

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

**Projet de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme
d'Ingénieur d'Etat en Génie Civil**



Réalisé par :

✚ HARKAT Billal
✚ BENDJABALLAH M^{ed} El Hadi

Encadré par :

Dr. M.MORSLI

Promotion Juin 2010

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier en premier lieu Dieu, le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force, la volonté et le courage nécessaire pour achever ce travail.

Il nous est particulièrement agréable d'exprimer nôtres vifs remerciements à notre promotrice Dr. **MORSLI** qui nous a proposé le sujet, pour toute l'aide et le soutien durant le travail.

Nous n'oublierons pas **Mr. MAGRAMANE**, chef de service du département des produits noirs, au laboratoire de Contrôle Technique de Travaux Publiques – CTTTP- .

Nos pensées vont vers Messieurs **FAOUZI et MOKHTAR**, techniciens au laboratoire CTTTP, pour leur aide jusqu'à l'achèvement de nos essais. Qu'ils trouvent ici nos profonds respects et remerciements.

Nos remerciements vont également au président et aux membres de jury pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

- ☞ A mes chers parents pour toute l'aide et le soutien qu'ils m'ont offert durant toute ma vie.*
- ☞ A mon frère et mes sœurs et à toute ma famille*
- ☞ A mes amis, sans exception.*

Bissal

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

œ *Mes très chers parents pour leurs sacrifices et pour tous ce qu'ils m'ont offerts.*

œ *Mes frères.*

œ *Ma famille.*

œ *A tous mes amis.*

Mohamed El Hadi

Résumé :

Notre étude fait le point sur les méthodes de formulations d'enrobés pour assise de chaussée, appliquées en France et en Algérie. Une attention particulière a été apportée aux Enrobés à Module Elevé, technique récemment introduite en Algérie.

Dans la partie expérimentale, nous avons procédé à la formulation d'un enrobé conventionnel. Puis incorporé un additif –le PR PLAST MODULE - au mélange optimal conventionnel à un dosage pondéral de 0.3 ; 0.6 ; 0.9 et 1.2 %.

Les performances ont été évaluées grâce aux essais Marshall et Duriez et complétées par l'essai de module au NAT.

Les résultats obtenus montrent que la modification par le PR Plast Module améliore les performances. En effet, à 1.2% on observe une amélioration de la stabilité Marshall, de la tenue à l'eau et du module respectivement de (28% ,5.55%,60%).

Mots clés : enrobé bitumineux, module, couche d'assise, enrobé à module élevé, fatigue, additifs.

ملخص:

نركز في دراستنا على الطرق المستخدمة لإيجاد صيغ الإسفلت- المستعمل في طبقة التسوية – المطبقة في فرنسا و الجزائر. و نولي اهتماماتنا في هذا البحث على الإسفلت ذو المعامل العالي، التقنية المعتمدة حديثاً في الجزائر. في الجانب التطبيقي قمنا بإعداد إسفلت بدون إضافة، ثم انطلاقاً من صيغته المثلى قمنا بإضافة نسب مئوية من PR PLAST MODULE للمزيج ممثلة في 0.3 %، 0.6 %، 0.9 %، 1.2 % - جرى تقييم الخصائص عن طريق اختبارات Marshall و Duriez ثم ختمناها بقياس المعامل باستعمال NAT. وأظهرت النتائج أن إضافة PR PLAST MODULE يحسن من الخصائص الميكانيكية للمزيج. و من أجل النسبة 1.2 % نلاحظ تحسن خصائص الإسفلت حيث أعطت من أجل اختبارات Marshall و Duriez والمعامل، هذه النسب على التوالي - 28% ; 5,55% ; 60% -

كلمات مفتاحية : إسفلت، معامل، طبقة الأساس، إسفلت ذو معامل عالي، تعب، المواد المضافة

Abstract:

Our study focuses on methods of coated formulations for floor seating, applied in France and Algeria. Particular attention was paid to High Modulus Asphalt, technology recently introduced in Algeria.

In the experimental part, we proceeded to the formulation of conventional asphalt. Then built an additive-PLAST MODULE PR - in an optimal mix of conventional dosage weight of 0.3, 0.6, 0.9 and 1.2%.

Performance was evaluated through testing and Marshall and Duriez and supplemented by the test module NAT.

The results show that changing the PR Plast module improves performance. Indeed, there is a 1.2% improvement in the Marshall stability, the water resistance and modulus, respectively (28%, 5.55%, 60%).

Keywords: asphalt, power, base layer, coated at high modulus, fatigue, additives.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : STRUCTURE DE CHAUSSEE

CHAPITRE II : LES ENROBE BITUMINEUX

CHAPITRE III : LES ENROBES A MODULE ELEVE

ETUDE EXPERIMENTALE

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

CONCLUSION GENERALE

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
------------------------------------	----------

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	4
---------------------------------------	----------

CHAPITRE I : STRUCTURE DE CHAUSSEE

I.1 CONSTITUTION DES STRUCTURES DE CHAUSSEE	5
----------------------------------------------------------	----------

I.2 LES DIFFERENTS TYPES DE STRUCTURES DE CHAUSSEE	6
-----------------------------------------------------------------	----------

I-2-1-LES CHAUSSEES SOUPLES	6
------------------------------------------	----------

I-2-2-LES CHAUSSEES BITUMINEUSES EPAISSES	7
--------------------------------------------------------	----------

I-2-3-LES CHAUSSEES A ASSISE TRAITEE AUX LIANTS HYDRAULIQUES	7
---------------------------------------------------------------------------	----------

I-2-4-LES CHAUSSEES A STRUCTURE MIXTE	7
----------------------------------------------------	----------

I-2-5-LES CHAUSSEES A STRUCTURE INVERSE	7
------------------------------------------------------	----------

I-2-6-LES CHAUSSEES EN BETON DE CIMENT	8
-----------------------------------------------------	----------

I-3-COMPORTEMENT DE CHAUSSEE BITUMINEUSE	8
-------------------------------------------------------	----------

I.3.1 PRINCIPAUX MODES DE DEGRADATION	8
----------------------------------------------------	----------

I.3.2 SOLLICITATIONS DANS LA CHAUSSEE	9
----------------------------------------------------	----------

I.4 CONCLUSION	10
-----------------------------	-----------

CHAPITRE II : LES ENROBE BITUMINEUX

II.1 DEFINITION	11
------------------------------	-----------

II.2 HISTOIRE DES BITUMES	11
----------------------------------------	-----------

II.3 ESSAIS SUR ENROBES	14
--------------------------------------	-----------

II.3.1 MANIABILITE DES ENROBES	15
II.3.1.1 La Presse à Cisaillement Giratoire	15
II.3.1.2 Essai Marshall	16
II.3.2 TENUE A L'EAU	17
II.3.3 DEFORMATION PERMANENTE	18
II.3.4 MODULE	19
II.3.5 FATIGUE	22
II.4 GENERALITES SUR LES CONSTITUANTS	23
II.4.1 LES GRANULATS	23
II.4.2 LES LAINTS HYDROCARBONES	23
II. 4.2.1 Types de bitumes	23
II. 4.2.2 Adhésion liant-granulat	24
II. 4.2.3 Essais de caractérisation	25
II.4. 3 LES ADDITIFS	28
II.4.4.1 Les produits	28
II.4.4.2 Domaine d'application des additifs	30
II. 5 ETUDE DE FORMULATION	30
II.5.1 MELANGE GRANULAIRE	30
II.5.2 TENEUR EN LIANT	31
II.5.3 METHODES DE FORMULATION	32
II. 5.3.1 Méthode CTTP (Algérie)	32
II. 5.3.2 Méthode LCPC (France)	33
II. 5.3.3 Comparaison entre les deux méthodes.....	35
II.6 CONCLUSION	36

CHAPITRE III : LES ENROBES A MODULE ELEVE

III.1 INTRODUCTION	37
III.2 EVOLUTION DES ENROBES D'ASSISES	37
III.2.1 OBJECTIFS DE L'EVOLUTION DES ENROBES	38
III.2.2 DISPOSITIONS POUR PARVENIR AUX OBJECTIFS	38
III.3 DEFINITION.....	39
III.4 PERFORMANCES ET FORMULATIONS	40
III.4.1 CONSTITUANTS DES EME	40
III.4.2 PERFORMANCES DES EME	41
III.5 EPAISSEURS D'UTILISATION DES EME	43
III.6 DOMAINES D'EMPLOI ET PRECAUTIONS D'USAGE	44
III.6.1 DOMAINES D'EMPLOI DES EME 2	44
III.6.2 PRECAUTIONS D'USAGE	45
III.7 DEVLOPPEMENT ET UTILISATION DE LA TECHNIQUE EN ALGERIE	45
III.8 CONCLUSION	47
ETUDE EXPERIMENTALE	48

CHAPITRE IV : ETUDE EXPERIMENTALE

IV.1 PROBLEMATIQUE	49
IV.2 METODOLOGIE DE LA PARTIE EXPERIMENTALE	49
IV.2.1 METHODOLOGIE D'OPTIMISATION.....	49

IV.2.1 PERFORMANCES DES ENROBES AVEC L'AJOUT	50
IV.3 ETUDE DE FORMULATION	52
IV.3.1 LES MATERIAUX	52
IV.3.2 FORMULATION DE L'ENROBE CLASSIQUE	58
IV.3.2.1 Mélange granulaire	58
IV.3.2.2 Détermination des teneurs en bitume	59
IV.3.2.3 Détermination du mélange optimal	61
IV.3.2.4 Résultats et commentaires	65
IV.4 EVALUATION DES PERFORMANCES EN FONCTION DE % DE PR PLAST	66
IV.4.1 COMPOSITIONS DES MELANGES	67
IV.4.2 PERFORMANCES DES MELANGES	68
IV.4.3 RECAPITULATIF DES RESULTATS ET GRAPHES	73
IV.5 CONCLUSION	80
CONCLUSION GENERALE	82
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	
ANNEXES	
ANNEXE I : ESSAIS SUR GRANULATS	
ANNEXE II : ESSAIS SUR BITUME	
ANNEXE III : CLASSIFICATION DES MATERIAUX	
ANNEXE IV : ESSAIS SUR ENROBES BITUMINEUX	

LISTE DES TABLEAUX:

Tableau II-1: Type d'essais pour les enrobés bitumineux	35
Tableau III-1: Valeurs minimales du module de richesse	41
Tableau III-2: Pourcentages de vides à respecter pour les EME	41
Tableau III-3: Performances mécaniques des EME et de GB	42
Tableau III-4: Epaisseurs d'utilisation par couche	43
Tableau III-5: Comparaison de structures (GB- EME)	44
Tableau IV-1: Performances d'une GB/20 et EME /20 selon la méthode LCPC	52
Tableau IV-2: Provenance des granulats utilisés	52
Tableau IV-3: Caractéristiques de fabrication des granulats	53
Tableau IV-4: résultats de l'analyse granulométrique	54
Tableau IV-5: Caractéristiques intrinsèques des granulats	55
Tableau IV-6: Caractéristiques du bitume	56
Tableau IV-7: le fuseau GB 0/20	58
Tableau IV-8: Composition du mélange Granulométrique	58
Tableau IV-9: calcul de la surface spécifique	60
Tableau IV-10: Teneurs en bitume retenues	61
Tableau IV-11: % de vide (TL1)	62
Tableau IV-12: Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL1)	62
Tableau IV-13: Tenue à l'eau (TL1)	62
Tableau IV-14: % de vide (TL2)	63
Tableau IV-15: Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL2)	63
Tableau IV-16: Tenue à l'eau (TL2)	63
Tableau IV-17: % de vide (TL3)	64
Tableau IV-18: Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL3)	64
Tableau IV-19: Tenue à l'eau (TL3)	64
Tableau IV-20: Résultats des essais MARSHALL	65

Tableau IV-21 : fiche technique du PR PLAST MODULE	66
Tableau IV-22: la Composition optimale du mélange bitumineux	67
Tableau IV-23: Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0% de PR Plast	68
Tableau IV-24: Résultats de module de rigidité avec 0% de PR Plast	68
Tableau IV-25: Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.3% de PR Plast..	69
Tableau IV-26: Résultats de module de rigidité avec 0.3% de PR Plast	69
Tableau IV-27: Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.6% de PR Plast..	70
Tableau IV-28: Résultats de module de rigidité avec 0.6% de PR Plast	70
Tableau IV-29: Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.9% de PR Plast...	71
Tableau IV-30: Résultats de module de rigidité avec 0.9% de PR Plast	71
Tableau IV-31: Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 1.2% de PR Plast...	72
Tableau IV-32: Résultats de module de rigidité avec 1.2% de PR Plast	72
Tableau IV-33: Récapitulatif des résultats	73

LISTE DES FIGURES:

Figure I-1: Les différentes couches d'une chaussée	6
Figure I-2: Chaussée souple	6
Figure I-3: Chaussée bitumineuse épaisse	7
Figure I-4: Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques	7
Figure I-5: Chaussée à structure mixte	7
Figure I-6: Schématisation des sollicitations induites par le trafic	8
Figure I-7: Sollicitations induites par la température	9
Figure I-8: Déformation longitudinale à la base d'une couche de chaussée	9
Figure II-1: Presse à cisaillement giratoire	15
Figure II-2: principe de compactage à la PCG	15
Figure II-3: principe de l'essai Marshall	16
Figure II-4 : Essai Duriez	18
Figure II-5 : Ornièreur LCPC	18
Figure II-6 : Déformation d'une éprouvette– Essai de traction indirecte NAT – ...	19
Figure II-7 : Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps	20
Figure II-8 : Appareil pour essai de module de rigidité (NAT)	21
Figure II-9 : Dispositif de montage de l'éprouvette	21
Figure II-10 : Capteurs de déformation	22
Figure II-11 : Essai de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales..	22
Figure II-12 : Désenrobage d'un gravillon en présence d'eau	25
Figure II-13 : Domaines thermiques des sollicitations mécaniques et essais correspondants	25
Figure II-14 : Essai de pénétrabilité pour le bitume	26
Figure II-15 : Détermination du point de ramollissement	26
Figure II-16 : L'essai RTFOT	27
Figure II-17 : Procédure de formulation en Algérie	32

Figure II-18 : Procédure de formulation en France	33
Figure II-19 : Résumé des niveaux de l'épreuve de formulation	34
Figure III-1: évolution des enrobés d'assises	39
Figure III-2 : Epaisseurs des couches de la 2 ^{ème} Rocade	46
Figure IV-1: schéma présente la démarche expérimentale	51
Figure IV-2: Courbes granulométriques des fractions granulaires	55
Figure IV-3: la courbe de mélange s'insère dans le fuseau GB 0/20	59
Figure IV-4: <i>PR Plast</i> sous forme granulés	66
Figure IV-5: Variation de % de vide en fonction de % de <i>PR Plast</i>	74
Figure IV-6: Variation de la stabilité Marshall en fonction de % de <i>PR Plast</i>	75
Figure IV-7: Variation de fluage Marshall en fonction de % de <i>PR Plast</i>	76
Figure IV-8: Variation de quotient Marshall en fonction de % de <i>PR Plast</i>	77
Figure IV-9 : Variation de la tenue à l'eau en fonction de % de <i>PR Plast</i>	78
Figure IV-10 : Variation de module de rigidité en fonction de % de <i>PR Plast</i>	79

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Problématique

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

Les fermetures fréquentes de routes pour réparation et remise en état constituent un problème croissant, car elles contribuent de manière importante à l'augmentation des encombrements : les travaux sont de plus en plus difficiles, en raison des gênes et des temps d'attente qu'ils occasionnent aux usagers.

Aussi, le maintien en état de service des autoroutes et routes principales sans perturber le flux de circulation représente un défi majeur pour les maîtres d'ouvrage et les équipes opérationnelles qui gèrent la construction et l'entretien des routes. De ce défi est née la notion de chaussée durable, ou chaussées souples adaptées aux véhicules lourds.

Dans le cas d'autoroutes et routes fortement circulées (trafic supérieur à 300 PL /jour /sens), le corps de chaussée est généralement réalisé en enrobés bitumineux. Ces derniers sont des matériaux reconstitués à partir de granulats qui forment le squelette, la cohésion est assurée par du bitume. Le mélange obtenu est un matériau hétérogène auquel la matrice confère des propriétés viscoélastique, cependant ses caractéristiques sont fortement dépendantes de la nature du bitume utilisée.

Les enrobés ont connu à travers le temps, au grès des avancées technologiques, des progrès notables pour répondre aux exigences des décideurs et usagers de la route.

Aujourd'hui, avec la mise au point de bitumes durs, une nouvelle génération d'enrobés est née : technique d'amélioration des performances des enrobés conventionnels a été mise au point : les Enrobés à Module Elevé qui, en plus du module élevé, présentent une plus grande résistance à la fatigue que les mélanges conventionnels.

Grace à cette technique, le dimensionnement qui en résulte aboutit à des épaisseurs de couches notablement plus faibles, ce qui permet de limiter l'utilisation de granulats de bonne qualité et de réduire les volumes de matériaux à transporter. Par ailleurs, la limitation de l'épaisseur des couches permet le maintien des gabarits sous ouvrage et,

dans certains cas, évite la mise à niveau des équipements tels que bordures et glissières. L'entretien est quasiment nul les premières années de mise en service.

L'invention des EME est attribuée à la France où ils ont fait leur apparition à grande échelle il y a plus de 20 ans. Ces matériaux font l'objet d'une norme et sont couramment appliqués sur des chaussées fortement sollicitées. L'expérience s'est étendue en Belgique, en République Tchèque, Irlande, Suisse, Pologne et récemment en Algérie. C'est principalement la mise au point du bitume dur - bitumes 10/20, 15/25 ou 20/30, dans les années 1990, qui a permis l'émergence des EME. Un bitume dur possède des caractéristiques remarquables, pour apporter aux couche d'assise (enrobé à module élevé EME) et couche de liaison (BBME) les hautes performances attendues. Lorsque ce type de bitume fait défaut, un bitume de grade traditionnel (35/50) peut être utilisé avec des additifs de nature organique (gilsonite, asphalte dur,...) sous forme de fines ou de granulés, pour durcir le liant et augmenter la rigidité de l'enrobé. Ce pourrait être une solution pour réaliser des EME dans les pays du Maghreb (Brosseaud Yves, 2009).

Situation en Algérie

L'Algérie s'est lancée dans réalisation d'un réseau routier moderne dans le cadre de grands projets structurants tels que la liaison autoroutière Est-Ouest, la rocade autoroutière des hauts plateaux, les pénétrantes Nord – Sud, et les différentes liaisons : 2^{ème}, 3^{ème}, et 4^{ème} rocade autoroutières d'Alger.

L'Algérie ne voulant pas rester en deçà des progrès réalisés dans le monde, a fait appel à des groupements étrangers pour une réalisation modernes de ses infrastructures routières intégrant des techniques innovantes dont les EME.

Cependant, deux aspects sont à signaler à propos de l'importation de cette technique en Algérie :

Pour la plus part des sections réalisée avec les EME, faute de la disponibilité de laboratoire équipé en vue de l'épreuve de formulation, cette dernière s'est effectuée à l'étranger et contrôlé par un autre organisme étranger.

Pas de disponibilité de bitume pur dur, un additif fourni par Chimibat a été introduit dans les mélanges bitumineux.

Notre sujet s'inspire des « techniques innovantes en construction routière pour assise de chaussée », on s'est intéressé particulièrement aux EME en couches d'assise. Le travail s'est déroulé en deux principales étapes : recherche bibliographique et partie expérimentale.

Dans la partie bibliographique nous avons passé en revue

- les différents types de chaussées,
- les enrobés
- un chapitre est consacré aux EME.

Dans la partie expérimentale, nous avons :

- effectué les essais de caractérisations sur le bitume et les granulats,
- procédé à la formulation d'un enrobé conventionnel.
- incorporé un additif Module -le même que celui utilisé pour le cas des EME Algérie- au mélange optimal conventionnel et suivi l'évolution des performances des mélanges en fonction du taux d'ajout.

Ce travail nous a permis de nous immerger dans le domaine des produits noirs, de nous familiariser avec la formulation des enrobés conventionnels, de nous rapprocher des EME en attendant d'avoir, dans un avenir qu'on espère proche, un laboratoire national équipé en matériel en adéquation avec les techniques innovantes.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

Structure de chaussée

I.1 CONSTITUTION DES STRUCTURES DE CHAUSSEE

Les chaussées se présentent comme des structures multicouches (figure I-1), qui sont mises en œuvre pour répartir les charges induites par le trafic que le sol support seul ne pourrait pas soutenir.

La structure complète comprend :

Les couches de surface comprennent :

- **la couche de roulement** est la couche supérieure de la structure routière sur laquelle s'exerce directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Elle attribue à la chaussée les caractéristiques suivantes : adhérence, drainabilité, uni, bruit de roulement.

- **la couche de liaison** est la couche intermédiaire entre la couche de roulement et la couche de base. Elle contribue à l'amélioration de l'uni de la chaussée et renforce la protection mécanique, thermique et hydraulique de l'assise par imperméabilisation. Elle supporte principalement les efforts tangentiels et assure un rôle primordial contre la formation d'ornières.

Les couches d'assise comprennent :

- **la couche de base** est la couche située sous la couche de surface assurant une protection thermique de la plate-forme (couche de forme) et une capacité portante du revêtement. Elle est destinée à répartir les efforts dus aux charges verticales.

- **la couche de fondation** est la couche située sous la couche de base, destinée à répartir les efforts dus aux charges verticales sur le sol de fondation et à former le support du revêtement. Elle assure ensemble avec la couche de base la protection thermique de la plate-forme.

L'accotement est la plate-forme contiguë à la chaussée, renforcé ou non pour permettre l'immobilisation des véhicules.

Le fossé est une partie de la route formant une tranchée ouverte dans le terrain servant à la récolte et l'évacuation des eaux de surface.

La couche de forme est constituée de matériaux sélectionnés, de matériaux rapportés (remblai) ou réalisée par un traitement spécial destiné à améliorer les caractéristiques du terrain. Elle assure la protection du sol support et contribue à l'homogénéisation des caractéristiques portantes.

Le **sol support** est l'ensemble des matériaux en place, existant avant les terrassements ou à défaut le déblai, qui est l'ensemble des matériaux en place obtenu après excavation.

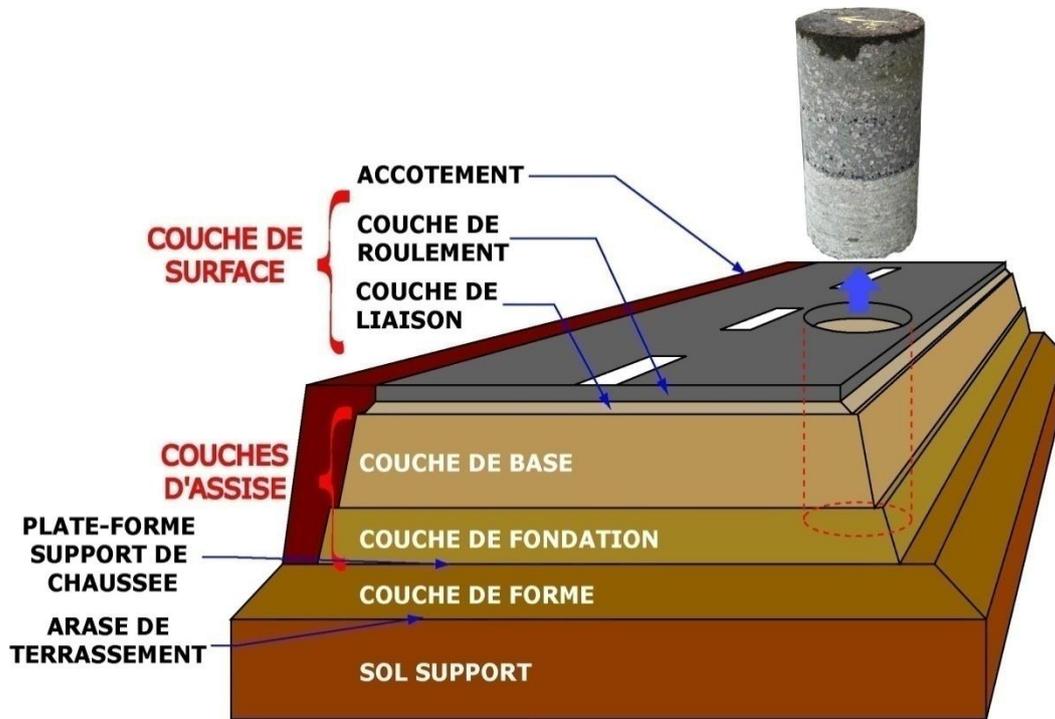


Figure (I-1) : Les différentes couches d'une chaussée [Brosseaud Yves, 2009]

I.2 LES DIFFERENTS TYPES DE STRUCTURES DE CHAUSSEE

Suivant leur mode de fonctionnement lui même lié aux matériaux mis en œuvre, on distingue 6 grandes familles de chaussées:

I.2.1 LES CHAUSSEES SOUPLES

Les chaussées souples comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15cm), parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm.

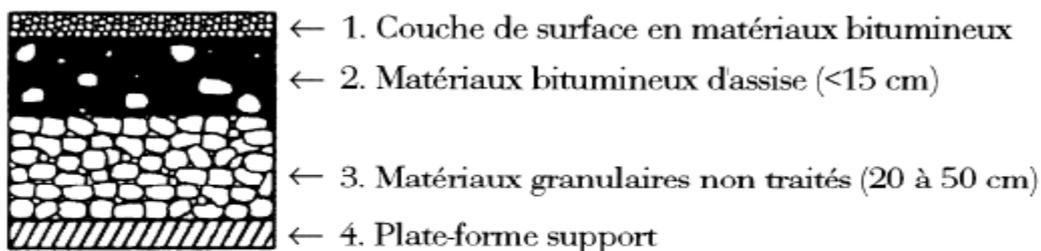


Figure (I-2) : Chaussée souple [catalogue des chaussées, 1998]

I.2.2 LES CHAUSSEES BITUMINEUSES EPAISSES

Les chaussées bitumineuses épaisses comportent une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux bitumineux disposés en une ou deux, voire trois couches, dont l'épaisseur totale est comprise entre 15 et 40 cm.

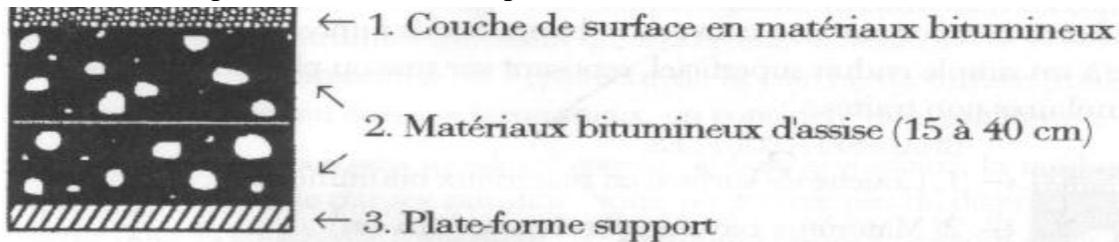


Figure (I-3) : Chaussée bitumineuse épaisse [catalogue des chaussées, 1998]

I.2.3 LES CHAUSSEES A ASSISE TRAITEE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Ces structures comportent une couverture bitumineuse mince (moins de 15cm), parfois réduite à un simple enduit superficiel, reposant sur une ou plusieurs couches de traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm.

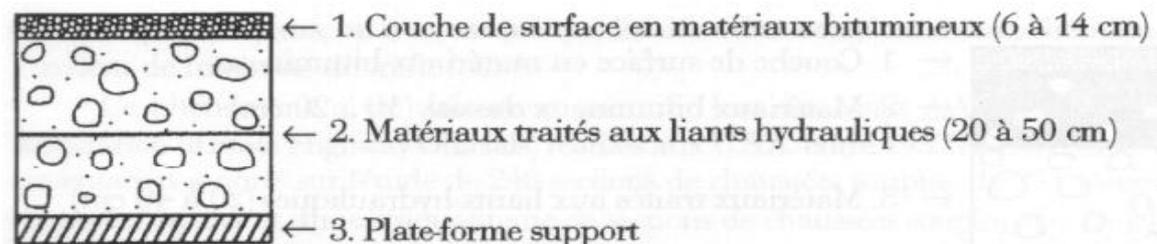


Figure (I-4) : Chaussée à assise traitée aux liants hydrauliques [Catalogue des chaussées, 1998]

I.2.4 LES CHAUSSEES A STRUCTURE MIXTE

Les chaussées à structure mixte comportent une couche de surface et une couche de base (10 à 20cm) en matériaux bitumineux sur une couche de matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40cm). Les matériaux bitumineux représentent environ la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée

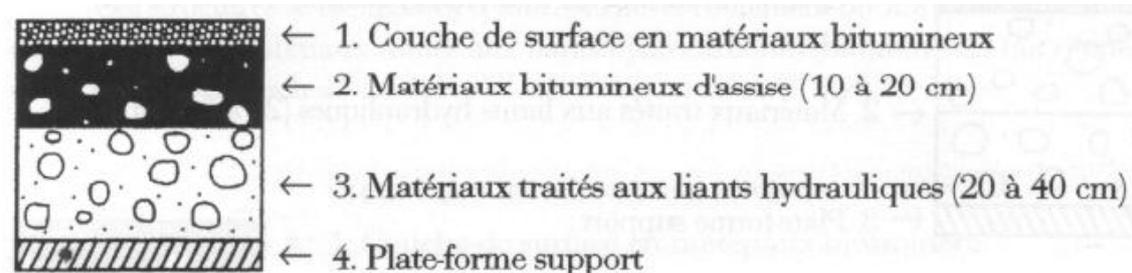


Figure (I-5) : Chaussée à structure mixte [catalogue des chaussées, 1998]

I.2.5 LES CHAUSSEES A STRUCTURE INVERSE

Par rapport aux structures mixtes, les structures inverses comportent une couche supplémentaire de matériaux granulaires entre la couche de fondation (traitée aux liants hydrauliques) et les couches supérieures bitumineuses.

Cette couche de matériaux granulaires a pour rôle d'éviter la remontée des fissures de la couche de fondation.

I.2.6 LES CHAUSSEES EN BETON DE CIMENT

Ces structures sont peu répandues en France. La chaussée est constituée par une couche de fondation en grave ciment d'environ 15cm d'épaisseur, surmontée par une dalle de béton de 25cm d'épaisseur environ. Des joints transversaux sont effectués tous les 4 à 5m pour éviter une fissuration anarchique du béton, ainsi que des joints longitudinaux.

I.3 COMPORTEMENT DE CHAUSSEE BITUMINEUSE

Les matériaux bitumineux sont employés principalement dans les couches de surface et d'assise. Ils subissent l'action conjuguée du trafic routier (agression mécanique) et du climat (température, gel).

I.3.1 PRINCIPAUX MODES DE DEGRADATION

Effet de trafic

L'agression mécanique des charges roulantes provoque des écrasements et des flexions dans la structure routière. Leur répétition est à l'origine des phénomènes :

- d'orniérage (causé par les compressions successives des matériaux bitumineux, mais aussi par les déformations des couches non liées éventuelles) ;
- de fatigue par l'accumulation de micro-dégradations créées par les tractions transversales répétées qui peut entraîner la ruine du matériau
- de fissuration qui peut apparaître et se propager dans la chaussée.

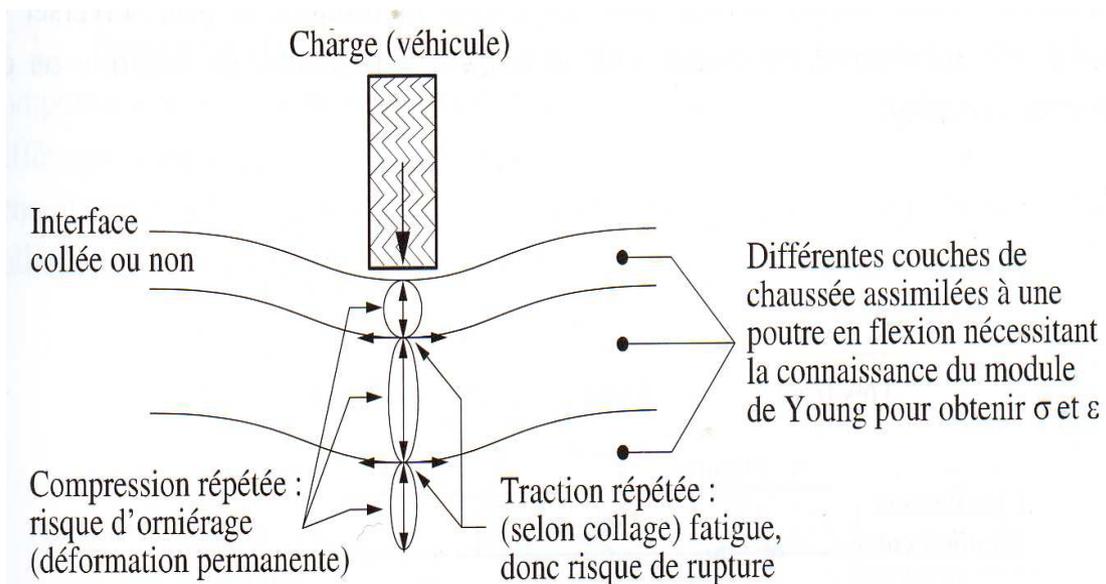


Figure (I-6) : Schématisation des sollicitations induites par le trafic [6]

Effet de la température

La température a deux effets mécaniques principaux outre le vieillissement du matériau :

- changement de la rigidité (module) du matériau dû au caractère thermosusceptible du mélange bitumineux et plus particulièrement du liant hydrocarboné ;
- création de contraintes et déformations au sein du matériau en raison des dilatations-contractions thermiques qui peut provoquer et faire se propager des fissures avec les cycles thermiques, surtout à basse température (les couches traitées aux liants hydrauliques sont sujettes quant à elles aux retraits thermique et de prise).

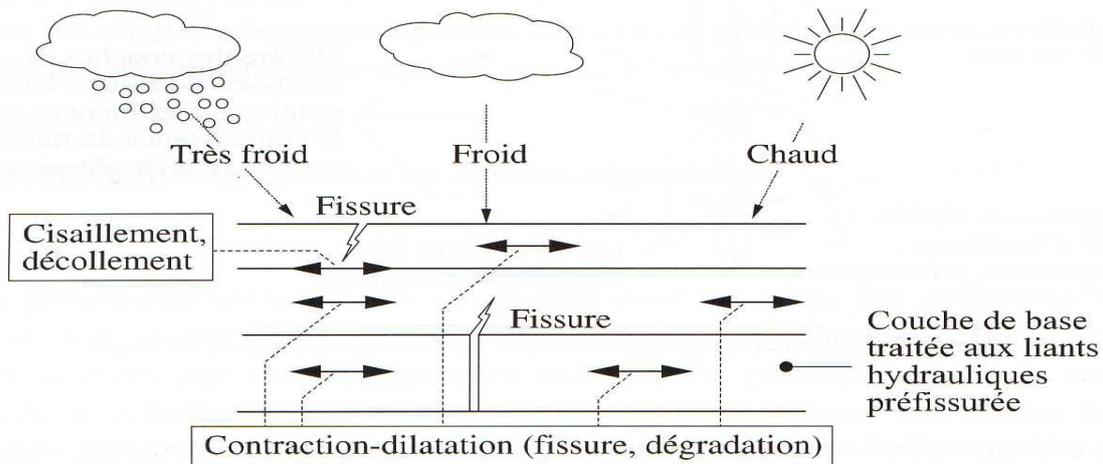


Figure (I-7) : Sollicitations induites par la température [6]

I.3.2 SOLLICITATIONS DANS LA CHAUSSEE

Le passage d'un véhicule engendre des contraintes normales et de cisaillement dans toutes les directions des couches de la chaussée. La couche d'assise constituée de matériau bitumineux subit essentiellement le phénomène de fatigue causé par les cycles de traction/compression dans la direction parallèle à l'axe de roulement. La figure suivante montre la déformation longitudinale à la base de la couche d'assise au passage d'une roue.

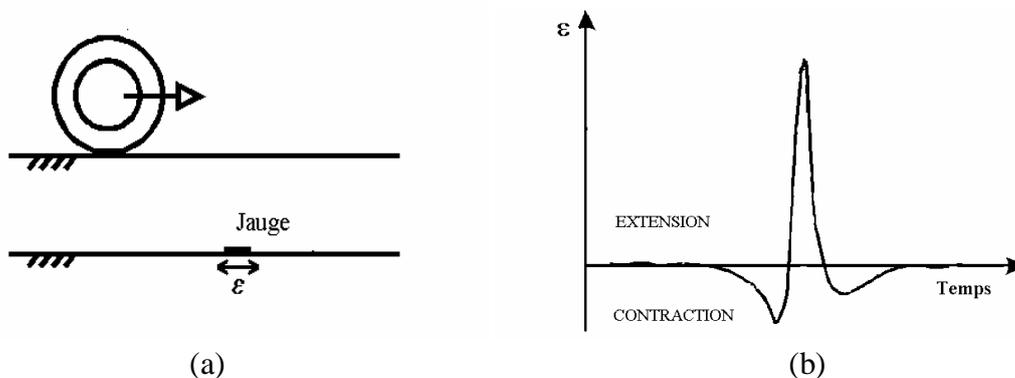


Figure (I-8) : Déformation longitudinale à la base d'une couche de chaussée [7]

(a) Schéma du passage de la charge roulante et point de mesure

(b) Déformation longitudinale résultante

A l'approche de la charge, le point de mesure est soumis à une contraction puis à une extension quand la charge en est suffisamment proche. De plus, les phases d'extension et de contraction sont fortement asymétriques et d'autant plus que la température est élevée. 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 (à sa base et dans la direction longitudinale).

L'amplitude de la partie en extension du signal de sollicitation est environ trois à quatre fois plus grande que celle correspondant à la partie en contraction. En outre, la résistance de l'enrobé bitumineux en traction est beaucoup plus faible que sa résistance en compression. L'endommagement par fatigue se fait donc principalement dans la phase de traction de la flexion. La traction par flexion étant plus forte à la base de la chaussée (quand il s'agit des couches collées), l'amorce de la fissure doit se déclencher théoriquement à cet endroit.

I.4 CONCLUSION

Les poids lourds, qui représentent les éléments les plus agressifs du trafic en termes de sollicitations, voient leur configuration évoluer rapidement et constamment. Des dégradations observées des routes, qui jusqu'alors ne posaient aucun problème, sont là pour le confirmer.

Les matériaux bitumineux sont les matériaux les plus employés dans les autoroutes et routes à fort trafic. Le maintien en état de service de ces liaisons sans perturber le flux de circulation représente un défi majeur pour les maîtres d'ouvrage et les équipes opérationnelles qui gèrent la construction et l'entretien des routes. De ce défi est née la notion de *chaussée durable*, ou *chaussées souples adaptées aux véhicules* lourds avec la mise au point d'enrobés de plus en plus performants.

Chapitre II

Les enrobés bitumineux - Etat de l'Art-

II.1. DEFINITION

Mélange de liant hydrocarboné (bitume), de granulats et/ou d'additifs minéraux dosés, chauffés et mélangés dans une installation appelée centrale d'enrobage. Ils sont ensuite transportés et mis en œuvre sur chaussée.

II.2. HISTOIRE DES BITUMES

L'histoire du bitume a un impact direct sur l'histoire des enrobés. En effet, les performances et des caractéristiques des enrobés à chaud dépendent de la qualité des éléments qui le composent. De tous ces éléments, seul le bitume a connu à travers le temps, de véritables avancées technologiques d'où cette relation intime ente les deux évolutions.

Années 20 : Premiers bitumages des routes

La connaissance et l'utilisation du bitume remontent à l'antiquité. Des recherches archéologiques ont confirmé que les peuples du Moyen-Orient exploitaient l'asphalte naturel il y a plus de 6 000 ans. Mais ce n'est qu'au XIX^e siècle qu'apparurent les premiers trottoirs asphaltés dans Paris et en 1925 que commença l'emploi des produits bitumeux sur les routes françaises.

Années 50-60 : L'essor des bitumes purs

Le revêtement de la plus grande partie du réseau routier secondaire français remonte en fait aux années 1950. Les recherches d'amélioration des propriétés des bitumes par modification de sa structure ou par l'ajout d'additif sont anciennes. Ainsi, par exemple, Bencovitz et Boe publiaient en 1938 déjà un article sur l'addition de soufre aux mélanges bitumineux.

Antérieurement à 1970, on relève à partir de la fin des années 1950, aux États-Unis, la réalisation d'enrobés avec du bitume modifié par des caoutchoucs incorporés sous forme de latex. Des opérations du même genre furent effectuées en Europe ; des expérimentations eurent ainsi lieu en France en 1966. Mais ces applications, souvent réalisées à titre d'essai (planches expérimentales), furent généralement considérées comme insuffisamment au point, onéreuses et non indispensables malgré l'essor important des travaux publics durant la décennie 60. Les travaux de construction routière furent réalisés à cette époque avec des bitumes purs.

Années 70 : Les bitumes polymères

Vers 1965, des brevets furent déposés pour promouvoir l'utilisation du soufre, additionné en quantités importantes dans le bitume ou dans les matériaux à enrober. Ces études furent reprises en 1973 au moment de la première crise pétrolière, suite à l'augmentation importante du prix du bitume à cette époque. Ceci permit de réaliser des enrobés présentant une assez forte rigidité à partir de granulats de qualité secondaire ; ce procédé ne se serait montré économiquement viable qu'avec un coût du soufre au minimum deux fois inférieur à celui du bitume, ce qui ne s'est pratiquement pas présenté.

Le développement significatif des liants modifiés ou comportant des additifs, avec des processus industrialisés et maîtrisés, peut être situé dans les années 1970. En Europe, et particulièrement en Allemagne, des applications d'enrobés au bitume polymère voient le jour au début des années 1970. En Autriche puis en Italie, apparaissent sur chaussée autoroutière de nouveaux revêtements bitumineux à base de polyéthylène introduit au niveau du malaxeur.

Pour lutter contre le ressuage : les élastomères thermoplastiques

L'objectif d'amélioration de la sécurité sur les routes par le biais d'un accroissement de l'adhérence des couches de roulement allait être un élément important de stimulation des recherches à cette époque. Les enduits superficiels présentaient alors plusieurs défauts, celui de souvent ressuer (du fait de l'utilisation de bitumes mous du type 180/220 comme base), d'être fragiles l'hiver, de subir un vieillissement précoce, et surtout d'être généralement peu résistants à l'usure sous trafic lourd. Les recherches conduites par les laboratoires pétroliers et certains organismes comme le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées permirent alors la mise au point de bitumes modifiés adaptés aux applications routières avec de nouveaux polymères, les élastomères thermoplastiques.

Des systèmes monocouches plus économiques

Par ailleurs, les liants modifiés permettaient de constituer des systèmes monocouches (donc plus économiques) en substitution des systèmes multicouches à base de bitumes oxydés. Après des recherches ayant débuté à la fin des années 1960, le passage progressif de l'industrie de l'étanchéité vers les liants modifiés s'est renforcé vers la fin des années 1970, entraînant du même coup une accélération de la mise au point de liants modifiés pour la route, d'abord pour les enduits dits « améliorés » comme vu précédemment puis pour les mélanges enrobés.

Années 80 : Les bitumes modifiés et les additifs

L'augmentation de l'agressivité du trafic routier et d'autre part les crises pétrolières de 1973 puis de 1979 ont constitué des facteurs essentiels du développement des liants modifiés. En effet, la recherche d'économies sur les travaux de construction (comme vu précédemment pour le bâtiment mais également dans le domaine routier) a conduit à rechercher des solutions innovantes en particulier dans le domaine de l'entretien des

couches de roulement avec des revêtements d'épaisseur réduite (inférieure à 5 cm) et de plus grande durabilité.

Les techniques minces

Le développement de bitumes modifiés par des polymères et de l'emploi d'additifs est intimement lié à la mise au point de nouvelles formules d'enrobés bitumineux de couches de surface en faible épaisseur, offrant de meilleures performances en termes de qualité d'usage et de durabilité.

C'est tout un ensemble de techniques de chaussée qui s'industrialisera dans les années 1980 :

- les bétons bitumineux minces ou BBM (3 à 4 cm)
- les bétons bitumineux très minces ou BBTM (2 à 3 cm)
- les bétons bitumineux ultra-minces ou BBUM (1 à 2 cm)

Les enrobés drainants

Bien que les premières réalisations d'enrobés drainants aient été faites avec des bitumes purs dans de nombreux pays et que les bitumes purs restent souvent employés pour cette application sous trafic modéré, l'emploi de bitume modifié (bitume-caoutchouc ou bitume polymère) s'est généralisé pour les chaussées fortement circulées et autoroutières.

Les chapes d'étanchéité

Une autre application des liants modifiés est celle des membranes anti-fissures et des chapes d'étanchéité. Pour traiter les remontées de fissures qui sont apparues dans les chaussées dont les couches d'assises ont été traitées aux liants hydrauliques, construites essentiellement en Allemagne et en France.

Années 90 : Les bitumes spéciaux, les Enrobés à Module Elevés

Les Enrobés à module élevé (EME et BBME)

L'emploi de liants modifiés a aussi été envisagé en matériau d'assise de chaussée du fait de l'amélioration qu'ils apportent à la résistance en fatigue. Mais l'avantage économique recherché par une réduction sensible d'épaisseur a plutôt conduit à l'emploi de bitumes durs afin d'atteindre des modules de rigidité élevés. Ces bitumes dits « spéciaux » (de pénétration 10/20, 15/25, etc..) se sont avérés pour cette application plus économique que les bitumes modifiés malgré la nécessité d'une teneur en liant forte pour assurer une bonne résistance en fatigue. Ils ont permis de constituer les Enrobés à Module Elevé (EME) et les Bétons Bitumineux à Module Elevé(BBME).

Enfin, les préoccupations d'orniérage de la couche de surface, face à un trafic poids lourd croissant et plus agressif ont amené l'invention et le développement, ces dernières années, de bitumes spéciaux de type multigrade, de pénétration semi-dure (40/60, 60/80, ...). Ces bitumes spéciaux présentent une moindre susceptibilité

thermique que les bitumes purs de même pénétration à 25 °C, ils ont ainsi une rigidité plus grande aux températures élevées et une moindre fragilité aux basses températures que les bitumes purs durs.

Les enrobés colorés

C'est également vers la fin des années 1980 que seront mis au point les liants de synthèse pigmentables permettant la réalisation de revêtements de chaussée de couleurs variées, ce qui apporte de nouvelles solutions pour les aménagements urbains et de sécurité.

Années 2000 : les enrobés économes en énergie

Dès 2000-2001, la tendance à la recherche d'enrobés économes en énergie apparaît :

Les enrobés à l'émulsion

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

Les enrobés tièdes

Les enrobés à basses températures ou enrobés tièdes sont fabriqués à une température de 125 °C, inférieure de 40 °C à la température classique de fabrication des enrobés. Ils sont étendus à la température de 120 °C et le compactage s'effectue à moins de 100 °C. Cette réduction de 40° entraîne une très forte réduction de toutes les émissions observées. Mais probablement qu'un abaissement de température plus important peut être recherché.

II.3. LES ESSAIS SUR ENROBES [MANUEL LPC, 2007]

Actuellement, cinq caractéristiques principales sont exigées d'un enrobé bitumineux :

Il faut qu'il soit :

1. Maniable pour faciliter la mise en œuvre,
2. Insensible à l'eau pour éviter un désenrobage,
3. Résistant aux déformations permanentes pour réduire le phénomène d'orniérage,
4. Avoir un bon module de rigidité pour réduire les épaisseurs des couches
5. Résister à la fatigue pour assurer la pérennité de la chaussée.

Le Manuel LPC d'aide à la formulation, (Septembre 2007) prévoit des essais en fonction des attentes énumérées ci-dessus. En Algérie, seules les deux premiers points sont exigés et sont évalués selon des directives émanant du CTTTP.

II.3.1 MANIABILITE DES ENROBES

Elle est appréciée par un essai qui détermine l'aptitude au compactage des enrobés. Nous citons ci après l'essai à la Presse à Cisaillement Giratoire adoptée en Europe et canada et l'essai Marshall encore en vigueur en Algérie.

II.3.1.1 La Presse à Cisaillement Giratoire

Principe: le mélange hydrocarboné préparé en laboratoire, est placé, foisonné et à la température d'essai (130 °C à 160 °C environ) dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre. On applique sur le sommet de l'éprouvette une pression, verticale de 0,6 MPa. En même temps, l'éprouvette est inclinée d'un angle faible de l'ordre de 1.25° et soumise à un mouvement circulaire. Ces différentes actions exercent un compactage par pétrissage. On observe l'augmentation de compacité (diminution du pourcentage de vides) en fonction du nombre de tours.



Figure (II-1): Presse à cisaillement giratoire [3]

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

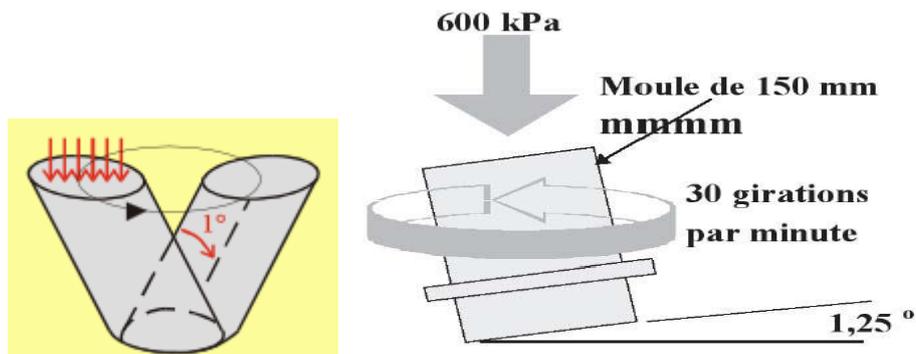


Figure (II-2) : principe de compactage à la PCG [6]

A partir de cet essai, les risques d'orniérage peuvent être aussi détectés. Grâce à la rapidité de l'essai, la Presse à Cisaillement Giratoire est un instrument précieux pour le formulateur. Cet essai permet également de déceler les changements imperceptibles par les essais courants sur les granulats. Aussi, la Presse à Cisaillement Giratoire sert à vérifier la constance des formules dans le temps. Les spécifications s'appliquent à tous types d'enrobés. Elles portent sur une fenêtre de pourcentage de vides à respecter pour un nombre de girations donné.

II.3.1.2 Essai Marshall [directives du CTTP Algérie, 2004]

Il permet de détermination de la teneur en vides et les caractéristiques mécaniques de l'enrobé

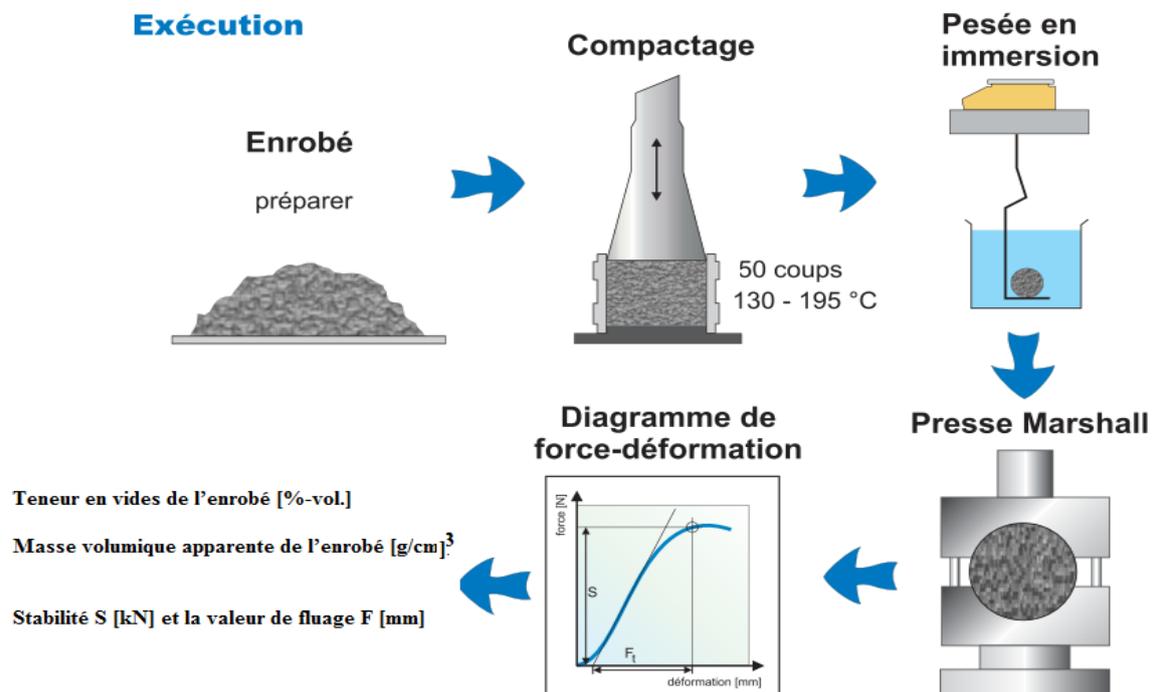


Figure (II-3) : principe de l'essai Marshall

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

- ✓ La stabilité (SM) qui est la résistance maximale à l'écrasement.
- ✓ Le fluage (FM) qui est le raccourcissement du diamètre de l'éprouvette au moment de sa rupture

Deux grandeurs liées à la caractérisation empirique de l'orniérage Elles permettent de définir le quotient Marshall SM/FM.

On prépare un mélange hydrocarboné qu'on mettra dans des moules cylindriques, on fait subir à l'enrobé un compactage en appliquant 50 coups par face par une dame, on fait refroidir les éprouvettes à l'air pendant 2 à 3 heures, chaque éprouvette est démoulée à l'aide d'une presse, conservé ensuite pendant 24 heures (phase de maturation).

Les éprouvettes, sont immergées dans un bain d'eau à 60°C pendant une durée de 30 à 40 min puis comprimées à vitesse constante en compression diamétrale empêchée au moyen de mâchoires hémicylindriques.

Le mode opératoire de cet essai ne renseigne pas sur la tenue à l'eau de l'enrobé, néanmoins au niveau du CTPP d'Alger une méthode de travail a été développée qui consiste à introduire l'immersion ainsi que le calcul de gonflement, cette pratique est pratiquée comme suit :

On prépare un mélange hydrocarboné qu'on mettra dans des moules cylindriques, on fait subir à l'enrobé un compactage en appliquant 50 coups de la dame sur les deux surfaces de l'éprouvette, on fait refroidir les éprouvettes à l'air pendant 2 à 3 heures, chaque éprouvette est démoulée à l'aide d'une presse, conservé ensuite pendant 24 heures (phase de maturation).

On prépare 6 éprouvettes de même composition :

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

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

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

On calcule ensuite :

- le Rapport immersion / compression (RCimm/RCsec)
(Stabilité avec 7 jours en immersion)/ (Stabilité avec 7 jours sans immersion)

II.3.2 TENUE A L'EAU

La tenue à l'eau est habituellement mesurée au moyen de l'essai Duriez dans le cadre de la normalisation française et algérienne. Cependant, en Algérie, l'essai Duriez est de moins en moins utilisé remplacé par l'adaptation de l'essai Marshall à la tenue à l'eau.

Essai Duriez

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

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



Figure (II-4) : Essai Duriez [16]

II.3.3 DEFORMATION PERMANENTE

L'orniérage est un facteur de dégradation des chaussées bitumineuse fortement circulées.

L'essai consiste à prévoir le comportement de l'enrobé soumis à un trafic agressif et sous température élevée.

Cet essai est très important pour les routes très circulées et avec un pourcentage de poids lourds assez élevé, il permettra de simuler au laboratoire la résistance de l'enrobé à l'orniérage.

Mode d'essai : on détermine la profondeur de l'ornière au passage répété d'un pneumatique, selon l'épaisseur de l'enrobé on confectionne une plaque de 5 ou 10 cm qu'on lui fait subir une énergie de compactage normalisée à 60°C, plusieurs cycles sont appliqués 1000, 3000, 10 000, 30 000, 100 000, le résultat (profondeur d'ornière) est comparé à la norme.



Figure (II-5) : Orniéreur LCPC [3]

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

II.3.4 MODULE

Le module élastique est un paramètre fondamental, le caractériser est essentiel pour le dimensionnement de la chaussée. Il existe divers essais de module dont l'essai de module complexe utilisé par les laboratoires français et l'essai de traction indirect disponible au CTTTP d'Alger.

Essai de module complexe

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

Interprétation: Le module (rapport de la contrainte à la déformation) est calculé pour chaque essai élémentaire. Grâce à l'équivalence temps-température, on trace la courbe maîtresse du module à une température donnée. Cette représentation permet de connaître le comportement du mélange sur un large spectre de temps de charge ou de fréquences. La spécification porte sur le module à 15 °C et une fréquence de 10 Hz ou un temps de charge de 0,02 s.

Essai de traction Nottingham Asphalt Tester NAT [12]

L'essai de détermination de module complexe en Algérie (CTTP) est un essai de traction indirecte répétée au NAT

Le principe de l'essai de traction indirecte répétée figure (II-6) consiste à soumettre une éprouvette cylindrique de façon répétée à une charge verticale de compression le long d'un diamètre, provoquant ainsi une contrainte de traction le long du diamètre perpendiculaire à la direction du chargement. La déformation transitoire (horizontale) due à cette contrainte est mesurée. Le module élastique est une fonction de la charge de compression et de la déformation de traction. La contrainte de traction (σ_{ti}) et le module élastique (E_{ti}) sont donnés respectivement par les relations suivantes :

$$\sigma_{ti} = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot e}$$

$$E_{ti} = \frac{P(v + 0,27)}{\Delta D \cdot e}$$

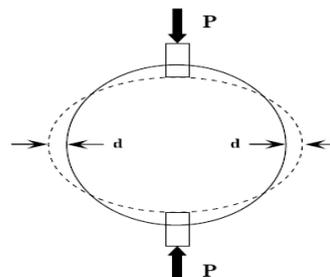


Figure (II-6) : Déformation d'une éprouvette [12]
-Essai de traction indirecte NAT-

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 : épaisseur de l'éprouvette.

ν : coefficient de Poisson

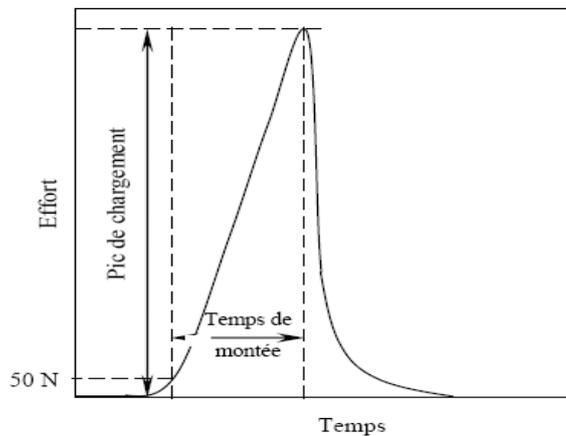


Figure (II-7) : Evolution de l'effort de déformation en fonction du temps. [12]

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) 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.

Matériel utilisé :

La (figure) 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.

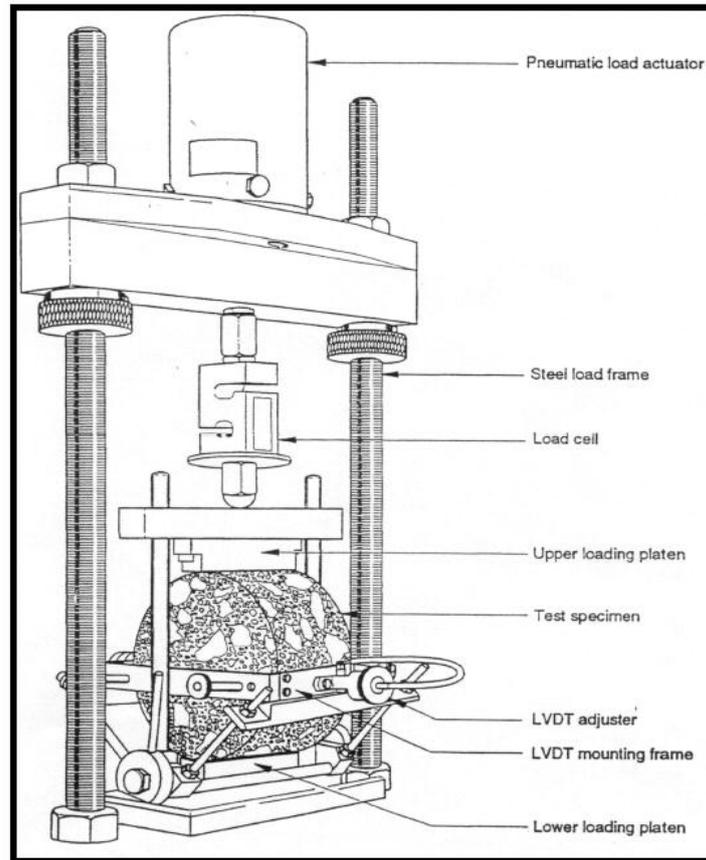


Figure (II-8) : Appareil pour essai de module de rigidité (NAT) [12]

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

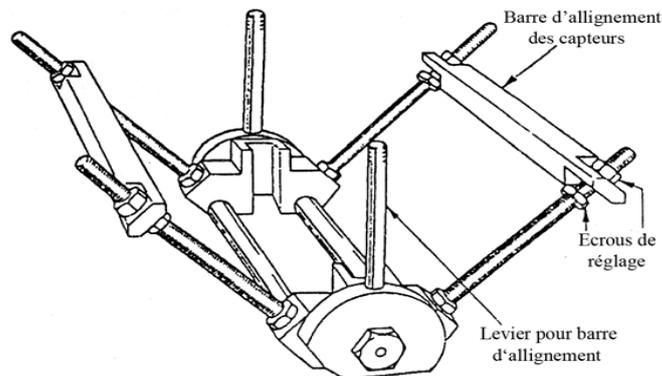


Figure (II-9) : Dispositif de montage de l'éprouvette [12]

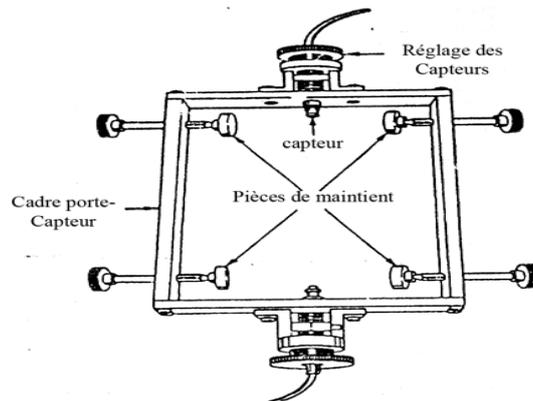


Figure (II-10) : Capteurs de déformation [12]

I.3.5 FATIGUE

Les structures de chaussées subissent un endommagement progressif par fissuration sous l'agressivité du trafic routier. Ce phénomène de fatigue est étudié en laboratoire par des essais de flexion deux points réalisés sur consoles à profil trapézoïdal qui subissent en tête des sollicitations sinusoïdales continues.



Figure (II-11) : Essai de fatigue en flexion 2 points sur éprouvettes trapézoïdales [3]

Cet essai permet d'étudier le comportement des enrobés bitumineux vis-à-vis de la fissuration, il est pratiqué sur des éprouvettes de forme trapézoïdales, l'éprouvette est encastree à la base, sollicités en tête en flexion sinusoïdale par déplacement imposé d'amplitude constante choisie afin de caractériser la rupture à un million de cycle.

L'essai est pratiqué à 10°C et à une fréquence de 25 Hz.

La répétitivité des cycles de flexion alternée entraîne un endommagement de l'éprouvette (des fissures sont localisées).

L'essai est conduit jusqu'à réduction de moitié de l'effort mesuré en tête, c'est le critère de la rupture. Les résultats obtenus sont reportés sur un diagramme (déformation - nombre de cycles à rupture).

II.4 GENERALITES SUR LES CONSTITUANTS

La composition des enrobés bitumineux est un mélange dans une proportion choisie de granulats et de liant hydrocarboné. Dans ce mélange, le liant hydrocarboné est principalement responsable de la cohésion tandis que le squelette minéral constitué par les granulats assure la rigidité de l'ensemble.

II.4.1 LES GRANULATS

Les granulats proviennent de carrières où les roches massives sont concassées, ou bien sont d'origine alluvionnaire. Ils sont répartis en différentes classes granulaires normées qui sont définies par le diamètre minimal et le diamètre maximal du granulat (norme P18-101). Les granulats sont ainsi classés en fines, sables, gravillons, cailloux et graves. Les caractéristiques des granulats peuvent être regroupées en deux familles :

- celles qui tiennent à la nature de la roche d'origine (dureté, résistance au polissage, résistance aux chocs) ;
- celles qui résultent de la fabrication des granulats (propreté, forme, granularité, angularité, homogénéité).

En outre des essais mécaniques permettent d'établir un classement selon :

- la résistance à la fragmentation par les essais Los Angeles (norme P18-573) ;
- la résistance à l'usure et à l'attrition par l'essai Micro-Deval humide (norme P18572)
- la résistance au polissage (norme P18-575)

II.4.2 LES LIANT HYDROCARBONES

Les deux grandes catégories de liants hydrocarbonés sont les goudrons et les bitumes, ainsi que les produits qui en dérivent.

À l'origine, les seuls liants routiers étaient les goudrons, qui provenaient de la distillation des goudrons bruts d'usines à gaz ou de cokeries de hauts-fourneaux. L'arrêt des usines à gaz a fait que le goudron routier, sous sa forme traditionnelle, a pratiquement complètement disparu, le brai de cokerie trouvant d'autres applications plus rentables et les huiles de goudron étant utilisé en ajout au bitume pour en faire des bitumes fluxés.

La quasi-totalité des liants routiers est donc maintenant à base de bitume.

II. 4.2.1 Types de bitumes

Bitume naturel

Le bitume existe à l'état naturel sous forme de résidu d'anciens gisements de pétrole dont les éléments les plus légers ont été éliminés au cours du temps par une sorte de distillation naturelle.

Ils sont extraits soit à ciel ouvert, les gisements se présentent alors comme de véritables lacs, soit sous forme de filons en sous-sol. Le plus connu de ces bitumes naturels est le bitume de Trinidad qui relève du premier type de gisement.

Les bitumes naturels subissent des opérations de dégazage et de déshydratation avant d'être conditionnés, le plus souvent, en bacs fusibles.

Au total, la production mondiale est très faible puisqu'elle ne dépasse pas 200 000 t.

Ils ne sont guère utilisés que comme ajout pour certaines utilisations particulières, compte tenu de leurs caractéristiques spécifiques (aptitude à être colorés, effet stabilisateur pour les asphaltes coulés...).

Asphalte naturel

L'asphalte naturel est constitué par une roche calcaire imprégnée d'hydrocarbures lourds (jusqu'à 20 %).

Le bitume naturel d'imprégnation a des caractéristiques particulières du fait de l'exsudation par la roche des fractions non colloïdales.

L'asphalte naturel entre traditionnellement dans la composition de l'asphalte coulé. Il peut également être utilisé comme appoint dans les enrobés auxquels il apporte du liant et des fines.

Bitume de pétrole

C'est de très loin le principal liant hydrocarboné utilisé dans les chaussées.

Les bitumes de pétrole sont fabriqués par distillation de bruts sélectionnés. Pour obtenir économiquement les propriétés spécifiques à chaque utilisation, on peut utiliser des procédés de soufflage, de précipitation, de mélange et bien souvent une combinaison de ces procédés.

Toutes ces opérations se font en raffinerie et permettent d'obtenir les différentes catégories de liants demandées par les ingénieurs routiers.

II. 4.2.2 Adhésion liant-granulat

La durabilité d'un enrobé dépend non seulement de ses constituants minéraux et hydrocarbonés, mais aussi de la solidité de leur liaison et donc des propriétés de mouillabilité et d'adhésivité.

Les propriétés agglomérantes du bitume sont liées à sa faculté de mouiller les granulats qu'il est chargé d'enrober, ce qui se passe relativement bien à chaud ($T > 160^{\circ}\text{C}$) avec des granulats propres, mais peut s'avérer délicat à une température inférieure à 100°C du fait :

- _ Des pollutions de surface qui créent un écran entre les constituants
- _ De la présence d'eau sur le chantier, constituant présentant une affinité au mouillage avec les granulats plus grands que le bitume.

Il faut donc trouver les moyens d'inverser la tendance, aussi bien que pour l'enrobage (recherche de l'adhésivité active du liant) que pour la résistance au désenrobage

(adhésivité passive). Pour cette raison, on peut être amené avec certains types de granulats à utiliser des "dopes" d'adhésivité.

Le désenrobage peut survenir soit par rupture du film de liant, soit par capillarité.

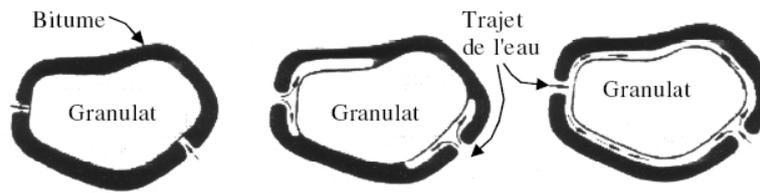


Figure (II-12) : Désenrobage d'un gravillon en présence d'eau [6]

II. 4.2.3 Essais de caractérisation

Les gammes approximatives des températures d'exposition des bitumes ainsi que les essais considérés comme pertinents pour apprécier les propriétés significatives correspondantes sont résumé (Di Benedetto et al. 2004) dans le schéma suivant.

Les bitumes sont classés selon leur consistance, compte tenu de l'étendue de la plage de variation de la consistance des bitumes dans leur domaine d'application et d'usage (de -40°C à 200°C), chaque essai de laboratoire n'est réalisé que sur une partie du domaine.

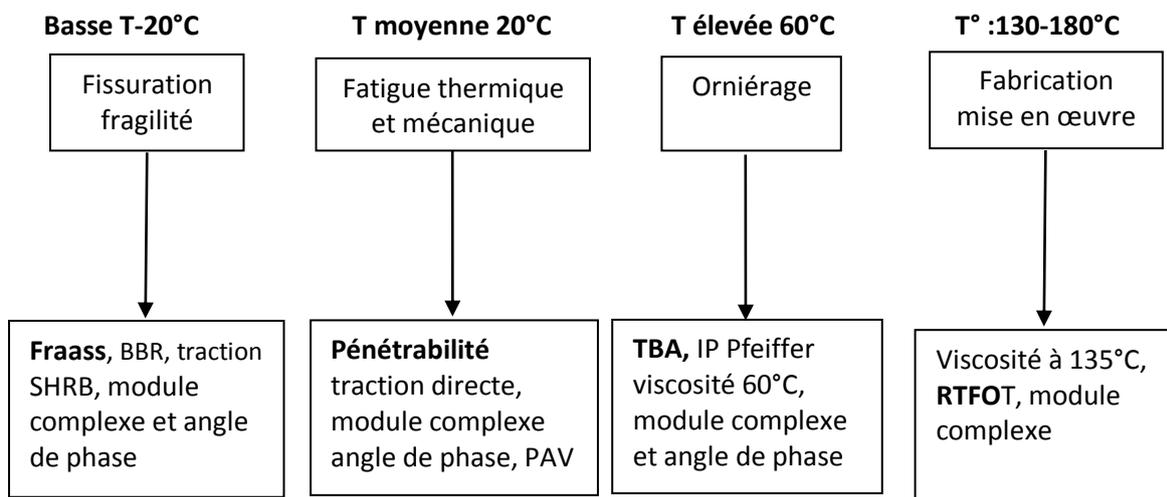


Figure (II-13) : Domaines thermiques des sollicitations mécaniques et essais correspondants

Les principaux indicateurs de consistance sont selon les plages de température d'utilisation mentionnées ci-dessus :

- La pénétrabilité à 25°C (NF T 66-004)
- La température bille anneau (TBA) (NF T 66-008)
- Température de fragilité FRAASS (NF T 66-006)
- Le vieillissement à la mise en œuvre

Essai de pénétrabilité à l'aiguille

L'essai consiste à mesurer en 10ème de mm, l'enfoncement dans un échantillon de bitume à température donnée, d'une aiguille standard au bout d'un temps de 5s, d'une aiguille dont le poids avec son support est de 100g. C'est donc une mesure de la consistance du bitume. La pénétrabilité la plus couramment utilisée est celle mesurée à 25°C. Dans ces conditions, plus un bitume est dur, plus sa pénétrabilité est faible.

A titre d'exemple, on distingue les classes :

10/20 et 35/50 => bitumes durs

50/70 et 70/100 => bitumes semi-durs

180/220 => bitumes mous

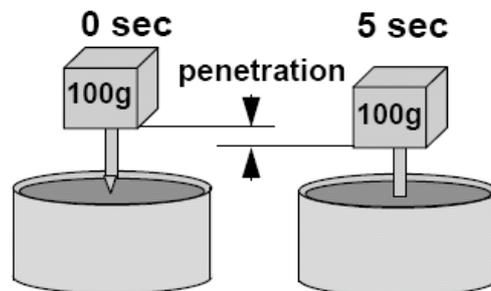


Figure (II-14) : Essai de pénétrabilité pour le bitume [6]

Point de ramollissement - méthode bille et anneau

On mesure la température à laquelle une bille d'acier, placée à la surface du produit contenu dans un anneau de métal, tombe d'une hauteur déterminée après avoir traversé le produit progressivement ramolli sous l'effet d'une élévation de température effectuée à vitesse constante (5°C/mn)

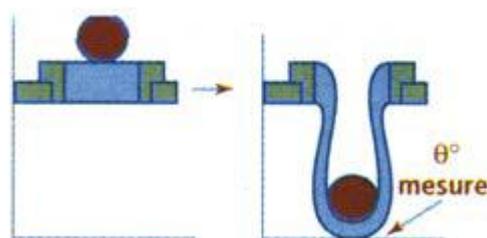


Figure (II-15) : Détermination du point de ramollissement

Les résultats des deux essais empiriques précédents (Pénétrabilité à 25°C et Température Bille-Anneau) permettent d'identifier le liant examiné et de le classer par rapport aux spécifications actuellement admises.

Essai RTFOT "Rolling Thin Film Oven Test"

Cet essai est employé pour caractériser le vieillissement des bitumes à l'enrobage. En effet, lors de la fabrication d'un enrobé, les granulats chauffés aux environs de 160°C sont mis en contact avec le bitume chaud qui répartit en film mince autour du granulat, ce contact induisant un vieillissement du liant. Pour l'essai **RTFOT**, dans des conditions d'essai précises, le bitume placé en film mince, est régulièrement exposé à un flux d'air chaud dont le débit est contrôlé. On mesure ensuite les propriétés habituelles du liant : pénétrabilité et température de ramollissement bille et anneau. Ces valeurs, dites après **RTFOT**, sont alors comparées aux valeurs initiales. Elles sont plus proches de celles du liant extrait de l'enrobé, que celles obtenues sur le bitume d'origine.

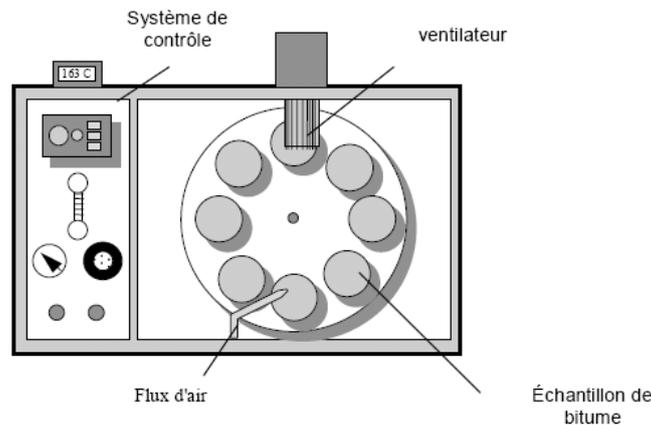


Figure (II-16) : L'essai RTFOT [6]

Température de fragilité FRAASS

La température de fragilité FRAASS correspond à la température à laquelle un film mince de bitume rompt sous l'effet d'une flexion, dans des conditions opératoires de fabrication et d'essai bien définies.

Cet essai empirique donne une indication sur les propriétés à froid d'un bitume.

Ramond et Such (1990) précisent que, par expérience, on sait que la zone critique où se présentent les phénomènes de fissuration correspond à des liants bitumineux dont :

- la pénétration est inférieure à 20 1/10 mm,
- la température de ramollissement est supérieure à 70°C,
- la température de fragilité FRAASS est supérieure à 0°C.

Densité relative - méthode au pycnomètre -

On pèse un pycnomètre de 24 à 30 ml rempli d'eau distillée à 25°C et maintenu dans un bain d'eau à cette température. On remplit ensuite le pycnomètre de bitume à 25°C et on calcule le rapport de sa masse à celle de l'eau

Point d'éclair

Versé dans un récipient cylindrique, le produit est chauffé de façon que sa température s'élève de 5°C/mn. Ce point éclair correspond au moment où l'inflammation des vapeurs a lieu sous l'influence d'une flamme de veilleuse présentée de 2 en 2°C.

II.4.4 LES ADDITIFS

II.4.4.1 Les produits

Les additifs sont destinés à améliorer les propriétés de l'enrobé. Ils peuvent être introduits soit dans le mélange au moment du malaxage soit directement dans la cuve bitume.

On peut fabriquer des enrobés en utilisant seulement du bitume. Cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de bitume par un ou plusieurs additifs lorsqu'ils sont disponibles à des prix compétitifs peut être avantageuse, non seulement du point de vue économique, mais aussi du point de vue rhéologique et du point de vue résistance et performance ; ils permettent d'augmenter notamment :

- L'affinité bitume-granulats
- Le module.
- La résistance à l'orniérage.

Quelques exemples d'additifs conditionnés sur le marché sont donnés ci dessous :

Bitumes de Trinidad épuré

Le bitume épuré est extrait par raffinage, ses caractéristiques sont comme suit : Masse volumique : 1,40 g/cm³

Pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s, 1/10 mm : comprise entre 1 et 4.

Température bille anneau : comprise entre 68 et 78 °C.

Gilsonite : (Gilsonite Résine, HMA Plus)

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

Masse volumique : 1,05 g/cm³

Température bille-anneau : 150 °C.

Pénétrabilité à 25°C, 100g, 5s, 1/10 mm : 0 (1/10 mm).

Selenizza SLN 120

C'est un additif anti orniérant, livré sous différentes formes (blocs, granulés, poudre) Conditionné en sacs fusibles de poids variables facilitant l'utilisation dans les centrales d'enrobage discontinues dotées d'un malaxeur à pales.

Conditionné en « BIG BAGS » de 800 Kg à 1 tonne, le matériau est traité préalablement par un produit anti-mottant afin d'éviter toute reprise en masse. Très souple d'utilisation, il peut être introduit soit dans le liant chaud, soit au niveau de l'anneau de recyclage d'une centrale continue, soit dans le tapis enfourneur des centrales à double flux de matériaux.

Matières insolubles (fines siliceuses): 7 à 15 %

Pénétrabilité à 25 °C : 0

Point de ramollissement bille anneau : 120 °C

Perte de masse à 163 °C pendant 5 h : 0.08%

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

Plastomères de polyoléfines

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

Densité (g/cm³) : 0,91 à 0,96

Point de fusion (°C) : 140 à 150

Granulométrie : 4 mm

Plastomères (%) : > 95

PR Plast S

C'est un additif anti orniérant pour les bétons bitumineux BBME, et les couches de liaison. Il a une granulométrie de 0/5 mm, s'emploie directement au malaxage des enrobés, dosé en Big Bag pour les postes continues, et en sacs thermo fusibles pré dosés de 7 à 12 kg pour les postes discontinues, ses caractéristiques sont représentés comme suit :

Granulométrie : 0/5 mm

Densité : 0,93 à 0,965 gr/cm³.

Point de fusion : 175 °C.

PR Plast Module

Augmentation du module d'élasticité sur routes à fort trafic et plateformes industrielles. Dosage compris entre 0.4 et 0.8% par tonne d'enrobé.

Polyéthylène

Provenance : déchets de câble, broyage de bouteilles de lait, de films polyéthylène, polyéthylène neuf. Les déchets de polyéthylène sont souvent un mélange de polyéthylène haut et bas densité. Lors de la fusion voisine de 130 °C le polyéthylène se combine en partie avec le bitume. Le dosage est habituellement compris entre 0,4 % et 1 %, par rapport aux granulats. La proportion de polyéthylène par rapport au bitume, peut ainsi varier entre 20 % et 66 %.

Poudrette de caoutchouc et granulats de caoutchouc 2/6

Incorporés au moment du malaxage, le caoutchouc se combine partiellement avec le bitume. La température de fabrication est supérieure à celle du bitume pur. La masse volumique du caoutchouc est de 1,15 g/cm³.

Remarque : pour le cas de notre travail l'additif utilisé est le **PR Plast Module** détaillé dans la partie formulation

II.4.4.2 Domaine d'application des additifs

- Routes à fort trafic et autoroutes.
- Giratoires.
- Zones canalisées et à fort trafic.
- Zones portuaires.
- Plates formes industrielles.
- Aéroports.
- Barrières de péage, arrêts de bus.

II.5 ETUDE DE FORMULATION

A partir de constituants (granulats, fines, liants hydrocarbonés, additifs minéraux ou organiques), identifiés et représentatifs des matériaux à utiliser dans le projet, une séquence d'essais de laboratoire est réalisée pour décrire le comportement d'un mélange hydrocarboné.

II.5.1 MELANGE GRANULAIRE

La distribution de la taille des différents grains (des plus gros au plus petit) constitue la courbe granulométrique du mélange. Celle-ci peut être continue ou discontinue (c'est à dire qu'une ou plusieurs fractions granulaires peuvent manquer), selon la destination du mélange et les propriétés visées.

Le mélange granulaire des enrobés bitumineux se fait par combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que la courbe granulométrique de mélange s'insère dans un fuseau de référence.

II.5.2 TENEUR EN LIANT

Le liant bitumineux transmet naturellement son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc définir une teneur en liant optimale afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d'une trop forte teneur en bitume).

La teneur en liant TL_{ext} (teneur en liant extérieur) est le rapport de la masse de liant à la masse de granulats secs, exprimé en pour-cent extérieur.

$$TL_{ext} = 100 \times \frac{\text{masse de bitume}}{\text{masse de granulats secs}}$$

La valeur TL_{int} (teneur en liant intérieur) qui est le rapport de la masse de liant à la masse de mélange total, exprimé en pour-cent intérieur.

$$TL_{int} = 100 \times \frac{\text{masse de bitume}}{\text{masse de granulats secs} + \text{la masse de bitume}}$$

A l'étranger, les teneurs en liant sont exprimées soit en TL_{ext} , soit en TL_{int}

Module de richesse K

Le module de richesse K [Duriez, 1950] est une grandeur proportionnelle à l'épaisseur conventionnelle du film de liant hydrocarboné enrobant le granulat. K est indépendant de la masse volumique du mélange granulaire. Il est relié à la teneur en liant *externe* par l'équation suivante :

$$TL_{ext} = K \times \alpha \sqrt[5]{\Sigma}$$

Où Σ est la surface spécifique, exprimée en mètres carrés par kilogramme, déterminée par la relation :

$$100 \Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 150 f \quad \text{avec :}$$

G : proportion d'éléments supérieur à 6,3 mm

S : proportion d'éléments compris entre 6,3 mm et 0,250 mm

s : proportion d'éléments compris entre 0,250 mm et 0,063 mm

f : proportion des éléments inférieurs à 0,063 mm

α : un coefficient correcteur relatif à la masse volumique des granulats

$\alpha = 2,65 / \rho_G$ avec ρ_G : masse volumique des granulats en grammes par centimètre cube.

Il est toujours possible d'utiliser la notion de module de richesse avec la teneur en liant interne TL_{int} à l'aide des équations suivantes :

$$TL_{int} = \frac{100 \times K \times \alpha \sqrt[5]{\Sigma}}{100 + (K \times \alpha \sqrt[5]{\Sigma})}$$

II. 5.3 LES METHODES DE FORMULATION

II. 5.3.1 Méthode CTTP (Algérie)

Recommandations algérienne sur l'utilisation des bitumes et des enrobés en béton bitumineux à chaud CTTP Février 2004.

C'est une approche dite empirique ; elle consiste à choisir la courbe granulométrique, les teneurs en vide, la tenue à l'eau, l'enveloppe de la courbe granulométrique et la teneur en liant.

Le mélange granulaire étant fixé, la méthodologie consiste à concevoir plusieurs formules avec des modules de richesses différents en vue d'avoir une bonne stabilité du mélange hydrocarboné et une bonne tenue au désenrobage. Ainsi seuls les essais stabilité Marshal et Duriez sont au programme.

Les étapes de travail suivis par les laboratoires Algériens sont :

1. Sélection des composants (selon les exigences établies par les normes)
2. Détermination des caractéristiques physiques des mélanges obtenus pour différentes teneurs en liant.
3. Détermination des performances mécaniques des différents mélanges :
 - De compactage (Fluage et Stabilité Marshall).
 - De tenue à l'eau (Essai Duriez)
4. Choix de la formule optimale

Le schéma ci-dessous présente la procédure de formulation en Algérie.

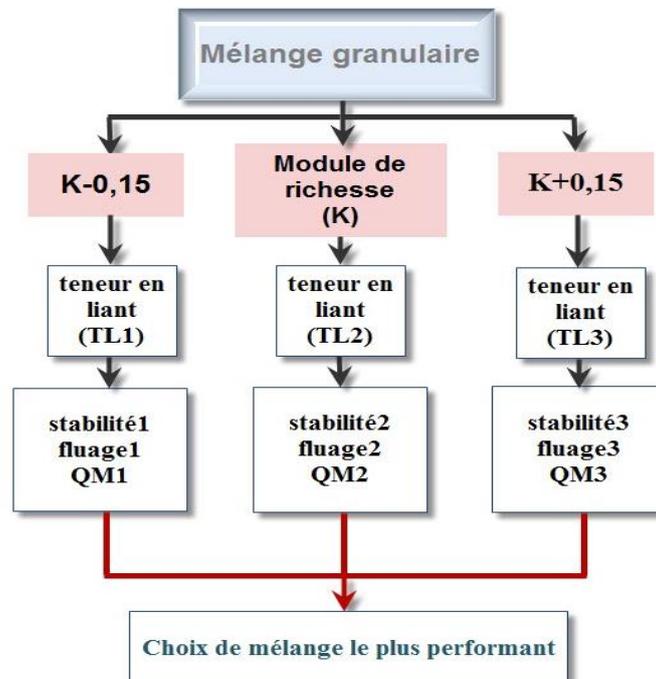


Figure (II-17) : Procédure de formulation en Algérie

II. 5.3.2 Méthode LCPC (France)

C'est une approche fondamentale qui reprend un certain nombre d'exigences sur la tenue à l'eau, les pourcentages de vide et la résistance à l'orniérage mais en y ajoutant le module complexe et la fatigue. Dans cette approche, la teneur en liant et l'enveloppe de la courbe ne sont pas fixées. L'épreuve de formulation est caractérisée par une approche fondée le plus possible sur les performances du mélange. Les considérations volumétriques sont prises en compte au moyen de la presse à cisaillement giratoire. Cet essai est le pivot de la méthode car il est utilisé pour tous les types d'enrobés à chaud. Cette procédure est décrite sur le schéma ci-dessous.

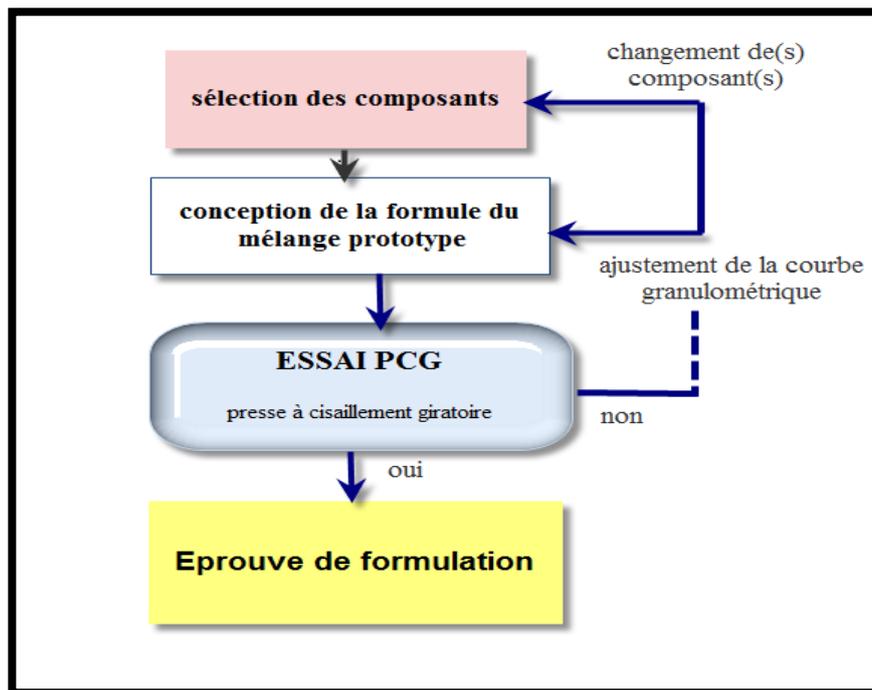


Figure (II-18) : Procédure de formulation en France [3]

Les niveaux de l'épreuve de formulation

La séquence d'essais est choisie en fonction du niveau d'épreuve (1 à 4) requis par le donneur d'ordre et éventuellement des essais complémentaires. Le niveau dépend généralement du type de mélange, de la position de la couche de mélange hydrocarboné dans la chaussée, de son épaisseur, du trafic prévu, des sollicitations particulières (rampes, carrefour, température), de l'objectif recherché par l'application de cette couche et de la nature des couches inférieures et de la taille du chantier.

Les différents niveaux de l'épreuve varient du plus simple (niveau 1) au plus complet (niveau 4), les niveaux supérieurs englobant les exigences des niveaux inférieurs.

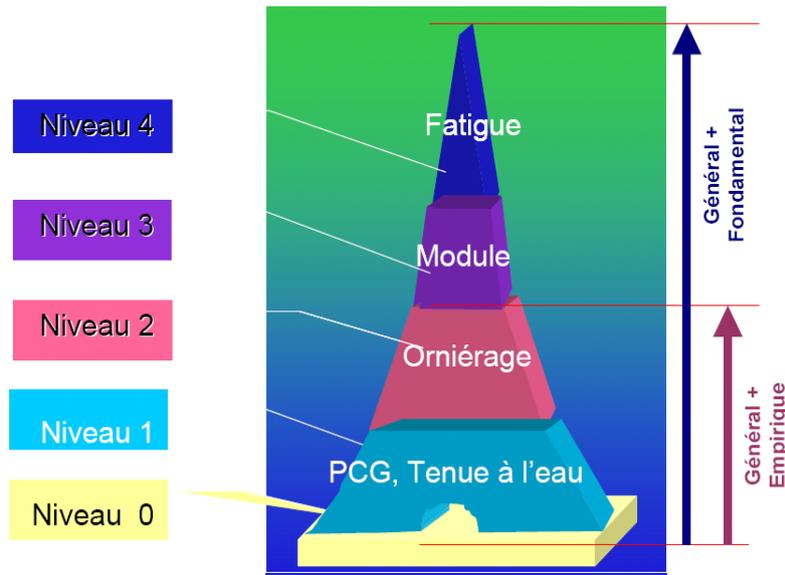


Figure (II-19) : Résumé des niveaux de l'épreuve de formulation [3]

Niveau 0 :

Le niveau 0 (sans essais) correspond aux enrobés destinés aux zones non circulées, et correspond à une description de la formule avec la granularité et la teneur en bitume.

Niveau 1 :

Le mélange doit satisfaire une fenêtre de pourcentages de vides à l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire ainsi que le seuil de tenue à l'eau.

À l'exception du niveau 0, ce niveau est commun à toutes les épreuves. Dans le cas d'applications à faible niveau de sollicitation, le niveau 1 peut être suffisant sans essai complémentaire.

Niveau 2 :

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

Niveau 3 :

Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement Giratoire et de tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'orniérage du niveau 2 et la caractérisation du module du mélange.

L'essai de module est spécifié dans le cas de chantiers importants et lorsque la couche concernée intervient dans le fonctionnement structurel de la chaussée.

Les valeurs de module à 15°C, 10 Hz ou 0,02s sont directement utilisées dans les modèles de calcul de dimensionnement.

Par définition dans les normes produites, les épreuves de formulation des GB (grave bitume) classe 4, BBME (béton bitumineux à module élevé) et des EME (enrobé à

module élevé) doivent obligatoirement comprendre un essai de module. Pour les autres produits qui peuvent appartenir à l'approche empirique ou fondamentale, la détermination du module doit être mentionnée.

Niveau 4 :

Ce niveau comporte les essais Presse à Cisaillement Giratoire et tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'orniérage du niveau 2, la caractérisation du module du mélange du niveau 3. Il est complété par la détermination de la résistance en fatigue.

L'essai de fatigue est à spécifier dans le cas de chantiers très importants et dès que la couche concernée travaille en fatigue.

II. 5.3.3 comparaison entre les deux méthodes

Le tableau (II-1) récapitule les essais de formulation de la méthode Contrôle Technique des Travaux Publics (Algérienne) et celle du Laboratoire Central de Ponts et Chaussées (Française).

Tableau (II-1) : Type d'essais pour les enrobés bitumineux

Caractéristiques	Essais	Formulation	
Maniabilité	Compactage à la PCG	LCPC	Approche empirique
	Stabilité et fluage Marshall	CTTP	
Sensibilité à l'eau	Tenue à l'eau Duriez	LCPC, CTTP	
Déformation permanente	Essai d'orniérage	LCPC	Approche fondamentale
Module de rigidité	Essai sur plaque	LCPC	
	Traction indirect (NAT)	CTTP	
Fatigue	Flexion en deux points	LCPC	

On observera que pour la méthode du CTTP, aucun niveau d'essai n'est exigé au stade fondamental (même si il y'a possibilité de mesurer le module de rigidité).

Au niveau empirique, seul l'essai Duriez est commun aux deux méthodes.

La maniabilité bénéficie pour la méthode LCPC, de la Presse de Cisaillement Giratoire qui offre la possibilité de prévoir le comportement de l'enrobé lors de la mise en œuvre

en fonction de l'énergie de compactage. La méthode CTTTP est restée au stade de l'essai Marshall.

II.6 CONCLUSIONS

Les enrobés sont des matériaux routiers par excellence. Placés en couche d'assises, ils permettent une diffusion suffisante des contraintes pour éviter une déformation permanente du sol support. Les bitumes polymères ont permis d'améliorer la cohésivité, de diminuer la susceptibilité thermique, d'augmenter l'élasticité, d'améliorer les propriétés rhéologiques et l'adhésivité des enrobés. Avec l'avènement des bitumes durs, les enrobés jouent un rôle structurant dans les chaussées des autoroutes et routes à fort trafic permettant la réalisation de chaussées durables. La détermination du module de rigidité - paramètre dimensionnant - devient incontournable.

Par ailleurs l'épreuve de formulation des enrobés a évolué, elle est caractérisée par une approche fondée sur les performances du mélange. Elle s'articule autour d'un essai pivot basé sur la détermination de l'aptitude au compactage des enrobés et l'optimisation de la formulation.

En Algérie, la formulation des enrobés standards se fait à ce jour selon l'approche empirique. Les nouvelles techniques à base de bitumes durs viennent de faire leur entrée en application dans l'autoroute EST-OUEST et roades ; faute de laboratoires équipés en ce sens, les formulations et les vérifications de ces dernières se sont faites à l'étranger. Cependant la situation devrait s'améliorer bientôt avec les prochaines acquisitions de matériels pour produits noirs.

Chapitre III

Les enrobés à module élevé -EME-

III.1 INTRODUCTION

L'évolution du trafic et des charges (globales et par essieu) que nous constatons sur le réseau des autoroutes et des routes principales incite à recourir à des revêtements toujours plus performants. De plus, l'entretien en profondeur et sous trafic des chaussées perturbe les flux de circulation et obligera à l'avenir d'avoir recours à des techniques performantes qui permettent de réduire l'étendue, la durée et la fréquence des travaux d'entretien.

L'utilisation de matériaux bitumineux à module élevé pour la construction et l'entretien des chaussées apporte de nombreux avantages. En particulier, le dimensionnement qui en résulte aboutit à des épaisseurs de couches notablement plus faibles, ce qui permet de limiter l'utilisation de granulats de bonne qualité et de réduire les volumes de matériaux à transporter. La limitation de l'épaisseur des couches permet le maintien des gabarits sous ouvrage et, dans certains cas, évite la mise à niveau des équipements tels que bordures et glissières.

On attribue l'invention des EME à la France. Les enrobés à module élevé ont fait leur apparition à grande échelle dans ce pays il y a plus de 20 ans. Ces matériaux font l'objet d'une norme dans ce pays et sont couramment appliqués sur des chaussées fortement sollicitées. Des expériences sont menées pour utiliser des enrobés à module élevé EME en couches de support. Ceux-ci sont obtenus par le choix d'une formulation spécifique et par le recours à des bitumes durs élaborés spécialement pour cet usage.

Les EME ont fait l'objet de plusieurs applications en Algérie (2007) pour la réalisation des tronçons sur l'autoroute Est-Ouest.

III.2 EVOLUTION DES ENROBES D'ASSISES

L'augmentation de l'agressivité du trafic routier et d'autre part le développement des matériaux de construction ont constitué des facteurs essentiels du développement des enrobés pour assise de chaussée (structure de chaussée). En effet, la recherche d'économies sur les travaux de construction a conduit à rechercher des solutions innovantes avec des revêtements en faible épaisseur, offrant de meilleures performances en termes de qualité d'usage et de durabilité.

III.2.1 OBJECTIFS DE L'EVOLUTION DES ENROBES

Amélioration des Performances mécaniques

- Module
- Comportement en fatigue
- Forte résistance à l'orniérage

Optimisation Technique et Economique

- Épaisseur de plus en plus mince
- Meilleure réponse à l'augmentation des sollicitations du trafic (charges, répartition, croissance,..)
- Nouvelle structure, notamment en renforcement de structure
- Réduction des travaux annexes (ex.: passage de canalisation, limite la hauteur de rehausse des rails des sécurités, des ouvrages en bordure ...)
- Economie de matériaux, longévité accrue (moins travaux)

III.2.2 DISPOSITIONS POUR PARVENIR AUX OBJECTIFS

- Augmentation de la teneur en bitume (de + en + élevées)
- Diminution de la granularité maximale (31, 20, 14 et 10 mm)
- Augmentation de la dureté des bitumes (pénétrabilité = 50, 40, 20 et 10)
- L'ajout des additifs pour augmenter la dureté des bitumes

Donc l'emploi des liants modifiés en matériau d'assise de chaussée du fait de l'amélioration qu'ils apportent aux performances des enrobés, et la réduction sensible d'épaisseur a plutôt conduit à l'apparaissant des GB3 et GB4.

Puis l'utilisation des bitumes durs (de pénétration 10/20, 15/25, etc..) afin d'atteindre des modules de rigidité élevés. Ils ont permis de constituer les Enrobés à Module Elevé (EME) se sont avérés pour cette application plus économique que les bitumes modifiés malgré la nécessité d'une teneur en liant forte pour assurer une bonne résistance en fatigue.

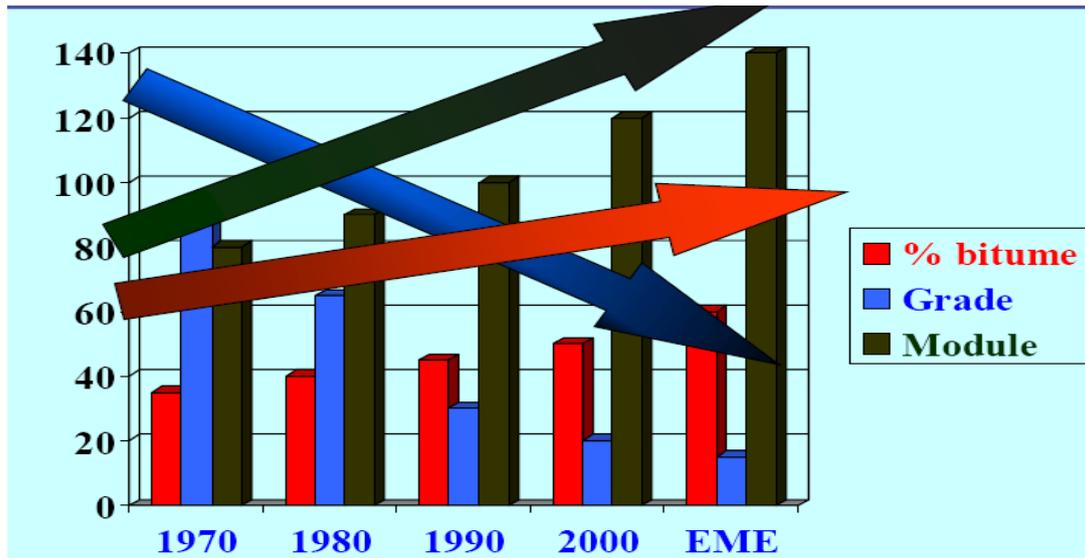


Figure (III-1) : évolution des enrobés d'assises [Brosseaud Yves, 2009]

III.3 DEFINITION

On définit les enrobés à module élevé, appelés communément EME, comme des bétons bitumineux pour couches de support qui présentent une rigidité sensiblement plus grande que celle des mélanges conventionnels, avec des doubles et des triples valeurs ($E > 14000 \text{ MPa}$). Ces mélanges présentent, en plus du module élevé, une plus grande résistance à la fatigue que les mélanges conventionnels.

Ils sont généralement constitués d'une fraction minérale à courbe granulométrique continue et d'un liant, ordinairement un bitume pur dur. La gamme de pénétration de ces liants mesurée à 25°C se situe habituellement entre 10 et $25^{1/10}$ mm.

On distingue suivant la classe granulaire trois types d'enrobés à module élevé :

- enrobé à module élevé 0/10 mm (**EME 0/10**) ;
- enrobé à module élevé 0/14 mm (**EME 0/14**) ;
- enrobé à module élevé 0/20 mm (**EME 0/20**).

Chaque type peut se situer dans deux classes de performances qui diffèrent entre eux notamment par leur teneur en liant et la dureté de celui-ci :

EME Classe1 : correspond à des graves bitumes à module élevé (14 000 MPa) obtenu par l'emploi d'un bitume dur, aux dosages voisins de ceux des graves bitumes (GB).

EME Classe2 : correspond à un enrobé à module élevé comportant, de plus, un très bon comportement en fatigue, du fait du dosage élevé en bitume dur.

C'est toujours de cette classe 2 que l'on parle lorsque l'on désigne de manière globale un EME.

Pour parvenir à concilier deux propriétés, quelques peu antinomiques, comme une rigidité importante ($E > 14\,000$ MPa) et une résistance élevée en fatigue ($\epsilon_6 > 130$ μdef), il est fait usage d'un liant dur (pénétrabilité comprise entre 10 et 35 1/10ème mm ; TBA $> 65^\circ\text{C}$), avec un dosage important (environ 5,5 à 6%, comparable à celui des enrobés pour couche de surface). La consistance élevée du mastic (bitume + filler) associée à un faible pourcentage de vides (3 à 5 %) conduit aussi à une très bonne résistance à l'orniérage.

III.4 PERFORMANCES ET FORMULATIONS

III.4.1 CONSTITUANTS DES EME

Le principe des EME repose sur deux idées pour augmenter notablement le module de rigidité et une meilleure tenue à la fatigue :

- **le remplacement** du bitume classique par un bitume dur 20/30 ou hyper dur 10/20.
- **Addition des produits industriels**, comme : polyéthylène, fibres cellulosique, fibres de verre, fibres de roche, bitume additionné de gilsonite (Asphalte naturel très dur)

III.4.1.1 Les granulats

Le squelette granulaire reste sensiblement le même que celles de GB.

Les caractéristiques mécaniques et de fabrication, concernant l'angularité, la propreté par exemple, des gravillons et des sables, sont conformes à celles des GB. Comme pour la formulation des GB, la norme permet d'utiliser des agrégats d'enrobés (matériaux bitumineux à recycler) selon le contexte du chantier avec un maximum de 40 %. La teneur en fines est de 7 à 9 %.

Les catégories des granulats sont spécifiées en fonction des objectifs recherchés et du contexte du chantier. Elle ne peut pas être inférieure aux caractéristiques minimales [ANNEXE III].

III.4.1.2 Les bitumes

Le liant utilisé est le plus souvent un bitume pur prêt à l'emploi, beaucoup plus rarement un bitume modifié ou un bitume spécial, tels que définis dans la norme NF EN 12591, élaborés par les sociétés pétrolières et les entreprises routières.

Bien qu'aucune caractéristique des liants ne soit imposée dans la norme, il convient d'utiliser le plus souvent des bitumes 10/20,15/25 ou 20/30 c'est à dire dont la pénétrabilité à 25°C se place dans l'intervalle 10 – 30 (1/100 mm) et dont la température Bille-Anneau soit proche de 65°C , ou supérieure.

Un bitume de grade traditionnel (40/50) peut être utilisé avec des additifs, 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. Ce pourrait être une solution pour réaliser des EME en Algérie.

III.4.1.3 Les additifs

Les additifs au comportement spécial permettent une amélioration considérable des caractéristiques et performances des enrobés avec, dans le cadre de certaines applications, l'obtention de modules très élevés.

Ils sont compatibles avec tous les grades de bitume et, par ailleurs, ces additifs (PR Plaste, gilsonite, asphalte dur,...) sous forme de fines ou de granulés peuvent palier certaines carences du bitume utilisé.

III.4.2 PERFORMANCES DES EME

Pour chaque classe de performances d'EME, le module de richesse K doit avoir une valeur supérieure ou égale à celle donnée dans le Tableau (III-1).

Tableau (III-1) : Valeurs minimales du module de richesse

EME de type 0/10, 0/14 ou 0/20	CLASSE 1	CLASSE 2
K	≥2.5	≥3.4
Dosage en bitume	≥4.2	≥5.6

Lorsque les constituants sont totalement nouveaux, il est nécessaire d'effectuer une étude à caractère général qui fait appel à l'essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire (PCG).

Les limites des % de vide à la PCG pour les EME sont représentées sur le tableau :

Tableau (III-2) : Pourcentages de vides à respecter pour les EME

ESSAI	EME CLASSE 1	EME CLASSE 2
Essai de compactage à la presse de cisaillement giratoire (NF P 98-252)		
A 80 girations pour un EME 0/10		
A 100 girations pour un EME 0/14	≤10	≤6
A 120 girations pour un EME 0/20		

Une bonne tenue en fatigue (cas des EME Classe 2) est assurée par une teneur en vide faible (de l'ordre < 6 %), et par un film épais de liant autour des granulats, caractérisé par le module de richesse, et assurant une bonne déformabilité favorable à l'autoréparation.

Le tableau (III-3) présente une comparaison des caractéristiques mécaniques normalisées des matériaux bitumeux d'assises, entre les graves bitumes GB et les enrobés à module élevé EME. On notera qu'il existe une bonne continuité dans les performances mécaniques, entre les classes de GB et d'EME, pour répondre à des choix variés d'utilisation.

Tableau (III-3) : Performances mécaniques des EME et des GB

ESSAIS	GB 2	GB 3	GB 4 et EME1	EME 2
DURIEZ à 18° C	0,65	0,70	0,70	0,75
ORNIÉRAGE - Profondeur d'ornièrè en % de l'épaisseur de la dalle (10 cm) à 60° C, au % de vides compris entre :				
8 et 11 % après 10.000 cycles	≤10%			
7 et 10 % après 10.000 cycles		≤10%		
5 et 8 % après 30.000 cycles			≤10% (GB 4)	
7 et 10 % après 30.000 cycles			≤7.5%(EME1)	
3 et 6 % après 30.000 cycles				≤7.5%
MODULE COMPLEXE Module (MPa) à 15° C, 10 Hz au % de vides compris entre :				
7 % et 10 %	≥9000	≥9000	≥14000 (EME1)	
7 % et 10 %			≥11000(GB4)	
5 % et 8 %				≥14000
3 % et 6 %				
FATIGUE Déformation relative à 10 ⁶ cycles, 10° C et 25 Hz au % de vides compris entre :				
7 % et 10 %	≥80 10 ⁻⁶	≥90 10 ⁻⁶	≥100 10 ⁻⁶ (EME1)	
5 % et 8 %			≥100 10 ⁻⁶ (GB4)	
3 % et 6 %				≥130 10 ⁻⁶

Les EME de classe 2 sont plus rigides, mais ont de meilleures performances en fatigue que les GB de classe 4. Ils pourront être employés chaque fois que l'on recherchera de faibles épaisseurs de chaussée sur des supports déformables, par exemple pour la réfection ou le renforcement de chaussée en traversée d'agglomération, ou lorsque la résistance à l'orniérage est souhaitée.

III.5 EPAISSEURS D'UTILISATION DES EME

Les épaisseurs moyennes (en cm) de mise en œuvre ainsi que les épaisseurs minimales en tout point sont mentionnées dans le tableau (III-4). Cette technique performante nécessite un très bon respect des épaisseurs, pour un bon fonctionnement structurel

Tableau (III-4) : Epaisseurs d'utilisation par couche

Type d'EME	Epaisseur moyenne d'utilisation (cm)	Epaisseur minimale en tout point (cm)
EME 0/10	6 à 8	5
EME 0/14	7 à 13	6
EME 0/20	9 à 15	8

Ces épaisseurs sont plus faibles que celles des GB : le fait d'être plus riche en liant rend l'enrobé plus maniable et plus structurant à épaisseur égale. Il est également plus imperméable, ce qui permet de le recouvrir directement par un enrobé très mince (BBTM), sans nécessairement utilisée une couche de liaison. Par rapport à celui d'une GB, le niveau élevé du module de rigidité réduit les déformations dans le matériau au niveau de la couche inférieure, ce qui est favorable à une réduction de l'épaisseur sous les mêmes sollicitations de trafic. Par ailleurs, les valeurs plus élevées des déformations relative à 15° C pour l'EME de classe 2, permettent le calcul de valeurs de déformations admissibles supérieures à celles des GB.

Le Guide des structures types de chaussées neuves (SETRA/LCPC 1998), pour le réseau routier national, ainsi que le Manuel de conception des routes, pour les chaussées autoroutières, permettent de faire la comparaison entre les 2 structures (GB, EME) dans les mêmes conditions de trafic et de type de plate-forme (tableau (III-5)).

Tableau (III-5) : Comparaison de structures sur réseau autoroutier (GB– EME)
[Y.BROSSEAUD]

Les couches	GB 2	EME 2
BBTM	2.5	2.5
BBSG	5.0	-
Basse	11.0	10.0
Fondation	13.0	10.0
Epaisseur totale	36.5	27.5

III.6 DOMAINES D'EMPLOI ET PRECAUTIONS D'USAGE

Les EME offrent une bonne résistance à l'orniérage et constituent donc une solution souvent utilisée en couche de base de 7 à 9 cm d'épaisseur, en répondant à la fois au problème d'apport structurel et à l'aspect anti-ornières.

III.6.1 DOMAINES D'EMPLOI DES EME 2

Le créneau privilégié est celui des travaux neufs et de renforcement fortement sollicités, avec parfois des contraintes de seuil, comme en contexte urbanisé. On peut citer :

- les voies à trafic lourd, canalisé et lent, telles que couloirs de bus,
- les voies spécifiques à trafic très lourd : voie spéciale poids lourds, quai de chargement, piste d'évolution des engins de manœuvre des portes containers,...
- les renforcements de chaussées en décaissement, voiries urbaines ou périurbaines,
- les couches de base de chaussée neuve à fondation en GRH, ou les couches d'assise de chaussée bitumineuse épaisse,
- la réfection et le renforcement de voies lentes d'autoroutes après fraisage limité à 8 ou 12 cm d'épaisseur. Une couche de roulement générale, en BBTM par exemple, est ensuite mise en œuvre sur toute la largeur des voies,
- les pistes et zones de circulation des aéroports, lorsque le trafic est important en nombre de mouvement et surtout en charge supportée par chaque roue des trains d'atterrissage.

Ces EME 2 sont fréquemment utilisés sur les aéroports français.

Ce matériau EME2, associé à une couche de roulement en béton bitumineux très mince (2 à 3 cm) constitue l'une des techniques d'entretien les plus fréquentes, pour les

chaussées à très fort trafic, puisque dans ce cas, du fait d'un pouvoir structural plus grand, la réduction d'épaisseur peut atteindre 25 %. De plus, la résistance à l'orniérage est excellente et l'on observe un bon maintien des caractéristiques de surface (adhérence, rugosité).

III.6.2 PRECAUTIONS D'USAGE

Les principales précautions, concernant la mise en œuvre, doivent être respectées pour permettre un bon comportement de la technique :

- disposer d'un support de capacité portance suffisante pour assurer une restitution satisfaisante durant le compactage, pour densifier correctement l'EME,
- les performances mécaniques de l'EME doivent bien entendu, satisfaire les spécifications de la norme, sur notamment la rigidité du matériau,
- respecter impérativement les épaisseurs moyennes du dimensionnement et surtout limiter les variations d'épaisseur (bon uni du support),
- assurer une protection superficielle par une couche de surface adaptée au trafic (suivant le principe de dissociation des couches) et au climat notamment hivernal.

III.7 DEVELOPPEMENT ET UTILISATION DE LA TECHNIQUE EN ALGERIE

Le bilan des EME est extrêmement positif, comme l'indique l'expérience française [Y.BROSSEAUD]

L'inquiétude que pouvait avoir les ingénieurs routiers, à utiliser des liants trop durs, était une certaine sensibilité à la fissuration thermique et à un accroissement de la rigidité dans le temps du fait d'un durcissement du liant déjà dur. Ces inquiétudes ne sont pas fondées. Il n'a pas été observé de fissurations transversales répétitives, signes de retrait thermique, sur les EME. Les seuls cas particuliers de fissuration ont été expliqués par l'usage de liants anormalement durs ou de certains additifs, et des mauvaises réalisations (non respect des précautions énoncées ci-avant). Avec le temps, il n'est constaté de fissurations thermiques sur les premières réalisations âgées de plus de 20 ans [Y.BROSSEAUD].

Pour la mise au point des EME, l'Algérie dispose d'un atout majeur, celui de la connaissance et de l'usage des normes française de formulation des enrobés à chaud.

Les ressources en granulats suffisamment durs, comme ceux déjà utilisés dans la technique des graves bitumes GB existent. Pour les liants, des adaptations sont vraisemblablement 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. Des grades de bitume «mi dur» comme le 20/30 pourront, par la suite, mieux répondre aux attentes de ces EME.

Mais d'autre part, le non disponibilité des laboratoires équipés des moyens d'essai de formulation des EME limite l'utilisation des EME en Algérie seulement sur les grandes projets routiers, ou l'épreuve de formulation est effectuée à l'étranger (France) et contrôlé par un autre organisme étranger.

Parmi les sections réalisées avec les EME on peut citer :

- La 2^{ème} rocade autoroutière (Zeralda-Boudouaou) sur 62 km
- La 4^{ème} rocade autoroutière (Khemis Miliana-Bordj Bou Arreridj) sur 300 km
- Travaux de renforcement de la RN 01 (Media) sur 20 km
- Réhabilitation de RN 04 (Ain Defla) sur 44 km

A titre d'exemple, Dans le chantier de la 2^{ème} Rcade, l'entreprise OHL (entreprise espagnole) a proposé l'utilisation des mélanges bitumineux de module élevé, de type EME pour les couches de fondation et de base, et de type BBME pour la couche de surface. Cela a permis de réduire l'épaisseur totale de la chaussée de **35 cm** dans le projet initial à **23 cm** dans la nouvelle solution (figure III-2), avec un comportement mécanique et d'une vie utile similaire et inclus meilleur que la chaussée initialement projeté.

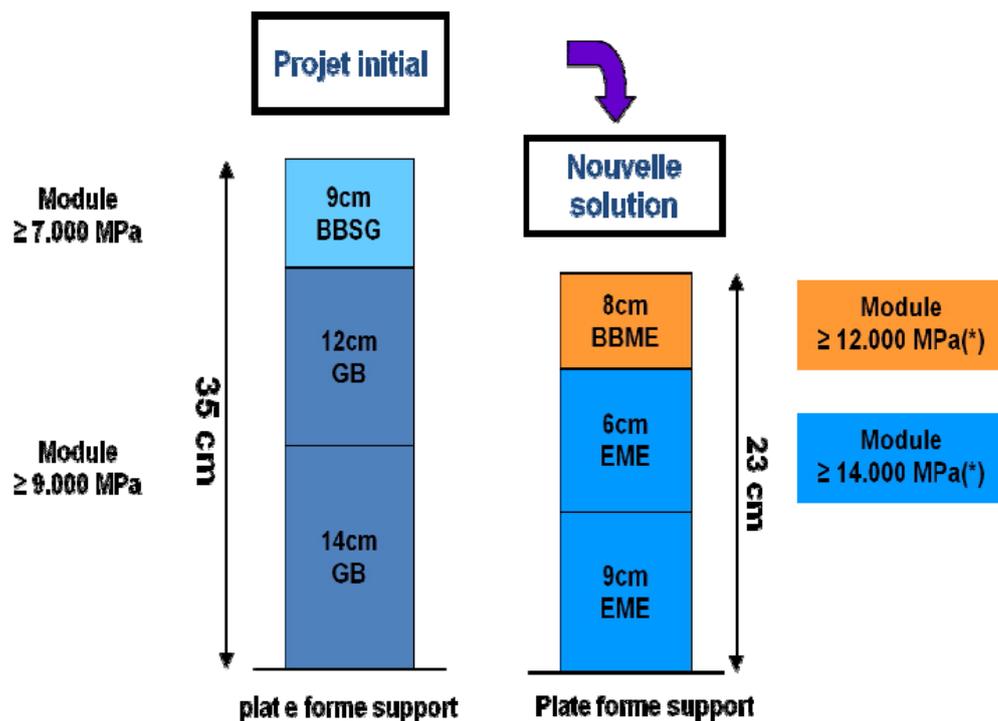


Figure (III-2) : Epaisseurs des couches de la 2^{ème} Rcade

III.8 CONCLUSION

Les mélanges dénommés du module élevé, développées et largement utilisées dans plusieurs pays européens, permettent de construire des couches de la chaussée avec quelques caractéristiques mécaniques sensiblement meilleures qu'avec les mélanges conventionnels, alors ils ont une grande résistance à la fatigue et aux déformations permanentes (ornières), ils ont une plus grande rigidité comparable à celle qui est obtenue avec les couches granulaires traitées par le ciment (gravier ciment et sol ciment), sans risque de fissuration par rétraction de durcissement ou thermique.

L'utilisation des liants modifiés, bien fabriqués dans la centrale ou bien obtenus "in situ" a travers l'incorporation, au propre bitume ou au mélange bitumineux, des additifs en forme de granulaire, formés par des types distincts de polymères, permet d'obtenir des mélanges bitumineux avec l'une des caractéristiques mécaniques et un comportement sous l'action du trafic, améliore sensiblement quand un bitume normal est utilisé.

ETUDE EXPERIMENTALE

Chapitre IV :

Etude expérimentale

IV.1 PROBLEMATIQUE

Cette partie expérimentale est destinée à mettre en application les connaissances acquises dans la partie bibliographique à savoir, établir une formulation d'un Enrobé Classique puis celle d'un Enrobé à Module Amélioré : *EMA à la place d'un EME*.

En effet:

1. La méthode de formulation appliquée en Algérie ne suit pas les mêmes étapes que la méthode Française (chapitre II).
2. L'équipement nécessaire pour une telle formulation n'est pas disponible en Algérie (les formulations et le contrôle des EME mis en œuvre en Algérie ont été établis à l'étranger).

Pour contourner ces obstacles, nous avons donc procédé à la formulation selon la recommandation du CTTP :

1. D'un enrobé classique –**Grave Bitume**-
2. D'un enrobé modifié – **Grave Bitume + Ajout** - (on ne peut pas parler d'EME, car la formulation n'est pas celle prévue par les normes régissant ce type de matériaux), l'additif par contre est celui utilisé dans la confection des EME mis en œuvre sur l'autoroute EST-OUEST.
3. Notre étude a été complétée par la détermination du module élastique grâce au NAT mis à notre disposition par le CTTP. (Chapitre II, paragraphe II.3.4).

IV.2 METHODOLOGIE DE LA PARTIE EXPERIMENTALE

IV.2.1 METHODOLOGIE D'OPTIMISATION

Les prescriptions CTTP pour une étude de formulation d'un enrobé en laboratoire sont les suivantes:

- ❖ **Teneur en liant:** variation du module de richesse par pas de 0,15 autour de module de richesse exigé par la norme, 3 formules au total.
- ❖ **Granulométrie:** une seule composition, Celui-ci se fait par combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que le mélange s'insère dans un fuseau de référence.

Les essais mécaniques retenus pour l'étude de formulation sont les suivants:

- ❖ **Essai Marshall** (détermination de compacité des éprouvettes, de stabilité, fluage et quotient Marshall)
- ❖ **Tenue à l'eau** (suivant le mode opératoire CTTP)

Le mélange optimal est celui qui donne de bonnes performances (% de vide, stabilité et fluage Marshall et tenue à l'eau).

IV.2.1 PERFORMANCES DES ENROBES AVEC L'AJOUT

La 2^{ème} partie, on procède à l'ajout d'un additif Module -le même que celui utilisé pour le cas des EME Algérie- au mélange optimal conventionnel et suivi l'évolution des performances des mélanges en fonction du taux d'ajout.

Les essais retenus pour cette partie sont les mêmes essais de la 1^{ère} partie dans laquelle on ajoute l'essai de module.

Remarque :

Le nombre des éprouvettes pour chaque formulation est de **8** :

- Une éprouvette pour la compacité
- 2 éprouvettes pour la stabilité et fluage Marshall
- 5 éprouvettes pour la tenue à l'eau (2 en immersion et 3 à sec)

Pour l'essai de module, l'essai est réalisé sur les mêmes éprouvettes conservées à sec avant l'écrasement.

La quantité totale des matériaux utilisés pour chaque formulation est de 9600g (1200g par éprouvette)

Le schéma ci-dessous présente les différentes étapes de l'étude expérimentale :

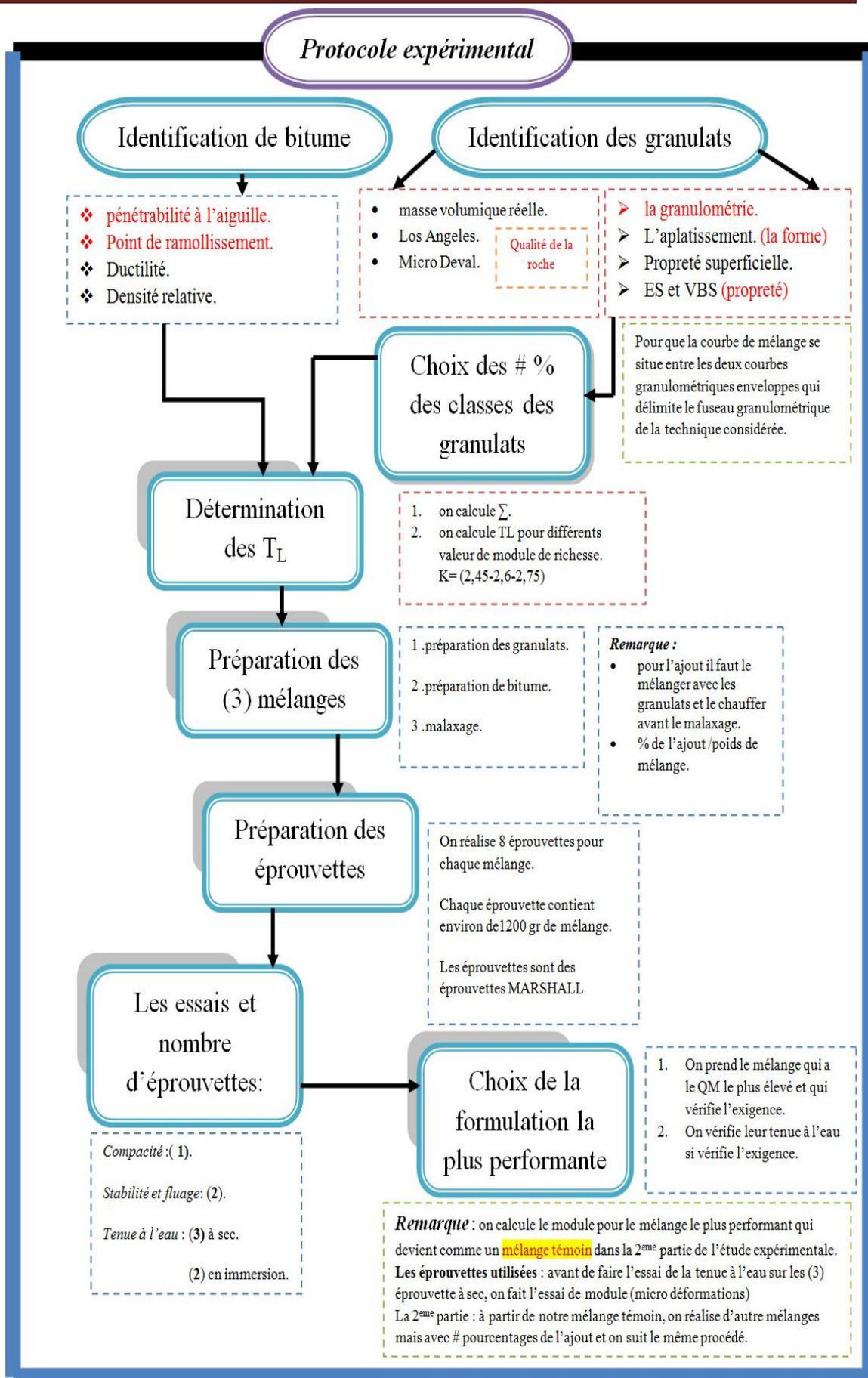


Figure (IV- 1):schéma présente la démarche expérimentale

IV.3 ETUDE DE FORMULATION

IV.3.1 LES MATERIAUX

Les matériaux ont été choisis de telle manière à fabriquer un enrobé classique GB/20 de sorte à ce que l'ajout du PR PLAST MODULE nous rapproche d'EME, classe 2.

Tableau (IV-1) : Performances exigés des GB/20 et EME /20 selon la méthode LCPC

Appellation	GB/20	EME/20
% vides PCG	< 11	< 6
Sensibilité à l'eau	> 0.7	> 0.7
Module (MPa)	9000	14 000

Ces indications serviront pour l'analyse de nos résultats.

IV.3.1.1 Les granulats

Provenance

Les granulats utilisés dans le cadre de la présente étude sont les fractions couramment utilisées en Algérie pour la fabrication des enrobés bitumineux destinés aux couches des chaussées. Les origines des fractions granulaires 0/3, 3/8, 8/15 et 15/25 sont données dans le tableau (IV-2) ;

Tableau (IV-2) : Provenance des granulats utilisés

Matériau	Carrières	Entreprise d'exploitation
Sable 0/3	Keddara wilaya de Boumerdes	SARL AGREGAL
Gravier 3/8	Keddara wilaya de Boumerdes	SARL AGREGAL
Gravier 8/15	Keddara wilaya de Boumerdes	SARL AGREGAL
Gravier 15/25	Keddara wilaya de Boumerdes	SARL AGREGAL
Bitume 40/50	-	NAFTAL

Caractérisation

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

- Caractéristiques de fabrications des granulats
- Caractéristiques intrinsèques des granulats

Caractéristiques de fabrications des granulats :

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

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

Caractéristiques intrinsèques des granulats :

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

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

Résultats et commentaires :

Les résultats de Caractéristiques de fabrications des granulats sont regroupés dans le tableau (IV-3).

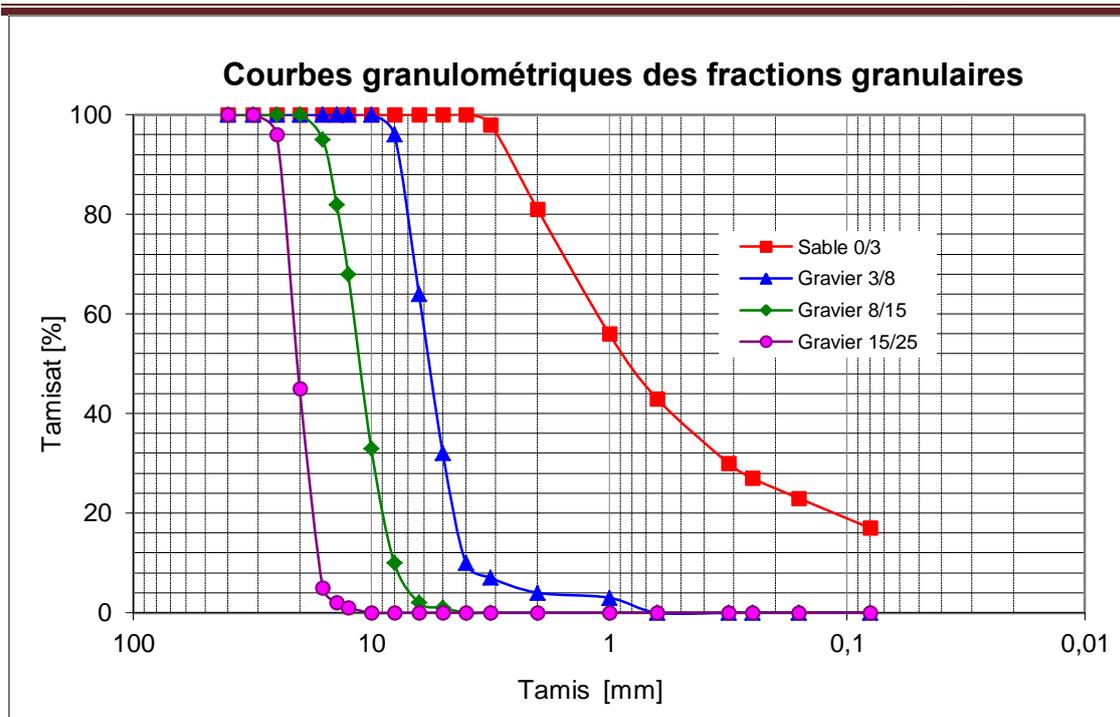
Tableau (IV-3) : Caractéristiques de fabrication des granulats.

Essais	Résultats				Spécifications
	0/3	3/8	8/15	15/25	
Coefficient d'aplatissement [%]	-	13,65	12,50	6,37	≤ 25*
Propreté superficielle [%]	-	3,31	1,13	1,30	< 2
Equivalent de sable	75,5	-	-	-	≥ 60
Valeur au bleu de méthylène	1,01	-	-	-	< 2

Les résultats de l'analyse granulométrique sont présentés par le tableau (IV-4) est illustrés par la figure (IV-3).

Tableau (IV-4) : résultats de l'analyse granulométrique

Tamis	Fractions					Mélange proposé
	Fillers	0/3	3/8	8/15	15/25	
31,5	100	100	100	100	100	100
25	100	100	100	100	94	99
20	100	100	100	100	43	89
16	100	100	100	99,5	4	81
14	100	100	100	81	1	76
12,5	100	100	100	70	1	74
10	100	100	100	39,5	0	68
8	100	100	98	12	0	62
6,3	100	100	76	3	0	56
5	100	100	45,5	1	0	49
4	100	100	20	0	0	44
3,15	100	94	12	0	0	40
2	100	81	7	0	0	34
1	100	59	5	0	0	25
0,63	100	47	4,5	0	0	20
0,315	100	33	4	0	0	14
0,16	97	23	4	0	0	10
0,08	95	16	3,5	0	0	7



IV.3.1.2 Le bitume

Les analyses que nous avons effectuées sur le bitume sont :

- Densité relative à 25°C (norme EN ISO 2592).
- Pénétrabilité à l'aiguille à 25°C (norme EN 1426),
- Point de ramollissement billes et anneaux (norme EN 1427),
- Ductilité (norme NF T66-006)

Les caractéristiques physiques et mécaniques du bitume de base sont résumées dans le tableau (IV-6).

Tableau (IV-6): Caractéristiques du bitume.

<i>Type d'essai</i>	<i>Résultat</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Spécifications</i>
Pénétrabilité à 25°C (1/10 mm)	41-41	41	35 – 50
Température bille et anneau « TBA » (°C)	52	52	50 – 58
Densité relative (g/cm ³)	1,01	1,01	1,0 à 1,05
Ductilité (cm)	>100	-	>100

Commentaire :

Le bitume analysé répond bien aux caractéristiques de la classe 40/50 selon la norme NF T65-001. [Annexe III]

IV.3.1.3 L'ajout

PR PLAST MODULE : [fiche technique de PR Plast industrie]

C'est un additif qui permet d'obtenir des modules complexes élevés atteignant 17 000 M Pa. Ce polymère de couleur noir, d'une granulométrie de 5 mm introduit lors du malaxage, sur les granulats chauds avant enrobage en centrale d'enrobage.

Le taux d'ajout est généralement compris entre 0,5 à 0,8 % de l'enrobe et, il est injecté dans le malaxeur des postes d'enrobage. La température de fabrication est de 180°C.

Le PR PLAST MODULE offre, au niveau de l'enrobé, un triple effet de renforcement :

- ✓ Un effet de liant obtenu par dissolution d'une certaine partie du polymère offrant notamment un abaissement de la pénétrabilité, une augmentation de la température bille et anneau, un abaissement de la susceptibilité thermique.
- ✓ Un effet d'armature initié par des fibres plastiques présentes en créant des ponts à l'intérieur du squelette granulométrique.
- ✓ Un effet bloquant dû aux particules ramollies provisoirement lors de la mise en œuvre et qui seront ainsi thermoformées lors du compactage en remplissant les vides du squelette granulométrique. L'ensemble de ces trois effets permet à l'enrobé ainsi amélioré d'obtenir une amélioration importante des performances des chaussées et de leur durée de service.

Principaux avantages :

- ✓ Réduction de l'épaisseur (20-30%)
- ✓ Permet de fabriquer des enrobés hauts modules avec bitume classique
- ✓ Améliore la résistance à l'orniérage
- ✓ Simplicité d'utilisation
- ✓ Réduction du coût
- ✓ Stockage aisé

Domaine d'application :

- * Couche de Roulement BBME (Bitume 50/70)
- * Couche de Base EME-BBME (Bitume 35/50 ou 50/70)
- * Couche de Fondation EME-BBME (Bitume 35/50 ou 50/70)

IV.3.2 FORMULATION DE L'ENROBE CLASSIQUE

Le but de la formulation étant de déterminer une composition optimale de granulats, de liants et de vides qui permette d'atteindre des performances conformes aux normes.

La démarche de formulation développée ici comporte trois phases :

1. Détermination de mélange granulaire,
2. Sélection des teneurs en bitume,
3. Optimisation des mélanges.

IV.3.2.1 Mélange granulaire

L'objectif visé est de maîtriser la disposition granulaire du squelette minérale et choisir une formule qui donne un mélange ayant la meilleure aptitude au compactage et qui pourrait conférer une meilleure stabilité au mélange hydrocarboné.

Celui-ci se fait par combinaison des fractions granulaires utilisées de manière à ce que le mélange s'insère dans un fuseau de référence.

Le fuseau de référence utilisé est celui d'un grave bitume 0/20 (GB 0/20) dont les valeurs limites sont données dans le tableau (IV-7) :

Tableau (IV-7): le fuseau GB 0/20

Tamis	Fuseau	
20	85	100
6,3	45	60
2	25	40
0,63	16	29
0,08	6	9

Pour que la courbe de mélange s'insère dans le fuseau de référence, la composition granulaire suivante a été retenue :

Tableau (IV-8) : Composition du mélange Granulométrique

Fractions	Pourcentage (%)
Sable 0/3	40
Gravier 3/8	20
Gravier 8/15	20
Gravier 15/25	20

La courbe granulométrique du mélange issue de cette formule s'inscrit parfaitement dans le fuseau spécifique à la Grave bitume 0/20 défini dans les recommandations algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux de Février 2004.

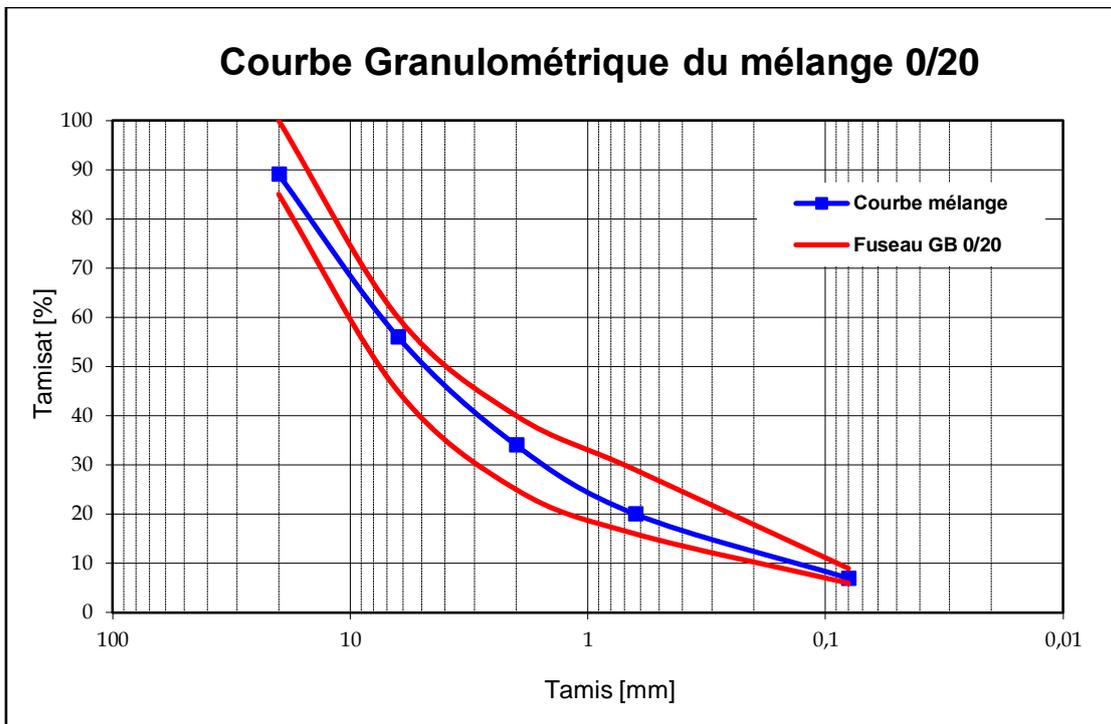


Figure (IV-3) : la courbe de mélange s'insère dans le fuseau GB 0/20

IV.3.2.2 Détermination des teneurs en bitume

La teneur en liant est définie comme étant le rapport de la masse de bitume sur la masse des granulats secs exprimé en pourcent.

Pour déterminer cette teneur en liant, on introduit la notion de surface spécifique des granulats notée Σ et exprimée en m^2/kg , c'est-à-dire la surface développée qu'auraient les granulats assimilés à des sphères.

Pour un mélange granulométrique donné, la formule suivante permet d'avoir une approximation de la surface spécifique Σ :

$$100 \Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 135f$$

Avec : G : des éléments supérieurs à 6.3mm,

S : des éléments compris entre 6.3 et 0.315mm,

s : des éléments compris entre 0.315 et 0.08mm,

f : des éléments inférieurs à 0.08 mm.

La teneur en liant, fonction de la surface spécifique des granulats, est donnée par la formule expérimentale suivante :

$$P = \alpha \cdot k \cdot \sqrt[5]{\Sigma}$$

Avec :

P : teneur en liant (%)

α : coefficient destiné à tenir compte de la masse volumique réel des granulats « MVR_g ». Si celle-ci diffère de 2.65 t/m³, on utilise la formule suivante :

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

Pour les granulats utilisés dans cette étude : MVR_g=2.62 t/m³ => $\alpha=1.01$

Σ : surface spécifique des granulats (m²/kg),

K : le module de richesse qui caractérise l'épaisseur moyenne du film de bitume autour des granulats richesse (k varie pour un grave bitume 0/20 de 2,45 à 2,90)

Tableau (IV-9) : calcul de la surface spécifique

Tamis	Mélange proposé	Paramètre de calcul de Σ
31,5	100	G=44%
25	99	
20	89	
16	81	
14	76	
12,5	74	
10	68	
8	62	
6,3	56	S=42%
5	49	
4	44	
3,15	40	
2	34	
1	25	
0,63	20	s=7%
0,315	14	
0,16	10	
0.08	7	f=7
Σ		11.37
$\sqrt[5]{\Sigma}$		1.63

Les teneurs en liant doivent être choisies de manière à permettre au mélange hydrocarboné d'atteindre en laboratoire les performances exigées par les normes.

On fabriquera l'enrobé avec au moins trois teneurs en liants différentes. On choisira donc des valeurs de module de richesse qui devront varier de l'ordre de ± 0.15 de module théorique.

Les différents modules de richesse ainsi que les teneurs en liant résiduel correspondant sont résumés dans le tableau (IV-10) :

Tableau (IV-10) : Teneurs en bitume retenues

	Teneur TL1	Teneur TL2	Teneur TL3
Module de richesse	2.45	2.6	2.75
Teneur en liant (%)	4.03	4.28	4.52
Poids (g)	387	411	434

IV.2.2.3 Détermination du mélange optimal

Les essais réalisés pour tester les performances mécaniques et déterminer la formulation optimale de la grave bitume (GB 0/20) sont uniquement les essais MARSHALL réalisés selon le mode opératoire des « recommandations Algériennes pour l'utilisation des bitumes et enrobés bitumineux » de Février 2004. On mesure :

- % de vide
- Stabilité et fluage Marshall
- Tenue à l'eau

Mélange avec TL1=4.03%

Module de richesse de mélange : $k = 2.45$

La teneur en liant est égale à 4.03%

Les résultats des essais pratiqués sur cet enrobé sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau (IV-11) : % de vide (TL1)

Masse de l'éprouvette	Volume de l'éprouvette	Densité apparente	Densité hydrostatique	compacité	% de vide
1190.6	514.93	2.32	2.40	96.66	3.34

Tableau (IV-12) : Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL1)

N° de l'éprouvette	Lecteur anneau	Stabilité Marshall	Stabilité après corrélation	Fluage Marshall	Quotient Marshall
1	52.5	12.18	12.18	3.05	
2	40	9.28	9.14	3.75	
moyenne	-	-	10.66	3.40	

Tableau (IV-13) : Tenue à l'eau (TL1)

N° de l'éprouvette	RCsec	RCsec moyenne	RCimm	RCimm moyenne	Rapport RCimm/RCsec
1	62.4	63	55.3	57.4	0.91
2	63.6		59.5		

Mélange avec TL2=4.28%

Module de richesse de mélange : $k = 2.6$

La teneur en liant est égale à 4.28%

Les résultats des essais pratiqués sur cet enrobé sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau (IV-14) : % de vide (TL2)

Masse de l'éprouvette	Volume de l'éprouvette	Densité apparente	Densité hydrostatique	Compacité	% de vides
1198.4	516.55	2.32	2.39	97.07	2.93

Tableau (IV-15) : Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL2)

N° de l'éprouvette	Lecteur anneau	Stabilité Marshall	Stabilité après corrélation	Fluage Marshall	Quotient Marshall
1	57	13.25	13.25	3.05	
2	54	12.53	12.06	3.25	
moyenne	-	-	12.65	3.15	

Tableau (IV-16) : Tenue à l'eau (TL2)

N° de l'éprouvette	RCsec	RCsec moyenne	RCimm	RCimm moyenne	Rapport RCsec/RCimm
1	68.6	67.75	62.2	61.15	0.9
2	66.9		60.1		

Mélange avec TL3=4.52%

Module de richesse de mélange : $k = 2.75$

La teneur en liant est égale à 4.52%

Les résultats des essais pratiqués sur cet enrobé sont présentés dans les tableaux suivants :

Tableau (IV-17) : % de vide (TL3)

Masse de l'éprouvette	Volume de l'éprouvette	Densité apparente	Densité hydrostatique	compacité	% de vides
1199	522.19	2.30	2.37	97.04	2.96

Tableau (IV-18) : Résultats de stabilité et fluage Marshall (TL3)

N° de l'éprouvette	Lecteur anneau	Stabilité Marshall	Stabilité après corrélation	Fluage Marshall	Quotient Marshall
1	57	13.25	13.47	3.56	
2	64.5	14.97	14.97	3.90	
moyenne	-	-	14.22	3.73	

Tableau (IV-19) : Tenue à l'eau (TL3)

N° de l'éprouvette	RCsec	RCsec moyenne	RCimm	RCimm moyenne	Rapport RCsec/RCimm
1	77.7	76.2	67.5	64.8	0.85
2	74.7		62.1		

IV.3.2.4 Résultats et commentaires

Les résultats des essais MARSHALL sont regroupés dans le tableau (IV-20).

Tableau (IV-20) : Résultats des essais MARSHALL

Formule granulaire	TL1	TL2	TL3	Spécifications
Teneur en bitume (%)	4,03	4,28	4,52	-
Densité apparente	2,32	2,32	2,30	-
% vides	3,34	2,92	2,96	< 8
Stabilité (KN)	10,66	12,65	14,22	≥ 10,5
Fluage (mm)	3,40	3,15	3,73	≤ 4
Quotient Marshall	3,13	4,01	3,81	-
Tenue à l'eau	0,91	0,90	0,85	> 0,75

Commentaires

D'après les résultats des essais Marshall effectués, nous remarquons que :

- Les compacités de toutes les éprouvettes sont acceptables.
- Les stabilités et les résistances aux fluages MARSHALL sont conformes aux spécifications.
- Les mélanges hydrocarbonés ont montré une tenue à l'eau satisfaisante.
- La formule « TL2 » présente des bonnes performances en termes de stabilité, fluage et quotient Marshall.

NB : Le quotient Marshall est un indicateur pour la résistance aux déformations, permanentes, contraintes de cisaillement et aussi pour l'orniérage des enrobés bitumineux. Les plus grandes valeurs du quotient indiquent que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes.

IV.4 EVALUATION DES PERFORMANCES EN FONCTION DES % DE PR PLAST

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

L'additif qui a nomenclature PR PLAST MODULE permet d'obtenir des modules complexes élevés atteignant 17 000 M Pa voire tableau (VI-21).

Le taux d'ajout est généralement compris entre 5 et 8 kg par tonne d'enrobé (0.5% à 0.8%) ou plus précisément par tonne de granulats secs et, il est injecté dans le malaxeur des postes d'enrobage.



Figure (IV-4) : PR Plast sous forme granulés

Le PR Plast est un plastomère utilisé pour la modification des enrobés bitumineux et ceci depuis plus de 20 ans [catalogue de PR Industrie] afin d'obtenir une augmentation de la résistance à la fatigue et diminution des déformations permanentes.

Tableau (IV-21) : fiche technique du PR PLAST MODULE

Grade bitume	50/70	35/50	50/70	35/50
% bitume	4,4	4,4	5,9	5,9
PR Plast Module	0,80%	0,80%	0,80%	0,80%
Module de richesse	2,7	2,7	3,6	3,6
teneur en vides	7%	7%	3%	3%
Module complexe	12 930	17 000*	12 500	16 000*
15°C-10 Hz Fatigue	112.10(-6)	105.10(-6)*	140.10(-6)*	135.10(-6)*
Nom / Classe		EME Classe 1	BBME Classe 3	EME Classe 2

* valeurs estimés

L'incorporation de ce modifiant aux enrobés entraîne une modification qui est fonction de l'enrobé lui-même, du classe de bitume et de la teneur de modifiant comme l'indique la fiche technique (tableau IV-21) du PR PLAST MODULE.

Notre travail est concentré sur l'influence du PR Plaste sur les caractéristiques mécaniques Marshall (stabilité, fluage et quotient Marshall), et l'amélioration du module de rigidité de l'enrobé formulé dans la première partie de notre étude.

Remarque : il est à noter que la fiche technique ne fournit d'informations ni sur la composition chimique du produit, ni sur l'essai avec lequel le module a été déterminé, ni sur les performances de l'enrobé témoin (0% d'ajout) ; de plus aucune indication sur le comportement à long terme.

IV.4.1 COMPOSITIONS DES MELANGES

L'étude se fait sur une formulation optimale (de chapitre précédant) ; L'ajout du PR Plast Module s'est opéré aux taux suivants : - **0.3% ; 0.6 ; 0.9 et 1.2** – taux pris dans un intervalle plus grand que celui préconisé dans la fiche technique [**0,5 à 0,8 %**] afin de constater son influence sur les performances de l'enrobé.

Les dosages en constituants d'enrobé sont comme suit :

Tableau (IV-22) : la Composition optimale du mélange bitumineux

<i>Les constituants</i>	<i>Pourcentage (%)</i>
Sable 0/3	40
Gravier 3/8	20
Gravier 8/15	20
Gravier 15/25	20
Bitume 40/50	4.28

IV.4.2 PERFORMANCES DES MELANGES

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

Mélange avec 0% de PR Plaste

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec un teneur en PR Plast de 0% sont représentées sur le tableau (IV-23)

Tableau (IV-23) : Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0% de PR Plast

Densité apparente	2.32
% vides	2.92
Stabilité (KN)	12.65
Fluage (mm)	3.15
Quotient Marshall	4.01
Tenue à l'eau s/SM	0,90

Le module :

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé sans ajout de PR PLAST sont représentés dans le tableau :

Tableau (IV-24) : Résultats de module de rigidité avec 0% de PR Plast

N° des pulsations	Charge vertical (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontal (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	2.04	194.7	2.1	121	9200
2	2.05	196.2	2.2	125	8977
3	2.05	196.2	2.1	125	9168
4	2.05	195.9	2.2	125	8917
5	2.05	195.6	2.1	123	9264
moyenne	2.05	195.7	2.1	123.5	9105

Mélange avec 0.3% de PR Plaste :

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec un teneur en PR Plast de 0.3% sont représentées sur le tableau (IV-25)

Tableau (IV-25) : Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.3% de PR Plast

Densité apparente	2.37
% vides	2.47
Stabilité (KN)	14.63
Fluage (mm)	2.7
Quotient Marshall	5.42
Tenue à l'eau s/SM	0,93

Le module :

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé avec 0.3% d'ajout de PR PLAST sont représentés dans le tableau (IV-26) :

Tableau (IV-26) : Résultats de module de rigidité avec 0.3% de PR Plast

N° des pulsations	Charge vertical (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontal (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	3.83	389.8	3.4	124	11151
2	3.80	386	3.4	125	11122
3	3.78	384.3	3.4	124	11214
4	3.78	384.4	3.4	124	11077
5	3.79	384.9	3.4	124	11000
moyenne	3.80	385.9	3.4	124.2	11113

Mélange avec 0.6% de PR Plaste :

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec un teneur en PR Plast de 0.6% sont représentées sur le tableau (IV-27)

Tableau (IV-27) : Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.6% de PR Plast

Densité apparente	2.31
% vides	3.35
Stabilité (KN)	15.77
Fluage (mm)	2.45
Quotient Marshall	6.58
Tenue à l'eau s/SM	0,94

Le module :

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé avec 0.6% d'ajout de PR PLAST sont représentés dans le tableau (IV-28) :

Tableau (IV-28) : Résultats de module de rigidité avec 0.6% de PR Plast

N° des pulsations	Charge vertical (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontal (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	3.79	378.9	3.2	121	11574
2	3.78	378.6	3.2	127	11797
3	3.76	376.1	3.2	123	11735
4	3.78	378.4	3.1	125	11899
5	3.76	376.9	3.2	123	11659
moyenne	3.77	377.7	3.2	123.8	11733

Mélange avec 0.9% de PR Plaste :

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec un teneur en PR Plast de 0.9% sont représentées sur le tableau (IV-29)

Tableau (IV-29) : Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 0.9% de PR Plast

Densité apparente	2.32
% vides	2.52
Stabilité (KN)	16
Fluage (mm)	2.24
Quotient Marshall	7.14
Tenue à l'eau s/SM	0,95

Le module :

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé avec 0.9% d'ajout de PR PLAST sont représentés dans le tableau (IV-30):

Tableau (IV-30) : Résultats de module de rigidité avec 0.9% de PR Plast

N° des pulsations	Charge vertical (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontal (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	3.77	377	2.9	122	12841
2	3.76	376.2	2.9	127	12941
3	3.74	374.0	2.8	124	12929
4	3.74	374.2	2.8	124	12986
5	3.75	374.8	2.9	124	12921
moyenne	3.75	375.2	2.9	124.4	12924

Mélange avec 1.2% de PR Plast

Les résultats des essais Marshall sur l'enrobé avec un teneur en PR Plast de 1.2% sont représentées sur le tableau (IV-31)

Tableau (IV-31) : Résultats des essais Marshall sur enrobé avec 1.2% de PR Plast

Densité apparente	2.29
% vides	3.37
Stabilité (KN)	16.22
Fluage (mm)	2.01
Quotient Marshall	8.07
Tenue à l'eau s/SM	0,95

Le module :

Les résultats de module de rigidité obtenus par l'essai au NAT pour un enrobé avec 1.2% d'ajout de PR PLAST sont représentés dans le tableau (IV-32):

Tableau (IV-32) : Résultats de module de rigidité avec 1.2% de PR Plast

N° des pulsations	Charge vertical (KN)	Effort horizontal (KPa)	Déformation horizontal (micron)	Temps de l'évaluation (ms)	Module de rigidité (MPa)
1	3.41	336.0	2.4	121	13639
2	3.48	342.5	2.3	128	14824
3	3.43	338.2	2.3	124	14779
4	3.43	337.9	2.2	124	14897
5	3.43	338.3	2.3	124	14692
moyenne	3.44	338.6	2.3	124.2	14566

IV.4.3 RECAPITULATIF DES RESULTATS ET GRAPHES

Le tableau (VI-33) est un récapitulatif des performances de l'enrobés par l'ajout des différents teneurs en PR Plast Module.

Tableau (IV-33) : Récapitulatif des résultats

% de PR Plaste	0%	0.3%	0.6%	0.9%	1.2%
Teneur en bitume (%)	4.28	4.28	4.28	4.28	4.28
Densité apparente	2.39	2.43	2.39	2.38	2.37
% vides	2.92	2.47	3.35	2.52	3.37
Stabilité (KN)	12.65	14.63	15.77	16	16.22
Fluage (mm)	3.15	2.7	2.45	2.24	2.01
Quotient Marshall	4.01	5.42	6.44	7.14	8.07
Tenue à l'eau	0.90	0.93	0.94	0.95	0.95
Module (MPa)	9105	11113	11733	12924	14566

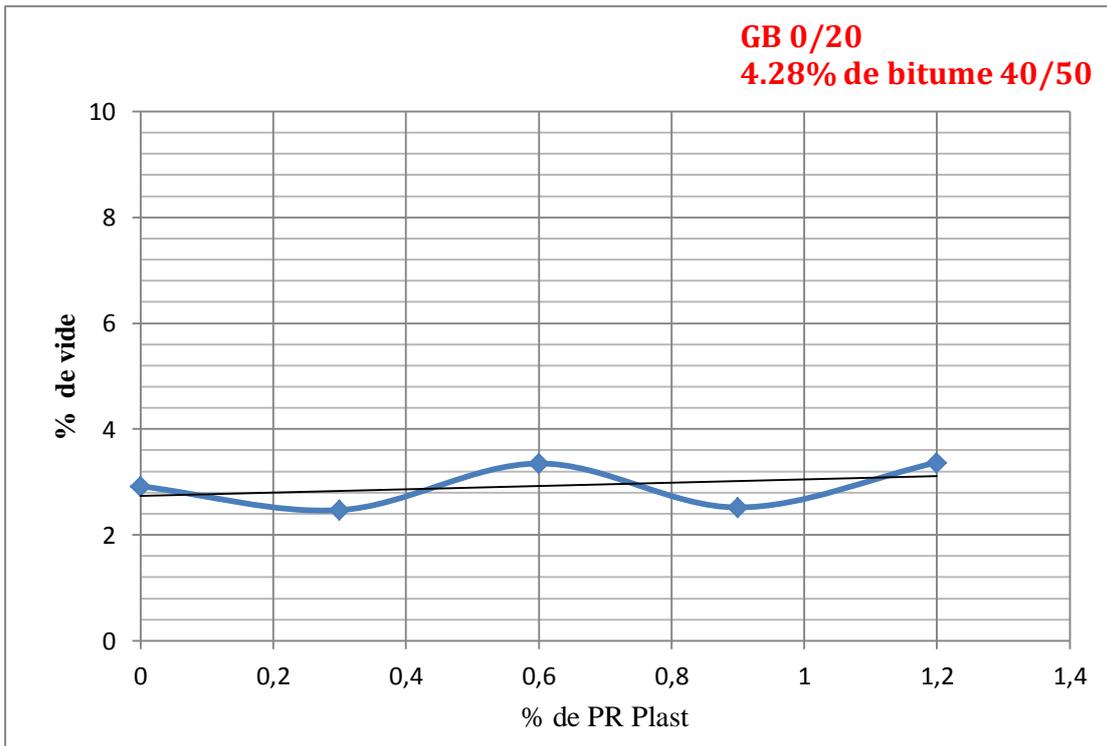
%de vide

Figure (IV-5) : Variation de % de vide en fonction de % de PR Plast

Le pourcentage de vides du mélange est quasi stable, et passe par des valeurs minimales à 0.3% et 0.9% d'ajout. Pour les autres taux, le pourcentage de vide est plus important que celui de l'enrobé sans ajout.

On remarque que le pourcentage de vide est dehors de l'intervalle spécifié par la recommandation algérienne [4-8], mais reste toujours acceptable.

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

Stabilité Marshall

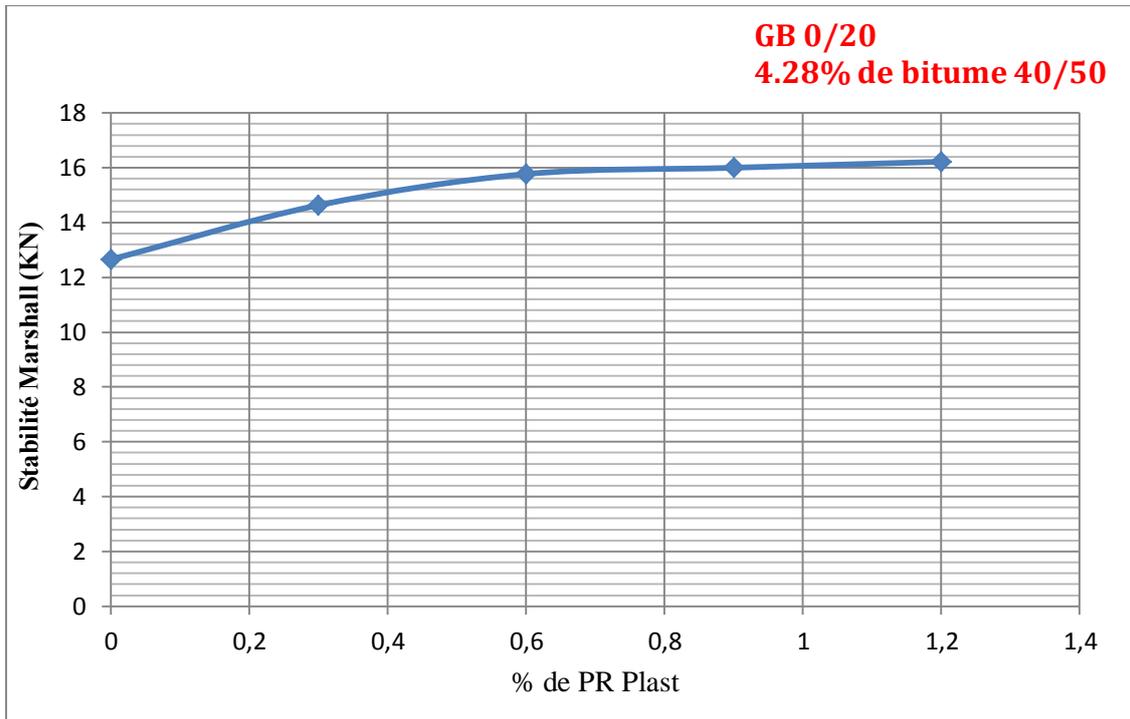


Figure (IV-6) : Variation de la stabilité Marshall en fonction de % de PR Plast

La figure (IV-7) montre la variation de la stabilité Marshall en fonction de PR Plast

Les spécifications [CTTP 2004] préconisent ; dans le cas de l'utilisation d'un bitume 40/50, une stabilité supérieure à 10,5 KN, donc tous les enrobés donnent des stabilités conforme aux spécifications algériennes.

La stabilité des mélanges est améliorée pour toutes les teneurs en PR Plast.

On remarque que la stabilité Marshall est proportionnelle avec la teneur en PR Plast.

-Dans le cas de 0% de PR Plast, la stabilité est de 12.65 ;

-Dans le cas de 0.6% de PR Plast l'amélioration est estimée à 25% par rapport à l'enrobé sans ajout. Alors que pour 1.2% de PR Plast elle est de 28%.

Le fluage Marshall

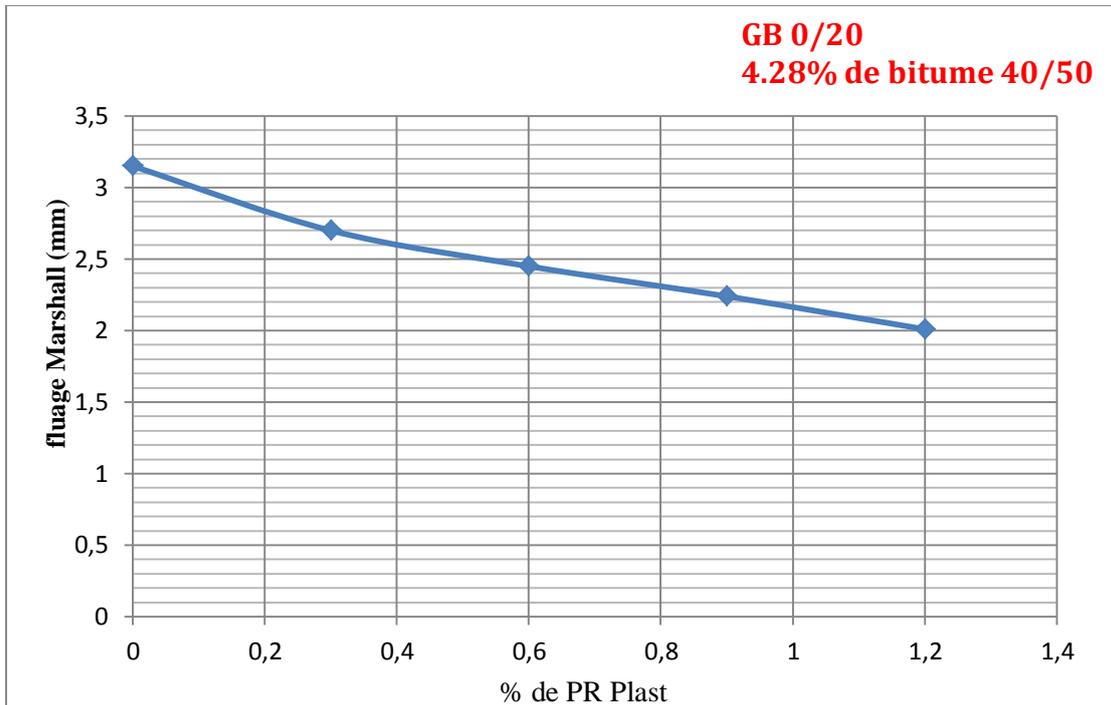


Figure (IV-7) : Variation de fluage Marshall en fonction de % de PR Plast

La figure (IV-8) montre la variation du fluage Marshall en fonction de PR Plast

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

On remarque que le fluage Marshall est diminué en fonction de % de PR Plast ajouté. Ce qui peut être expliqué par le fait que le PR Plast Module augmente la rigidité de l'enrobé.

La modification de l'enrobé par le PR Plast Module améliore la résistance au fluage. Cette amélioration est de l'ordre de 25% pour une teneur de 0.6%, et de 36% pour une teneur de 1.2%.

Quotient Marshall

Les valeurs du QM ont été calculées afin d'évaluer la résistance des éprouvettes d'enrobés modifiés.

Une valeur plus grande du quotient indique que les mélanges sont plus résistants aux déformations permanentes. L'évolution du quotient en fonction de PR Plast est présentée sur la figure (IV-9).

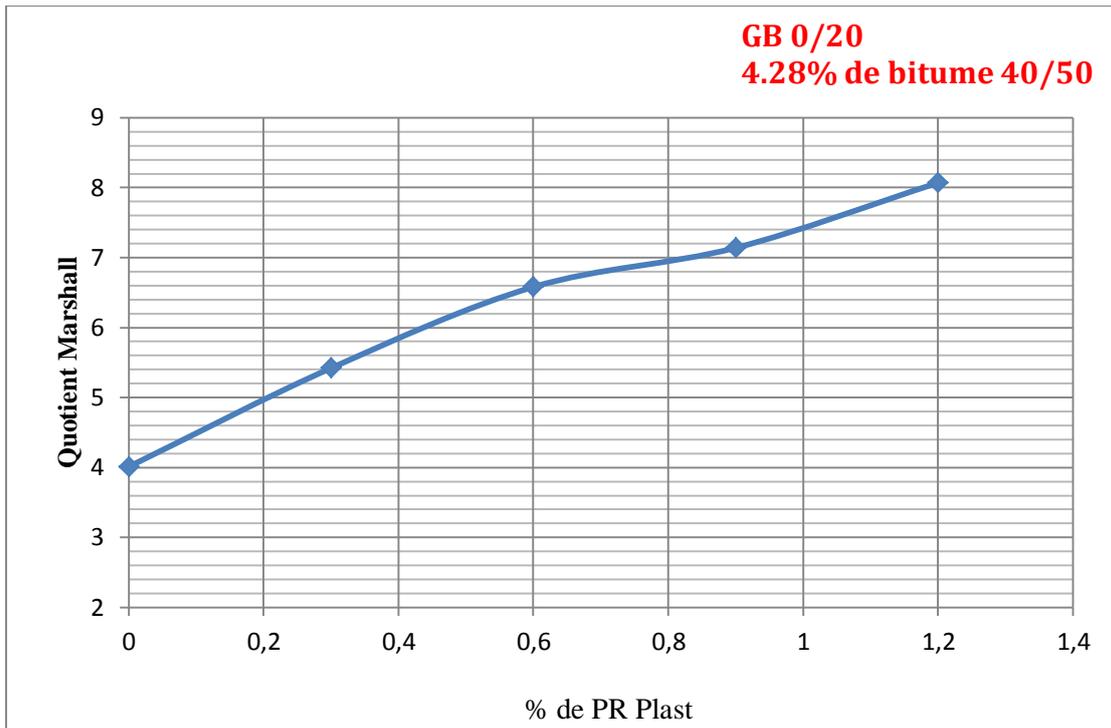


Figure (IV-8) : Variation de quotient Marshall en fonction de % de PR Plast

Les mélanges avec PR Plast atteignent des valeurs maximales du quotient Marshall par rapport à l'enrobé sans PR Plast.

Le mélange avec 0,6% de PR Plast présente pratiquement une amélioration de l'ordre de 64%, et pour 1,2% de PR Plast l'amélioration est de l'ordre de 100%, ceci montre tout l'intérêt d'utiliser ce type d'ajout.

Tenue à l'eau

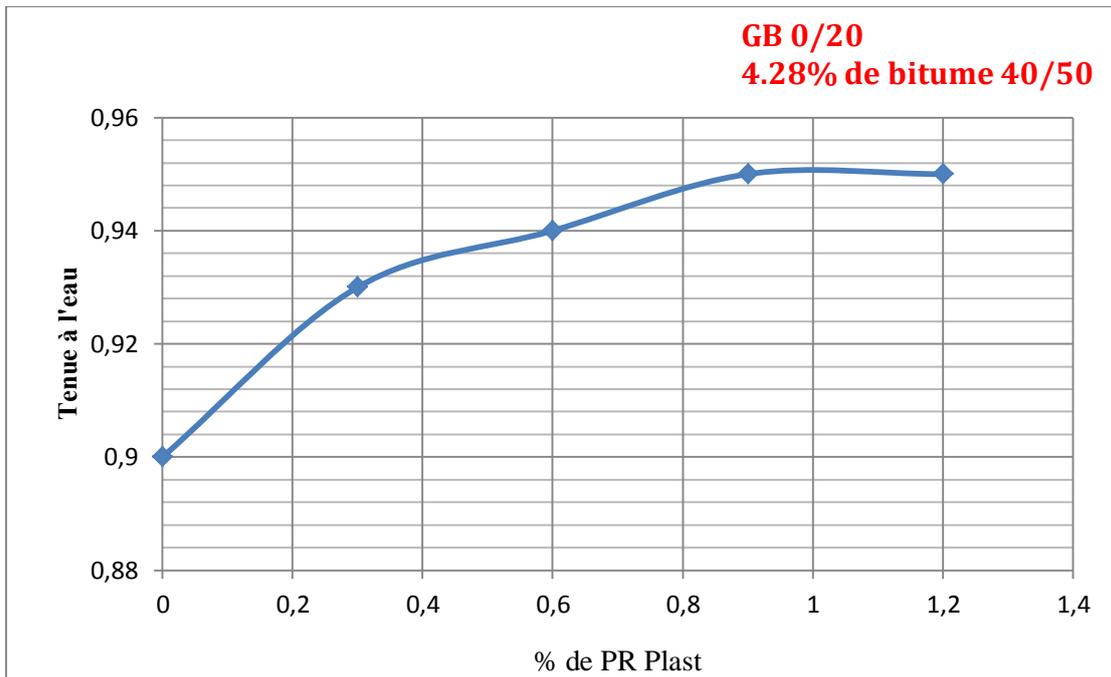


Figure (IV-9) : Variation de la tenue à l'eau en fonction de % de PR Plast

La figure (IV-10) montre la variation de la tenue à l'eau en fonction de PR Plast.

Les tenues à l'eau obtenues avec tous les mélanges répondent aux spécifications algériennes (>0.65).

La tenue à l'eau augmente avec l'augmentation de pourcentage de l'ajout.

Pour le mélange sans PR Plast la tenue à l'eau est de 0.9.

La tenue à l'eau est améliorée de 4,5% pour 0,6% de PR Plast d'autre part l'amélioration est de 5,55% pour 0,9% et 1,2% de l'ajout.

Module de rigidité

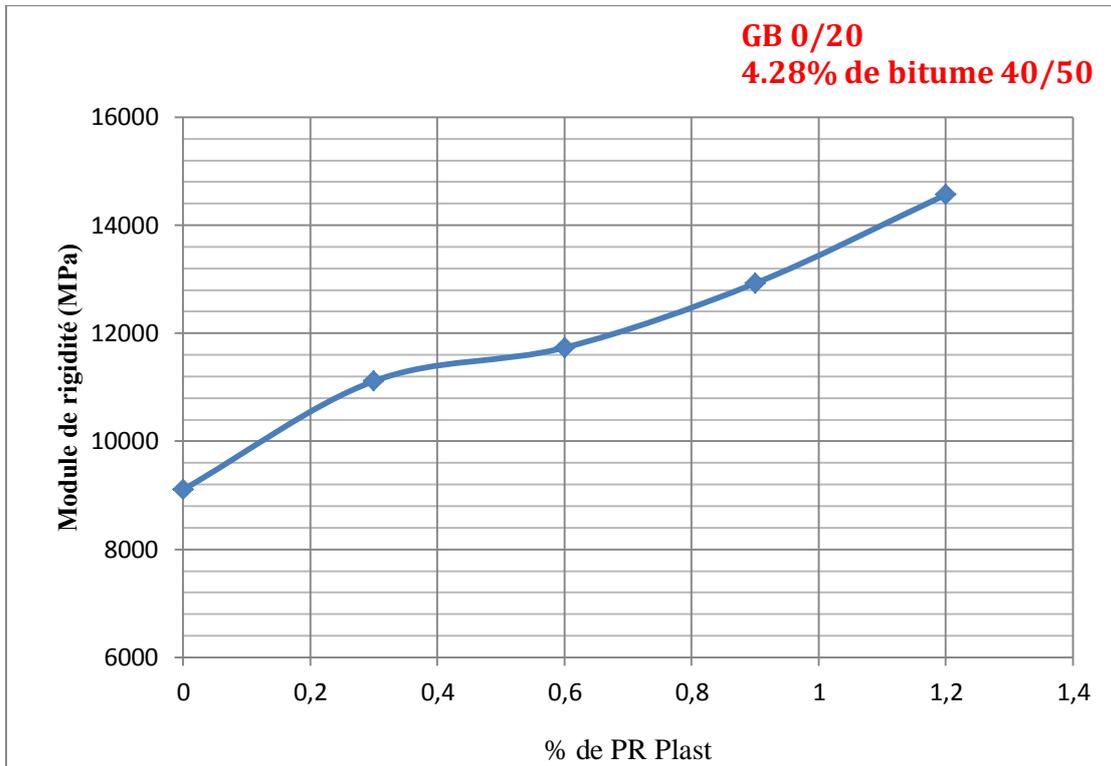


Figure (IV-10) : Variation de module de rigidité en fonction de % de PR Plast

Le graphe et le tableau présentent les résultats des essais de NAT (pour le calcul de module de rigidité avec traction indirecte) sur les 5 enrobés étudiés (avec # pourcentages de PR PLAST MODULE).

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

On constate :

Une amélioration des caractéristiques mécaniques du mélange au fur et à mesure que le dosage en PR PLAST MODULE augmente.

L'intervalle des 0,5% à 8% donné par la fiche technique n'est pas justifié a priori. Un argument économique pourrait être à l'origine de cette proposition (ou des effets négatifs à long terme tel qu'un vieillissement prématuré de l'enrobé ;

Au taux de 0,6%, le module élastique (**11733 MPa**) reste inférieur au résultat attendu (16000 MPa selon la fiche technique), mais on remarquera que cette valeur correspond à un dosage en liant de 5,9%, alors que dans notre cas le dosage est de l'ordre de 4,28%.

IV.5 CONCLUSION

Par cette étude, nous avons voulu augmenter les performances de composée de matériaux d'usage courant.

L'approche adoptée est la modification par un plastomère de type **PR Plast Module**. Ce travail a été axé sur l'évaluation des performances que peut apporter l'introduction d'un modifiant (PR Plast Module) lors de l'opération de malaxage.

Il est à noter que l'ajout du PR Plast Module vient palui au manque d'un bitume de grade dur.

L'étude expérimentale du comportement mécanique des enrobés en laboratoire a montré que les performances de l'enrobé augmente proportionnellement avec la teneur en PR Plast. Ceci révèle tout l'intérêt d'appliquer des enrobés modifiés directement au moment de malaxage sachant que leur utilisation ne nécessite aucun changement à la centrale de fabrication des enrobés bitumineux.

On remarque que l'amélioration des performances de l'enrobé entre 0% et 0.6% est plus importante que l'amélioration entre 0.6 et 1.2%. C'est ce qui pourrait justifier l'utilisation par les maîtres d'œuvres des teneurs de l'ordre de 0.6% (généralement) qui donnent des performances acceptables avec un coût minimal.

Comme tout ajout, le PR Plast peuvent avoir des inconvénients sur le long terme, inconvénients que ne sont pas spécifiés sur la fiche technique de PR Plast.

Il faut cependant se soucier du comportement à long terme de ce type de mélange, donc de prévoir des essais complémentaires concernant une éventuelle interaction chimique entre les différents composants du mélange.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'utilisation de matériaux bitumineux à module élevé pour la construction et l'entretien des chaussées apporte de nombreux avantages. En particulier, le dimensionnement qui en résulte aboutit à des épaisseurs de couches notablement plus faibles, ce qui permet de limiter l'utilisation de granulats de bonne qualité et de réduire les volumes de matériaux à transporter. La limitation de l'épaisseur des couches permet le maintien des gabarits sous ouvrage et, dans certains cas, évite la mise à niveau des équipements tels que bordures et glissières.

Récemment introduits en Algérie, les EME n'ont cependant pas fait l'objet d'une étude scientifique et technique à l'échelle nationale. Plusieurs administrations, convaincues des avantages de cette technique réalisent actuellement des structures sans pouvoir s'appuyer sur des procédures normalisées et sur des spécifications adéquates.

Il faut également se méfier des produits « miracles » qui permettent de palier au non disponibilité du bitume dur : leur action à long terme peut être néfaste à la bonne tenue de la structure de chaussée.

L'introduction de PR Plast Module nous semble une solution pratique, économique et performante pour réaliser des EME en Algérie avec un bitume de grade traditionnel (40/50) afin de durcir le liant et augmenter la rigidité de l'enrobé, qui résulte l'amélioration des résistances aux fatigue et aux déformations permanentes qui se traduisent en ornières.

La promotion de cette nouvelle sorte d'enrobés doit nécessairement passer par des recherches qui devraient aboutir à l'élaboration de directives pour formulation d'Enrobés à Module Elevé en adéquation avec notre environnement : matériaux, climat et trafic.

Il sera opportun de valider leurs performances des EME par la réalisation d'essais en vraie grandeur, de façon à pouvoir disposer des informations nécessaires pour permettre de publier une norme.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **J.G.MALLOUK** « les enrobés bitumineux » TOME 1+TOME 2
- [2] **LCPC** « bitume et enrobés bitumineux » n° spécial V, décembre 1977
- [3] **LCPC** « Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés » Septembre 2007
- [4] **A.JUNOD, G.DUMONT** « Formulation et optimisation des formules d'enrobés » Mandat de recherche ASTRA 2000/421-2, Décembre 2004
- [5] **Yves BROSSEAUD** « les enrobés à module élevé : bilan de l'expérience de française et transfert de technologie »
- [6] **Berthe-Julienne** « caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses » thèse de doctorat de l'institut national des sciences appliquées de LYON, 18 mars 2005
- [7] **Yann LEFEUVRE** « l'étude du comportement en fatigue des enrobés bitumineux » thèse de doctorat de l'école nationale des ponts et chaussées, 28 mars 2001
- [8] **CTTP** « recommandation algérienne sur l'utilisation des bitumes et des enrobés en béton bitumineux à chaud » Février 2004.
- [9] **Ould-Henia** « Evaluation des performances de nouveaux matériaux de revêtement: 1ère partie: Enrobés à haut module » Décembre 2001
- [10] **A. Junod** « Formulation et optimisation des formules d'enrobés » Décembre 2004
- [11] **J. Perret** « Modélisation des charges d'essieu » Septembre 2004
- [12] **NF EN 12697-26** « mélanges bitumineux : méthode d'essai pour mélange hydrocarboné à chaud, partie 26 : module de rigidité » décembre 2004.
- [13] **NF P 140** « Couches d'assises : enrobés à module élevé (EME) » Novembre 1999
- [14] **Guide technique** «enrobés bitumineux à haute résistance à l'orniérage par fluage » -comité technique AIPCR des routes souples 1995- Rédaction J. VERSTRAETEN, Belgique.
- [15] **Jean BERTHIER** « Granulats et liants routiers » Technique de l'ingénieur, traité Construction.
- [16] **Jean Luc Delorme** « Formulation des enrobés, du laboratoire au chantier, vers l'Europe » LRPC Melun, 2005.
- [17] **M. Laid ROUASKI** « liants et enrobés colorés » mémoire d'ingénieur d'état, école nationale polytechnique d'Alger 2003.
- [18] **Hamami Ameer el Amine** « Modélisation du comportement d'un sable bitume à base de sable de dune» mémoire d'ingénieur d'état, école nationale polytechnique d'Alger 2004.
- [19] **Tristan LORINO** « autopsie d'une chaussée » LCPC de Nantes

ANNEXES

ANNEXE I : **ESSAIS SUR GRANULATS**

Échantillonnage

L'échantillonnage des granulats consiste à sélectionner une fraction réduite de matériau, censée représenter l'ensemble du matériau de façon aussi faible que possible.

Lorsqu'on n'applique pas les méthodes d'échantillonnages, les caractéristiques des granulats utilisés dans la formulation des enrobés bitumineux s'écartent nécessairement de celles représentatives du lot de production. En effet, ces produits granulaires non liés sont très sensibles à la ségrégation.

La préparation doit être réalisée avec le matériau légèrement humide pour éviter la perte d'éléments fins. Si le matériau est sec, il faut l'humidifier légèrement de manière homogène.

La préparation des échantillons au CTPP s'effectue au moyen de diviseurs «échantillonneurs», appareils séparant en parties égales une quantité de matériau déterminée.

La séparation au moyen de diviseurs consiste à :

- Verser le matériau à l'aide de la pelle dans le diviseur (figure 1). Veiller à ce qu'il soit uniformément réparti sur toute la surface de la pelle correspondant à l'appareil utilisé.
- La largeur des couloirs doit être supérieure ou égale à $2D$, D exprimé en millimètres est la plus grande dimension spécifiée.

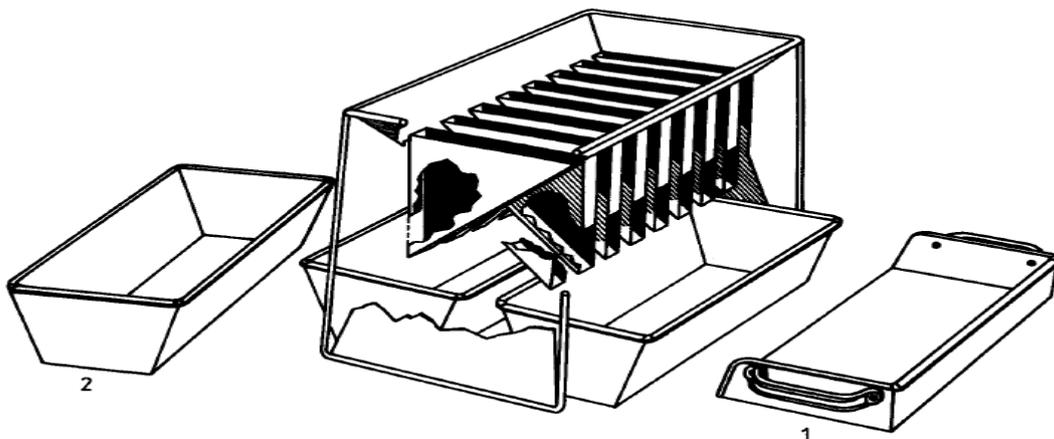


Figure (1): Diviseur échantillonneur à couloirs

1-Pelle correspondante

1- Bac

- S'assurer que le nombre de couloirs est pair (en obstruant au besoin l'un des couloirs extrêmes), supérieur ou égal à 14 et que leur largeur est identique.

- Si la quantité obtenue dans chaque bac est trop importante pour l'essai envisagé, recommencer l'opération avec le matériau d'un des deux bacs.

Pour obtenir la quantité nécessaire à la réalisation « m » du ou des essais prévus, on utilise une quantité initiale de « $3m$ » en effectuant les opérations montrées sur la figure (2) :

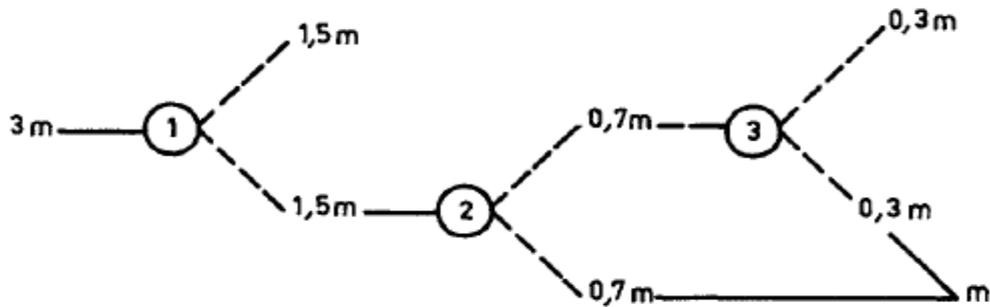


Figure (2): Nombre de partages

Analyse granulométrique par tamisage NF P18-560

1-objet

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination de la granularité des granulats dont les dimensions sont comprises entre 0,063 et 80 mm.

2-domaine d'application

La présente norme s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

3-Généralités

3-1- Définitions

Granularité : distribution dimensionnelle des grains.

Refus sur un tamis : matériau qui est retenu sur le tamis.

Tamisât (ou passant) : matériau qui passe à travers le tamis.

3-2- Principe de l'essai

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes. Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue.

Les masses des différents refus ou celles des différents tamisats sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

4-Appareillage

4-1- Appareillage d'usage courant

- Appareillage spécifique à la norme P 18-553.
- **Bacs, brosses, pinceaux.**
- **Balance** dont la portée limite est compatible avec les masses à peser et permettant de faire toutes les pesées avec une précision relative de 0,1 %.
- **Étuve** ventilée réglée à $105 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$.
- Un dispositif de lavage.

4-2- Appareillage spécifique

Tamis dont l'ouverture est conforme à la norme NF X 11-501 et de diamètre 250 mm. Parmi les tamis de contrôle définis dans cette norme, on utilise généralement ceux donnés par la norme NF P 18-101 pour la classification des granulats.

Le contrôle des tamis sera effectué suivant les indications données dans la norme NF X 11-504.

5-préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à 0,2 D, avec M exprimé en kilogrammes et D plus grande dimension spécifiée en millimètres.

6-exécution de l'essai

6-1-Détermination de la masse sèche de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique

L'essai s'effectue sur le matériau à la teneur en eau à laquelle il se trouve avant l'analyse afin d'éviter un séchage qui présente des inconvénients : perte de temps due au séchage avant tamisage, risque d'agglomération des particules par séchage. À partir de l'échantillon pour laboratoire, il est donc préparé deux échantillons pour essai.

L'un de masse M_{1h} pour déterminer la masse sèche de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique, l'autre de masse M_h pour effectuer l'analyse granulométrique.

- pesée des deux échantillons M_{1h} et M_h ;

-séchage à l'étuve jusqu'à masse constante (c'est-à-dire jusqu'à ce que deux pesées successives de l'échantillon, séparées d'une heure, ne diffèrent pas de plus de 0,1 %) du premier échantillon M_{1h} et pesée, soit M_{1s} sa masse sèche.

La masse sèche (M_s) de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique est calculée de la manière suivante :

$$M_s = \frac{M_{1s}}{M_{1h}} M_h$$

6-2- Tamisage

- Verser le matériau lavé et séché dans la colonne de tamis. Cette colonne est constituée par l'emboîtement des tamis, en les classant de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes.
- Agiter manuellement ou mécaniquement cette colonne, puis reprendre un à un les tamis en commençant par celui qui a la plus grande ouverture en adaptant un fond et un couvercle. On agite chaque tamis en donnant à la main des coups réguliers sur la monture. D'une manière générale, on peut considérer qu'un tamisage est terminé lorsque le refus sur un tamis ne se modifie pas de plus de 1 % en une minute de tamisage.
- Verser le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur.

6-4- Pesées

- Le refus maximum admissible sur chaque tamis doit être inférieur à : 100 g si d < 1 mm, 200 g si d compris entre 1 et 4 mm et 700 g si d > 4 mm.
- Peser le refus du tamis ayant la plus grande maille. Soit R₁ la masse de ce refus.

- Reprendre la même opération avec le tamis immédiatement inférieur ; ajouter le refus obtenu à R1 et peser l'ensemble. Soit R2 la masse des deux refus cumulés.
- Poursuivre la même opération avec tous les tamis de la colonne pour obtenir les masses des différents refus cumulés R3, R4, ..., Ri, ..., Rn.
- Peser s'il y en a, le tamisât au dernier tamis. Soit Tn sa masse.
- Si après essai, les résultats montrent qu'un (ou plusieurs) tamis a (ont) été surchargé(s), l'essai doit être refait manuellement à partir de ce tamis.

7-expression des résultats

7-1- Calculs :

Les résultats des différentes pesées cumulées sont portés sur une feuille d'essai.

Les masses des différents refus cumulés Ri, sont rapportées à la masse totale calculée de l'échantillon pour essai sec Ms et les pourcentages de refus cumulés ainsi obtenus,

$$\frac{R_i}{M_s} 100$$

Inscrits sur la feuille d'essai. Les pourcentages de tamisats correspondants sont égaux à

$$100 - \left(\frac{R_i}{M_s} 100 \right)$$

7-2-Présentation des résultats

Les pourcentages de tamisats cumulés ou ceux des refus peuvent être présentés soit sous forme de tableau (exploitation statistique), soit le plus souvent sous forme de courbe.

Tracé de la courbe :

Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats ou des différents refus cumulés sur la feuille de papier semi-logarithmique.

En abscisse : les dimensions des mailles, sur une échelle logarithmique.

En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe représentant la distribution granulométrique des éléments doit être tracée de manière continue et peut ne pas passer rigoureusement par tous les points.

Mesure du coefficient d'aplatissement NF P 18-561

1-objet

La présente norme a pour objet de définir le mode opératoire pour la détermination du coefficient d'aplatissement d'un échantillon de granulats dont les dimensions sont comprises entre 4 et 50 mm.

2-domaine d'application

La présente norme s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle, utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

3-Généralités

3-1- Définitions

La forme d'un élément est définie par trois dimensions principales :

Longueur L = le plus grand écartement d'un couple de plans tangents parallèles.

Épaisseur E = le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles.

Grosseur G = dimension de la maille carrée minimale à travers laquelle passe l'élément.

Le coefficient d'aplatissement A d'un lot de granulats soumis à l'essai est, par définition, le pourcentage des éléments tels que : $(G/E > 1.58)$

3-2-Principe de l'essai

L'essai consiste à effectuer un double tamisage :

- Tamisage sur tamis à mailles carrées, pour classer l'échantillon étudié en différentes classes d/D (avec $D = 1,25 d$), suivant leur grosseur G.
- Puis tamisage des différentes classes granulaires d/D, sur des grilles à fentes parallèles d'écartement : $(d/1.58)$

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire d/D correspond au passant du tamisage sur la grille à fentes d'écartement $d/1,58$, exprimé en pourcentage.

Le coefficient d'aplatissement global de l'échantillon est égal à la somme pondérée des coefficients d'aplatissement des différentes classes granulaires d/D composant l'échantillon.

4-appareillage

4-1- Appareillage d'usage courant

Appareillage courant et spécifique de la norme P 18-553.

La détermination des classes granulaires s'effectue sur les tamis à mailles carrées utilisés pour l'analyse granulométrique définie par la norme P 18-560. On utilise les tamis de dimensions d'ouverture de maille de :

50 - 40 - 31,5 - 25 - 20 - 16 - 14 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 et 4 mm.

4-2- Appareillage spécifique

Pour la détermination du coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire, on utilise une série de grilles, constituées par des barres cylindriques parallèles fixées dans un châssis carré. Les écartements intérieurs des barres sont respectivement de :

31,5 - 25 - 20 - 16 - 12,5 - 10 - 8 - 6,3 - 5 - 4 - 3,15 et 2,5 mm.

Pour chaque grille, l'ouverture des fentes ainsi définies doivent satisfaire aux conditions suivantes ;

Il ne doit pas y avoir plus de 10 % de la longueur totale des fentes dont l'écartement diffère de 0,25 mm de l'écartement nominal.

En aucun point des fentes, la largeur de fente ne doit s'écarter de 0,5 mm de la dimension nominale.

5-Préparation de l'échantillon pour l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme P 18-553. La masse M de l'échantillon pour essai doit être supérieure à $0,2D$, avec M exprimé en kilogrammes et D , plus grande dimension spécifiée, exprimé en millimètres.

L'échantillon est passé sur un tamis de 4 mm, la masse M_0 du refus est déterminée avec une précision relative de 0,1 %.

6-exécution de l'essai

6-1-Tamisage sur tamis à mailles carrées

Procéder au tamisage de l'échantillon par voie sèche sur les tamis en se conformant aux prescriptions de la norme P 18-560.

Recueillir les différentes fractions d/D ; peser chaque classe granulaire avec une précision relative de 0,1 %.

6-2-Tamisage sur grilles à fentes :

Tamiser chaque classe granulaire obtenue par l'opération précédente sur une grille dont l'écartement E entre les barres est défini par le tableau de correspondance ci-dessous :

Classe granulaire			Écartement
d/D			E
	> 50		31,5
40	—	50	25
31,5	—	40	20
25	—	31,5	16
20	—	25	12,5
16	—	20	10
12,5	—	16 (1)	8
10	—	12,5	6,3
8	—	10	5
6,3	—	8	4
5	—	6,3	3,15
4	—	5	2,5

(1) Ou 14 pour le 10 — 14 mm.

Le tamisage sur les grilles se fait manuellement.

Peser avec une précision relative de 0,1 % le passant sur la grille correspondante à chaque classe granulaire d/D.

7-expression des résultats

Les résultats sont portés sur des feuilles d'essai dont un exemple est donné en annexe A. Les notations suivantes sont utilisées :

M_g = Masse de chaque classe granulaire d/D, en grammes.

$M = \Sigma M_g$ (ce chiffre peut être légèrement inférieur à M_o mais ne doit pas s'en écarter de plus de 2 %).

M_e = Masse des éléments de chaque classe granulaire d/D passant sur la grille correspondante, définie par le tableau du paragraphe 6.2.

Le coefficient d'aplatissement de chaque classe granulaire est donné par :

$$\frac{M_e}{M_g} 100$$

Le coefficient d'aplatissement global A est donné par :

$$A = \frac{\Sigma M_e}{M} 100$$

Los Angeles NF P18-573

1-Objet

La mesure de la résistance à la fragmentation par chocs des éléments d'un échantillon de granulats.

2- Périmètre

Elle s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et du génie civil.

3- Mode opératoire

3-1-Préparation de l'échantillon

- Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand.
- Laver le matériau tamisé et le séché à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante. La masse pour essai sera de 5000 g \pm 5 g.

3-2-Exécution de l'essai

Introduire avec précaution la charge de boulets correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai dans le cylindre de la machine. Faire effectuer à la machine 500 rotations (15 mn). La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Classes granulaires (mm)	Nombre de boulets	Masse totale de la charge (g)	
4 - 6,3	7	3080	
6,3 - 10	9	3960	
10 - 14	11	4840	
10 - 25	11	4840	+20 à -150
16 - 31,5	12	5280	
25 - 50	12	5280	

3-3-Résultats

- Recueillir les granulats dans un bac placé sous l'appareil ;
- Tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm et le laver;

- Egoutter et sécher à l'étuve à 105 °C ;
- Peser le refus une fois séché soit m' le résultat de la pesée.

4-Equipement

- Tamis de 1,6-4-6,6-10-14-16-20-25-31,5-40-50 ;
- Appareil Los Angeles ;
- Un bac ;
- Etuve ;

Balance de précision.

5-Formule de calcul

$$LA = 100 m/M$$

M : masse du matériau soumis à l'essai

m = (5000-m') : masse sèche des éléments inférieur à 1,6 mm produits au cours de l'essai

Micro-Deval NF P18-572

1-Objet

La mesure de la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats produite par frottements mutuels, en présence d'eau et d'une charge abrasive, dans un cylindre en rotation.

2-Périmètre

Elle s'applique aux granulats d'origine naturelle ou artificielle utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

3-Mode opératoire

3-1-Préparation de l'échantillon

- Laver l'échantillon et le séché à l'étuve à 105°C, jusqu'à masse constante.
- Tamiser l'échantillon à sec sur chacun des tamis de la classe granulaire choisie, en commençant par le tamis le plus grand. La masse pour essai sera de 500 g \pm 2 g.
- L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme NF P 18-553 (préparation d'un échantillon pour essai).

3-2-Exécution de l'essai

Introduire dans le cylindre d'essai, disposé ouverture vers le haut, la charge abrasive correspondant à la classe granulaire choisie, puis l'échantillon pour essai et 2,5 litre d'eau. Faire effectuer à la machine 12000 rotations (soit 2 heures).

La charge est fixée conformément aux indications du tableau ci-après :

Classes granulaires (mm)	la charge abrasive (g)
4 - 6,3	2 000 \pm 5
6,3 - 10	4 000 \pm 5
10 - 14	5 000 \pm 5

3-3-Résultats

- Recueillir le granulat et la charge abrasive dans un bac en ayant soin d'éviter les pertes de granulat ;

- Laver soigneusement à la pissette l'intérieur du cylindre en recueillant l'eau et les parties minérales ;
- Tamiser le matériau sur le tamis de 1,6 mm et le laver; la charge abrasive sera retenue sur un tamis de 8 mm ;
- Egoutter et sécher le refus à l'étuve à 105 °C jusqu'à masse constante;

Peser le refus une fois séché au gramme près ; soit m' le résultat de la pesée.

4-Equipement

- Tamis de 1,6 - 4 - 6,3 - 10-14 et 14 mm ;
- Appareil Micro – Deval, Charges abrasives ;
- Un bac, Etuve ;

Balance de précision.

5-Formule de calcul

MDE = 100 m/500

$m = (500 - m')$: masse sèche des éléments inférieur à 1,6 mm produits au cours de l'essai.

ANNEXE II :
ESSAIS SUR BITUME

Essai de pénétrabilité NF T66-004

1-Objet

Le présent mode opératoire a pour objet la détermination de la pénétrabilité à l'aiguille des produits bitumineux.

2-Mode opératoire

2-1-Préparation de l'échantillon

- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit fluide.
- Verser l'échantillon dans le gobelet préchauffé. (La hauteur de l'échantillon doit être ≥ 10 mm à la profondeur à laquelle l'aiguille est susceptible de pénétrer.
- Protéger le gobelet et son contenu de la poussière par un couvercle et le laisser à la température 20°C-30°C pendant 1h30-2h00.
- Placer ensuite le gobelet dans un bain d'eau à 25°C pendant 1h30 à 2h00.

2.2-Exécution de l'essai :

- Placer la prise d'essai dans le récipient de transfert et le mettre sur le plateau du pénétromètre
- Déplacer l'aiguille chargée (100grs \pm 0.1grs) pour qu'elle affleure la surface de la prise d'essai
- Ramener à 0 l'aiguille du cadran.
- Libérer l'aiguille pendant la durée spécifiée de 5s \pm 0.1s et la bloquer aussitôt et mesurer la profondeur.
- Effectuer 3 mesures avec la même aiguille.
- A chaque mesure, replacer la prise d'essai et le récipient de » transfert dans le bain d'eau

3-Résultats

Noter la moyenne arrondie à l'unité de la plus proche des résultats de 3 mesures effectuées.

4-Equipement

- gobelets
- Aiguilles conforme aux spécifications
- Pénétromètre.
- Bain d'eau thermostatique.
- Thermomètre
- Récipient à gobelet

5-Formule de calcul

- la moyenne des 3 mesures

Essai de ductilité NF T66-006

1-Objet

Le présent mode opératoire a pour objet la détermination de la ductilité des produits bitumineux.

2-Mode opératoire

2.1-Préparation de l'échantillon

- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il devient fluide.
- Enduire le moule d'un mélange de dextrine et de glycérine.
- Verser l'échantillon dans le moule et le laisser refroidir pendant 30min à 40 min.
- Placer le moule dans un bain d'eau pendant 30min à 25°C.
- Eliminer l'excès avec un couteau.
- Placer le moule dans le ductilimètre et le laisser pendant 1h30 à 25°C.

2.2-Exécution de l'essai

- Effectuer l'étirage à une vitesse de 50mm/min jusqu'à la rupture.

2.3-Résultats

- Mesurer en cm la distance dont il a fallu écarter les pattes d'attache pour provoquer la rupture.
- volume occupé par cet échantillon.

4-Equipement

- Moule.
- Appareil d'essai
- Bain thermostatique

5-Formule de calcul

- c'est la valeur mesurée en cm

Essai de ramollissement billes et anneaux NF T66-008

1-Objet

Le présent mode opératoire a pour objet la détermination de la température de ramollissement des produits bitumineux.

2-Mode opératoire

2-1-Préparation de l'échantillon

- Chauffer l'échantillon jusqu'à ce qu'il soit fluide.
- Verser l'échantillon dans deux anneaux préchauffés et reposants sur une plaque enduite d'un mélange de glycérine et de dextrine pour éviter l'adhérence du produit.
- Laisser refroidir 30min au moins.
- Enlever l'excès du produit par arasement avec une spatule chauffée.

2-2-Exécution de l'essai

- Assembler l'appareillage avec les anneaux, les guides et thermomètre spécifié en position correcte.
- Remplir le vase avec de l'eau distillée.
- Placer les billes d'acier au centre de chaque anneau.
- Chauffer à vitesse de 5°C/min.

Résultats :

Noter la température à laquelle l'échantillon enveloppant la bille touche la plaque du support.

3-Equipement

- Anneaux - Support d'anneaux -Bain thermostatique
- Guides
- Thermomètre
- Billes en acier

4-Formule de calcul

La moyenne des 2 mesures

ANNEXE III:
CLASSIFICATION DES MATERIAUX

Les catégories de sable et de gravillon

Les différentes catégories des sables et des gravillons sont présentés dans les tableaux :

Tableau (1) : les catégories des sables

Catégorie	Granularité		ES 10%	VB si ES10% Non obtenu	
	Position du fuseau	Etendue maximale du fuseau			
a	refus à $1.58D=0$	10% à D et à 0.5mm 15% à 2mm et 4mm	≥ 60	≤ 1	
b		Refus à D=1 à 15%	4% à 0.08mm si fines < 12 % 6% à 0.08mm si fines ≥ 12 %	≥ 50	≤ 1.5
c				≥ 40	≤ 2

Tableau (2) : les catégories des gravillons

catégorie	Granularité		A* ou Em		propreté	
	Fuseau de spécification (position)	Fuseau de régulation (étendue)				
I	Refus à $1.25D=0\%$.Refus à D 1 à 15% (1 à 20 % si $> D1.58d$)	Etendue maximale 10% à d	≤ 10	$\geq (D+d)/3$	≤ 0.50
Ibis		.Tamisât à d	10% à D	≤ 15	$\geq (D+d)/3.5$	≤ 1
		.tamisât à $0.63d < 3\%$ ($< 5\%$ si $D \leq 5mm$)	25% à $(D+d)/2$			≤ 2
II	Refus à $1.58D=0\%$	si $D \geq 2.5d$		≤ 20		≤ 2
III		tamisât à $(D+d)/2=33$ à 66%		≤ 30		≤ 3

Classement des granulats

A partir des essais de **Los Angles** et **Micro-Deval** sur les granulats destinés aux travaux routiers, les gravillons sont classés suivant les cinq catégories de résistance mécanique du tableau (1).

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

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

Tableau (3) : Classement des granulats selon la norme P18-101

catégorie	LA +MDE	LA	MDE
A	≤25	≤20	≤15
B	≤35	≤25	≤20
C	≤45	≤30	≤25
D	≤55	≤35	≤30
E	≤80	≤45	≤45
F	>80	>45	>45

Lorsque la catégorie F est retenue, les limites supérieures doivent obligatoirement être fixées

Classification des bitumes purs

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

Tableau (4) : classification des bitumes purs

Spécifications des bitumes routiers de grades 20/30 à 160/220	Unité	Désignation des classes appropriées				
		20/30	35/50	50/70	70/100	160/220
Pénétrabilité à 25 °C	0,1mm	20-30	35-50	50-70	70-100	160-220
Point de ramollissement	°C	55-63	50-58	46-54	43-51	35-43
Densité relative à 25°C	-	1.00 à 1.10			1.00 à 1.07	
Ductilité à 25°C	cm	> 25	>60	>80	>100	>100
pénétrabilité restante après durcissement, minimum	%	55	53	50	46	37
point de ramollissement après durcissement, minimum	°C	57	52	48	45	37
augmentation du point de ramollissement, maximum	°C	8	8	9	9	11
Point d'éclair, minimum	°C	240	240	230	230	220
Solubilité, minimum	%	99.0	99.0	99.0	99.0	99.0
Teneur en paraffines, maximum	%	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

ANNEXE IV :
ESSAIS SUR ENROBES
BITUMINEUX

Essai Marshall NF P 98-251-2

1-Objet

Ces essais et déterminations sont effectués d'une part en vue de l'étude préalable de recherche de la meilleure composition à adopter pour la confection d'un enrobé ou béton hydrocarboné, d'autre part, en vue du contrôle de la consistance du produit en cours de fabrication.

2-principe et définition

L'essai de stabilité Marshall est un essai de compression exercée suivant la génératrice d'une éprouvette cylindrique semi-frettée. Cette compression est appliquée sur l'éprouvette après 1/2 h d'immersion dans l'eau à 60 °C, et à la vitesse de 0,846 mm/s. On appelle « stabilité Marshall » la charge en Kilogrammes, atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette.

En même temps que l'on applique l'effort de compression, on mesure la déformation à l'aide d'un appareil se composant d'un manchon de guidage et d'un indicateur de fluage.

On appelle déformation Marshall, la diminution du diamètre vertical qui est atteinte au moment de la rupture de l'éprouvette. Cette déformation est exprimée en 1/10 de mm.

Par des mesures de dimensions et de poids de l'éprouvette après confection on détermine la densité apparente et, connaissant la densité du liant et des agrégats, on calcule le pourcentage de vides occupé par le liant.

On appelle proportion des vides occupés par le liant, le pourcentage volumique des vides de l'agrégat comblé par le liant.

3-le domaine d'application

Les essais Marshall peuvent être effectués pour tous les enrobés hydrocarbonés. Il y a cependant une restriction en ce qui concerne la dimension maximum des agrégats, ceux qui doivent tous passer au module 45 (tamis de 25 mm ou passoire 31,5 mm).

Il y a lieu aussi de tenir compte de la nature du liant pour la confection des éprouvettes, le mode opératoire n'étant décrit que pour un matériau enrobé à chaud au bitume pur.

4-Appareillage

- 1 presse développant 2 tonnes, sensible au Kilogramme, équipée d'un dispositif d'application de la compression à la vitesse de 0,846 mm/s ;
- 1 appareillage Marshall ou mieux, 2 moules de compactage, 2 dames, 1 piston extracteur, 2 appareils de stabilité, d'un appareil pour mesurer la déformation (indicateur de fluage).

Le comptage est réalisé par les coups répétés du marteau pesant 4,5 Kg et tombant verticalement d'une hauteur de 45 cm. Chaque coup porte sur la presque totalité de la surface de l'éprouvette.

- 1 appareil de stabilité Marshall.

La mâchoire semi-cylindrique supérieure coulisse librement sur les 2 tiges de guidage. Lorsqu'une éprouvette est placée entre les mâchoires les extrémités en regard de ces dernières doivent être à 19,1 mm l'une de l'autre.

- 1 indicateur de fluage petit appareil à vernier coulissant, gradué en 0,5mm, qui s'adapte lors de la mesure à une des tiges de guidage.
- Bain d'eau thermostatique réglé à 60 °C. +/- 0,5 et pouvant contenir simultanément sur un support perforé au moins 4 éprouvettes complètement immergées et 2 appareils de stabilité Marshall.

5-Mode opératoire

En raison de la dispersion de l'essai, on confectionnera au moins quatre éprouvettes pour chaque formule étudiée.

5-1-Préparation des éprouvettes

Dans un récipient métallique de 2 000 cm³ de capacité environ, placé sur le plateau d'une balance on pèse successivement les quantités fixées des différents agrégats, filler compris. On mélange énergiquement et on porte le récipient et son contenu dans une étuve réglée à 175-190 °C où ils séjourneront une heure.

Dans le dernier quart d'heure du chauffage des agrégats, on porte dans une étuve réglée à 140 °C les moules à confection (base, cylindre et hausse montés), la dame de compactage, le piston extracteur.

Dans un second récipient, de 2 000 cm³, on pèse la quantité prévue de liant, et on chauffe celui-ci par exemple dans l'étuve réglée à 140 °C, de manière à lui conférer la fluidité nécessaire à l'enrobage, sans qu'il atteigne la température où la vaporisation des huiles devient excessive (le bitume ne doit pas émettre de vapeurs).

On retire d'abord de son étuve, le récipient contenant le liant, puis les agrégats, et l'on verse ceux-ci dans le récipient du liant. On mélange la totalité à la cuiller. La température du mélange ne doit pas être tombée au-dessous de 150 °C à la fin du malaxage. Si la température tombe au-dessous de cette valeur, on ne doit en aucun cas réchauffer le mélange, qui doit être rebuté.

Variante Tolérée

Le mélange pourra être effectué dans un malaxeur mécanique convenable par exemple du type à axe verticale et à contre-courant. Le malaxeur devra être tel que la ségrégation des matériaux soit réduite au minimum. Dans ce cas, on confectionnera 6 éprouvettes pour chaque mesure, au lieu de 4. On portera dans le malaxeur les agrégats chauffés à 175-190 °C, comme il a été indiqué, puis la quantité voulue de bitume. On vérifiera que la température ne tombe pas au-dessous de 125 °C à la fin du remplissage du dernier moule. On pourra utiliser un malaxeur chauffant, mais dans ce cas, on doit vérifier avec le plus grand soin qu'il ne se produit pas de surchauffe au sein du matériau durant le malaxage, et le chauffage du malaxeur devra être aussi modéré que possible.

Dans le cas où l'on utilise un malaxeur mécanique, on devra avoir un jeu complet de 6 moules, bases et pistons.

Dans ce cas, pour éviter un refroidissement excessif du mélange on pourra réintroduire celui-ci dans l'étuve à 140 °C, après malaxage pour une durée de 15 minutes au maximum.

On sort de l'étuve le moule à confection. On l'enduit intérieurement d'une légère couche d'oléate de soude de glycérine, puis on place dans le fond 2 disques de papier filtre.

On verse plusieurs fois la gâchée, en tassant à chaque fois avec la cuiller.

On égalise la surface avec la surface extracteur, auquel on communique un léger mouvement de rotation. On place un disque de papier filtre sur le mélange et on dame à raison de 50 coups sur chaque 2 bases de l'éprouvette. Pour cela, il est préférable de placer le moule sur un support de fixation, à 50 cm au-dessus du sol. On maintient fermement à la verticale la tige de la dame et on laisse tomber 50 fois sur le marteau. On démonte et remonte le moule en intervertissant la base et la hausse. On répète à nouveau le damage.

On enlève la base.

On place l'éprouvette toujours dans son moule sous un robinet d'eau pendant 5 minutes, afin d'accélérer le refroidissement. (L'éprouvette est couchée et l'eau coule sous le moule.)

Pour démouler, on fait passer l'éprouvette dans la hausse, dont le diamètre est légèrement plus grand que celui du moule proprement dit, en s'aidant du piston extracteur et de la presse.

L'éprouvette, qui doit être manipulée avec soin, est numérotée et laissée pendant une heure au moins à l'air libre afin d'être amenée à la température ambiante. Elle doit avoir une hauteur de 63,5 mm à 5 mm près. Si on utilise des gâchées de 1 150 à 1 175 g les hauteurs des éprouvettes sont presque toujours dans ces limites.

Si cette tolérance n'est pas respectée, on doit modifier en conséquence le poids de la gâchée à placer dans le moule. Les disques de papier filtres qui restent collés sur les bases ne sont pas retirés.

Pendant ce temps, on passe à la confection des autres éprouvettes. Il est pratique d'avoir 2 dames et 2 moules à confection.

Un jeu peut alors être placé en étuve pendant que l'autre est utilisé. Le bitume et les agrégats sont, bien entendu, laissés en étuve durant les temps morts de confection des éprouvettes. Le nettoyage de la base et de l'intérieur des moules se fait au moyen d'un chiffon imbibé de pétrole.

5-2-Détermination de la Densité apparente

Après refroidissement, on mesure au 1/10 de mm près les dimensions des éprouvettes (au moins 6 hauteurs et 3 diamètres) et on pèse à 5 dg près. Le rapport poids sur volume donne la densité apparente. Dans le cas où la surface est irrégulière, il est recommandé de déterminer la densité apparente par la méthode de la balance hydrostatique (pesées dans l'air et dans l'eau, mais sans paraffinage de l'éprouvette). Cette méthode peut cependant échouer si la surface est trop poreuse.

5-3- Essai de stabilité et de déformation

Après confection des éprouvettes, celles-ci sont conservées pendant 5 heures (heure) à la température ambiante puis on les immerge dans le bain thermostatique réglé à 60 °C 0,5 °C avec l'appareil d'essai, pour une durée de 30 mn (± 1 min).

Pendant ce temps, on donne, entre le plateau et l'appui à bille de la presse C.B.R. l'écartement juste nécessaire pour placer l'appareil Marshall. On installe également le dispositif contrôleur de cadence réglé pour une vitesse de 0,846 mm/s. On retire de l'eau l'appareil Marshall.

On lubrifie à la glycérine les tiges de guidage et la mâchoire supérieure devra pouvoir glisser sans heurts sur les tiges de guidages. On enlève cette dernière.

Ces préparatifs préliminaires sont indispensables car le temps écoulé entre l'instant où l'éprouvette est retirée du bain d'eau et celui de la mesure de la stabilité doit être inférieur à 30 secondes.

L'éprouvette retirée de l'eau est placée immédiatement dans la mâchoire inférieure de l'appareil d'essai, couché et bien centrée. On adapte la mâchoire supérieure et on place le tout sur la presse C.B.R. en veillant à tout ce que l'appui à bille soit juste en regard de son point d'appui sur la mâchoire (petite concavité). On amène en contact la bille et la mâchoire ; le comparateur de l'anneau dynamométrique permet d'apprécier ce contact.

On règle le comparateur au zéro. On adapte l'indicateur de fluage sur l'une des tiges de guidages, en assurant fermement son contact avec la mâchoire supérieure. On note la division indiquée. Deux opérateurs sont nécessaires pour cette phase de l'essai ; l'un manœuvre la presse à la cadence imposée, l'autre surveille le comparateur de l'anneau dynamométrique tout en maintenant appuyé l'appareil pour la mesure de la déformation.

Quand tout est prêt, on manœuvre le volant de la presse pour suivre la cadence. La rupture se produit au moment où le comparateur de l'anneau dynamométrique indique un maximum. En lisant ce maximum, il faut libérer en même temps, l'appareil de mesure de déformation.

La courbe d'étalonnage de l'anneau dynamométrique permet de convertir le chiffre maximum relevé sur le comparateur en charge exprimée en Kg.

Cette valeur est corrigée, pour tenir compte du volume de l'éprouvette, il suffit de la multiplier par un coefficient de corrélation, celui-ci correspond à la hauteur de l'éprouvette

Tenue à l'eau des enrobés bitumineux à chaud (Mode opératoire de CTTTP)

1-objet

La présente mode opératoire spécifier une méthode d'essai ayant pour but de déterminer la tenue à l'eau d'un mélange hydrocarboné à chaud à partir des rapports de stabilité avec et sans immersion des éprouvettes mesure par l'essai Marshall selon la norme (ASTM-D1559).

2-principe de l'essai

Les éprouvettes utilisées à réalisation de l'essai sont fabriqués selon la norme Marshall (ASTM-D1559).concernant la phase d'écrasement pour la mesure des stabilités, les éprouvettes sont soumises à l'essai Marshall après conservation dans des conditions définies, après 24 h à l'air pour certaine éprouvettes, après 7 jours d'immersion pour d'autres éprouvettes.

3-mode opératoire

Le nombre des éprouvettes utilisé pour l'essai est de 6.

3-1-conservation des éprouvettes sans immersion

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

3-2- conservation des éprouvettes avec immersion

Les 3 autres éprouvettes de mémé composition sont ensuite immergées dans l'eau à la température pouvant varier de 18°C à 25°C pendant 7 jours.

A la fin de cette opération on mesure le volume des éprouvettes.

4-mesure des stabilités

Les éprouvettes sont soumises à l'essai Marshall. Qu'elles aient été conservées avec ou sans immersion.

Les éprouvettes et les mâchoires sont immergées dans l'eau à $60^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ pendant $30\text{min} \pm 1\text{min}$.

La vitesse de plateau de la presse est réglée à 0.85mm/s.

6-expression des résultats

On établit le rapport de la stabilité avec 7 jours en immersion(RCimm) à la stabilité sans immersion (RCsec).

Le rapport (RCimm/RCsec) est exprimé avec deux chiffres significatifs.

Les spécifications algérienne sur les enrobés bitumineux

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

Tableau 1: les performances mécaniques des BB 0/14 et GB 0/20

Caractéristiques	Classes de bitume							
	80/100		60/70		40/50		20/30	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Sm	8.5	-	9.5	-	10.5	-	12.5	-
Fm	-	4	-	4	-	4	-	4
%vide des BB0/14	3	5	3	5	3	5	3	5
%vide des GB0/20	4	8	4	8	4	8	4	8

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

Tableau2 : Performances liées à la tenue à l'eau des BB 0/14 et GB 0/20 (zones I et 2)

Type d'enrobé	Caractéristiques	Zones I et II	
		Trafic (PL.JMA) <150	Trafic (PL.JMA) ≥150
BB 0/14	RCimm/RCsec	>0.70	>0.75
GB 0/20		>0.60	>0.65

Tableau3 : Performances liées à la tenue à l'eau des BB 0/14 et GB 0/20 (zones 3)

Type d'enrobé	Caractéristiques	Zones 3	
		Trafic (PL.JMA) <150	Trafic (PL.JMA) ≥150
BB 0/14	RCimm/RCsec	>0.40	>0.45
GB 0/20		>0.35	>0.40