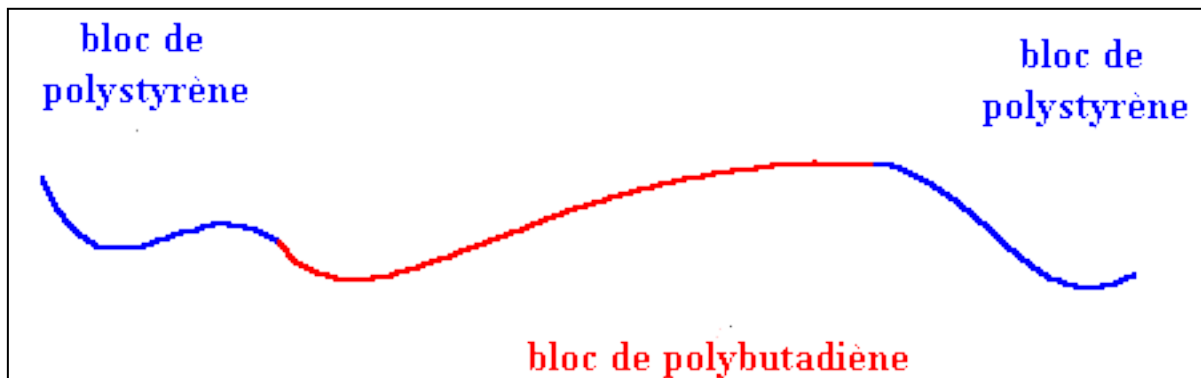


Figure A.1. Schématisation du Le poly (styrène-butadiène-styrène)

A.5. Styrène-Butadiène-Rubber (SBR) :

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

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

A.6. Elvaloy :

Utilisé seul ou mélangé à d'autres résines, Dupont Elvaloy ® copolymères ajouter performances dans des domaines tels que la flexibilité, la ténacité, la résistance aux intempéries et «soft touch». Exemples d'utilisation finale comprennent les adhésifs, les plastiques modifications, l'asphalte.

Les producteurs de polymère modifié asphalte constatent souvent qu'ils peuvent optimiser les performances du liant par Elvaloy, les essais sur les données de performance des route à travers le monde montrent que Elvaloy ® peut être un modificateur de performance

ANNEXES

supérieure pour polymère modifié asphalte et de nombreux catégories et types de matériau a base d'asphalte.

A.7. Éthylène-Vinyle-Acétate :

L'acétate de vinyle d'éthylène (EVA) est le copolymère d'éthylène et d'acétate de vinyle. Il s'agit d'un matériau très élastique qui peut être frittée pour former un matériau poreux similaire à du caoutchouc, mais avec une excellente ténacité. Il est trois fois plus souple que le polyéthylène basse densité (LDPE), montrant l'allongement en traction de 750%, avec un pic de température de fusion de 250 ° F (96 ° C).

Ce matériau présente de bonnes propriétés de barrière, ténacité à basse température, résistance à la fissuration, les propriétés imperméables à l'eau adhésive thermo fusibles, et la résistance aux rayons ultraviolets. EVA a peu ou pas d'odeur et est en concurrence avec caoutchouc et en vinyle dans de nombreuses applications.

A.8. Acide poly phosphorique :

Deux ou plus molécules d'ortho phosphorique peuvent être liées par condensation pour former des molécules plus grandes en éliminant l'eau. De cette façon, une série d'**acides poly A.1.**

A.9. Phosphoriques :

Il peut être obtenue de l'acide poly phosphorique peut être obtenu en déshydratant la bonne qualité d'acide phosphorique. La matière première utilisée pour produire l'acide poly phosphorique est une solution d'acide phosphorique concentrée à environ 50% - 60% P₂O₅. Pour la déshydratation, notre Pulvaporizator est utilisé pour pulvériser, vaporiser et amener la molécule à la température désirée, pour que le phénomène de déshydratation puisse se produire. Le mélange d'acide phosphorique et des gaz est ensuite refroidi et séparé; les gaz sont lavés et rejetés à l'atmosphère, et l'acide poly phosphorique est récupéré.

A.10. Gilsonite :

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

ANNEXES

Annexe B : Les spécifications des composants des BBME (NF P 98-141 Novembre 1999)

- ✓ Les BBME sont utilisés en couche de roulement ou en couche de liaison

Tableau B.1. Caractéristiques minimales des granulats pour BBME

	Couche de roulement	Couche de liaison
Résistance mécanique des gravillons	C	D
Caractéristiques de fabrication des gravillons	III	III
Caractéristiques de fabrication des sables	a	a
Angularité des gravillons et des sables ¹⁾	RC ₂	—
<i>1) L'incorporation de 10 % de sable roulé, au maximum, peut être admise.</i>		

B.1. Composition classique:

- Courbe continue
- 7,5% de fines
- 29 à 30% de passant à 2mm
- 45 à 48% de passant à 6,3mm

B.2. Emplois de Chaux :

En cas d'utilisation de filler d'apport présentant une certaine teneur en chaux vive, la teneur en chaux vive de la masse totale du BBME ne doit pas excéder 1 %.

B.3. Dopes et additifs :

L'adjonction éventuelle d'un dope doit être conforme à la norme NF P 98-150.

Norme NF P98 -150

"Les dopes dont des composés tensio-actifs permettant d'améliorer l'adhésivité du liant sur les granulats. Les additifs sont des composés organique ou minéraux destinés à modifier des caractéristiques physiques et mécaniques des enrobés ces produit sont définis par une fiche technique qui fixe leurs condition de transport, de stockage et d'emplois (dosage et mode d'introduction)."

Si l'obtention des performances spécifiées au (Tableau II.3) le nécessite, un additif peut être ajouté à l'occasion de l'opération d'enrobage.

ANNEXES

B.4. Module de richesse minimal :

Tableau B.2. Valeurs du module de richesse

Type de BBME	BBME 0/10	BBME 0/14
K	3,5	3,3

B.5. Pourcentages de vides : selon les normes NF P 98-150 et XP P 98-151 doit être compris entre 4 % et 8 %.

B.5. Evaluation des caractéristiques des BBME

Tableau B.3. Evaluation des caractéristiques des BBME [2]

Norme EME 0/14	Epaisseur (cm)		Module de richesse min	% des vides PCG à 10 et 80g	Duriez RH /Rs	Ornière a 30000 Cycles à 60°C % vide 3/6	Module complexe (MPa) à 15°,10Hz NF P,98-260-2	Fatigue 10) et 25Hz NF P,98-261-1(µdef)	Compacité (%vides)
	6/9	5							
Classe1 NF P 98-141 1999	6/9	5	3.3	≥ 11 et 4/9	≥ 0.8	≤ 10.0	≥ 9 000	≥ 110	4/8
Classe2 NF P 98-141 1999	6/9	5	3.3	≥ 11 et 4/9	≥ 0.8	≤ 7.5	≥ 12 000	≥ 130	4/8
Classe 3 NF P 98-138 Nov. 1999	6/9	5	3.3	≥ 11 et 4/9	≥ 0.8	≤ 5.0	≥ 12 000	≥ 100	4/8

B.6. Profondeur moyenne de texture PMT (Ex: Hauteur au sable vraie HSV)

Selon NF EN 13036-1, cet essai permet de connaître la macro texture d'une surface de revêtement qui consiste à mesurer la hauteur moyenne de la texture d'une surface par remplissage du volume des vides à l'aide d'un volume fixé de billes de verres spécifié, qu'on étale en forme de cercle, comparaison des formulations d'enrobés à chaud pour couches de roulement des chaussées très circulées utilisées en France et en Algérie du point de vue sécurité (glissance) et orniérage après la surface de ce cercle, la profondeur moyenne de texture sera calculée par la formule suivante :

ANNEXES

$$PMT [mm] = \frac{4 V}{\pi D^2}$$

V : Volume de l'échantillon = 25 cm³ de billes de verres calibrées

D : Diamètre moyen de la surface couverte de billes de verres (en mm).

On mesure au moins 4 diamètres pour calculer la surface. La gamme des résultats est de 0,3 à 3 mm selon l'état de la couche de roulement. Cet essai ne s'applique que lorsque l'état de la chaussée est sec, on vérifie aussi l'état de propreté de la chaussée, afin que cet essai soit représentatif de la réalité.

Les caractéristiques de l'état de surface dépendent de la formule du mélange, effectivement lorsque la PMT est relativement élevée cela explique la présence d'un pourcentage de vides élevé, on peut déduire que la courbe granulométrique du mélange est discontinue ou l'existence d'un faible taux de fines dans la formule.

Les irrégularités de la surface de la chaussée pour la macro texture sont de l'ordre de :

- 0,5 à 50 mm pour la gamme de dimension horizontale.
- 0,2 à 10 mm pour la gamme de dimension verticale.

La macro texture contribue essentiellement au drainage d'eau (à vitesse élevé), elle contribue aussi à l'indentation (déformation des pains de gomme au contact avec des aspérités de chaussée, ce qui est en relation directe avec l'adhérence et le phénomène de glissance (gérant de forces de frottements pneumatique - chaussée).