



تاریخ الشهادۃ: 22/12/2025

رقم الشهادۃ: 1709

شهادۃ نشر

دار بصمة علمية للنشر أن الباحث (ة) : Dr. Taqiyeddine Assas

قد نشر(ت) كتاب بعنوان:

TECHNIQUES INNOVANTES POUR L'ASSISE DES CHAUSSEES ROUTIERES

Enrobés à module élevé (EME) et béton bitumineux à module élevé (BBME)

رقم الإيداع القانوني: ISBN : 978-9969-02-899-7

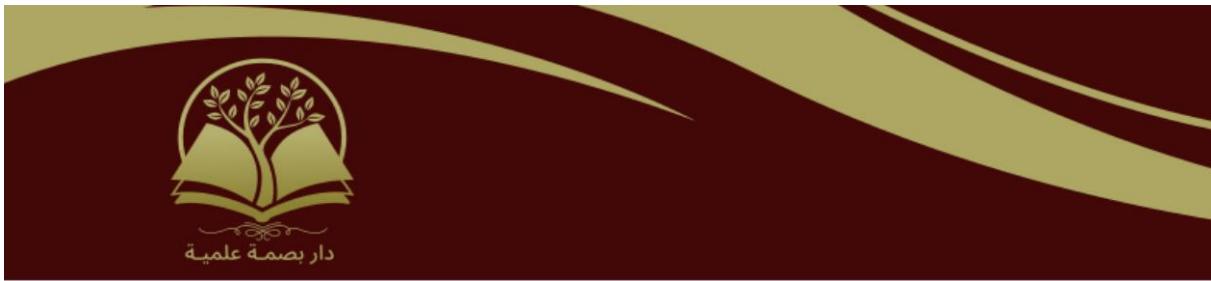
ديسمبر 2025

امضاء وتوقيع مدير الدار/د. قاضي هشام



يمكن استعمال هذه الشهادۃ بما يسمح به القانون

المقر الاجتماعي: الطابق الثالث رقم 01 و 02 شارع الأمير عبد القادر وسط المدينة - ورقلة / الجزائر



الرقم الدولي المعياري للكتاب ISBN (International Standard Book Number)	سنة النشر	دار النشر	عنوان الكتاب العلمي	الرقم
ISBN 978-9969-02-899-7	2025	دار بصمة علمية ورقلة -وسط المدينة- الجزائر شارع الأمير عبد القادر الطابق الثالث مكتب رقم 01 و 02 الفاكس: 029761587 الهاتف: 0698829618/0561216454/0660625929 البريد الإلكتروني : dar.bsma.ourgla@gmail.com Web Site : https://dar.basmalmiya.dz	TECHNIQUES INNOVANTES POUR L'ASSISE DES CHAUSSEES ROUTIERES Enrobés à module élevé (EME) et béton bitumineux à module élevé (BBME)	02

خطوات الوصول إلى الكتاب:

1. افتح متصفح الإنترنت وادهّب إلى الموقع الرسمي لدار النشر:

<https://dar.basmalmiya.dz>

2. على الموقع، ابحث عن قسم الكتب العلمية أو البحث بواسطة **ISBN**.

3. استخدم رقم **ISBN** للكتاب الذي تبحث عنه:

ISBN: 978-9969-02-899-7 .4

5. يمكنك البحث مباشرة باستخدام عنوان الكتاب إذا توفر خيار البحث:

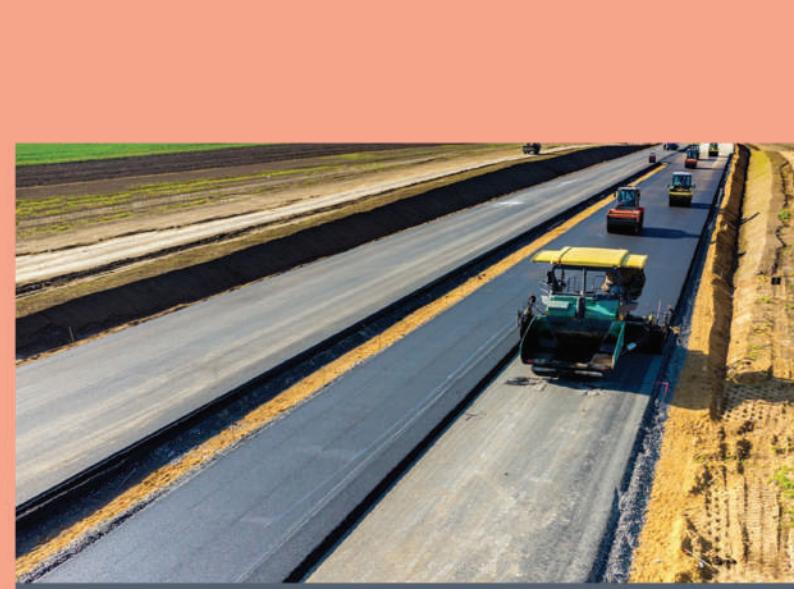
TECHNIQUES INNOVANTES POUR L'ASSISE DES CHAUSSEES
ROUTIERES

Enrobés à module élevé (EME) et béton bitumineux à
module élevé (BBME)



ISBN : 978-9969-02-899-7

9 789969 028997



TECHNIQUES INNOVANTES POUR L'ASSISE DES CHAUSSEES ROUTIERES

**Enrobés à module élevé (EME) et béton
bitumineux à module élevé (BBME)**

Dr. taqiyeddine Assas



TECHNIQUES INNOVANTES POUR L'ASSISE DES CHAUSSEES ROUTIERES

**Enrobés à module élevé (EME) et béton
bitumineux à module élevé (BBME)**

Dr. taqiyeddine Assas

Dr. Taqiyeddine Assas

**TECHNIQUES INNOVANTES POUR L'ASSISE DES
CHAUSSEES ROUTIERES**

Enrobés à module élevé (EME) et béton bitumineux à module élevé (BBME)



عنوان الكتاب:

TECHNIQUES INNOVANTES POUR L'ASSISE DES CHAUSSEES ROUTIERES

Enrobés à module élevé (EME) et béton bitumineux à module élevé
(BBME)

تأليف : Dr. Taqiyeddine Assas

القياس: 24×16 سم

الطبعة: 01

الترقيم الدولي:

ISBN 978-9969-02-899-7

الإيداع القانوني: ديسمبر 2025

حقوق النشر محفوظة للمؤلف

الناشر:

دار بصمة علمية

ورقلة - وسط المدينة - الجزائر

شارع الأمير عبد القادر الطابق الثالث مكتب رقم 01 و 02

الفاكس: 029761587

الهاتف: 0698829618 - 0561216454 - 06 60 62 59 29

البريد الإلكتروني: dar.bsma.ouargla@gmail.com

Web Site: <https://dar.basmalmiya.dz>

الأفكار الواردة في الكتاب لا تعبّر إلا عن آراء صاحبها

Table des Matières

Liste des figures	07
Liste des tableaux	08

Chapitre 1 : Terminologie routière

1.1 Introduction.....	12
1.2 Généralités sur les routes	12
1.2.2 Accotements :.....	14
1.2.3 Terre-plein central (TPC).....	15
1.2.4 Les fossés	15
1.2.5 Le talus	16
1.2.6 Plate-forme.....	16
1.2.7 Assiette.....	17
1.2.8 Emprise	17
1.3 Généralités sur les structures de chaussée.....	18
1.3.1 Constitution et rôles de la structures des chaussées	18
1.3.2 Les différents types de structures de chaussée	20
1.3.3 Comportement des chaussées bitumineuses	26
1.4 Conclusion	29

Chapitre 2 : Les enrobés bitumineux

2.2 Introduction.....	30
2.3 Définition des enrobés bitumineux	30
2.4 Histoire détaillée des bitumes et des enrobés bitumineux ..	31
2.5 Évolution des matériaux de chaussées: du béton aux enrobés et leurs propriétés	34
2.5.1 Définition des deux types de liants: liant hydrocarboné et liant hydraulique	34
2.5.2 Comparaison entre liant hydrocarboné et liant hydraulique	35
2.6 Analyse des différents constituants des enrobés	37
2.6.1 Différences entre enrobés classiques et EHM:	37
2.6.2 Bitumes	38
2.6.3 Formulation des mélanges granulaire	47
2.7 Classification des enrobés bitumineux.....	51

2.7.1	Béton bitumineux (BB)	52
2.7.2	Grave-Bitume (GB).....	53
2.7.3	Sable Bitume (SB)	54
2.7.4	Les enrobes nouveaux	54
2.8	Caractéristiques des enrobés bitumineux	62
2.8.1	Caractéristiques physiques	62
2.8.2	Caractéristiques mécaniques	63
2.8.3	Caractéristiques thermiques et climatiques.....	64
2.8.4	Caractéristiques hydriques	64
2.8.5	Caractéristiques spécifiques selon le type d'enrobé ...	65
2.9	Les niveaux de formulations et les essais pour enrobés	65
2.9.1	Les essais de performance sur les enrobés.....	66
2.10	Conclusion	75

Chapitre 3 : Enrobés à Module Élevé (EME)

3.1	Introduction	76
3.2	Définition des Enrobés à Module Élevé (EME)	77
3.3	Objectifs des Enrobés à Module Élevé (EME)	77
3.4	Types d'Enrobés à Module Élevé (EME)	77
3.4.1	EME Classe 1 (EME1).....	77
3.4.2	EME Classe 2 (EME2).....	77
3.5	Composition typique des Enrobés à Module Élevé (EME)	78
3.5.1	Granulats :	78
3.5.2	Bitume :	78
3.5.3	Additifs pour Enrobés à Haut Module (EHM)	79
3.5.4	Méthodes d'Incorporation des Additifs dans EME	85
3.6	Processus de fabrication et mise en œuvre des Enrobés à Module Élevé (EME)	87
3.6.1	Fabrication en centrale à chaud.....	87
3.6.2	Transport vers le chantier.....	87
3.6.3	Préparation du chantier et mise en œuvre	88
3.6.4	Épaisseurs recommandées.....	88
3.6.5	Contrôles qualité sur chantier	88
3.6.6	Bonnes pratiques et recommandations.....	89
3.7	Essais de performance des Enrobés à Module Élevé (EME)	89

3.7.1	Module complexe (NF EN 12697-26)	89
3.7.2	Essai d'ornierage (NF EN 12697-22)	90
3.7.3	Essai de fatigue	90
3.7.4	Adhésivité liant–granulat (ITSR – NF EN 12697-12)	90
5.7.5.	Teneur en vides (NF EN 12697-8)	90
5.7.6.	Synthèse et approche globale.....	91
3.8	Avantages et limites des Enrobés à Module Élevé (EME)	91
3.8.1	Avantages.....	91
3.8.2	Limites	92
3.8.3	Synthèse	92
3.9	Les Enrobés à Module Élevé (EHM) selon la position dans la structure	92
3.9.1	Enrobé à Module Élevé de Base (EHM / EME).....	93
3.9.2	Enrobé à Module Élevé de Liaison (EME1 – EME2).93	93
3.9.3	Enrobé à Module Élevé de Roulement	94
3.10	Choix du type d'Enrobé à Module Élevé (EHM) selon la couche et le trafic	94
3.11	Cycle de vie d'un Enrobé à Haut Module (EME) vs Enrobé Normal (GB)	95
3.11.1	Production en centrale.....	95
3.11.2	Transport	96
3.11.3	Mise en œuvre sur chantier	96
3.11.4	Contrôles de qualité et essais de performance	96
3.11.5	Équipements spécifiques requis pour la production des Enrobés à Haut Module (EME) et comparaison avec les enrobés classiques.....	98
3.12	Analyse de cycle de vie (ACV) d'un enrobé à module élevé – EME	100
3.12.1	Définition et objectif de l'ACV	100
3.12.2	Objectif principal :	100
3.12.3	Intérêt de l'ACV dans le contexte algérien	100
3.12.4	Étapes du cycle de vie d'un EME ²	100
3.12.5	Résultats typiques de la comparaison EME ² / enrobé classique	101

Chapitre 4 : Les bétons bitumineux à modules élevé (BBME)

4.1	Introduction	102
4.2	Définition	103
4.3	Historique d'apparition des EME et BBME	104
4.4	Objectifs et intérêt de l'utilisation des BBME	105
4.4.1	Amélioration du comportement mécanique	105
4.4.2	Rôle des matériaux dans l'amélioration des performances.....	106
4.4.3	Teneur en bitume et rapport granulats/bitume	106
4.4.4	Avantages techniques des BBME	107
4.5	Caractéristiques des BBME	107
4.5.1	Rigidité.....	107
4.5.2	Endurance.....	108
4.5.3	Stabilité	108
4.5.4	Propriétés normalisées des BBME.....	108
4.6	Les classes de BBME.....	104
4.7	Domaine d'emploi des BBME	104
4.8	Formulation des BBME	105
4.8.1	Contenu de l'épreuve de formulation.....	105
4.8.2	Objectifs d'une épreuve de formulation.....	106
4.8.3	Niveau d'étude	106
4.9	Durée de validité des études de formulation	107
4.10	Fabrication de l'enrobé Bétons Bitumineux à Module Élevé	108
4.10.1	Réception des matières premières	108
4.10.2	Contrôle des paramètres thermiques	108
4.10.3	Teneur en bitume et module de richesse	108
4.11	Analyse comparative des Enrobés à Haut Module (EME/BBME) vs Enrobés Classiques (GB / BBSG).....	109
4.11.1	Bénéfices techniques.....	109
4.11.2	Inconvénients techniques & opérationnels	110
4.11.3	Analyse économique et Life Cycle Cost (LCC) ...	110
4.11.4	Impact environnemental (LCA)	111
4.11.5	Expérience internationale.....	111
4.11.6	Impact macro-économique.....	111
4.12	Conclusion	112

LISTE DES FIGURES

Figure 1. 1.Plan horizontal d'une chaussée.....	12
Figure 1. 2.Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée	14
Figure 1. 3.Accotements routiers.	15
Figure 1. 4.Terre-plein central (TPC)	15
Figure 1. 5.Types de talus	16
Figure 1. 6.Élément du profil en travers	18
Figure 1. 7.Les différentes couches d'une chaussée [1]	19
Figure 1. 8.Structures bitumineuses de référence[2].....	21
Figure 1. 9.Structures-types avec assises traitées aux liants hydrauliques[2].	22
Figure 1. 10.Structures mixtes de référence[2]	23
Figure 1. 11.Structures en béton de ciment de référence[2].	24
Figure 1. 12.Structures souples de référence[2].....	25
Figure 1. 13.Structure inverse de référence[2].....	26
Figure 1. 14.Schématisation des sollicitations induites par le trafic...	27
Figure 1. 15.Constraintes et déformations liées à la température[3]	28
Figure 1. 16. Déformation longitudinale à la base d'une couche de chaussée (a) schéma du passage de la charge roulante et point de mesure, (b) déformation longitudinale résultante[3].....	28
Figure 2. 1. Résumé détaillé sur les bitumes routiers	38
Figure 2. 2.Classification des enrobes bitumineux	52
Figure 2. 3. Résume des niveaux de l'épreuve de formulation.....	66
Figure 2. 4. Essai à la presse à cisaillement giratoire NF EN 12697-91 [9]	68
Figure 2. 5.Le principe de l'essai Duriez.....	69
Figure 2. 6. Appareillage de l'essai d'ornierage.	70
Figure 2. 7. L'appareil de module complexe	72
Figure 2. 8. Appareillage de l'essai de fatigue.....	73
Figure 2. 9. Essai de Marshall (NF EN 12697 34).....	74
Figure 3. 1.Additifs Polymères	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. 1.Matériaux traités aux liants hydrauliques retenus[2].	21
Tableau 1. 2. Conditions de collage aux interfaces[2].....	22
Tableau 2. 1. Nature et mécanisme de durcissement des liants	35
Tableau 2. 2.Comportement mécanique et thermique des liants	36
Tableau 2. 3.Caractéristiques hydriques des liants	36
Tableau 2. 4.Exemples d'utilisations des liants.	37
Tableau 2. 5.Avantages et inconvénients des liants.....	37
Tableau 2. 6.Composition du bitume routier	40
Tableau 2. 7. Essais de consistance (liant à l'état non vieilli)	42
Tableau 2. 8. Essais de comportement thermique.....	42
Tableau 2. 9. Essais de vieillissement.....	43
Tableau 2. 10. Essais de rhéologie moderne	43
Tableau 2. 11. Essais d'adhésivité et sensibilité à l'eau	44
Tableau 2. 12. Essais spécifiques aux BMP (Bitumes Modifiés par Polymères)	44
Tableau 2. 13. Caractéristiques fondamentales d'un bitume pur	45
Tableau 2. 14.Tableau synthétique – Effet des paramètres clés	46
Tableau 2. 15. Exemple typique – Bitume 35/50.....	46
Tableau 2. 16. Exigences usuelles des granulats pour enrobés bitumineux	51
Tableau 2. 17. Caractéristiques physiques des enrobés bitumineux..	63
Tableau 2. 18.Caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux .	63
Tableau 2. 19.Caractéristiques thermiques et climatiques des enrobés bitumineux	64
Tableau 2. 20.Caractéristiques hydriques des enrobés bitumineux. ...	64
Tableau 2. 21.Caractéristiques spécifiques des enrobés bitumineux selon le type	65
Tableau 3. 1. Les principaux types d'additifs polymères	80
Tableau 3. 2.Synthèse des Additifs pour Enrobés à Module Élevé (EME).....	85
Tableau 3. 3.Méthodes d'incorporation et dosage des additifs pour EME.	86
Tableau 3. 4. Choix du type d'Enrobé à Module Élevé (EHM) selon la couche et l'intensité de trafic [9].....	95

Tableau 3. 5. Comparaison du cycle de vie des enrobés à haut module (EME) et des enrobés classiques (GB)	97
Tableau 3. 6.Équipements spécifiques requis pour la production des Enrobés à Haut Module (EME) et comparaison avec les enrobés classiques	99
Tableau 4. 1.Propriétés normalisées des BBME et BBSG	103
Tableau 4. 2.Les essais expérimentaux selon les niveaux d'études [10]	107
Tableau 4. 1.Propriétés normalisées des BBME et BBSG	103
Tableau 4. 2.Les essais expérimentaux selon les niveaux d'études [10]	107

Préface / Avant-propos

Les infrastructures routières constituent un pilier fondamental du développement économique et social. Elles assurent la mobilité des personnes et des marchandises, participent à l'aménagement du territoire et jouent un rôle essentiel dans la sécurité et la durabilité des réseaux de transport. Dans ce contexte, la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre des chaussées exigent une maîtrise rigoureuse des matériaux, des techniques et des normes en constante évolution.

Le présent ouvrage s'inscrit dans cette perspective. Il a pour objectif principal de proposer une synthèse claire, progressive et approfondie des notions fondamentales et avancées relatives aux chaussées routières, avec un accent particulier porté sur les enrobés bitumineux, les enrobés à module élevé (EME) et les bétons bitumineux à module élevé (BBME). Ces matériaux occupent aujourd’hui une place stratégique dans les structures de chaussées modernes, notamment pour les trafics lourds et les exigences accrues en matière de durabilité, de performance mécanique et de maîtrise des coûts sur le cycle de vie.

L’ouvrage est structuré en quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre introduit la terminologie routière et les concepts de base indispensables à la compréhension des structures de chaussées. Il permet au lecteur d’acquérir un langage technique commun et une vision globale des éléments constitutifs de la route. Le deuxième chapitre est consacré aux enrobés bitumineux, depuis leur définition et leur évolution historique jusqu’à leurs caractéristiques, leur classification et leurs méthodes de formulation. Le troisième chapitre traite de manière détaillée des enrobés à module élevé (EME), en abordant leur composition, leurs performances, leurs essais normalisés, leur cycle de vie et leur intérêt technique et environnemental. Enfin, le quatrième chapitre est dédié aux bétons bitumineux à module élevé (BBME), en mettant en évidence leurs spécificités, leurs domaines d’emploi et leur comparaison avec les enrobés classiques.

Ce livre s’adresse principalement aux étudiants en **génie civil** et **travaux publics**, aux ingénieurs et techniciens des routes, ainsi qu’aux chercheurs et praticiens impliqués dans la conception, la réalisation et

la gestion des infrastructures routières. Il se veut à la fois un support pédagogique, un document de référence technique et un outil d'aide à la décision, en particulier dans le contexte des pays en développement et du contexte algérien, où l'optimisation des ressources et la durabilité des chaussées représentent des enjeux majeurs.

L'auteur espère que cet ouvrage contribuera à enrichir les connaissances du lecteur, à renforcer les bonnes pratiques professionnelles et à encourager l'utilisation raisonnée et performante des enrobés à haut module dans les projets routiers actuels et futurs.

**Docteur chercheur
ASSAS taqiyeddine
en Travaux Publics**

Chapitre 1 : Terminologie routière

1.1 Introduction

La conception et la construction des chaussées nécessitent une maîtrise précise de la terminologie technique. Une bonne compréhension des termes permet non seulement de communiquer efficacement entre les ingénieurs, laboratoires et entreprises, mais aussi d'appliquer correctement les normes et méthodes de dimensionnement. Ce chapitre présente les termes essentiels relatifs aux structures de chaussées et aux matériaux, en préparant le lecteur à l'étude des enrobés à haut module (EME) et des bitumes à module élevé (BBME).

1.2 Généralités sur les routes

1.2.1 Chaussée :

Une chaussée est la structure construite pour supporter et transmettre les charges du trafic, qu'il s'agisse de véhicules légers ou lourds, jusqu'au sol naturel ou à la plate-forme support. Elle constitue l'élément central des infrastructures routières et joue un rôle déterminant dans la sécurité, le confort et la durabilité de la route.

1.2.1.1 Sur le plan horizontal

Sur le plan horizontal, la chaussée correspond à la surface revêtue de la route sur laquelle circulent normalement les véhicules.



Figure 1. 1. Plan horizontal d'une chaussée.

1.2.1.2 Sur le plan vertical

Sur le plan vertical, la chaussée est une structure multicouche reposant sur le terrain naturel, conçue pour supporter le trafic et répartir les charges sur les couches inférieures. Elle est généralement constituée de trois parties principales :

a) Plate-forme support de la chaussée

- C'est le sol naturel ou amélioré qui reçoit l'ensemble des couches supérieures.
- Rôle : assurer la stabilité, limiter les tassements et garantir la durabilité.

b) Couches d'assise

- Couche de fondation : stabilise le sol et répartit les charges appliquées.
- Couche de base : couche structurelle principale apportant rigidité et résistance à la fatigue, souvent réalisée en granulats traités ou en enrobés à haut module (EME/BBME).

c) Couche de surface

- Couche de liaison : répartit les efforts mécaniques vers la couche de base et assure la continuité structurelle.
- Couche de roulement : couche supérieure en contact direct avec le trafic, garantissant confort, sécurité, adhérence et résistance à l'usure.

Ainsi, la chaussée combine fonction structurelle et fonction de roulement, permettant une circulation sûre et durable tout en protégeant le sol support des contraintes répétées du trafic. Chaque couche joue un rôle précis dans la répartition des charges, la résistance mécanique et la durabilité de l'infrastructure.

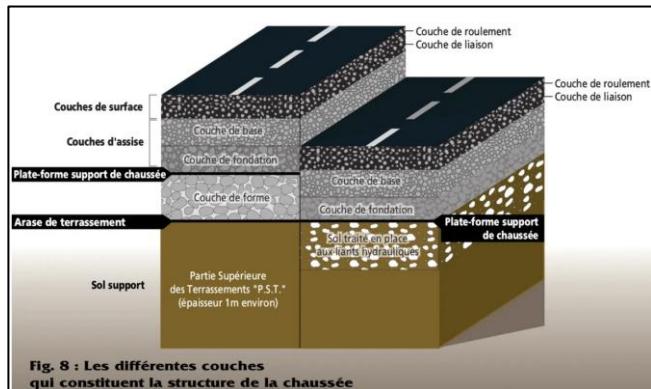


Figure 1. 2.Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée .

1.2.2 Accotements :

Les accotements sont les parties latérales de la chaussée, situées de chaque côté de la surface de roulement. Ils servent à plusieurs fonctions essentielles dans la conception routière :

a) Sécurité

- Fournir un espace pour l'arrêt d'urgence des véhicules.
- Permettre le passage des véhicules en cas d'accident ou de manœuvre d'évitement.

b) Stabilité de la chaussée

- Soutenir les bords de la chaussée pour éviter les tassements ou effondrements.
- Répartir certaines charges latérales et protéger la plate-forme support.

c) Drainage

- Faciliter l'évacuation des eaux de pluie et limiter l'infiltration dans la structure de la chaussée.
- Réduire le risque de dégradation du revêtement et de la fondation.

d) Fonction d'accès et d'entretien

- Permettre l'accès des véhicules d'entretien ou d'intervention.

- Offrir un espace pour la circulation des piétons, cyclistes ou engins agricoles lorsque cela est prévu.



Figure 1. 3. Accotements routiers.

1.2.3 Terre-plein central (TPC)

Le terre-plein central est la partie située au milieu d'une route bidirectionnelle, qui sépare physiquement les deux sens de circulation. Il empêche les traversées dangereuses, réduit les risques de collisions frontales et contribue à la sécurité et à l'organisation du trafic. Sa largeur et son aménagement (terre, gravier, végétation, glissières) dépendent du type de route et du volume de circulation.



Figure 1. 4. Terre-plein central (TPC)

1.2.4 Les fossés

Les fossés sont des tranchées situées le long des routes qui permettent d'évacuer les eaux pluviales et de protéger la chaussée. Ils assurent le drainage, la sécurité en limitant les risques d'aquaplaning et la durabilité de la route. Leur dimension, forme et revêtement dépendent

du débit d'eau et du profil de la route, et un entretien régulier est nécessaire pour leur efficacité.

1.2.5 Le talus

Le talus est la partie de la route située entre l'accotement et le fossé, ou parfois au-delà du fossé, correspondant aux zones de déblais ou de remblais. Il joue un rôle essentiel dans la stabilité des bords de route et dans la protection des infrastructures routières contre l'érosion et l'affaissement.

1.2.5.1 Types de talus

a) Talus de remblais :

- Constitué de matériaux ajoutés pour surélever la route.
- La pente est généralement de 3/2 (3 à la base et 2 en hauteur) pour garantir la stabilité.

b) Talus de déblais :

- Formé par l'excavation du terrain naturel.
- La pente est généralement de 1/1, adaptée à la résistance des matériaux du sol.



Figure 1. 5.Types de talus

1.2.6 Plate-forme

La plate-forme est la surface totale de la route, comprenant non seulement la chaussée, mais aussi les accotements et, lorsqu'ils existent, les terres-pleins centraux (TPC).

Elle constitue donc l'ensemble de la zone aménagée pour supporter la circulation, organiser les différents éléments latéraux et permettre l'intégration des dispositifs de sécurité et de drainage. La plate-forme sert également de base aux talus, fossés et autres aménagements périphériques indispensables au fonctionnement et à la durabilité de l'infrastructure routière

1.2.7 Assiette

L'assiette désigne la surface totale du terrain occupée par la route et l'ensemble de ses annexes. Elle inclut non seulement la plate-forme (chaussée, accotements et éventuellement terre-plein central), mais aussi les fossés, les talus, ainsi que toutes les dépendances et ouvrages relevant du domaine public routier.

Elle représente donc l'emprise complète de la route sur le terrain naturel, englobant toutes les zones nécessaires à la construction, au drainage, à la stabilité et à la sécurité de l'infrastructure routière.

1.2.8 Emprise

L'emprise est la surface de terrain juridiquement affectée à la route et à toutes ses annexes. Elle représente la limite du domaine public routier appartenant à l'État ou aux collectivités. Elle comprend l'ensemble des éléments nécessaires au fonctionnement de l'infrastructure, tels que la plate-forme, les fossés, les talus et tous les ouvrages ou équipements liés à la route. La largeur de l'emprise varie selon la nature de la voie : elle est généralement d'environ 30 mètres pour les routes ordinaires, tandis qu'elle peut atteindre entre 70 et 100 mètres pour les autoroutes afin d'intégrer les deux chaussées, le terre-plein central, les dispositifs de sécurité et les zones réservées aux interventions et à l'entretien.

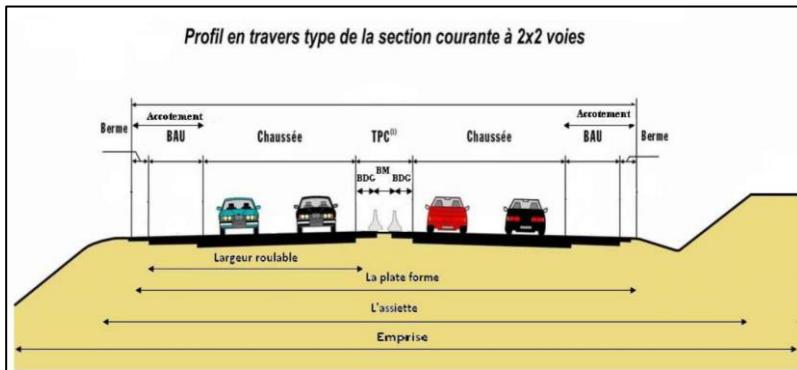


Figure 1. 6. Élément du profil en travers

1.3 Généralités sur les structures de chaussée

1.3.1 Constitution et rôles de la structures des chaussées

Une chaussée est une structure multicouche composée de trois éléments essentiels: la plate-forme support, les couches d'assise et la couche de surface. L'ensemble de ces couches est conçu pour permettre au sol-support de résister aux sollicitations générées par la circulation des véhicules. Ce rôle est assuré grâce à la répartition progressive des contraintes à travers les différentes couches de la structure, de sorte qu'au niveau du sol-support, la contrainte transmise reste inférieure à la contrainte admissible du terrain naturel. Ainsi, la chaussée agit comme un système de protection et de diffusion des charges, garantissant la stabilité, la durabilité et le bon fonctionnement de l'infrastructure routière. Chaque partie de la chaussée est composée d'une ou de plusieurs couches, chacune ayant un rôle précis.

- **La plate-forme support** est constituée du sol-support, souvent surmonté d'une couche de forme. Cette dernière a pour objectif, à long terme, d'homogénéiser la portance du sol, de maintenir une portance minimale de la plate-forme et de contribuer au drainage de la chaussée. À court terme, c'est-à-dire pendant les travaux, elle permet de protéger le sol-support, d'assurer un niveling correct et de faciliter la circulation des engins. Lorsque les qualités mécaniques du sol-support sont suffisantes, la couche de forme peut être réduite à une mince couche de réglage, voire supprimée.

- **L'assise de la chaussée**, également appelée corps de chaussée, est généralement composée d'une couche de fondation surmontée d'une couche de base. Elle apporte à la chaussée la résistance mécanique nécessaire pour supporter les charges verticales induites par le trafic et répartir ces pressions sur la plate-forme support afin de limiter les déformations à des valeurs admissibles. Bien que les deux couches remplissent globalement le même rôle, elles diffèrent par leurs caractéristiques. La couche de base, étant plus proche de la surface, subit des contraintes et des déformations importantes, tandis que la couche de fondation est moins sollicitée. Il est donc essentiel que la couche de base présente des propriétés mécaniques élevées pour résister aux sollicitations, sans imposer un surcoût excessif sur la couche de fondation.
- **La couche de surface** comprend la couche de roulement et une couche de liaison située entre la couche de base et la couche de roulement. La couche de roulement a plusieurs fonctions : résister aux efforts générés par l'accélération et le freinage des véhicules, assurer le confort de conduite, garantir la sécurité grâce à une rugosité adéquate et protéger les couches d'assise contre les infiltrations d'eau. L'ensemble de ces couches forme un système cohérent permettant à la chaussée de remplir sa fonction principale : supporter le trafic tout en conservant durabilité, confort et sécurité.

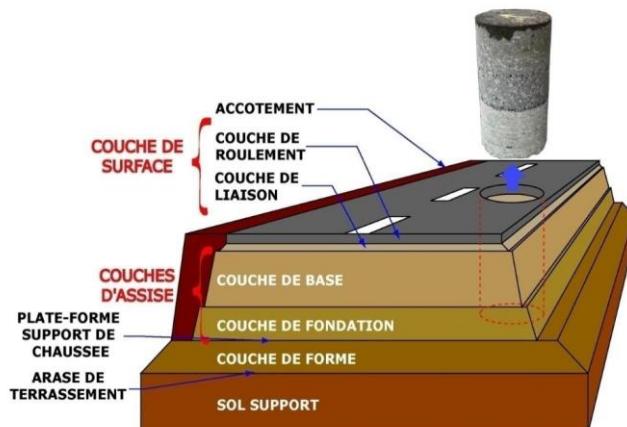


Figure 1. 7.Les différentes couches d'une chaussée [1]

1.3.2 Les différents types de structures de chaussée

Dans le paragraphe suivant, sont présentées les six familles de structures de chaussée retenues, en précisant les matériaux utilisés, les structures de référence associées c'est-à-dire les combinaisons des différentes couches d'assise ainsi que les conditions de collage aux interfaces entre les couches

1.3.2.1 Structures bitumineuses épaisses

a) Matériaux utilisés

Les chaussées bitumineuses épaisses s'appuient sur des matériaux spécifiquement choisis pour leur résistance à la fatigue [2]:

- Grave-bitume classe 2 (GB2)
- Grave-bitume classe 3 (GB3)
- Enrobé à module élevé classe 2 (EME2)

La GB3 offre une meilleure tenue face à la fatigue que la GB2, mais ce dernier reste adapté aux zones riches en granulats ou aux routes à faible trafic reposant sur une plateforme de bonne qualité. Les matériaux de classe 1, que ce soit les graves-bitume ou les enrobés à module élevé, sont exclus, soit pour des raisons réglementaires, soit en raison de performances insuffisamment connues.

b) Structures de référence

Les structures-types définies servent de guide pour le dimensionnement des chaussées elles sont récapitulées dans la figure 1.8[2]:

- Lorsque l'épaisseur totale de la couche bitumineuse est ≤ 12 cm, il est nécessaire de niveler la plateforme à ± 2 cm.
- Ce nivelingement peut être réalisé à l'aide d'une couche de réglage d'au moins 10 cm en grave non traitée insensible à l'eau, avec une granulométrie adaptée.
- La combinaison GB2/GB3, bien que plus économique, n'est pas retenue : à épaisseur équivalente, la GB2 est moins efficace pour limiter la propagation des fissures de fatigue en surface.

c) Conditions aux interfaces

Toutes les couches constituant la chaussée sont supposées bien collées entre elles, assurant ainsi la cohésion et la durabilité de la structure.

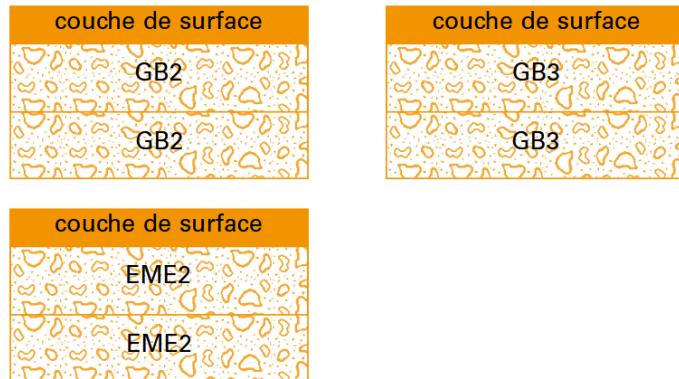


Figure 1.8. Structures bitumineuses de référence[2].

1.3.2.2 Structures à assise traitée aux liants hydrauliques

a) Matériaux utilisés

Les chaussées avec assise traitée aux liants hydrauliques reposent sur des matériaux spécialement stabilisés pour offrir rigidité et durabilité. Les matériaux utilisés dans les structures-types sont ceux définis dans le tableau 1.1 ci-dessous :

Tableau 1.1. Matériaux traités aux liants hydrauliques retenus[2].

Matériaux	Classe	Utilisation	Résistance minimale (traction directe à 360 jours)
Grave-ciment (GC)	G3, G4	Base et fondation	
Grave-liant routier (GLR)	G3	Base et fondation	cf Normes
Grave-cendres hydrauliques (GCH)	G3	Base et fondation	
Grave-laitier prébroyé (GLp*)	G2	Base et fondation	0,9 MPa
Grave-laitier granulé (GLg) ou prébroyé **	G1	Base et fondation	0,65 MPa
Grave-cendres volantes silico-alumineuses-chaux (GCV)	G3	Base et fondation	1,5 MPa
Sables traités (GH/SH)	S2 ou S3	Fondation	cf Normes

*activant sulfatique ou calcique autre que la chaux

**activant chaux

b) Structures de référence

Elles sont présentées ci-dessous dans la figure 1.9, qui en résume les principales caractéristiques et configurations.

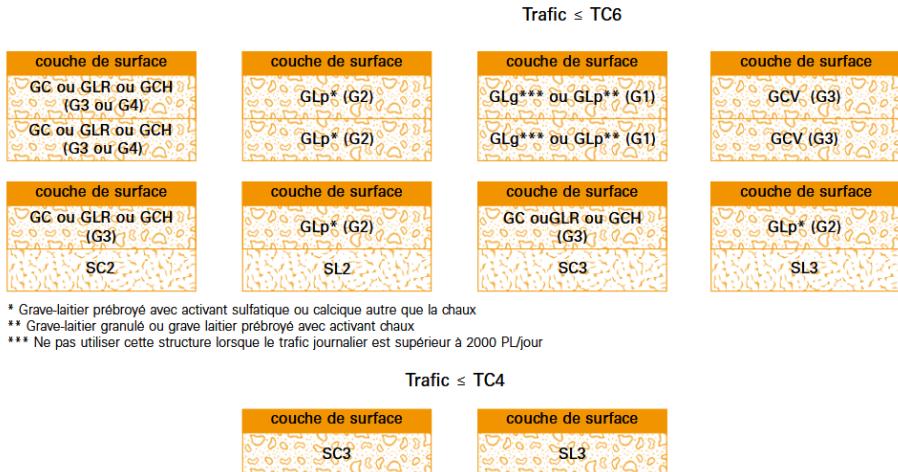


Figure 1.9. Structures-types avec assises traitées aux liants hydrauliques[2].

c) Conditions aux interfaces

Les conditions aux interfaces entre les différentes couches de la chaussée dépendent du type de matériau utilisé et du nombre de couches superposées. Elles influencent la cohésion entre les couches, la répartition des contraintes et la durabilité de la structure. Le tableau 1.2 ci-dessous récapitule les principales conditions de collage aux interfaces, fournissant ainsi un guide pratique pour assurer une liaison optimale entre les couches et garantir le comportement mécanique attendu de la chaussée.

Tableau 1.2. Conditions de collage aux interfaces[2].

Structure	Conditions aux interfaces
GLp*/GLp*, GC3/GC3, GLR/GLR, GCH/GCH	Semi-collé
GLg, GLp**	Collé
GC4/GC4, GCV/GCV	Décollé
SL3/SL3 (laitier prébroyé*), SC3/SC3	Semi-collé
Combinations GLp*/SL2, GLp*/SL3, GC/SC2, GC/SC3	Semi-collé

*activant sulfatique ou calcique autre que la chaux

**activant chaux

1.3.2.3 Structures mixtes

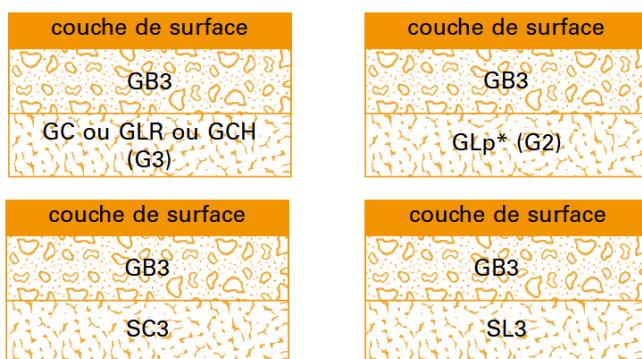
a) Matériaux utilisés

Pour les couches de fondation des structures mixtes, on utilise des matériaux traités aux liants hydrauliques (cf. tableau 1.1).

La couche de base est réalisée en grave-bitume de classe 3, choisie pour sa résistance à la fatigue et sa capacité à limiter la propagation des fissures de retrait.

b) Structures de référence

Elles sont présentées ci-dessous (figure 1.10).



* grave laitier prébrocé avec activant sulfatique ou calcique autre que la chaux

Figure 1. 10.Structures mixtes de référence[2]

c) Conditions aux interfaces

À la mise en service, l'interface entre la couche de fondation et la couche de base est considérée comme collée, garantissant la cohésion de la structure. Après rupture du matériau hydraulique, cette interface devient décollée, ce qui modifie le transfert des charges entre les couches.

1.3.2.4 Structures en béton de ciment

a) Matériaux utilisés

Pour couche de base-roulement :

- Béton armé continu (BAC) avec fers ronds, ou béton de ciment de classe 5 goujonné, pour les trafics supérieurs ou égaux à TC5.

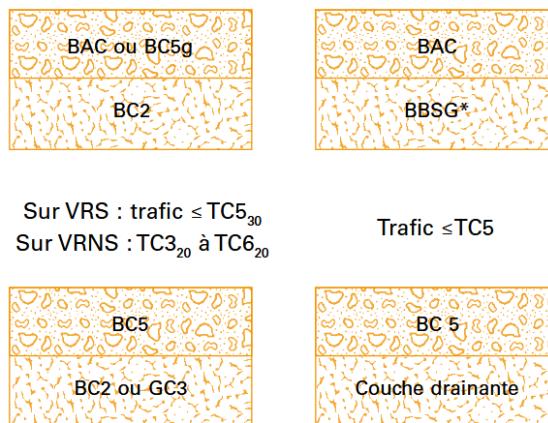
- Béton de ciment de classe 5 non armé et non goujonné (BC5) sur fondation traitée, pour les trafics TC4 à TC5 sur le réseau structurant et TC3 à TC6 sur les autres routes.
- Béton de ciment de classe 5 en dalle épaisse, reposant sur une couche drainante, pour les trafics TC2 à TC5.
Pour couche de fondation :
 - Béton maigre de classe 2 (BC2).
 - Dans le cas du béton armé continu, une couche de 5 cm d'enrobé peut être posée sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques de classe PF3 ou PF4.
 - Grave-ciment de classe G3.
 - Pour les dalles épaisses, une couche drainante de grave non traitée d'environ 10 cm est utilisée.

b) Structures de référence

Les structures-types sont définies selon la combinaison des couches et la nature du béton utilisé (figure 1.11). Elles servent de guide pour le dimensionnement et la réalisation des chaussées en béton de ciment.

c) Conditions aux interfaces

L'interface entre la couche de base-roulement en béton de ciment et la couche de fondation est considérée comme décollée, permettant une transmission spécifique des contraintes et limitant les interactions entre les couches.



* Reposant sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques de classe PF3 ou PF4

Figure 1. 11.Structures en béton de ciment de référence[2].

1.3.2.5 Structures souples

Les structures souples ne sont pas utilisées sur les voies du réseau structurant et ne sont pas adaptées aux trafics supérieurs ou égaux à TC6.

a) Matériaux utilisés

Pour couche de base :

- Grave-bitume de classe 3 (GB3).
- Grave non traitée (GNT) de type B2 (B2C2 ou B2C1), uniquement si le trafic est inférieur ou égal à TC3.

Pour couche de fondation :

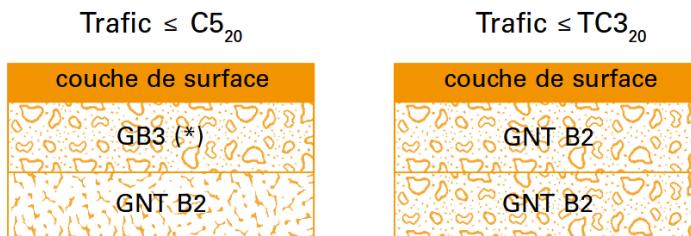
- Grave non traitée (GNT) de type B2 (B2C2 ou B2C1).

b) Structures de référence

Les structures-types sont présentées dans la figure 1.12 et servent de guide pour le dimensionnement des chaussées souples.

c) Conditions aux interfaces

Toutes les couches sont considérées comme collées, assurant la cohésion de la structure et la transmission des contraintes.



(*) Cette structure n'a pas été envisagée sur des plates-formes PF4.

Figure 1. 12.Structures souples de référence[2].

1.3.2.6 Structures inverses

Les structures inverses ne sont autorisées que sur des plateformes de classe PF3 ou PF4, constituées d'une couche de forme traitée aux liants hydrauliques. Elles sont limitées aux trafics inférieurs ou égaux à TC5 sur le réseau structurant et à TC6 sur le réseau non structurant.

a) Matériaux utilisés

- Couche de base : grave-bitume de classe 3 (GB3).
- Couche de fondation : grave non traitée (GNT) de type B2 et de classe de performance C1.

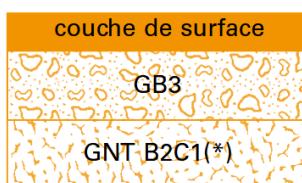
b) Structure de référence

La structure-type est présentée dans la figure 1.13 et sert de guide pour le dimensionnement des chaussées inverses.

c) Conditions aux interfaces

- Les couches bitumineuses sont considérées comme collées entre elles et sur la couche de GNT.
- La GNT est considérée comme décollée sur la plateforme PF3 ou PF4 traitée, permettant une transmission particulière des contraintes

$$\begin{aligned} \text{Sur VRS : Trafic} &\leq \text{TC5}_{30} \\ \text{Sur VRNS : Trafic} &\leq \text{TC6}_{20} \end{aligned}$$



(*) sur une plate-forme PF3 ou PF4 traitée aux liants hydrauliques.

Figure 1. 13.Structure inverse de référence[2].

1.3.3 Comportement des chaussées bitumineuses

Les chaussées bitumineuses sont constituées principalement de couches de surface et de base, qui assurent la transmission des charges et la durabilité de la structure. Ces couches subissent l'action combinée du trafic routier, générant des sollicitations mécaniques répétitives, et des conditions climatiques, telles que les variations de température et le gel[3].

1.3.3.1 Principaux modes de dégradation

a) Effet du trafic

Les passages répétés des véhicules entraînent des compressions et flexions dans les différentes couches de la chaussée. Ces sollicitations répétées provoquent plusieurs types de dégradations :

- **Orniérage** : creusement de pistes ou affaissements localisés, résultant de la compression successive des couches

bitumineuses et, éventuellement, des couches non liées sous-jacentes.

- **Fatigue** : accumulation progressive de micro-dégradations dans les matériaux, due aux tractions et flexions répétées, pouvant conduire à la rupture de la structure.
- **Fissuration** : formation et propagation de fissures, horizontales ou verticales, qui compromettent la durabilité, la sécurité et le confort de la chaussée.

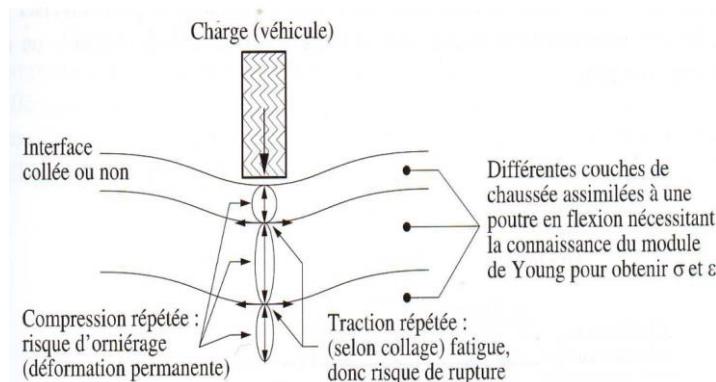


Figure 1. 14.Schématisation des sollicitations induites par le trafic[3]

b) Effet de la température

La température influence de manière significative le comportement des chaussées bitumineuses, au-delà du simple vieillissement du matériau. Ses effets principaux sont :

- **Variation de la rigidité** : le module des matériaux bitumineux change en fonction de la température, en raison du caractère thermosensible du mélange et, en particulier, du liant hydrocarboné. À haute température, le matériau devient plus souple, tandis qu'à basse température, il se rigidifie.
- **Contraintes thermiques et déformations** : les cycles de dilatation et de contraction thermique induisent des contraintes internes qui peuvent provoquer l'apparition et la propagation de fissures. Ce phénomène est particulièrement marqué à basse température. Les couches traitées aux liants hydrauliques sont également sensibles aux retraits thermiques et au retrait de prise, augmentant le risque de fissuration.

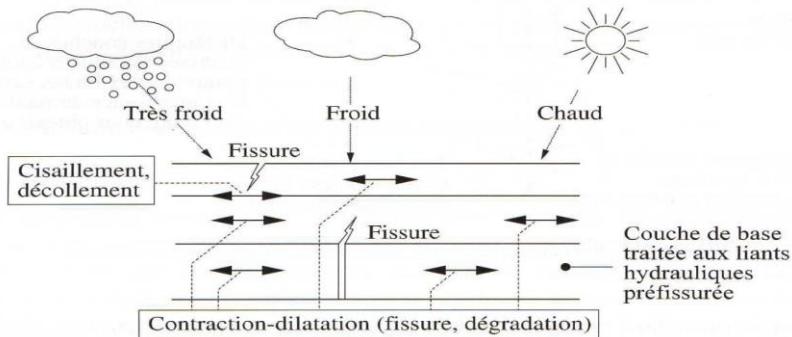


Figure 1. 15.Contraintes et déformations liées à la température[3]

1.3.3.2 Sollicitations dans la chaussée

Le passage d'un véhicule induit des contraintes normales et de cisaillement dans toutes les directions au sein des différentes couches de la chaussée. La couche d'assise, généralement constituée de matériau bitumineux, est particulièrement soumise à la fatigue, due aux cycles répétés de traction et de compression dans la direction parallèle à l'axe de roulement. Ces sollicitations provoquent des déformations longitudinales à la base de la couche d'assise, qui s'accentuent avec l'augmentation du trafic et de la charge des véhicules. La figure suivante illustre ce phénomène pour le passage d'une roue.

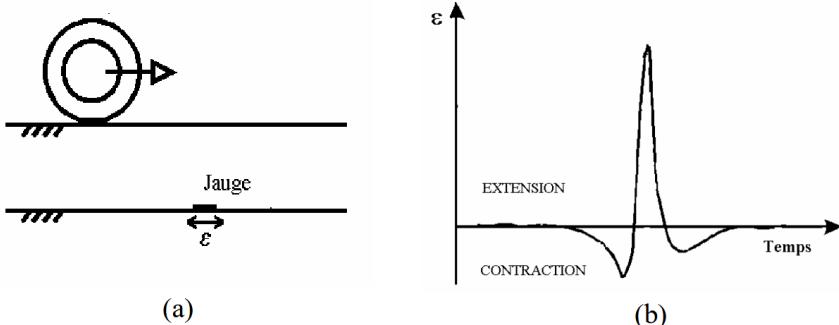


Figure 1. 16. Déformation longitudinale à la base d'une couche de chaussée
(a) schéma du passage de la charge roulante et point de mesure, (b)
déformation longitudinale résultante[3].

Lorsqu'un véhicule s'approche, un point de la chaussée est d'abord soumis à une contraction, puis à une extension lorsque la charge est suffisamment proche. Ces phases de contraction et d'extension sont asymétriques, et l'asymétrie augmente avec la température. À chaque

passage de roue, la chaussée subit donc un cycle de sollicitation de type « contraction – extension – contraction ». La répétition de ces cycles est la principale cause de la fatigue de la chaussée, particulièrement à la base de la couche d'assise et dans la direction longitudinale. L'amplitude de l'extension est généralement trois à quatre fois plus grande que celle de la contraction. De plus, la résistance à la traction des enrobés bitumineux est beaucoup plus faible que leur résistance à la compression. Ainsi, la fatigue apparaît principalement pendant la phase de traction. Dans les couches collées, la traction par flexion est maximale à la base de la chaussée. Par conséquent, c'est à cet endroit que les fissures se forment en premier, amorçant la dégradation progressive de la structure

1.4 Conclusion

Ce chapitre a établi les bases essentielles de l'ingénierie routière en définissant avec précision la terminologie des routes et les principes fondamentaux des chaussées. La compréhension des éléments constitutifs chaussée, accotements, terre-plein central, fossés, talus, plate-forme, assiette et emprise fournit un vocabulaire technique cohérent, indispensable à la conception, la construction et l'entretien des infrastructures. La distinction entre chaussées bitumineuses, bétonnées et mixtes, ainsi que l'analyse de leur comportement face au trafic et aux conditions climatiques, permet d'appréhender les mécanismes de dégradation et d'optimiser le dimensionnement et la maintenance. En résumé, ce chapitre offre un cadre théorique et pratique solide, servant de fondement aux prochains chapitres sur la conception, le dimensionnement et la durabilité des chaussées dans un contexte opérationnel et environnemental.

Chapitre 2 : Les enrobés bitumineux

2.2 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous proposons de définir les enrobés bitumineux et d'explorer leurs principaux aspects techniques. Nous commencerons par présenter brièvement quelques généralités sur l'enrobé bitumineux, en détaillant ses composants essentiels — bitume et granulats ainsi que leurs caractéristiques propres et appropriées pour la construction routière. Nous aborderons ensuite la formulation de l'enrobé, en considérant des paramètres clés tels que la teneur en bitume, la dureté du bitume et la granulométrie des granulats, qui influencent directement la compacité, la mise en œuvre et la durabilité de la chaussée. Enfin, nous présenterons les principaux essais de caractérisation conformes aux normes en vigueur, permettant d'obtenir un enrobé correspondant aux performances et au type souhaités.

2.3 Définition des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux sont des matériaux composites utilisés principalement pour la construction et l'entretien des chaussées routières. Ils sont composés de granulats minéraux (graviers, sable, filler) et de bitume, qui joue le rôle de liant[4]. Le bitume assure la cohésion des granulats et confère au mélange des propriétés de résistance et de flexibilité, indispensables pour supporter le trafic routier et les contraintes climatiques. On distingue différents types d'enrobés bitumineux selon la granulométrie, le type de bitume utilisé, et les conditions de mise en œuvre :

- **Enrobés à chaud (EAC)** : préparés et appliqués à des températures élevées, offrant une bonne compacité et durabilité.
- **Enrobés à tiède (EAT)** : fabriqués à des températures modérées, moins énergivores et plus respectueux de l'environnement.
- **Enrobés à froid** : utilisés pour des réparations rapides ou des couches de surface temporaires.

Les enrobés bitumineux constituent ainsi un élément clé de l'ingénierie routière, permettant d'obtenir des chaussées durables, résistantes aux charges et aux variations climatiques tout en assurant un confort de roulement optimal.

2.4 Histoire détaillée des bitumes et des enrobés bitumineux

L'évolution des enrobés bitumineux est intimement liée à celle du bitume, dont les avancées technologiques ont permis d'améliorer durablement les performances des chaussées. Chaque étape de l'histoire des bitumes correspond à des innovations influençant la conception et la durabilité des enrobés routiers.

a) Antiquité : Les débuts du bitume

- Mésopotamie (vers 4000-3000 av. J.-C.) : Les Sumériens utilisent l'asphalte naturel pour l'étanchéité des canaux, la construction de bâtiments et comme liant pour les briques et pierres.
- Égypte ancienne : Le bitume est utilisé pour la momification, l'étanchéité des structures et la protection contre l'humidité.
- Grèce et Rome : Les Romains emploient le bitume pour les routes et ouvrages hydrauliques. Ils mélangeant le bitume à des granulats pour créer des surfaces solides et durables, capables de supporter le trafic de chars et de piétons.

b) XIXe siècle : L'ère industrielle et les premières routes asphaltées

- Les premières applications modernes apparaissent en Europe : trottoirs asphaltés à Paris.
- L'usage du bitume dans les chaussées permet de réduire la poussière et d'améliorer la résistance des routes.
- Les méthodes restent artisanales et la qualité du bitume variable, limitant la durabilité des routes.

c) Années 1920 : Premiers bitumages des routes françaises

- En 1925, l'utilisation des produits bitumineux se généralise sur les routes françaises.

- L'objectif principal est de créer des revêtements de surface résistants et uniformes, capables de supporter le trafic croissant.
- Les enrobés à chaud commencent à être utilisés, préparés à des températures élevées pour assurer une bonne compacité et adhérence.

d) Années 1950-1960 : Essor des bitumes purs et premières expérimentations

- La majorité du réseau routier secondaire français est bitumée dans les années 1950.
- Les recherches sur l'amélioration des propriétés des bitumes par addition de produits chimiques sont déjà anciennes.
- Aux États-Unis, la fin des années 1950 voit l'expérimentation d'enrobés modifiés par caoutchouc latex.
- En France, des essais similaires ont lieu en 1966, mais restent limités en raison du coût et des incertitudes sur la durabilité.
- Les enrobés utilisés sont donc majoritairement à base de bitumes purs.

e) Années 1970 : Introduction des bitumes polymères et liants modifiés

- Début des brevets sur l'usage du soufre dans le bitume pour augmenter la rigidité des enrobés.
- La crise pétrolière de 1973 accentue la nécessité de produire des enrobés plus performants avec des granulats de qualité inférieure.
- Les bitumes polymères apparaissent en Allemagne, puis en Autriche et Italie, pour améliorer l'adhérence, la résistance au trafic lourd et réduire le ressusage.
- Les élastomères thermoplastiques sont introduits pour lutter contre le vieillissement des chaussées et la fragilité des enduits superficiels aux basses températures.
- Les liants modifiés permettent la mise en place de systèmes monocouches, plus économiques que les systèmes multicouches classiques à base de bitume oxydé.

f) Années 1980 : Développement des bitumes modifiés et enrobés de surface

- La montée du trafic et les crises pétrolières stimulent la recherche de solutions économiques et durables.
- Les nouvelles techniques incluent :
 - BBM (Bétons bitumineux minces) : 3-4 cm
 - BBTM (Très minces) : 2-3 cm
 - BBUM (Ultra-minces) : 1-2 cm
- L'emploi des bitumes modifiés s'étend aux enrobés drainants, aux chapes d'étanchéité et membranes anti-fissures.
- Les polymères et additifs améliorent la durabilité, l'adhérence et la résistance aux charges lourdes.

g) Années 1990 : Bitumes spéciaux et enrobés à module élevé

- Développement des EME (Enrobés à Module Élevé) et BBME (Bétons Bitumineux à Module Élevé).
- Les bitumes spéciaux (pénétration 10/20, 15/25) permettent une rigidité élevée pour réduire l'épaisseur des couches d'assise tout en augmentant la résistance en fatigue.
- Apparition des bitumes multigrade, moins sensibles aux variations de température et adaptés au trafic poids lourd.
- Mise au point de liants pigmentables pour la réalisation d'enrobés colorés, favorisant sécurité et aménagement urbain.

h) Années 2000 : Enrobés économies en énergie et respectueux de l'environnement

- Début des enrobés à l'émulsion, pour des couches minces sur trafic faible ou moyen (3-4 cm), avec granulométrie 0/10.
- Développement des enrobés tièdes : fabrication à 125 °C, compactage à moins de 100 °C, réduisant fortement les émissions polluantes tout en maintenant des performances mécaniques satisfaisantes.
- Orientation vers des procédés plus durables et économies en énergie, compatibles avec les normes environnementales modernes.

2.5 Évolution des matériaux de chaussées: du béton aux enrobés et leurs propriétés

Le passage des chaussées en béton aux enrobés bitumineux résulte de la recherche de solutions plus souples, économiques et faciles à entretenir. Les chaussées en béton, bien que très durables, présentaient un coût initial élevé et une mise en œuvre rigide, limitant leur adaptabilité aux évolutions rapides du trafic. Avec le développement de la motorisation et la disponibilité du bitume issu du raffinage pétrolier, les enrobés bitumineux ont offert une meilleure adaptabilité aux trafics croissants, une réparation rapide et un confort de roulement supérieur, marquant ainsi une transition majeure dans l'ingénierie routière moderne.

2.5.1 Définition des deux types de liants: liant hydrocarboné et liant hydraulique

Avant d'étudier les caractéristiques des enrobés, il est nécessaire de définir les deux types de liants utilisés dans les matériaux de chaussées :

2.5.1.1 Liant hydrocarboné

Est un produit issu du raffinage du pétrole, de nature bitumineuse, utilisé principalement dans les enrobés bitumineux. Il joue un rôle fondamental dans la cohésion et la cohérence du mélange, grâce à ses propriétés d'adhésion aux granulats et sa viscosité.

Les principaux types de liants hydrocarbonés sont :

- a) Bitume classique,
- b) Bitume modifié (amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance à la fatigue),
- c) Goudron (utilisé historiquement, aujourd'hui remplacé par le bitume moderne).

2.5.1.2 Liant hydraulique

Le liant hydraulique est un produit à base de ciment ou de chaux hydraulique, qui durcit par réaction chimique avec l'eau. Il est principalement utilisé dans les chaussées en béton et confère au matériau une rigidité et une durabilité élevées.

Les principaux types de liants hydrauliques sont :

- a) **Ciment Portland,**
- b) **Chaux hydraulique.**

Ce type de liant contraste avec le liant hydrocarboné par sa prise rigide et sa faible tolérance aux déformations, ce qui explique les différences de comportement entre les chaussées en béton et celles en enrobés bitumineux.

2.5.2 Comparaison entre liant hydrocarboné et liant hydraulique

2.5.2.1 Nature et mécanisme de durcissement des liants

Le Tableau 2.1 présente une synthèse des principales différences entre le liant hydrocarboné et le liant hydraulique, en mettant en évidence leur nature chimique, leur mécanisme de durcissement et leur comportement vis-à-vis de l'eau. Ces distinctions sont essentielles pour comprendre les performances et les applications des matériaux de chaussées.

Tableau 2. 1. Nature et mécanisme de durcissement des liants

Critère	Liant hydrocarboné	Liant hydraulique
Nature chimique	Organique	Minérale
Mécanisme	Physique (refroidissement, évaporation des solvants)	Chimique (hydratation)
Durcissement	Réversible avec la température	Irréversible après prise
Influence de l'eau	Sensible à l'eau (risque de décollement)	L'eau est nécessaire à la prise

2.5.2.2 Comportement mécanique et thermique des liants

Le comportement des liants face aux sollicitations mécaniques et aux variations de température influence directement la durabilité et la performance des chaussées. Le Tableau 2.2 synthétise les principales différences entre le liant hydrocarboné et le liant hydraulique en termes de souplesse, résistance et comportement thermique.

Tableau 2. 2. Comportement mécanique et thermique des liants

Propriété	Liant hydrocarboné	Liant hydraulique
Souplesse / Déformabilité	Très bon (viscoélastique)	Rigide et cassant
Résistance à la traction	Bonne (ductile)	Faible
Résistance à la compression	Moyenne	Élevée
Comportement en température	Sensible (ramollit à chaud)	Stable
Résistance au gel/dégel	Moyenne	Bonne (si bien dosé et dense)

2.5.2.3 Caractéristiques hydriques des liants

Les caractéristiques hydriques des liants influencent la résistance des matériaux aux infiltrations d'eau et leur durabilité en conditions humides. Le Tableau 2.3 présente les principales différences entre le liant hydrocarboné et le liant hydraulique concernant la perméabilité, l'adhérence sur support humide et le vieillissement.

Tableau 2. 3.Caractéristiques hydriques des liants

Aspect	Liant hydrocarboné	Liant hydraulique
Perméabilité	Faible (quasi étanche)	Plus élevée (si non traité)
Adhérence sur support humide	Mauvaise	Possible (même en présence d'eau)
Vieillissement	Oxydation du bitume → durcissement	Carbonatation du ciment →augmentation de rigidité

2.5.2.4 Exemples d'utilisations

Les liants hydrocarbonés et hydrauliques sont utilisés dans des domaines différents en fonction de leurs propriétés mécaniques, thermiques et hydriques. Le Tableau 2.4 présente les principaux usages pour chaque type de liant.

Tableau 2. 4.Exemples d'utilisations des liants.

Domaine	Liant hydrocarboné	Liant hydraulique
Couches de chaussée	Roulement, liaison, base souple	Fondation, couche de base traitée
Ouvrages portuaires / chaussées rigides	Peu adapté	Très adapté
Travaux temporaires / recyclage	Facilement réutilisable	Difficile à reprendre

2.5.2.5 Avantages et inconvénients

Chaque type de liant présente des forces et des limites selon ses caractéristiques intrinsèques. Le Tableau 2.5 résume les avantages et inconvénients principaux des liants hydrocarbonés et hydrauliques.

Tableau 2. 5.Avantages et inconvénients des liants.

Liant	Avantages	Inconvénients
Hydrocarboné	Souplesse, adhérence, recyclabilité, étanchéité	Sensibilité à la chaleur et à l'eau, vieillissement
Hydraulique	Rigidité, durabilité, insensibilité à l'eau	Fragilité, délai de durcissement, faible recyclabilité

2.6 Analyse des différents constituants des enrobés (classique et EHM)

Les enrobés bitumineux sont constitués de bitume, granulats et additifs, chacun jouant un rôle déterminant sur les performances mécaniques, thermiques et hydriques des chaussées. L'étude de ces composants permet de comprendre les différences entre enrobés classiques et enrobés à haut module (EHM).

2.6.1 Différences entre enrobés classiques et EHM:

- **Enrobé classique** : utilisation d'un bitume standard avec un dosage moyen, offrant un compromis entre souplesse et résistance.
- **EHM** : utilisation d'un bitume dur ou modifié, avec un dosage plus élevé pour atteindre un module de rigidité élevé et une meilleure résistance à la fatigue.

Les enrobés bitumineux sont constitués de bitume, granulats et additifs, chacun jouant un rôle déterminant sur les performances mécaniques, thermiques et hydriques des chaussées. L'étude de ces composants permet de comprendre les différences entre enrobés classiques et enrobés à haut module (EHM).

2.6.2 Bitumes

Le bitume routier est le principal liant hydrocarboné utilisé dans les enrobés. Il se présente sous forme visqueuse ou solide à température ambiante, de couleur noire ou brun foncé, et est obtenu principalement par distillation du pétrole brut.

2.6.2.1 Rôle du bitume:

- Assurer la cohésion des granulats dans les enrobés.
- Garantir l'imperméabilité et la durabilité des chaussées.

2.6.2.2 Propriétés essentielles :

- Adhésivité : capacité à coller aux granulats.
- Imperméabilité : limiter les infiltrations d'eau.
- Élasticité visco-plastique : tolérer les déformations sous trafic.
- Durabilité : résister au vieillissement et aux contraintes climatiques.

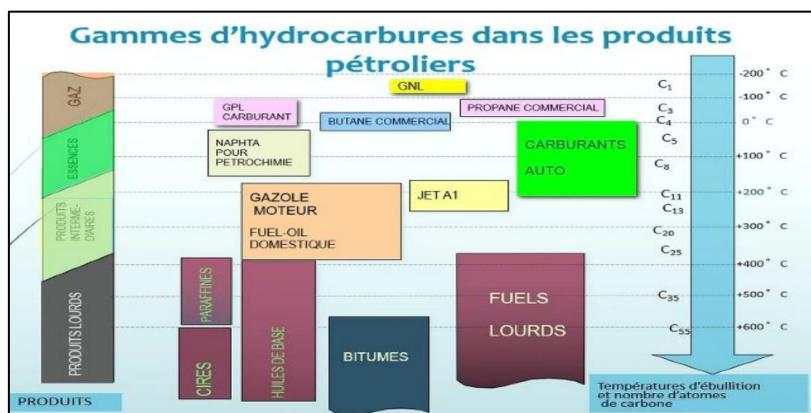


Figure 2. 1. Résumé détaillé sur les bitumes routiers

2.6.2.3 Composition du bitume routier

Le bitume routier est un mélange complexe d'hydrocarbures lourds dont les propriétés mécaniques et rhéologiques dépendent de la composition relative des différentes fractions.

a) Fractionnement asphaltène-maltène

Le bitume se compose principalement de deux fractions complémentaires :

- **Asphaltènes** : fraction solide, responsable de la rigidité et de la dureté du bitume.
- **Maltènes** : fraction huileuse, comprenant résines et huiles, assurant la flexibilité et l'adhésivité du liant.

L'équilibre entre asphaltènes et maltènes conditionne directement les performances mécaniques et la stabilité des enrobés sous trafic et variations climatiques.

b) Fractionnement SARA

Une analyse plus détaillée du bitume se fait selon la méthode SARA, qui classe les composants en fonction de leur polarité et de leur masse moléculaire :

- Saturés (S) : confèrent la fluidité.
- Aromatiques (A) : contribuent à la ductilité.
- Résines (R) : assurent cohésion et adhésion aux granulats.
- Asphaltènes (A) : responsables de la rigidité et de la stabilité.

L'équilibre SARA est la clé du comportement rhéologique du bitume et influence sa performance en service.

c) Indice de colloïdalité (Ic)

L'indice de colloïdalité, noté Ic, permet d'évaluer la stabilité du bitume :

$$I_c = \frac{A + S}{R + A} \quad (1)$$

Où :

- A : aromatiques
- S : saturés
- R : résines
- A : asphaltènes

Un équilibre optimal entre ces fractions garantit une cohésion suffisante, une souplesse adaptée et une résistance durable aux sollicitations mécaniques et thermiques des chaussées.

Tableau 2. 6.Composition du bitume routier

Caractéristiques	Maltènes Saturés	Maltènes Aromatiques	Maltènes Résines	Asphaltènes
% dans le bitume (massique)	5 % - 10 %	40 % - 65 %	10 % (Lesueur 2002)	5 % - 25 %
Masse moléculaire (g/mol)	300 – 2 000	300 – 2 000	500 – 50 000	1 000 – 100 000
Couleur	Incolore - jaunâtre	Rouge - brun sombre	Noire – brun foncé	Noir
Constituants	Carbone, Hydrogène	Carbone, Hydrogène et Soufre	Carbone, Hydrogène, Azote, Oxygène et Soufre	Carbone, Hydrogène, Azote, Oxygène et Soufre
Propriétés données au bitume	Viscosité et fluidité	Viscosité et fluidité	Adhésivité et ductilité	Résistance et rigidité

2.6.2.4 Types de bitumes routiers

Les bitumes routiers se distinguent selon leur origine et selon les normes de classification.

a) Selon l'origine

- **Bitumes purs (ou routiers classiques)** : issus directement de la distillation du pétrole brut, ils sont largement utilisés dans les enrobés classiques.
- **Bitumes modifiés (PMB – Polymer Modified Bitumen)** : additionnés de polymères (élastomères, plastomères) pour améliorer l'élasticité, la résistance au vieillissement et la stabilité aux déformations sous trafic.
- **Bitumes fluxés** : fluidifiés par l'ajout de solvants, permettant une utilisation à froid, notamment pour des enrobés semi-lisses ou réparations ponctuelles.

- **Bitumes émulsionnés** : dispersés dans l'eau avec des tensioactifs, utilisés à froid dans les enduits superficiels, le recyclage à froid ou les graves-émulsion.

b) Selon les normes

La classification des bitumes se fait également selon des normes spécifiques :

- **Norme EN 12591 (Europe)** : classe les bitumes purs selon leur grade de pénétration, par exemple 35/50, 50/70, 70/100.
- **Norme EN 14023 (Europe)** : destinée aux bitumes modifiés, avec des critères adaptés à leurs propriétés spécifiques.
- **Normes ASTM / AASHTO (Superpave – USA)** : classification par Performance Grade (PG), par exemple PG 64-22, indiquant la température maximale (64°C) et minimale (-22°C) d'utilisation.

2.6.2.5 Classification des bitumes routiers

a) Par pénétration (essai à l'aiguille)

- **Principe** : Mesure de la consistance du bitume à température standard (25 °C) à l'aide d'une aiguille qui pénètre dans l'échantillon sous charge définie.
- **Unité** : 1/10 mm (décimillimètre)
- **Exemple** : Bitume 50/70 → la pénétration varie entre 50 et 70 (indique la dureté du bitume : plus le chiffre est bas, plus le bitume est dur).
- **Utilité** : Permet de déterminer la malléabilité et l'aptitude à l'utilisation selon le type de route et le climat.

b) Par viscosité

- **Principe** : Mesure de la résistance à l'écoulement du bitume chauffé à haute température.
- **Températures de référence** : 135 °C ou 160 °C.
- **Unité** : Poise ou centipoise (Pa·s)
- **Utilité** : Permet d'évaluer le comportement du bitume lors du mélange avec les granulats chauds pour l'enrobé.

c) Par performance (PG – Superpave)

- **Principe** : Classification basée sur les performances réelles en service selon les conditions climatiques.
- **PG (Performance Grade)** : Indique les températures maximale et minimale auxquelles le bitume peut être utilisé sans fissuration ni affaissement.
- **Exemple** : PG 64-22 → adapté pour des températures allant jusqu'à 64 °C et aussi basse que -22 °C.
- **Utilité** : Permet d'adapter le bitume aux climats chauds ou froids, et d'améliorer la durabilité des routes.

2.6.2.6 Principaux essais de laboratoire

a) Essais de consistance (liant à l'état non vieilli)

Ces essais permettent de déterminer la dureté et la viscosité du bitume.

Tableau 2. 7. Essais de consistance (liant à l'état non vieilli)

Essai	Norme	Principe / Mesure	Indication
Pénétration	EN 1426	Mesure de la profondeur (1/10 mm) qu'une aiguille pénètre dans le bitume sous charge standard	Consistance du bitume : mou ou dur
Point de ramollissement (Bille et Anneau)	EN 1427	Température à laquelle le bitume devient mou et permet à une bille de tomber	Résistance à la chaleur, utile pour les climats chauds
Viscosité dynamique & cinématique	EN 12596 & EN 12595	Mesure de l'écoulement du liant à différentes températures	Aptitude au pompage, à l'enrobage et au compactage

b) Essais de comportement thermique

Ces essais évaluent la réponse du bitume aux variations de température, en particulier la fissuration à froid et la plasticité.

Tableau 2. 8. Essais de comportement thermique.

Essai	Norme	Principe / Mesure	Indication / Utilité
Point de fragilité Fraass	EN 12593	Température à laquelle le bitume se fissure par fragilité à froid	Évaluation de la résistance aux fissures dans les régions froides
Ductilité	EN 13398 (ou EN 13589 pour BMP)	Mesure de l'allongement maximal avant rupture	Indique la plasticité et l'adhésivité du bitume

c) Essais de vieillissement

Ces essais simulent l'oxydation et la perte de volatiles pour évaluer la durabilité du bitume en service.

Tableau 2. 9. Essais de vieillissement

Essai	Norme	Principe / Mesure	Indication / Utilité
RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test)	EN 12607-1 / ASTM D2872	Vieillissement court terme : échantillon chauffé et agité pour simuler la production et la mise en œuvre	Mesure la perte de masse et l'évolution des propriétés à court terme
PAV (Pressure Aging Vessel)	EN 14769	Vieillissement long terme : échantillon préalablement vieilli au RTFOT, soumis à pression et température	Simule 10-15 ans de service, évalue la durabilité et résistance aux fissures à long terme

d) Essais de rhéologie moderne

Ces essais permettent de caractériser le comportement viscoélastique des liants bitumineux, particulièrement pour les bitumes modifiés (BMP).

Tableau 2. 10. Essais de rhéologie moderne

Essai	Norme	Principe / Mesure	Indication / Utilité
DSR (Dynamic Shear Rheometer)	EN 14770	Mesure du module complexe et de l'angle de phase	Évalue la résistance au fluage, au cisaillement et au phénomène d'orniérage
BBR (Bending Beam Rheometer)	EN 14771	Mesure de la rigidité et de la relaxation à basse température	Évalue la sensibilité aux fissurations thermiques
MSCR (Multiple Stress Creep Recovery)	AASHTO T350	Test pour bitumes modifiés : mesure de la récupération après contrainte répétée	Évalue la résistance aux déformations permanentes et l'élasticité

e) Essais d'adhésivité et sensibilité à l'eau

Ces essais permettent d'évaluer l'interaction entre le liant et les granulats, et la sensibilité de l'enrobé à l'eau.

Tableau 2. 11. Essais d'adhésivité et sensibilité à l'eau

Essai	Norme	Principe / Mesure	Indication / Utilité
Essai de pelage	—	Observation de l'adhésion bitume/granulat après immersion	Évalue la qualité de collage et le risque de décollement
ITSR (Indirect Tensile Strength Ratio)	EN 12697-12	Rapport de résistance traction indirecte humide/sèche sur échantillons d'enrobé	Mesure la sensibilité à l'eau et prédit le décollement de l'enrobé

f) Essais spécifiques aux BMP (Bitumes Modifiés par Polymères)

Ces essais permettent de caractériser le comportement des bitumes modifiés, notamment leur élasticité et leur stabilité.

Tableau 2. 12. Essais spécifiques aux BMP (Bitumes Modifiés par Polymères)

Essai	Norme	Principe / Mesure	Indication / Utilité
Elastic Recovery	EN 13398	Mesure de la capacité de récupération élastique après allongement	Évalue l'élasticité du BMP et sa résistance au fluage
Force ductilité	EN 13589	Résistance à l'allongement d'un échantillon de BMP	Mesure la ductilité et la plasticité améliorée par polymère
Stabilité de stockage	EN 13399	Vérifie la non-séparation entre polymère et bitume après chauffage	Assure l'homogénéité et la qualité du BMP en stockage

2.6.2.7 Caractéristiques fondamentales d'un bitume pur — Valeurs indicatives & interprétation

Les bitumes purs sont des liants hydrocarbonés dont les propriétés déterminent largement le comportement des enrobés routiers. Pour garantir leur performance en service, ils sont caractérisés par un ensemble d'essais standardisés permettant d'évaluer leur consistance, résistance thermique, viscosité, ductilité, sensibilité au froid, densité et composition chimique. Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques fondamentales d'un bitume pur, leurs paramètres mesurés, les valeurs typiques et l'interprétation de chaque essai.

Tableau 2. 13. Caractéristiques fondamentales d'un bitume pur

Essai	Paramètre mesuré	Ordre de grandeur (valeurs typiques)	Interprétation / Signification
Pénétrabilité (EN 1426)	Profondeur de pénétration d'une aiguille sous charge normalisée	35/50 → 35–50 ($>0,1$ mm) 50/70 → 50–70 ($>0,1$ mm)	Mesure la consistance à 25 °C. Plus la valeur est élevée → bitume plus mou.
Point de ramollissement (Anneau & Bille, EN 1427)	Température à laquelle le bitume commence à s'écouler	35/50 → 50–56 °C 50/70 → 50–70 °C → 46–54 °C	Reflète la résistance à la chaleur. Plus le point est élevé → meilleure stabilité thermique et résistance au flUAGE.
Viscosité dynamique (ASTM D4402 – Brookfield)	Résistance à l'écoulement sous contrainte	60 °C : 100–500 Pa·s 135 °C : 0,3–3 Pa·s	Indique l'aptitude à la mise en œuvre. Diminue avec la température.
Viscosité cinématique (ASTM D2170)	Rapport viscosité/densité (écoulement libre)	135 °C : 300–600 mm ² /s	Sert à comparer les liants et leur fluidité à chaud.
Ductilité (EN 13398)	Allongement avant rupture à 25 °C	≥ 40 cm (bitume pur) ≥ 20 cm (bitume durci)	Mesure la cohésion et l'adhérisivité. Faible ductilité → bitume cassant.
Point de fragilité Fraass (EN 12593)	Température à laquelle le film de bitume se fissure sous flexion	–8 à –15 °C pour bitumes classiques	Caractérise la résistance au froid. Plus la température est basse → meilleure flexibilité à froid.
Teneur en paraffine (NF EN 12606-1)	% massique de cire naturelle	< 2 % (souhaité)	Excès → risque de fissuration à froid et mauvaise adhésivité.
Masse volumique (EN 15326)	Densité à 25 °C	$\approx 1,00$ à 1,05 g/cm ³	Sert aux calculs de dosage et d'énergie volumique.
Indice de pénétrabilité (PI)	Relation entre point de ramollissement et pénétrabilité	–2 à +2 (bitume normal)	Évalue la sensibilité thermique. PI élevé → bitume peu sensible aux variations de température.

2.6.2.8 Interprétation globale des paramètres d'un bitume pur
 Les différents paramètres mesurés sur un bitume pur permettent de prévoir son comportement en service. Chaque paramètre influence ses

propriétés : la pénétrabilité indique la souplesse et la flexibilité à froid, le point de ramollissement traduit la tenue à chaud, la ductilité reflète la cohésion et la résistance à la fissuration, la viscosité assure la stabilité sous trafic, et la température de fragilité Fraass renseigne sur la résistance aux fissures à basse température. Le tableau ci-dessous résume l'effet de chaque paramètre clé.

Tableau 2. 14.Tableau synthétique – Effet des paramètres clés

Paramètre	Variation / ↑ ou ↓	Effet observé
Pénétrabilité	↑	Bitume plus souple → meilleure flexibilité à froid mais plus sensible au fluage
Point de ramollissement	↑	Meilleure tenue à chaud → plus cassant à froid
Ductilité	↑	Bonne cohésion → meilleure résistance à la fissuration
Viscosité	↑	Plus difficile à mettre en œuvre, mais plus stable sous trafic
Fraass	↓	Bonne résistance aux basses températures

2.6.2.9 Exemple typique – Bitume 35/50

Pour illustrer concrètement les caractéristiques d'un bitume pur, le tableau ci-dessous présente un exemple typique pour le bitume 35/50. Les différentes propriétés mesurées permettent d'évaluer sa consistance, sa résistance à la chaleur, sa maniabilité, sa cohésion et sa flexibilité à froid, offrant ainsi une vue d'ensemble de son comportement attendu sur chaussée.

Tableau 2. 15. Exemple typique – Bitume 35/50

Propriété	Valeur indicative	Interprétation
Pénétrabilité	40 ($\times 0,1$ mm)	Bitume assez dur
Point de ramollissement	52 °C	Bonne résistance au fluage
Viscosité à 135 °C	1 Pa·s	Bonne maniabilité à chaud
Ductilité à 25 °C	50 cm	Cohésion correcte
Point Fraass	-10 °C	Flexibilité moyenne au froid

En résumé, le bitume routier est un liant stratégique dont les performances dépendent de sa composition, sa classification et l'ajout éventuel d'additifs. Les essais classiques tels que la pénétration, le point

de ramollissement et le point Fraass permettent une première évaluation de la consistance et de la résistance thermique. En complément, les essais modernes (DSR, BBR, MSCR, PAV) fournissent une vision complète du comportement viscoélastique, de la durabilité et des performances des bitumes routiers, en particulier pour les bitumes modifiés par polymères, garantissant ainsi une meilleure adaptation aux contraintes climatiques et au trafic.

2.6.3 Formulation des mélanges granulaire

Les granulats constituent la fraction solide principale des enrobés. Leur granulométrie, forme et résistance influencent la stabilité, la compacité et la résistance à l'orniérage. Ils constituent la structure portante de l'enrober — le « squelette granulaire ». Selon plusieurs sources, les granulats représentent environ 90 à 95 % en poids du mélange total.

- Enrobé classique : granulométrie adaptée aux couches de roulement et de liaison (généralement 0/14 ou 0/20).
- EHM : granulats soigneusement sélectionnés et calibrés pour garantir un module élevé et limiter la déformation plastique sous trafic lourd.

2.6.3.1 Critères de sélection des granulats

a) Nature pétrographique

- Roches dures, résistantes à l'usure et au polissage pour éviter le lustrage.
- Exemples : basalte, granite, calcaire dur.
- Roches tendres ou friables → risque d'affaissement prématué ou de dégradation rapide de la chaussée.

b) Granularité (distribution granulométrique)

- Granulométrie continue → toutes les classes de grains → meilleure compacité et résistance.
- Granulométrie discontinue → certaines fractions absentes pour caractéristiques spécifiques (perméabilité, enrobé drainant).
- Types de mélanges :
 - GB (Grave Bitume)
 - BBSG (Béton Bitumineux Semi-Grenu)

- BBME (Béton Bitumineux à Module Élevé)

c) Forme et texture des grains

- Grains anguleux et rugueux → cohésion mécanique et adhérence optimale.
- Grains arrondis → diminution de la résistance au trafic.
- Rugosité → amélioration du frottement interne et de la stabilité dimensionnelle.

d) Propreté et pureté

- Granulats propres et sans impuretés.
- Les impuretés réduisent l'adhésion bitume-granulat et favorisent décollements et fissurations.
- Lavage et tri nécessaires pour garantir la qualité.

2.6.3.2 Essais de contrôle avant formulation (normes EN 933, EN 1097, EN 1367)

a) Équivalent de sable (ES) – EN 933-8

L'essai d'équivalent de sable (ES) permet d'évaluer la propreté des granulats, en particulier la teneur en fines argileuses susceptibles de nuire à l'adhérence bitume–granulats et à la durabilité des enrobés. Il compare la proportion de sable propre à celle des éléments fins plastiques présents dans l'échantillon.

Exigences usuelles :

- Enrobés bitumineux courants :
 - $ES \geq 50\%$ (souvent exigé $\geq 60\%$)
- Couches de roulement à hautes performances :
 - $ES \geq 70\%$

Un ES élevé indique des granulats propres, favorisant une bonne adhésivité, une meilleure cohésion du mélange et une réduction du risque de décollement et d'orniérage.

b) Résistance mécanique – Essai Los Angeles (LA) – EN 1097-2

L'essai Los Angeles (LA) permet d'évaluer la résistance des granulats aux chocs et à l'usure, en simulant les sollicitations mécaniques subies sous l'effet du trafic. Il mesure la perte de masse des granulats après rotation dans un tambour contenant des billes d'acier.

Exigences usuelles :

- Chaussées courantes :
 - $LA \leq 35$ à 40
- Chaussées autoroutières et trafic lourd :
 - $LA \leq 25$ à 30

Un coefficient LA faible traduit des granulats plus résistants, assurant une meilleure durabilité, une stabilité mécanique accrue et une résistance supérieure à l'ornierage et à la dégradation sous trafic intense.

c) Résistance à l'usure – Essai Micro-Deval (MDE) – EN 1097-1

L'essai Micro-Deval (MDE) permet d'évaluer la résistance des granulats à l'usure par abrasion en présence d'eau, en simulant les conditions réelles de service des chaussées soumises au trafic et à l'humidité. Il mesure la perte de masse des granulats après rotation dans un tambour avec des billes et de l'eau.

Exigences usuelles :

- Trafic moyen :
 - $MDE \leq 20$ à 25
- Trafic lourd :
 - $MDE \leq 15$ à 20

Un coefficient MDE faible indique des granulats peu sensibles à l'usure et à l'action de l'eau, garantissant une meilleure durabilité, une stabilité du squelette granulaire et une réduction du risque de dégradation prématuée des enrobés.

d) Résistance au polissage – Polissage accéléré (PSV) – EN 1097-8

L'essai de polissage accéléré (PSV – Polished Stone Value) permet d'évaluer la résistance des granulats au polissage sous l'action du trafic, paramètre essentiel pour garantir une bonne adhérence de surface et la sécurité des usagers, notamment en conditions humides. Il simule l'usure progressive de la surface des granulats soumise au passage répété des véhicules.

Exigences usuelles :

- Chaussées courantes :
 - $PSV \geq 45$ à 50
- Autoroutes, zones de freinage et giratoires :

- PSV \geq 55 à 60

Un PSV élevé indique des granulats peu sensibles au polissage, assurant une adhérence durable, une meilleure résistance au lustrage et une réduction du risque de glissance, particulièrement sur les sections fortement sollicitées.

e) Absorption d'eau – EN 1097-6

L'essai d'absorption d'eau permet d'évaluer la porosité et l'altérabilité des granulats, en mesurant la quantité d'eau qu'ils peuvent absorber. Ce paramètre influence directement la durabilité des enrobés, l'adhérence bitume–granulat et la sensibilité au gel-dégel.

Exigences usuelles :

- Granulats calcaires :
 - Absorption \leq 2 %
- Granulats siliceux ou roches dures :
 - Absorption \leq 1 %

Une faible absorption d'eau indique des granulats peu poreux et durables, favorisant une meilleure adhésivité avec le bitume, une résistance accrue aux agents climatiques et une réduction des risques de dégradation prématuée des enrobés.

f) Autres essais complémentaires sur les granulats

En complément des essais mécaniques et de propreté, certains essais permettent de mieux apprécier la qualité globale des granulats et leur aptitude à être utilisés dans les couches de chaussée, en particulier les couches de roulement.

- Propreté par lavage (*EN 933-1*)
 - Mesure la teneur en fines éliminables par lavage.
 - Exigence usuelle : fines \leq 1 à 2 %.
 - Une faible teneur en fines favorise une meilleure adhérence bitume–granulat et une stabilité accrue du mélange.
- Teneur en particules tendres ou altérables (*EN 933-3*)
 - Évalue la proportion de particules fragiles susceptibles de se désagréger.
 - Exigence courante : \leq 3 %.
 - Un faible taux limite les risques de dégradation prématuée et de perte de résistance mécanique.

- Forme des grains – Indice de forme (IF) (*EN 933-4*)
 - Caractérise la forme des particules (aplatissement/allongement).
 - Exigence pour couches de roulement : IF ≤ 35 à 40.
 - Des grains bien conformés améliorent la compacité, la stabilité mécanique et la résistance à l'orniérage.

2.6.3.3 Synthèse des critères de qualité des granulats pour les enrobés bitumineux

Les valeurs présentées ci-dessous sont indicatives. Elles peuvent varier selon le type de couche (fondation, base, roulement) et le niveau de trafic (léger, moyen, lourd, autoroutier).

Tableau 2. 16. Exigences usuelles des granulats pour enrobés bitumineux

2.7 Classification des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux sont des matériaux constitués d'un mélange de granulats et d'un liant hydrocarboné. Leur composition globale peut être décrite comme un système à trois phases :

Essai	Norme	Valeurs indicatives
Équivalent de sable (ES)	EN 933-8	≥ 50 à 70 %
Los Angeles (LA)	EN 1097-2	≤ 25 à 40
Micro-Deval (MDE)	EN 1097-1	≤ 15 à 25
Polissage accéléré (PSV)	EN 1097-8	≥ 45 à 60
Absorption d'eau	EN 1097-6	≤ 1 à 2 %

- Phase solide : formée par le squelette granulaire, assurant la résistance mécanique et la structure interne du matériau ;
- Phase visqueuse : constituée par le liant bitumineux, qui assure la cohésion entre les grains ;
- Phase gazeuse : correspondant au taux de vides présents dans le mélange, influençant la durabilité, la stabilité et la sensibilité à l'eau.

Dans le domaine routier, il existe plusieurs types d'enrobés bitumineux, différenciés selon :

- Leur formulation,
- Leur granularité,
- Leur taux de vides,
- Leur mode de fabrication,

- Ou encore leur usage (couche de roulement, base, liaison...).

Le schéma suivant permet d'illustrer les principales familles d'enrobés et leurs différences essentielles :

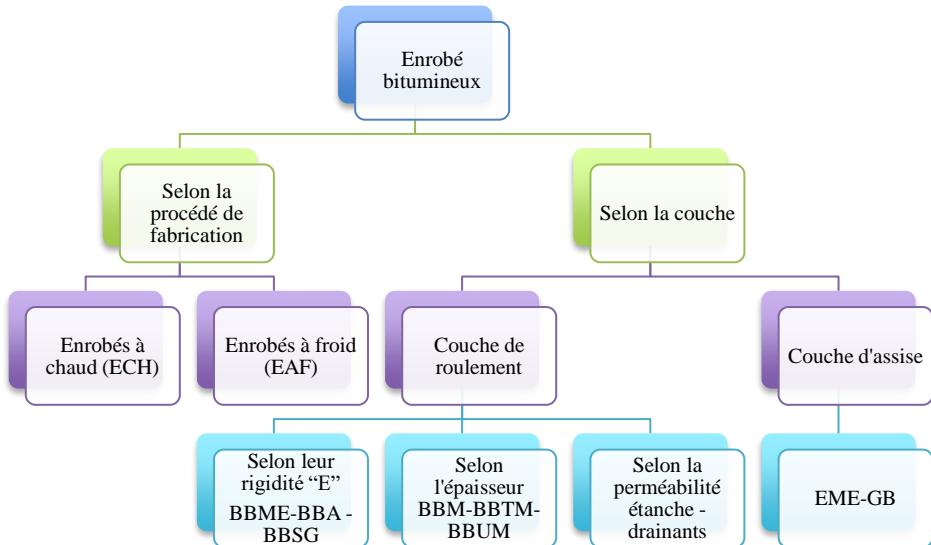


Figure 2. 2. Classification des enrobes bitumineux

D'après la classification précédente, plusieurs types d'enrobés bitumineux peuvent être distingués en fonction de leur composition, de leur granulométrie et de leur domaine d'utilisation. Ci-dessous, nous présentons quelques-uns de ces enrobés ainsi que leurs applications principaux:

2.7.1 Béton bitumineux (BB)

Le béton bitumineux (BB) est un enrobé à granularité continue, composé de gravillons, de sable, de filler, de liant bitumineux, ainsi que d'éventuels additifs permettant d'améliorer la maniabilité ou la performance du mélange. Selon le Cahier des Charges – ENR05 (2005), les classes granulaires retenues sont[5] :

- BB 0/8,
- BB 0/12,
- BB 0/14.

2.7.1.1 Domaine d'utilisation

Le domaine d'utilisation du béton bitumineux peut être résumé comme suit :

- Ce type de matériau est particulièrement adapté aux couches de surface des chaussées à fort trafic, grâce à ses bonnes caractéristiques mécaniques, notamment sa résistance à l'orniérage et à la fatigue. Il est utilisé aussi bien pour les chaussées neuves que pour les renforcements structurels.
- Selon la classe granulaire et le niveau de trafic, le BB peut être employé comme couche de roulement ou couche de liaison sur les routes, autoroutes et même les aérodromes.
- Le béton bitumineux est un enrobé fabriqué, mis en œuvre et compacté à chaud, conformément aux spécifications techniques du CTTP (2004)[6].

2.7.2 Grave-Bitume (GB)

La Grave-Bitume (GB) est un enrobé à granularité continue 0/20, composé de granulats, de sable, de filler, de liant bitumineux et éventuellement d'additifs destinés à améliorer la maniabilité ou la performance du mélange[5].

2.7.2.1 Caractéristiques principales

- Granulométrie continue : 0/20 mm
- Fabriquée, mise en œuvre et compactée à chaud
- Assure la portance de la chaussée et la répartition des charges transmises par les couches de surface
- Permet de réaliser le profil souhaité de la chaussée, notamment comme couche de reprofilage

2.7.2.2 Domaine d'utilisation

- La technique des Graves-Bitumes est principalement utilisée pour la réalisation des assises de chaussée, comprenant la couche de base et la couche de fondation.
- Adaptée aux chaussées soumises à des trafics moyens à élevés, selon le type de réseau :

- Réseau RP1 : classes de trafic TPL3 à TPL7 [6].
- Convient pour les routes, autoroutes et aérodromes, offrant une excellente portance mécanique et une durabilité accrue.

2.7.3 Sable Bitume (SB)

Le Sable Bitume (SB) est un mélange bitumineux à granularité fine, composé de sable, de filler, de liant bitumineux et éventuellement d'additifs pour améliorer l'adhérence ou la maniabilité du mélange. Il est fabriqué, mis en œuvre et compacté à chaud, et est principalement utilisé pour des applications de couches minces ou comme couche de finition.

2.7.3.1 Caractéristiques principales

- Granulométrie : fine, adaptée aux couches de surface ou de finition
- Fabriqué et posé à chaud
- Assure l'étanchéité et un confort de roulement sur les chaussées
- Peut être utilisé en couches de roulement légères, ou pour le reprofilage des surfaces existantes

2.7.3.2 Domaine d'utilisation

- Couche de finition des chaussées sur routes urbaines et interurbaines
- Couches minces sur parkings, trottoirs, voies lentes
- Travaux de réparation superficielle, offrant une bonne adhérence au trafic léger [5]

2.7.4 Les enrobés nouveaux

L'évolution des enrobés bitumineux a conduit, depuis les années 1980, au développement de nouvelles techniques dans le monde entier. Ces évolutions concernent principalement :

- La formulation des matériaux,
- Les épaisseurs des couches,
- L'amélioration des performances de surface et de la durabilité des chaussées.

Ces enrobés innovants sont conçus pour répondre à des besoins spécifiques tels que la réduction du bruit, l'amélioration de l'adhérence ou la prévention des fissures.

2.7.4.1 Les enrobés minces

Les enrobés minces sont largement utilisés pour la réalisation de couches de roulement, que ce soit sur chaussées neuves ou dans le cadre de travaux d'entretien[7].

Caractéristiques principales :

- Épaisseur réduite, généralement entre 3 et 5 cm selon le type de mélange.
- Rôle purement fonctionnel : apport ou restauration des caractéristiques de surface telles que l'adhérence, l'uniformité et la réduction du bruit de contact pneu/chaussée.
- Pas d'effet structurel particulier, ne remplace pas les couches de base ou de fondation.

Dans la famille des enrobés mince, on distingue :

- Bétons bitumineux minces (BBM)
- Bétons bitumineux drainants (BBDr)

a) Bétons Bitumineux Minces (BBM)

Les BBM sont des enrobés mince couramment utilisés pour les couches de roulement fines.

❖ Épaisseurs moyennes :

- BBM 0/10 : 3,0 à 4,0 cm
- BBM 0/14 : 3,5 à 5,0 cm

❖ Liants utilisés :

- Principalement des bitumes purs, dosés entre 5,4 et 5,8 % du mélange.
- Pour les chaussées à fort trafic, on peut utiliser des bitumes spéciaux ou modifiés afin d'améliorer :
 - La résistance au flUAGE,
 - La durabilité sous charges répétées,
 - La tenue à la fatigue.

b) Bétons Bitumineux Très Mince (BBTM)

- Granulométrie : 0/10 ou 0/6, discontinue, avec un dosage en sable 0/2 de 20–30 %
 - Épaisseur : 2 à 2,5 cm (45–65 kg/m²), moyenne 2,0–3,0 cm
 - Liant : généralement modifié
- ❖ **Objectifs techniques :**
- Adhérence élevée pour la sécurité des véhicules
 - Drainabilité efficace pour limiter le ruissellement
 - Possibilité de propriétés acoustiques ou photométriques selon besoins

- ❖ **Domaines d'application :** chaussées à trafic rapide ou important, entretien et réhabilitation de surfaces existantes

Les BBTM sont actuellement la technique de référence pour l'entretien rapide des routes à trafic élevé[7].

c) Bétons Bitumineux Ultra Mince (BBUM)

- Granulométrie : 0/10 ou 0/6, discontinue 2/6 ou 2/4, dosage en sable 20–25 %
- Épaisseur : 1 à 1,5 cm
- Liant : 5,2–5,5 %, généralement modifié

- ❖ **Objectifs techniques :**

- Adhérence optimale
- Confort de roulement et sécurité
- Drainabilité et résistance superficielle

- ❖ **Domaines d'application :**

- BBUM 0/6 : revêtements urbains (zones piétonnes, carrefours, trottoirs)
- BBUM 0/10 : entretien des routes secondaires

Ces couches ultra-minces sont idéales pour réhabilitations rapides avec un minimum de matériau, tout en conservant de bonnes propriétés fonctionnelles.

d) Couches bitumineuses minces et ultra-minces

Les couches bitumineuses minces et ultra-minces sont caractérisées par une épaisseur maximale de 3 cm. Elles constituent une solution efficace

pour la réhabilitation rapide des chaussées, tout en apportant adhérence, uniformité et confort de roulement[7].

❖ **Historique et évolution :**

- Début des années 1980 : développement des enrobés très minces, avec une épaisseur d'environ 2,5 cm. Ces enrobés ont permis de réaliser des couches de surface fines pour l'entretien et l'amélioration de la qualité des chaussées existantes.
- Début des années 1990 : apparition des enrobés ultra-minces, dont l'épaisseur correspond à celle du granulat, soit environ 1,5 cm. Cette génération d'enrobés a offert une solution économique et rapide pour les interventions sur chaussées urbaines ou secondaires, tout en maintenant de bonnes performances fonctionnelles et de sécurité[7].

Ces techniques ont révolutionné l'entretien des routes, permettant d'appliquer des couches de surface efficaces sans intervenir sur la structure porteuse de la chaussée.

2.7.4.2 Les enrobés drainants

Les enrobés drainants sont conçus pour évacuer rapidement l'eau de pluie à la surface des chaussées et réduire le bruit de contact pneu/chaussée. Ils sont particulièrement adaptés aux routes à grande vitesse (autoroutes, voies express) et aux zones où la sécurité et le confort de roulement sont prioritaires[7].

a) Bétons Bitumineux Drainants (BBD_r)

❖ **Caractéristiques principales :**

- Teneur en vides : ≈ 20 %
- Granulométrie : 0/10, discontinues 2/6
- Sable 0/2 : 10 à 14 %
- Fines : très faible proportion, 3 à 4 %
- Liant : bitume modifié, dosé entre 4,4 et 5,2 %

❖ **Objectifs et avantages :**

- Élimination efficace de l'eau superficielle
- Réduction du bruit de roulement dès le jeune âge
- Adhérence élevée et durable, même à grande vitesse
- Amélioration de la visibilité sous pluie

- Conservation du profil transversal de la chaussée
- Réduction du risque d'aquaplanage
- ❖ **Domaines d'application :**

- Autoroutes
- Voies express

Les BBDr monocouches sont donc particulièrement adaptés aux chaussées nécessitant sécurité et confort de conduite, tout en réduisant le bruit.

b) Enrobé drainant bicouche

Pour améliorer les performances des revêtements drainants classiques, on utilise le BBDr bicouche, composé de deux couches superposées d'enrobés drainants[7].

❖ **Avantages principaux :**

- Amélioration acoustique : réduction supplémentaire du bruit de roulement
- Meilleure évacuation de l'eau et performances hivernales accrues
- Durabilité accrue : résistance supérieure à l'usure et au vieillissement
- Optimisation du confort et de la sécurité, surtout pour les chaussées à fort trafic

Le BBDr bicouche est donc une solution technique avancée, combinant les bénéfices du drainage, de l'adhérence et de la réduction du bruit.

2.7.4.3 L'enrobé tiède (Warm Mix Asphalt – WMA)

L'enrobé tiède est une technologie intermédiaire entre l'enrobé à chaud et l'enrobé à froid, visant à réduire les températures de production et de mise en œuvre tout en conservant les performances d'un enrobé à chaud[7].

❖ **Principe de production**

- Diminution de la température de production de 30 à 60 °C par rapport à l'enrobé à chaud.
- Obtenu par :
 - Moussage du bitume

- Ajout d'additifs spécifiques dans la centrale d'enrobage
- Il est important de vérifier l'ajustement thermique de la centrale pour garantir un mélange homogène.

❖ **Avantages**

- Augmentation de la durée de vie du revêtement grâce à la réduction des températures
- Diminution des émissions de gaz à effet de serre
- Réduction de la consommation énergétique
- Moins d'odeurs et d'émissions de bitume lors de la production et de la mise en œuvre
- Augmentation possible de la proportion de granulats bitumineux recyclés (GBR)

❖ **Domaines d'application**

- Couches de roulement et de liaison, en construction ou en entretien
- Adapté à tous types de trafic, similaire aux enrobés à chaud

❖ **Mise en œuvre**

- Posé de manière identique à l'enrobé à chaud
- Température minimale de compaction : $\approx 90\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Température plus basse → mélange plus raide, nécessitant plus d'effort manuel pour le râtelage sur des bitumes à haut grade

❖ **Limites d'emploi**

- Identiques à celles des enrobés à chaud

2.7.4.4 L'enrobé à froid (Cold Mix Asphalt – CMA)

L'enrobé à froid est un mélange fabriqué et mis en œuvre à température ambiante, généralement destiné aux routes à faible trafic ou à des travaux de réparation et entretien[7].

❖ **Technique de fabrication**

- Mélange de granulats, sable et bitume
- Certains mélanges utilisent des granulats déjà enrobés → enrobé à froid à double enrobage

- Température de mise en œuvre : 10–20 °C (contrairement à l'enrobé chaud \approx 130 °C)

❖ **Mise en œuvre**

- Nettoyer la zone (trous, nids-de-poule, fissures)
- Remplir le trou généreusement
- Compactage à l'aide de :
 - Rouleau
 - Dame
 - Plaque vibrante
- Durcissement après compactage, renforcement progressif dans le temps
- Épaisseur : 1–5 cm par couche ; au-delà → réalisation en deux couches

❖ **Domaines d'utilisation**

- Rénovation ou entretien des chaussées
- Réparation de :
 - Trous et nids-de-poule
 - Fissures et tranchées
 - Dégâts liés au gel

❖ **Enrobé à froid durable**

- Certains enrobés à froid sont suffisamment résistants pour les ouvrages neufs
- Souvent renforcés par résine spéciale pour améliorer leur solidité et durabilité

2.7.4.5 l'enrobé à module élevé (EME)

L'enrobé à module élevé (EME) est un mélange bitumineux spécialement conçu pour les couches de liaison soumises à un trafic lourd, avec pour objectif principal de réduire l'orniérage[7].

a) **Composition et préparation**

- Granulats : calibrés selon les classes 0/10, 0/14 ou 0/20
- Liant hydrocarboné : bitume pur ou modifié, parfois dur

- Additifs : minéraux ou organiques selon la formulation et le comportement recherché
- Dopants éventuels pour améliorer les performances
- Processus : chauffage, dosage et malaxage dans une centrale d'enrobage
- Destiné à : travaux neufs ou renforcement de chaussées existantes

b) Caractéristiques principales

- Module de rigidité élevé : jusqu'à 17 000 MPa
- Excellente résistance à la fatigue comparée aux enrobés classiques
- Objectif fonctionnel : limiter les déformations permanentes sous trafic intense

c) Classes de performance

L'EME se décline en deux classes granulaires et de performance :

❖ **EME Classe 1**

- Correspond à des graves bitumes à module élevé
- Liant : bitume dur, dosage similaire aux graves bitumes classiques (GB)
- Objectif : obtenir un module élevé tout en conservant la rigidité du mélange

❖ **EME Classe 2**

- Enrobé à module élevé avec meilleure résistance à la fatigue
- Liant : dosage plus élevé en bitume dur
- Remarque : c'est généralement cette classe qui est désignée lorsqu'on parle d'EME standard
- Offre une excellente durabilité sous trafic lourd

2.7.4.6 Les Bétons Bitumineux à Module Élevé (BBME)

Les BBME sont des enrobés hydrocarbonés à chaud destinés aux couches de surface, qu'il s'agisse de couches de roulement ou de liaison. Leur caractéristique principale est un module de rigidité élevé, supérieur à celui des bétons bitumineux classiques, permettant de résister aux déformations et à l'orniérage sous trafic intense.

a) Épaisseur de mise en œuvre

- Moyenne : 5 à 10 cm
- Selon la granulométrie et la norme NF P 98-141 :
 - BBME 0/10 : 5 à 7 cm
 - BBME 0/14 : 6 à 9 cm

b) Familles d'enrobés pour couches de surface

On distingue trois principales familles d'enrobés utilisés en surface :

1. Bétons Bitumineux Semi-Grenus (BBSG)
2. Bétons Bitumineux à Module Élevé (BBME)
3. Bétons Bitumineux Souple (BBS)

c) Caractéristiques générales des BBME

- Granulométrie : 0/10 mm ou 0/14 mm
- Module de rigidité : plus élevé que celui des bétons bitumineux classiques
- Objectif fonctionnel : réaliser des couches de surface stables, durables et résistantes au trafic lourd

Les BBME sont particulièrement adaptés aux routes à fort trafic, autoroutes et voies rapides, où la durabilité et la résistance aux charges répétées sont prioritaires.

2.8 Caractéristiques des enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux présentent un ensemble de caractéristiques mécaniques, physiques et fonctionnelles qui conditionnent leur comportement en service et leur aptitude à répondre aux exigences du trafic et de l'environnement. Ces caractéristiques dépendent principalement de la nature des granulats, du type et du dosage du liant, de la formulation du mélange ainsi que des conditions de fabrication et de mise en œuvre.

2.8.1 Caractéristiques physiques

Les caractéristiques physiques influencent directement la compacité et la durabilité des enrobés bitumineux. Elles conditionnent la structure interne du matériau, sa résistance aux agressions extérieures ainsi que son comportement à long terme sous l'effet du trafic et des conditions

climatiques. Le tableau 2.17 présente les principales caractéristiques physiques des enrobés bitumineux ainsi que leurs objectifs associés.

Tableau 2. 17. Caractéristiques physiques des enrobés bitumineux.

Propriété	Description	Objectif
Granulométrie	Répartition dimensionnelle des grains	Assurer la stabilité et la compacité
Teneur en bitume	Pourcentage de liant dans le mélange	Garantir la cohésion et la durabilité
Densité apparente	Masse volumique du matériau compacté	Indicateur du niveau de compacité
Taux de vides	Volume d'air résiduel dans l'enrobé (%)	Contrôle de la perméabilité et de la sensibilité à l'eau
Compacité	Rapport entre la densité réelle et la densité théorique	Assurer la longévité du revêtement

2.8.2 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux traduisent leur aptitude à supporter les sollicitations du trafic et à assurer la performance structurelle de la chaussée. Elles influencent directement la portance, la résistance aux déformations permanentes et la durabilité à long terme. Le Tableau 2.18 présente les principales caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux et leur influence sur le comportement de la chaussée.

Tableau 2. 18.Caractéristiques mécaniques des enrobés bitumineux

Propriété	Définition	Influence sur le comportement
Module de rigidité (E)	Capacité de l'enrobé à résister à la déformation sous charge	Détermine la portance de la couche
Résistance à la traction indirecte	Capacité à résister à la fissuration	Influence la durabilité en fatigue
Résistance à l'orniérage	Capacité à s'opposer à la déformation plastique	Assure la stabilité à chaud
Comportement en fatigue	Nombre de cycles supportés avant fissuration	Conditionne la longévité de la chaussée

2.8.3 Caractéristiques thermiques et climatiques

Les propriétés thermiques et climatiques des enrobés bitumineux influencent fortement leur comportement sous différentes conditions environnementales. Elles conditionnent la résistance aux déformations, aux fissurations et la durabilité des chaussées. Les principales caractéristiques sont résumées dans le Tableau 2.19.

Tableau 2. 19.Caractéristiques thermiques et climatiques des enrobés bitumineux

Propriété	Description	Influence sur le comportement	Essais typiques
Sensibilité à la température	Ramollissement du bitume à chaud et rigidité à froid	Prévenir la déformation plastique et la fissuration	Analyse de module à différentes températures
Résistance au gel-dégel	Dépend du taux de vides et de l'adhésivité bitume-granulat	Limiter les fissurations et dégradations dues aux cycles gel-dégel	Essai gel-dégel, test de résistance au gel
Vieillissement	Oxydation du bitume entraînant une perte de ductilité	Maintenir la durabilité et la longévité de l'enrobé	Vieillissement en laboratoire (Short-Term Aging, Long-Term Aging)

2.8.4 Caractéristiques hydriques

Les caractéristiques hydriques concernent la capacité de l'enrobé à résister à l'eau et à maintenir ses performances. Les principales propriétés sont présentées dans le Tableau 2.20.

Tableau 2. 20.Caractéristiques hydriques des enrobés bitumineux.

Propriété	Description	Influence sur le comportement	Essais typiques
Perméabilité	Volume d'eau pouvant traverser l'enrobé	Contrôler l'infiltration et limiter les dégradations	Test de perméabilité
Adhésivité bitume /granulat	Capacité à résister au décollement sous l'eau	Assurer la cohésion et la durabilité en conditions humides	Test d'adhésivité, ITSR, immersion-compression

2.8.5 Caractéristiques spécifiques selon le type d'enrobé

Les enrobés bitumineux présentent des performances et caractéristiques spécifiques en fonction de leur mode de fabrication et de leur application. Le Tableau 2.21 résume les principales caractéristiques selon le type d'enrobé.

Tableau 2. 21.Caractéristiques spécifiques des enrobés bitumineux selon le type

Type d'enrobé	Caractéristique principale
Enrobé à chaud (EAC)	Haute performance mécanique
Enrobé à froid (EAF)	Facilité de mise en œuvre
Enrobé tiède (EAT)	Moindre impact environnemental
Enrobé à haut module (EHM)	Module élevé, faible déformation
Béton bitumineux mince (BBM)	Bonne adhérence de surface

2.9 Les niveaux de formulations et les essais pour enrobés bitumineux

Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux bitumineux sont déterminées à partir de résultats d'essais de laboratoire. Ces essais, lorsqu'ils servent au dimensionnement, sont réalisés selon des normes précises et dans des conditions strictes de température et de sollicitation. Ils peuvent être effectués sur des éprouvettes confectionnées en laboratoire ou sur des échantillons prélevés sur chantier.

Le niveau d'étude de formulation dépend généralement :

- Du type d'enrobé,
- Du niveau de sollicitation de la chaussée,
- De l'importance du chantier.

Pour la plupart des enrobés, une étude de niveau minimal 2 est nécessaire. Cependant, pour les enrobés à module élevé (EME/BBME), la norme EN 13108-1 recommande une étude approfondie de niveau 4. Les différents essais permettent de vérifier que l'enrobé formulé répond aux normes et exigences en vigueur[8].

Il existe cinq niveaux de formulation, numérotés de 0 à 4, chacun correspondant à un degré croissant d'exigence en matière d'essais :

- **Niveau 0** : Ce stade consiste à définir la courbe granulométrique et à déterminer la teneur en liant appropriée.
- **Niveau 1** : À ce niveau, on réalise l'essai à la Presse à Cisaillement Giratoire (PCG) ainsi que le test de résistance à l'eau, également appelé essai Duriez.
- **Niveau 2** : En complément des essais du niveau 1, on effectue l'essai de résistance à l'orniérage.
- **Niveau 3** : Ce niveau inclut l'essai du module de rigidité en plus des essais précédents.
- **Niveau 4** : Le niveau le plus complet, qui regroupe tous les tests des niveaux précédents et y ajoute l'essai de fatigue.

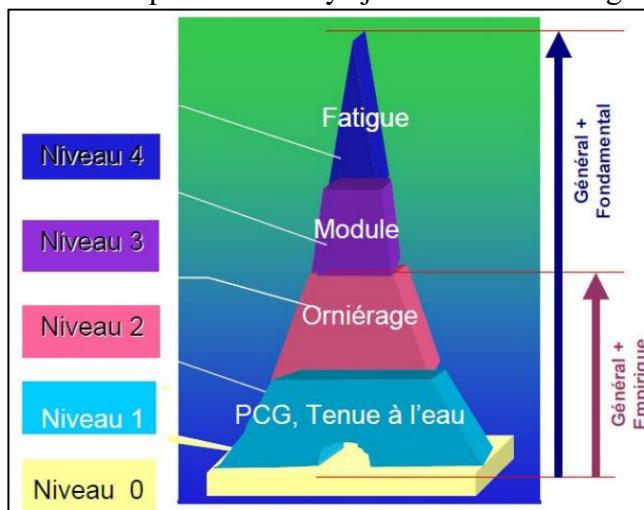


Figure 2. 3. Résume des niveaux de l'épreuve de formulation

2.9.1 Les essais de performance sur les enrobés

2.9.1.1 Niveau 1

Le niveau 1 correspond à une étape fondamentale de contrôle de la formulation et de la qualité des enrobés.

❖ Objectifs principaux :

- Vérifier que le mélange respecte une fenêtre de pourcentages de vides à l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire (PCG)
- Contrôler la tenue à l'eau selon la norme EN 12697-12

❖ **Caractéristiques :**

- À l'exception du niveau 0, le niveau 1 est commun à toutes les études d'enrobés.
- Pour des applications à faible niveau de sollicitation, le niveau 1 peut être suffisant sans recours à des essais complémentaires.

❖ **Remarques importantes :**

- Pour certains matériaux, une exigence peut être fixée sur le pourcentage de vides après 10 girations à l'essai PCG.
- Cette exigence est reprise dans les normes européennes comme spécification empirique relative à la résistance à l'orniérage.
- Il n'est pas recommandé de spécifier simultanément :
 - Une exigence sur le pourcentage de vides à 10 girations
 - Un essai d'orniérage → cela constituerait une sur-spécification[9].

a) **Essai de cisaillement à Presse de Giration (PCG) – EN 12697-91**

L'essai de cisaillement à Presse de Giration (PCG) permet d'évaluer la variation du taux de vides dans un enrobé bitumineux soumis à un compactage en conditions isothermes (Figure 2.4) [9].

❖ **Principe de l'essai**

- L'éprouvette subit un cisaillement giratoire combiné à une charge axiale.
- Elle est inclinée de 2° au sommet et soumise à une force de 12 kN.
- La vitesse de rotation varie entre 6 et 32 tours par minute.
- La hauteur de l'éprouvette est relevée à différents intervalles de girations pour suivre l'évolution du taux de vides.

❖ **Objectif**

- Déterminer l'évolution de la compacité (ou taux de vides) en fonction du nombre de girations.
- Identifier la formulation du mélange qui présente la meilleure compactibilité pour le chantier.

❖ Présentation des résultats

- Les résultats sont représentés sous forme de courbe :
 - Ordonnée : pourcentage de vides
 - Abscisse : nombre de girations
- La compacité maximale réalisable sur chantier pour une épaisseur donnée **e** (**en cm**) est estimée par la compacité obtenue en laboratoire pour : **n=10×e** girations

❖ Critères d'évaluation

- Bonne compactibilité si :
 - Compacité après 10 girations < 89 %
 - Compacité après 60 girations comprise entre 92 % et 96 %
- Parmi les formulations testées, on privilégie celle dont la compacité augmente le plus rapidement, c'est-à-dire la courbe avec la pente la plus élevée.



Figure 2. 4. Essai à la presse à cisaillement giratoire NF EN 12697-91 [9]

b) Essai de Duriez ou Essai de Compression Simple – EN 12697-12

L'essai de Duriez ne mesure pas directement une propriété fondamentale du matériau, mais il évalue indirectement la résistance à l'eau d'un enrobé bitumineux[9].

❖ Principe de l'essai

- Préparation des éprouvettes :
 - Des cylindres d'enrobé sont compactés dans un moule cylindrique à l'aide d'une double compression.

- Conditionnement des éprouvettes :
 - Pendant 7 jours à 18 °C, les éprouvettes sont conservées selon deux conditions :
 - À l'air libre
 - Immergées dans l'eau
- Essai de compression simple :
 - Chaque éprouvette est soumise à une compression à vitesse constante.
 - On mesure :
 - R : résistance des éprouvettes conservées à l'air
 - r : résistance des éprouvettes conservées dans l'eau

❖ Analyse des résultats

- Le rapport r/R , appelé rapport immersion/compression, est utilisé comme indicateur de la sensibilité à l'eau du mélange bitumineux.
- Une valeur élevée de ce rapport indique une bonne résistance à l'eau, tandis qu'une valeur faible signale un risque de décollement ou de dégradation sous humidité.

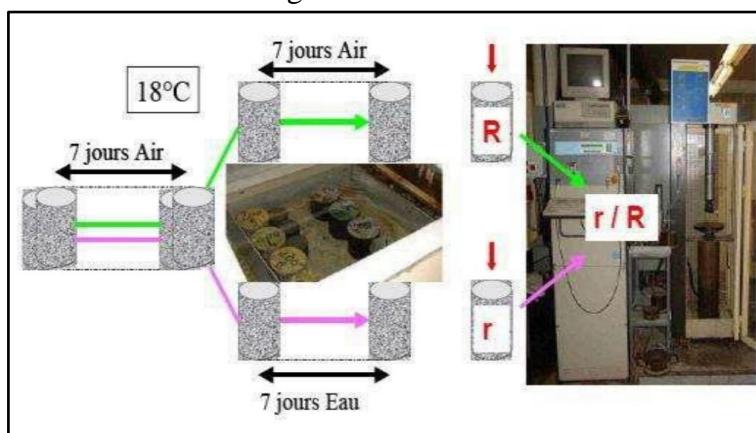


Figure 2. 5.Le principe de l'essai Duriez.

2.9.1.2 Niveau 2

Le niveau 2 inclut tous les essais du niveau 1 (Presse à Cisaillement Giratoire et tenue à l'eau), complétés par un essai d'orniérage [9].

a) Essai d'orniérage – EN 12697-22

L'essai d'orniérage est utilisé pour évaluer les performances des enrobés destinés aux chaussées soumises à un trafic intense ou très intense.

❖ Objectifs

- Mesurer la résistance des couches de roulement et des couches de base à la formation d'ornières.
- Reproduire des conditions proches de celles rencontrées en service réel.

❖ Principe de l'essai

- Une plaque d'enrobé est soumise au passage répété d'un pneu chargé.
- La profondeur de l'ornière générée est mesurée pour évaluer la déformation permanente.
- Température d'essai :
 - Couche de surface : 60 °C
 - Couche de base : 50 °C

❖ Appareillage

- L'essai utilise une installation spécifique permettant de chauffer la plaque d'enrobé et de faire rouler le pneu de manière répétée (Figure 2.6).
- Les mesures de profondeur de l'ornière permettent de quantifier la résistance à l'orniérage et de comparer différentes formulations d'enrobés.



Figure 2. 6. Appareillage de l'essai d'orniérage.

2.9.1.3 Niveau 3

Ce niveau comprend les essais de Presse à Cisaillement Giratoire et de tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'ornierage du niveau 2, ainsi que la caractérisation du module du mélange. L'essai de module est particulièrement requis pour les chantiers importants et lorsque la couche considérée joue un rôle dans le fonctionnement structurel de la chaussée. Dans ce niveau, le produit est considéré comme relevant de l'approche fondamentale selon les normes européennes (EN). Les valeurs de module mesurées à 15°C, 10 Hz ou 0,02 s sont directement utilisées dans les modèles de calcul pour le dimensionnement des chaussées. Selon les normes applicables, les épreuves de formulation des EB-GB classe 4, EB-BBME et EB-EME doivent obligatoirement inclure un essai de module. Pour les autres produits relevant de l'approche empirique ou fondamentale, la détermination du module doit être spécifiée. Dans certaines applications, des valeurs maximales peuvent être prescrites[9].

a) Essai de module complexe (EN 12697-26)

Cet essai permet d'évaluer le comportement viscoélastique des enrobés en fonction de la température et de la fréquence. Il est réalisé sur une éprouvette trapézoïdale d'enrobé, fixée à sa base, tandis qu'un déplacement sinusoïdal de faible amplitude est appliqué à son extrémité libre, provoquant une flexion qui simule les effets du passage des véhicules. En analysant la force générée, on détermine le module de l'enrobé sur une plage de températures allant de 10 °C à 40 °C. Pour chaque température, des mesures sont effectuées à quatre fréquences différentes : 1, 3, 10 et 30 Hz

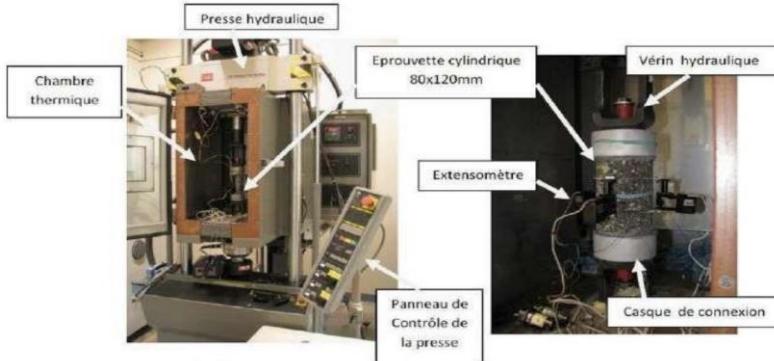


Figure 2. 7. L'appareil de module complexe

2.9.1.4 Niveau 4

Ce niveau inclut les essais de Presse à Cisaillement Giratoire et de tenue à l'eau du niveau 1, l'essai d'ornierage du niveau 2, ainsi que la caractérisation du module du mélange du niveau 3. Il est complété par la détermination de la résistance en fatigue. L'essai de fatigue doit être réalisé pour les chantiers très importants et dès que la couche concernée est soumise à des sollicitations de fatigue[9].

a) Essai de fatigue (FN EN 12697-24)

L'essai de fatigue a pour objectif d'évaluer la résistance à la fissuration par fatigue des enrobés bitumineux sous sollicitations répétées, simulant le passage des véhicules sur la chaussée.

❖ Principe de l'essai :

- Une éprouvette trapézoïdale d'enrobé est préparée et fixée rigidement à sa base.
- Une sollicitation en flexion est appliquée à l'extrémité libre de l'éprouvette.
- Le déplacement est imposé sous forme d'oscillations sinusoïdales à amplitude constante, reproduisant les cycles de charge alternée subis par l'enrobé en service.

❖ Détermination de la rupture :

- La force appliquée est mesurée en continu pour maintenir la déformation imposée.

- La rupture par fatigue est atteinte lorsque la force nécessaire pour maintenir le déplacement diminue à 50 % de la force initiale.

❖ **Paramètres clés mesurés :**

- Nombre de cycles jusqu'à rupture (durée de vie en fatigue).
- Déformation maximale appliquée.
- Amplitude de la force et diminution progressive au cours des cycles.

❖ **Applications :**

- Essai recommandé pour les chantiers importants et les couches soumises à des sollicitations répétées.
- Permet de quantifier la durabilité de l'enrobé et d'optimiser la formulation pour résister à la fatigue mécanique.



Figure 2. 8. Appareillage de l'essai de fatigue

b) Essai de Marshall (NF EN 12697-34)[16]

L'essai de Marshall concerne les enrobés hydrocarbonés à chaud, qu'ils soient préparés en laboratoire ou prélevés directement sur le chantier (ex. grave-bitume, béton bitumineux, etc.). La température de compactage correspond à celle du malaxage, assurant une viscosité d'environ $170 \text{ mm}^2/\text{s}$, garantissant ainsi une bonne compactibilité lors de la mise en œuvre.

❖ **Objectifs de l'essai :**

- Évaluer la masse volumique brute de l'enrobé.
- Déterminer sa résistance à la déformation (stabilité).
- Mesurer l'ampleur de la déformation (fluege).

❖ **Procédure :**

- Les éprouvettes sont préparées et immergées pendant 30 minutes dans un bain d'eau à 60 °C.
- Une compression diamétrale est appliquée à l'éprouvette à une vitesse constante de $0,85 \pm 0,1$ mm/s.

❖ **Paramètres mesurés :**

- **Stabilité** : charge maximale que l'éprouvette peut supporter avant déformation.
- **Fluage** : déformation observée à la rupture sous la charge appliquée sur les flancs à l'aide du moule de compression Marshall.
- **Compactibilité** : jugée satisfaisante lorsque la compacité à 50 coups est comprise entre 93 et 97 % pour le BBSG (Béton Bitumineux Semi-Grenu).

Cet essai permet ainsi de caractériser les propriétés mécaniques essentielles des enrobés et de s'assurer de leur performance lors de la mise en œuvre sur chantier.



Figure 2. 9. Essai de Marshall (NF EN 12697 34)

2.10 Conclusion

Ce chapitre introductif a permis de dresser une vue d'ensemble complète sur les enrobés bitumineux, matériaux essentiels à la conception et à la réalisation des structures routières. Il a présenté les éléments constitutifs des enrobés, en mettant en évidence le rôle déterminant des liants hydrocarbonés et des granulats dans la performance globale des chaussées.

L'analyse des différentes structures de chaussées, classées selon la nature des matériaux et leur comportement mécanique, a facilité la compréhension des critères de sélection adaptés aux sollicitations du trafic et aux conditions climatiques. De plus, la classification des enrobés selon leur procédé de fabrication, leur densité et leur formulation a illustré la diversité des solutions techniques disponibles pour répondre aux exigences croissantes en matière de durabilité et de sécurité.

Enfin, les méthodes de formulation et les essais de caractérisation mécanique présentés constituent des outils indispensables pour l'évaluation des performances des enrobés bitumineux. Ces bases théoriques serviront de fondement aux développements ultérieurs du mémoire, axés sur l'optimisation des mélanges et leur adaptation aux contextes d'exploitation actuels et futurs

Chapitre 3 : Enrobés à Module Élevé (EME)

3.1 Introduction

Les Enrobés à Module Élevé (EME) sont une catégorie spéciale d'enrobés développée en France et adoptée progressivement ailleurs (y compris en Algérie) pour les chaussées fortement sollicitées (autoroutes, axes poids lourds, plateformes portuaires, aéroports). Par rapport aux enrobés classiques, les EME se distinguent par leur rigidité accrue, leur stabilité thermique et leur résistance supérieure à la fatigue et au fluage, ce qui permet de prolonger la durée de vie des infrastructures et de réduire les coûts de maintenance. Ce chapitre se propose d'explorer les EME sous différents aspects essentiels à leur compréhension et à leur mise en œuvre :

- 1. Caractéristiques physiques et mécaniques** : description des propriétés fondamentales des EME, incluant module, densité, résistance à la fatigue et comportement viscoélastique.
- 2. Comparaison avec un enrobé classique (GB)** : mise en évidence des différences de performance entre les EME et les enrobés traditionnels, notamment en termes de rigidité, durabilité et résistance au trafic.
- 3. Schéma organisationnel du plan d'assurance qualité d'un EME** : présentation des procédures de contrôle et de suivi de la qualité lors de la formulation et de la mise en œuvre des enrobés à module élevé.
- 4. Analyse du cycle de vie d'un EME** : étude de la durabilité et de la performance économique et environnementale des EME sur toute la durée de vie de la chaussée.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une vision complète et structurée des enrobés à module élevé, en combinant les aspects théoriques, techniques et pratiques, afin de guider les choix de conception et de mise en œuvre pour des chaussées durables et performantes.

3.2 Définition des Enrobés à Module Élevé (EME)

Les enrobés à module élevé (EME) sont des enrobés bitumineux formulés avec un taux de liant élevé et des granulats de qualité supérieure, permettant d'atteindre un module de rigidité très élevé ($\geq 14\ 000$ MPa à 15°C). Ils sont spécialement conçus pour remplacer des structures épaisses en couches de base ou fondation, en optimisant la durabilité et en réduisant l'épaisseur totale des chaussées.

3.3 Objectifs des Enrobés à Module Élevé (EME)

- Résistance accrue aux déformations permanentes (orniérage), assurant la stabilité de la chaussée sous trafic intense.
- Amélioration significative de la durée de vie, généralement comprise entre 20 et 30 ans.
- Réduction des épaisseurs de la structure, entraînant des économies sur les granulats et les terrassements.
- Adaptation au trafic très lourd, de classe T4 à T5, conformément au catalogue français LCPC-SETRA.

3.4 Types d'Enrobés à Module Élevé (EME)

Les Enrobés à Module Élevé (EME) sont classés selon la norme NF P 98 140 en deux grandes catégories en fonction de leur module de rigidité, de leur teneur en liant et de leur aptitude au trafic :

3.4.1 EME Classe 1 (EME1)

- Module de rigidité : $\geq 14\ 000$ MPa à 15°C
- Teneur en liant : standard, adaptée aux exigences de rigidité et de cohésion pour le trafic moyen à lourd
- Usage : recommandé pour les chaussées soumises à un trafic moyen à lourd, telles que les routes nationales et départementales
- Avantages : offre une bonne résistance au fluage et à l'orniérage, tout en permettant une certaine flexibilité face aux variations climatiques

3.4.2 EME Classe 2 (EME2)

- Module de rigidité : $\geq 14\ 000$ MPa à 15°C

- Teneur en liant : plus élevée, généralement 5,5 – 6,0 %, afin d'améliorer la cohésion et la résistance à la fatigue
- Usage : adapté aux chaussées soumises à un trafic très lourd, en particulier les autoroutes et voies rapides
- Avantages : résistance optimale à l'orniérage, meilleure durabilité sur les structures épaisses et sur les couches de roulement fortement sollicitées

❖ **Remarques générales :**

- Les EME permettent de réduire l'épaisseur des couches de roulement, tout en conservant ou améliorant les performances des chaussées.
- Le choix entre EME1 et EME2 dépend de l'intensité du trafic, des contraintes climatiques et des objectifs de durabilité de la chaussée.
- La formulation spécifique (granulats de qualité et taux de liant élevé) assure une rigidité élevée et une meilleure tenue au trafic lourd, tout en limitant le flUAGE et les fissures.

3.5 Composition typique des Enrobés à Module Élevé (EME)

Les EME sont formulés pour obtenir un module de rigidité très élevé et une durabilité maximale sous trafic intense. Leur composition se caractérise par :

3.5.1 Granulats :

- Durs et résistants aux contraintes mécaniques (Los Angeles \leq 25, Micro-Deval \leq 20)
- Granulométrie fermée et dense, assurant de faibles vides et une meilleure cohésion

3.5.2 Bitume :

- Bitume de grade dur (35/50, 20/30), parfois modifié pour améliorer la résistance à la fatigue et à l'orniérage
- Teneur en liant plus élevée que dans les enrobés classiques :
 - EME1 : 4,5 – 5,0 %
 - EME2 : 5,0 – 6,0 %

3.5.3 Additifs pour Enrobés à Haut Module (EHM) :

3.5.3.1 Additifs Polymères

Les additifs polymères jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des propriétés des enrobés à module élevé (EME). Leur incorporation permet de modifier le comportement viscoélastique du liant, d'augmenter la rigidité et la résistance à la fatigue, tout en améliorant la durabilité et la résistance aux variations climatiques. Ces additifs contribuent également à limiter le flUAGE et l'ornierage sous trafic intense.



Figure 3. 1.Additifs Polymères

a) Objectifs principaux

- Renforcer la rigidité du liant à température élevée, pour résister aux déformations permanentes.
- Améliorer la résistance à la fatigue, permettant à l'enrobé de supporter un nombre élevé de cycles de charge sans fissuration.
- Accroître la durabilité et la stabilité thermique, particulièrement importante sur les chaussées exposées à de fortes variations de température.
- Maintenir une souplesse suffisante à basse température, afin d'éviter les fissures liées au gel ou au froid.

b) Types d'additifs polymères

Le tableau ci-dessous synthétise les principaux types d'additifs polymères, leurs effets sur le liant et les dosages généralement utilisés, offrant ainsi un aperçu clair et pratique pour la formulation des EME.

Tableau 3. 1. Les principaux types d'additifs polymères

Type d'additif	Composition	Effets principaux
Élastomères SBS (Styrène-Butadiène-Styrène)	Polymère thermoplastique élastomère	Améliore l'élasticité, la cohésion et résistance à la fatigue
Plastomères (EVA, LDPE, HDPE)	Polymères thermoplastiques	Augmente module de rigidité, résistance thermique et durabilité
CRM (Caoutchouc de pneus broyés)	Particules de caoutchouc recyclé	Améliore résistance au vieillissement, souplesse à basse température, réduit la fissuration

c) Mode d'incorporation

- Les additifs sont généralement mélangés directement au liant chaud dans un malaxeur à haute agitation, à des températures comprises entre 160 et 180 °C.
- Le dosage varie généralement entre 1 et 6 % du poids du liant, en fonction du type d'additif et des performances recherchées.
- Une bonne dispersion du polymère est essentielle pour garantir des performances homogènes de l'enrobé.

d) Avantages techniques pour les EME

- Les additifs permettent de maintenir un module élevé tout en améliorant la résistance au fluage, indispensable pour les chaussées à trafic très lourd.
- Ils améliorent la durabilité en service, réduisant l'entretien et prolongeant la durée de vie des chaussées.
- L'emploi de CRM favorise également un impact environnemental positif, en valorisant des pneus usagés dans les enrobés.

e) Applications et recommandations

- Les additifs polymères sont utilisés dans EME1 et EME2, selon le niveau de trafic et la classe de chaussée.
- Les choix spécifiques (SBS, EVA, CRM) dépendent des conditions climatiques, du niveau de trafic, et de la performance souhaitée en fatigue et fluage.

- Leur utilisation est particulièrement recommandée pour les autoroutes, voies rapides et chaussées soumises à trafic très lourd.

3.5.3.2 Additifs Organiques (Fluxants & Warm-Mix)

a) Objectif :

- Faciliter la mise en œuvre des enrobés et réduire la viscosité du bitume à chaud, permettant un malaxage et une compaction plus aisés.
- Diminuer la température de fabrication et de pose, contribuant à des économies d'énergie et à un impact environnemental réduit (technique Warm-Mix Asphalt).

b) Types d'additifs :

- Cires synthétiques (Sasobit®, Licomont®) :
 - Réduisent la température de malaxage et de pose de 20 à 30 °C.
 - Améliorent la fluidité et la maniabilité de l'enrobé.
- Esters, amides, paraffines :
 - Facilite la compaction et l'uniformité de la surface.
 - Améliore la texture et la cohésion de l'enrobé.

c) Mode d'incorporation :

- Introduits dans le bitume fondu avant le mélange avec les granulats.
- Dosage typique : 1 à 3 % du poids du liant.
- Une dispersion homogène est nécessaire pour garantir l'efficacité de l'additif et la performance finale de l'enrobé.

d) Avantages :

- Réduction de la température de production et de pose, ce qui limite le vieillissement prématué du bitume.
- Amélioration de la compactibilité et de la maniabilité, surtout pour les enrobés à module élevé riches en liant.
- Compatible avec les EME1 et EME2, permettant d'adapter les enrobés à différentes conditions de chantier et de climat.

3.5.3.3 Additifs Minéraux

a) Objectif :

- Optimiser la cohésion du mastic bitumineux, l'adhésivité entre le liant et les granulats, ainsi que la rigidité du squelette granulaire.
- Améliorer la stabilité mécanique et limiter le vieillissement des enrobés.

b) Types d'additifs :

- Filler calcaire actif : augmente le module de rigidité et renforce la cohésion du mastic bitumineux.
- Cendres volantes, laitier moulu, métakaolin : effet pouzzolanique, améliore la stabilité et la durabilité du mélange.
- Filler bitumineux (mélange de bitume et chaux hydratée) : limite le vieillissement oxydatif du liant et améliore l'adhérence aux granulats.

c) Mode d'incorporation :

- Dosage typique : 6 à 9 % en masse du mélange.
- Incorporé au moment du malaxage, de manière homogène avec le bitume et les granulats.

d) Avantages :

- Renforce le module de rigidité et la stabilité à la déformation permanente.
- Améliore la cohésion et l'adhésion entre granulats et liant.
- Contribue à la durabilité des chaussées, en limitant le vieillissement et les fissurations prématurées.

3.5.3.4 Additifs d'Adhésivité

a) Objectif :

- Améliorer l'adhérence entre le liant bitumineux et les granulats, particulièrement dans les conditions humides, afin de prévenir le décollement et l'affaiblissement du mélange.
- Contribuer à la cohésion et à la durabilité de l'enrobé sous trafic et conditions climatiques variables.

b) Types d'additifs :

- Amides grasses (amines, imidazoline, etc.) : favorisent la liaison chimique entre bitume et granulats, améliorant la cohésion.
- Agents tensioactifs cationiques : augmentent l'adhésion superficielle du liant sur les granulats.
- Silicates ou chaux hydratée ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) : renforcent la résistance à l'humidité et limitent le risque de stripping.

c) Mode d'incorporation :

- Dans le liant : dosage de 0,3 à 1 % du poids du bitume.
- Sur les granulats : pulvérisation avant le malaxage, assurant une distribution homogène de l'additif.

d) Avantages :

- Réduit le décollage du liant et les phénomènes de stripping.
- Améliore la stabilité et la durabilité des EME, même sous climat humide ou cycles gel/dégel.
- Compatible avec les EME1 et EME2, pour toutes les classes de trafic.

3.5.3.5 Additifs Fonctionnels Spéciaux

a) Objectif :

- Modifier les propriétés spécifiques de l'enrobé selon les besoins particuliers du chantier ou les contraintes de performance.
- Renforcer des aspects tels que la durabilité, la résistance à l'orniérage, la résistance à la fissuration, ou conférer un comportement viscoélastique adapté.

b) Types d'additifs :

- Antioxydants / Anti-âge : retardent le durcissement du liant et réduisent le vieillissement prématué.
- Agents anti-orniérage : renforcent la cohésion à chaud et limitent les déformations permanentes sous trafic intense.
- Fibres (cellulosiques, aramides, basalte) : améliorent la résistance à la fissuration, renforçant le maillage du mélange bitumineux.

- Additifs viscoélastiques (Elvaloy®, Butonal®, etc.) : confèrent un comportement semi-rigide, combinant rigidité et capacité d'absorption des contraintes.

c) Mode d'incorporation :

- Introduits au moment du mélange à chaud, pour assurer une dispersion homogène dans le bitume et le mastic.
- Dosage variable selon le produit : 0,3 à 2 % du poids du mélange, adapté aux performances recherchées.

d) Avantages :

- Permettent d'adapter les EME à des conditions spécifiques, telles que trafic très lourd, variations thermiques importantes ou besoins de durabilité prolongée.
- Contribuent à la stabilité mécanique globale et à la longévité des chaussées.
- Compatibles avec les formulations EME1 et EME2, selon les exigences de trafic et de performance

Avant de présenter le tableau récapitulatif, il est important de noter que les additifs jouent un rôle essentiel dans la performance des Enrobés à Module Élevé (EME). Ils permettent d'ajuster le module de rigidité, la résistance à la fatigue, l'adhérence, la maniabilité et la durabilité selon les besoins spécifiques du chantier et les conditions de trafic et climatiques. Le tableau ci-dessous (Tableau 3.2) offre une synthèse claire des différentes catégories d'additifs, avec leurs exemples, effets principaux et taux d'ajout recommandés, facilitant la compréhension de leur rôle dans la formulation des EME.

Tableau 3. 2.Synthèse des Additifs pour Enrobés à Module Élevé (EME)

Catégorie	Exemples	Effet principal	Taux d'ajout (%)
Polymères	SBS, EVA, CRM	↑ Module, ↑ résistance à la fatigue	2 – 6
Organiques	Cires synthétiques, esters	↓ Température de mise en œuvre, ↑ maniabilité	1 – 3
Minéraux	Filler calcaire, chaux	↑ Cohésion, ↑ rigidité du squelette granulaire	6 – 9
Adhésifs	Amines, silicates	↑ Adhérence liant–granulat	0,3 – 1
Fonctionnels	Fibres, antioxydants, agents anti-orniérage	↑ Tenue mécanique, ↑ durée de vie	0,5 – 2

3.5.4 Méthodes d’Incorporation des Additifs dans les EME

La performance des Enrobés à Module Élevé (EME) dépend non seulement du type d’additif utilisé, mais aussi de la méthode d’incorporation, de la température et de la durée de mélange. Chaque catégorie d’additifs possède des exigences spécifiques pour garantir une dispersion homogène et l’efficacité souhaitée dans le mélange.

3.5.4.1 Additifs polymères (SBS, EVA, CRM)

- Incorporation directe dans le bitume chaud (170–185 °C).
- Agitation mécanique forte pendant 2 à 4 h avant utilisation.
- Contrôle possible au viscosimètre dynamique pour confirmer la modification du liant.
- Utilisation possible de bitumes polymères prêts à l’emploi (PMB).
- Dosage typique :
 - SBS : 3–6 % du liant
 - EVA : 2–5 %
 - CRM : 10–15 %

3.5.4.2 Additifs organiques (cires, fluxants, WMA)

- Ajout au bitume fondu avant mélange avec les granulats.
- Température d’incorporation : 140–160 °C
- Mélange rapide : 10–15 min
- Dosage typique : 1–3 % du liant

- Réduction de la température de fabrication et de pose de 20 à 30 °C

3.5.4.3 Additifs minéraux (filler, chaux, cendres, métakaolin)

- Introduits directement dans le malaxeur avec les granulats.
- Température d'enrobage : 160–170 °C
- Homogénéisation avec le mastic bitumineux
- Dosage typique : 6–9 % en masse du mélange

3.5.4.4 Additifs d'adhésivité

- Ajoutés soit dans le bitume chaud, soit pulvérisés sur les granulats avant malaxage
- Température : 150–170 °C
- Dosage : 0,3–1 %
- Permettent d'améliorer la cohésion liant–granulats, surtout en milieu humide

3.5.4.5 Additifs fonctionnels (fibres, antioxydants, viscoélastiques)

- Ajoutés dans le malaxeur juste avant le liant, pour assurer une répartition homogène dans le mélange chaud
- Dosage : 0,3–2 % selon le type
- Les fibres évitent la ségrégation du bitume et renforcent la cohésion

Tableau 3. 3.Méthodes d'incorporation et dosage des additifs pour EME.

Type d'additif	Étape d'ajout	T° (°C)	Durée	Dosage (%)
Polymère (SBS, EVA, CRM)	Dans le bitume	170–185	2–4 h	3–6 / 2–5 / 10–15
Organique (cire, fluxants)	Dans le bitume	140–160	10–15 min	1–3
Minéral (filler, chaux)	Dans le malaxeur	160–170	–	6–9
Adhésif (amines, silicates)	Bitume / granulats	150–170	–	0,3–1
Fonctionnel (fibres, antioxydants, visco)	Dans le malaxeur	160–170	–	0,3–2

3.6 Processus de fabrication et mise en œuvre des Enrobés à Module Élevé (EME)

Les Enrobés à Module Élevé (EME) sont conçus pour offrir une rigidité très élevée, une résistance exceptionnelle à la fatigue et une longévité supérieure sur des chaussées soumises à un trafic très intense. La réussite de leur performance dépend non seulement de la formulation du mélange, mais surtout de la rigueur appliquée à chaque étape de fabrication, transport et mise en œuvre.

3.6.1 Fabrication en centrale à chaud

- Température de production : les EME sont fabriqués à 150–170 °C, selon le type de bitume et la nature des additifs (polymères, fluxants, minéraux, adhésifs, fonctionnels).
- Malaxage :
 - Les granulats sont préchauffés et séchés pour éliminer l'humidité et obtenir une température homogène.
 - Le bitume chauffé est mélangé aux granulats et aux additifs dans un malaxeur haute performance pour assurer une répartition homogène.
 - La durée et l'intensité du malaxage varient selon les additifs : polymères (2–4 h avec agitation mécanique forte), fluxants ou cires (10–15 min).
- Contrôle qualité en centrale :
 - Vérification de la température du mélange à la sortie du malaxeur.
 - Contrôle de la composition granulométrique et du taux de liant.
 - Échantillonnage pour tests de stabilité, module et densité.

3.6.2 Transport vers le chantier

- Utilisation de camions isolés pour maintenir la température du mélange et éviter le refroidissement.

- Durée de transport limitée pour prévenir la ségrégation et la perte de maniabilité du mélange.
- Vérification de la température à l'arrivée pour s'assurer qu'elle reste supérieure à 130 °C avant pose.

3.6.3 Préparation du chantier et mise en œuvre

- Étalement : réalisé avec un finisseur adapté pour garantir l'uniformité de l'épaisseur et de la surface.
- Contrôle des températures :
 - La pose doit se faire à > 130 °C pour permettre une compaction efficace et l'activation des additifs.
 - Mesure régulière pour vérifier que la température de la surface reste conforme.
- Compactage :
 - Utilisation de rouleaux lourds (vibrants et statiques).
 - Objectif : atteindre $\geq 97\%$ de la densité de référence afin d'assurer une rigidité maximale et une résistance au fluage.
 - Le compactage doit être progressif : premières passes avec des rouleaux vibrants, puis finition avec rouleaux statiques pour uniformiser la surface.

3.6.4 Épaisseurs recommandées

- EME en couche de base : 7–12 cm
- EME en couche de fondation : 12–18 cm
- L'épaisseur doit être choisie en fonction du trafic prévu, des conditions climatiques et des propriétés mécaniques du mélange.

3.6.5 Contrôles qualité sur chantier

- Densité et compacité : mesures sur la couche fraîche pour vérifier la conformité.
- Épaisseur de la couche : contrôlée à plusieurs points pour garantir une répartition uniforme.
- Échantillonnage et essais en laboratoire :
 - Stabilité Marshall ou module dynamique.
 - Tests de fatigue pour confirmer la durabilité.

- Inspection visuelle : détection de fissures, ségrégation, défauts de surface ou problèmes de compactage.

3.6.6 Bonnes pratiques et recommandations

- Limiter le temps entre fabrication et pose pour maintenir la qualité du mélange.
- Respect strict des températures de malaxage et de mise en œuvre pour chaque type d'additif.
- Maintenir une homogénéité parfaite du mélange pour éviter les points faibles.
- Adapter la mise en œuvre aux conditions climatiques et au niveau de trafic prévu.
- Prévoir un plan d'assurance qualité rigoureux pour contrôler toutes les étapes, depuis la centrale jusqu'à la pose finale

3.7 Essais de performance des Enrobés à Module Élevé (EME)

La validation des Enrobés à Module Élevé (EME) repose sur une approche performancielle complète, qui ne se limite pas aux seuls paramètres volumétriques ou à la compacité. L'objectif est de garantir que le mélange pourra résister aux charges extrêmes, à la fatigue et aux conditions climatiques, tout en maintenant son intégrité sur la durée de vie prévue.

3.7.1 Module complexe (NF EN 12697-26)[12]

- ❖ Objectif : Évaluer la rigidité et le comportement viscoélastique de l'enrobé sous différentes conditions de température et de fréquence de sollicitation.
- ❖ Méthode : Une éprouvette trapézoïdale est soumise à une déformation sinusoïdale de faible amplitude. La réponse en force est mesurée pour déterminer le module complexe (module de stockage et module de perte).
- ❖ Critère de performance : Module $\geq 14\ 000$ MPa à 15 °C et fréquence 10 Hz.
- ❖ Importance : Confirme que le mélange offrira une résistance suffisante à la déformation dans des conditions réelles de circulation.

3.7.2 Essai d'orniérage (NF EN 12697-22)[13]

- ❖ Objectif : Mesurer la résistance aux déformations permanentes causées par le passage répété des véhicules lourds.
- ❖ Méthode : La chaussée ou l'éprouvette est soumise à des cycles de charge répétés dans une grande orniéreuse à température élevée (60 °C).
- ❖ Critère de performance : Profondeur d'ornière $\leq 7\%$ après 30 000 cycles.
- ❖ Importance : Prévoit le comportement du revêtement sous trafic intense, évitant l'orniérage prématué.

3.7.3 Essai de fatigue (NF EN 12697-24 – bending test 2 ou 4 points)

- ❖ Objectif : Évaluer la durabilité du mélange face à des sollicitations cycliques, représentant la fatigue de la chaussée.
- ❖ Méthode : Une éprouvette est soumise à des cycles de flexion répétés (2 points ou 4 points) jusqu'à rupture ou jusqu'à un nombre de cycles défini.
- ❖ Critère de performance : Durée de vie $> 10^6$ cycles à une déformation de référence ε_6 .
- ❖ Importance : Permet de garantir une longévité de 20–30 ans pour les chaussées exposées à un trafic très lourd.

3.7.4 Adhésivité liant–granulat (ITSR – NF EN 12697-12)[14]

- ❖ Objectif : Vérifier l'adhérence du liant sur les granulats, essentielle pour prévenir le délaminate et l'usure prématuée, surtout en milieu humide.
- ❖ Méthode : Mesure de l'Indirect Tensile Strength Ratio (ITSR) après immersion et conditionnement à l'eau.
- ❖ Critère de performance : $ITSR \geq 80\%$.
- ❖ Importance : Assure la cohésion interne du mélange, améliorant la résistance aux cycles gel/dégel et à l'eau.

5.7.5. Teneur en vides (NF EN 12697-8)[15]

- ❖ Objectif : Contrôler la porosité du mélange compacté, facteur clé pour la durabilité, la perméabilité et la résistance mécanique.

- ❖ Méthode : Mesure du volume de vides dans l'éprouvette ou la couche compacte.
- ❖ Valeur recommandée : 3 – 6 % maximum.
- ❖ Importance : Une porosité maîtrisée limite la pénétration de l'eau, réduit les risques de fissuration et améliore la stabilité dimensionnelle sous charge.

5.7.6. Synthèse et approche globale

La combinaison de ces essais permet d'évaluer :

- Rigidité mécanique : module complexe.
- Résistance aux déformations permanentes : essai d'orniérage.
- Durabilité face à la fatigue : bending test.
- Adhésion et cohésion interne : ITSR.
- Compacité et perméabilité : teneur en vides.

Cette approche performancielle complète garantit que les EME sont adaptés à des conditions de trafic T4–T5 et à des climats variés, tout en assurant une longévité optimale et un entretien réduit.

3.8 Avantages et limites des Enrobés à Module Élevé (EME)

3.8.1 Avantages

Les EME présentent de nombreux bénéfices par rapport aux enrobés bitumineux classiques :

- Durée de vie prolongée : Les EME peuvent atteindre jusqu'à deux fois la durée de vie d'un enrobé classique (GB), grâce à leur module élevé et leur résistance accrue à la fatigue.
- Réduction d'épaisseur des couches : L'augmentation du module permet de diminuer l'épaisseur des couches de base ou de fondation de 20 à 30 %, ce qui entraîne des économies sur les granulats et terrassements.
- Excellente tenue au trafic lourd : Convient aux chaussées exposées à des trafics intenses (T4–T5), telles que autoroutes, zones industrielles, ports et aéroports.
- Stabilité dimensionnelle : La rigidité élevée limite le fluage et l'orniérage, améliorant la performance mécanique de la chaussée.

3.8.2 Limites

Malgré leurs avantages, les EME présentent certaines contraintes :

- Coût initial plus élevé : L'utilisation de bitumes durs, d'un taux de liant plus élevé et d'additifs spécifiques augmente le coût de production par rapport aux enrobés classiques.
- Fabrication et mise en œuvre exigeantes :
 - Nécessitent une centrale performante pour le malaxage et le chauffage précis.
 - Contrôles qualité rigoureux à chaque étape pour garantir la performance du mélange.
- Sensibilité aux climats très froids : Un bitume trop dur peut entraîner des fissurations thermiques dans les régions aux températures extrêmement basses.

3.8.3 Synthèse

- Catégories EME1 / EME2 : Destinées aux couches de base et de fondation pour trafic moyen à très lourd.
- Caractéristiques techniques :
 - Module $\geq 14\ 000\ \text{MPa}$ à $15\ ^\circ\text{C}$
 - Teneur en vides $3 - 6\ \%$
 - ITSR $\geq 80\ \%$ pour assurer une bonne adhérence liante–granulat
- Contrôles performanciers obligatoires : Module complexe, essai d'ornierage, tests de fatigue.
- Applications idéales : Autoroutes, voies industrielles, ports, pistes d'aéroport et zones à trafic très intense.

3.9 Les Enrobés à Module Élevé (EHM) selon la position dans la structure

Les EHM sont conçus en couches distinctes selon leur rôle dans la structure de la chaussée : base, liaison et roulement. Chaque type

présente des caractéristiques adaptées aux contraintes mécaniques, thermiques et de trafic auxquelles il est soumis.

3.9.1 Enrobé à Module Élevé de Base (EHM-Base / EME2)

❖ Rôle :

- Constituer la couche porteuse principale de la chaussée.
- Assurer la rigidité structurelle et une répartition efficace des charges sur les couches inférieures.

❖ Caractéristiques techniques :

- Module $\geq 14\ 000$ MPa à 15 °C
- Bitume très dur : 10/20 ou 15/25
- Granulométrie : 0/14 ou 0/20 mm
- Épaisseur : 8 à 14 cm selon le trafic prévu
- Compaction élevé : $\geq 98\%$ de la densité de référence

❖ Avantages :

- Haute résistance à la déformation et à l'orniérage
- Réduction possible de l'épaisseur de la couche
- Très bonne stabilité thermique

❖ Inconvénients :

- Moins flexible : risque de fissures si le support sous-jacent est faible ou inégal

3.9.2 Enrobé à Module Élevé de Liaison (EHM-L / EME1 – EME2)

❖ Rôle :

- Assurer la transition entre la base rigide et la couche de roulement plus souple.
- Distribuer les contraintes mécaniques afin d'éviter les ruptures d'interface entre les couches.

❖ Caractéristiques techniques :

- Module : 10 000 à 14 000 MPa
- Bitume : 15/25 ou 25/35
- Granulométrie : 0/10 à 0/14 mm

- Épaisseur : 6 à 10 cm
- Bonne résistance à la fatigue et à la traction

❖ **Avantages :**

- Équilibre rigidité / flexibilité
- Très bon comportement sous cycles thermiques
- Favorise la cohésion inter-couches

❖ **Exemples d'enrobés :**

- EME1 (Classe 1)
- BBME (Béton Bitumineux à Module Élevé)
- GBBME (Grave Bitume à Module Élevé)

3.9.3 Enrobé à Module Élevé de Roulement (EHM-R / EHR)

❖ **Rôle :**

- Résister à l'action directe du trafic et à l'usure mécanique.
- Garantir adhérence, confort de roulement et résistance à l'orniérage.

❖ **Caractéristiques techniques :**

- Module : 8 000 à 12 000 MPa
- Bitume plus souple : 25/50 ou 35/50
- Granulométrie : 0/10 ou 0/6 mm
- Épaisseur : 3 à 5 cm

❖ **Avantages :**

- Bon compromis entre flexibilité et résistance mécanique
- Adapté aux contraintes thermiques et mécaniques de surface

3.10 Choix du type d'Enrobé à Module Élevé (EHM) selon la couche et le trafic

Ce tableau permet de sélectionner le type d'EHM adapté pour chaque couche de chaussée selon l'intensité du trafic.

Tableau 3.4. Choix du type d’Enrobé à Module Élevé (EME) selon la couche et l’intensité de trafic [9]

Type de trafic	Couche de base	Couche de liaison	Couche de roulement	Remarques
Moyen (T3–T4)	EME1	EME1	BBME	Adapté aux routes à trafic modéré ; équilibre rigide/flexible pour prévenir fissures et déformations.
Lourd (T5–T6)	EME2	EME1	BBME	Convient aux routes nationales, voies industrielles et routes à trafic intense ; la base rigide (EME2) supporte les charges élevées, la liaison (EME1) répartit les contraintes vers la surface.
Très lourd (T7)	EME2	EME2	BBUM	Destiné aux autoroutes, pistes d’aéroport, ports et zones industrielles avec trafic très intense ; renforce la durabilité et limite l’orniérage.

3.11 Cycle de vie d’un Enrobé à Haut Module (EME) vs Enrobé Normal (GB)

L’analyse du cycle de vie des enrobés met en évidence des différences significatives entre les enrobés classiques (GB) et les enrobés à haut module (EME), tant au niveau de la fabrication que de la mise en œuvre, du contrôle qualité et des performances à long terme. Ces différences traduisent une philosophie de conception distincte : approche essentiellement volumétrique pour les GB contre approche fondamentalement performancielle pour les EME.

3.11.1 Production en centrale

Les enrobés GB peuvent être fabriqués dans des centrales moins exigeantes, avec des températures modérées (150 à 165 °C) et des bitumes plus souples (50/70 ou 35/50), associés à des teneurs en liant relativement faibles (4,0 – 5,0 %). À l’inverse, les EME nécessitent des centrales à chaud modernes et performantes, capables d’assurer un malaxage homogène à des températures plus élevées (160 à 180 °C). L’utilisation de bitumes durs (20/30 ou 35/50) et de teneurs en liant plus

importantes (5,0 – 6,0 %) impose un contrôle rigoureux du séchage des granulats, du temps de cycle et de la température de fabrication.

3.11.2 Transport

Le transport des enrobés GB présente une certaine tolérance vis-à-vis des délais et des pertes thermiques, avec une température minimale acceptable d'environ 135 °C. En revanche, les EME exigent un transport strictement maîtrisé à l'aide de bennes thermo-isolées et bâchées, afin de garantir une température à l'arrivée sur chantier supérieure ou égale à 150 °C, condition indispensable pour préserver la compactibilités du mélange.

3.11.3 Mise en œuvre sur chantier

Les enrobés GB sont généralement mis en place en couches de 6 à 10 cm, avec des exigences de compactage moins sévères (compacité $\geq 95\%$). Les EME, quant à eux, sont appliqués en couches plus épaisses, notamment en base et en fondation (7 à 12 cm base, 12 à 18 cm fondation), et nécessitent un compactage immédiat et intensif. La densité exigée est plus élevée ($\geq 97\%$), avec un contrôle permanent de la température afin de maintenir le mélange au-dessus de 130 °C durant toute la phase de compactage.

3.11.4 Contrôles de qualité et essais de performance

Les contrôles appliqués aux GB reposent principalement sur des critères volumétriques (teneur en liant, granulométrie, compacité). Pour les EME, les contrôles sont à la fois volumétriques et mécaniques, incluant obligatoirement des essais de performance tels que le module complexe, la résistance à l'orniérage et la fatigue. Cette exigence garantit une validation complète du comportement de l'enrobé en conditions réelles de trafic et de température.

Tableau 3. 5. Comparaison du cycle de vie des enrobés à haut module (EME) et des enrobés classiques (GB)

Étape du cycle de vie	Enrobé Classique (GB)	Enrobé à Haut Module (EME)
Production en centrale	Centrale standard suffisante Température : 150–165 °C Bitume souple (50/70, parfois 35/50) Teneur en liant : 4,0–5,0 % Contrôle qualité plus tolérant	Centrale à chaud moderne et performante Température : 160–180 °C Granulats très secs (humidité < 1 %) Bitume dur (20/30 ou 35/50) Teneur en liant : 5,0–6,0 % Contrôle strict du malaxage et du temps de cycle
Transport	Bennes bâchées classiques Température acceptable ≥ 135 °C Tolérance aux délais et pertes thermiques	Bennes thermo-isolées obligatoires Température à l'arrivée ≥ 150 °C Logistique stricte pour éviter le refroidissement
Mise en œuvre sur chantier	Épaisseur : 6–10 cm Compactage possible jusqu'à 120 °C Compacité exigée ≥ 95 % Teneur en vides : 5–8 %	Épaisseur : 7–12 cm (base) ; 12–18 cm (fondation) Compactage immédiat après répandage Fin du compactage ≥ 130 °C Compacité exigée ≥ 97 % Teneur en vides : 3–6 %
Contrôles qualité	Essais volumétriques classiques Teneur en liant, granulométrie, compacité	Essais volumétriques + mécaniques obligatoires Module complexe, orniérage, fatigue Contrôles terrain (carottages, gammadensimètre)
Performances mécaniques	Résistance moyenne à l'orniérage et à la fatigue	Module ≥ 14 000 MPa (15 °C – 10 Hz) Orniérage ≤ 7 % à 60 °C Durée de vie en fatigue ≥ 10 ⁶ cycles
Durée de vie	10–15 ans (trafic T2–T3)	20–30 ans (trafic T4–T7)
Coût initial	Plus faible	+15 à 25 % par rapport au GB
Impact global sur le cycle de vie	Coût initial faible mais entretien plus fréquent	Réduction d'épaisseur, entretien espacé, coût global optimisé
Domaines d'application	Routes secondaires, trafic modéré	Autoroutes, zones industrielles, ports, aéroports

3.11.5 Équipements spécifiques requis pour la production des Enrobés à Haut Module (EME) et comparaison avec les enrobés classiques

La production des Enrobés à Haut Module (EME) impose des exigences plus strictes que celles des enrobés classiques, en raison de l'utilisation de liants plus durs, de dosages élevés en filler et de performances mécaniques visées plus élevées. Ces contraintes nécessitent des adaptations spécifiques des centrales d'enrobage, tant au niveau du stockage et du dosage des constituants que du malaxage, du contrôle thermique et du suivi qualité. Le tableau 3.6 présente une comparaison synthétique entre les équipements requis pour les enrobés classiques et ceux nécessaires à la fabrication des EME.

Tableau 3. 6.Équipements spécifiques requis pour la production des Enrobés à Haut Module (EME) et comparaison avec les enrobés classiques

Poste / Équipement	Enrobé Classique (GB / BBSG / BBTM)	Enrobé à Haut Module (EME)
Gestion du filler	Filler de récupération, complément limité	Silo à filler additionnel (chaux, filler calcaire, cendres volantes) Vis doseuses haute précision ($\pm 0,2\%$) Capteurs de pesée continus
Type de liant	Bitume 35/50 ou 50/70	Bitume dur 10/20 ou 15/25 Bitume modifié PMB/BMP
Cuves à bitume	Cuves simples avec chauffage standard	Cuves thermiquement isolées Agitation mécanique ou circulation continue Température contrôlée 170–180 °C
Additifs liquides	Anti-stripping occasionnel	Anti-stripping quasi systématique Fluxants, additifs fonctionnels Pompes doseuses automatiques
Additifs solides	Généralement absents	Doseur de fibres (cellulose, synthétiques) Trémies spécifiques pour chaux et poudres
Malaxeur	Standard (30–40 s)	Malaxeur renforcé Temps de malaxage prolongé (40–60 s) Capteurs de température précis ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Température de fabrication	150–165 °C	160–180 °C
Transport	Camions standards bâchés	Bennes thermo-isolées obligatoires Gestion stricte de la température
Stockage intermédiaire	Silos classiques	Silos avec maintien thermique Temps de stockage limité (éviter ségrégation)
Contrôles qualité en centrale	Granulométrie + teneur en liant	Contrôles renforcés et continus : – Température IR – Teneur en liant (EN 12697-1) – Granulométrie (EN 12697-2) – Masse volumique (EN 12697-6/7)

3.12 Analyse de cycle de vie (ACV) d'un enrobé à module élevé – EME

3.12.1 Définition et objectif de l'ACV

L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est une méthode d'évaluation environnementale normalisée (ISO 14040 et ISO 14044) qui permet d'identifier, de quantifier et d'interpréter les impacts environnementaux associés à un produit ou à un procédé tout au long de son cycle de vie, depuis l'extraction des matières premières jusqu'à la fin de vie.

Dans le cas des enrobés à module élevé de type EME², l'ACV vise à analyser l'ensemble des flux de matières et d'énergie générés lors de la production, de la mise en œuvre, de l'utilisation et du recyclage de ce matériau routier à haute performance.

3.12.2 Objectif principal :

Comparer la performance environnementale globale de l'EME² à celle des enrobés classiques (GB3, BBSG, etc.), afin de justifier son utilisation dans une démarche de construction durable des infrastructures routières.

3.12.3 Intérêt de l'ACV dans le contexte algérien

L'Algérie s'est engagée dans la mise en œuvre de l'Agenda 2030 des Nations Unies et de ses 17 Objectifs de Développement Durable (ODD). Dans le secteur du bâtiment et des travaux publics (BTP), ces engagements se traduisent par la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la promotion de solutions à faible empreinte carbone et l'optimisation de l'utilisation des ressources naturelles.

L'ACV constitue ainsi un outil d'aide à la décision essentiel pour évaluer la pertinence environnementale des solutions techniques innovantes, telles que les enrobés à haut module, en tenant compte de leur durabilité et de leur performance sur le long terme.

3.12.4 Étapes du cycle de vie d'un EME²

Le cycle de vie d'un enrobé EME² comprend les étapes suivantes :

a) Extraction et production des matières premières

Extraction des granulats, raffinage du bitume et fabrication des additifs polymères.

Impacts principaux : consommation d'énergie, émissions de CO₂, épuisement des ressources.

b) Fabrication en centrale d'enrobage

Malaxage à chaud (160–180 °C), dosage précis du liant dur et des additifs.

Impacts principaux : émissions de gaz à effet de serre et consommation d'énergie fossile.

c) Transport et distribution

Acheminement des matériaux vers la centrale et transport de l'enrobé vers le chantier. Impacts principaux : émissions de CO₂ liées au transport routier.

d) Mise en œuvre sur chantier

Épandage et compactage de l'enrobé.

Impacts principaux : consommation énergétique des engins et émissions de poussières.

e) Phase d'utilisation

Durée de vie prolongée (20 à 30 ans) avec un entretien limité.

Avantage environnemental : réduction des impacts cumulés sur la durée de service.

f) Fin de vie

Rabotage et recyclage possible en couches inférieures.

Impacts principaux : valorisation matière et réduction des déchets.

3.12.5 Résultats typiques de la comparaison EME² / enrobé classique

Les études d'ACV montrent que :

- L'EME² présente un impact initial légèrement supérieur lors de la fabrication (température élevée et liant dur),
- Sa durée de vie accrue (jusqu'à 25–30 ans) permet de réduire fortement les opérations d'entretien,
- Sur un horizon de 30 ans, l'impact environnemental global de l'EME² est réduit d'environ 30 à 40 % par rapport à un enrobé classique.

Chapitre 4 : Les bétons bitumineux à modules élevé (BBME)

4.1 Introduction

Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) constituent une famille d'enrobés bitumineux à hautes performances mécaniques, développée pour répondre aux exigences croissantes des infrastructures routières soumises à des trafics élevés et très élevés. Issus des recherches menées notamment en France dans le cadre des travaux du LCPC et du SETRA, les BBME s'inscrivent dans la continuité du concept des enrobés à haut module (EME), tout en étant spécifiquement adaptés aux couches de liaison et, dans certains cas, aux couches de roulement.

Le principe fondamental des BBME repose sur l'augmentation significative du module de rigidité du matériau, obtenue par l'utilisation de liants bitumineux plus durs ou modifiés et par une formulation optimisée combinant une granulométrie dense et une teneur élevée en filler. Cette rigidité accrue permet une meilleure répartition des contraintes induites par le trafic, une limitation des déformations permanentes et une amélioration notable de la résistance à la fatigue, tout en autorisant une réduction des épaisseurs structurelles par rapport aux bétons bitumineux classiques.

Dans un contexte marqué par la recherche de solutions durables, économiquement optimisées et respectueuses de l'environnement, les BBME présentent des avantages significatifs sur l'ensemble du cycle de vie de la chaussée. Leur durabilité élevée, associée à une réduction des besoins de maintenance, contribue à diminuer les coûts globaux d'exploitation ainsi que les nuisances pour les usagers. Toutefois, leur mise en œuvre requiert une maîtrise technique rigoureuse, tant au niveau de la production en centrale que du contrôle des températures et de la compacité sur chantier.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les principes de formulation des BBME, leurs caractéristiques mécaniques et leur domaine d'emploi dans la structure de chaussée, ainsi que d'analyser leurs performances et leurs limites par rapport aux enrobés bitumineux conventionnels.

4.2 Définition

Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) sont généralement employés dans les couches de surface des chaussées, où les contraintes mécaniques sont les plus importantes en raison du passage répété des véhicules. La mise en œuvre de ces enrobés se fait avec des épaisseurs comprises entre 5 et 10 cm, ce qui permet de combiner résistance mécanique élevée et économie de matériaux. Dans les couches de surface, on distingue principalement trois familles d'enrobés :

4.2.1.1 Les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG)

Les BBSG sont caractérisés par un mélange de granulats fins et grossiers avec un faible taux de filler. Ils offrent une bonne maniabilité et une résistance adaptée aux chaussées à trafic modéré. Leur module de rigidité est moyen, ce qui les rend moins adaptés aux routes à trafic intense.

4.2.1.2 Les bétons bitumineux à module élevé (BBME)

Les BBME se distinguent par un module de rigidité élevé, obtenu grâce à une granulométrie soigneusement sélectionnée, un liant bitumineux modifié et l'utilisation de fillers spécifiques. Cette combinaison permet de supporter des charges importantes tout en limitant l'épaisseur de la couche de surface nécessaire. Les BBME sont donc privilégiés sur les autoroutes, routes nationales et voies urbaines à fort trafic.

4.2.1.3 Les bétons bitumineux souples (BBS)

Les BBS sont des enrobés plus souples, conçus pour des conditions de trafic modéré à faible. Leur élasticité permet d'absorber les déformations du support et de limiter les fissures de fatigue, mais leur module de rigidité est inférieur à celui des BBME.

Cette classification permet de choisir l'enrobé le mieux adapté en fonction de l'intensité du trafic, des conditions climatiques et de la durabilité attendue de la chaussée.

4.3 Historique d'apparition des EME et BBME

L'apparition des enrobés à module élevé (EME) et des bétons bitumineux à module élevé (BBME) est étroitement liée à l'évolution du trafic routier et aux exigences croissantes en matière de durabilité des chaussées. À la fin des années 1970, l'augmentation du nombre de poids lourds et l'agressivité accrue de ces véhicules ont provoqué l'apparition de ornières sur les chaussées traditionnelles. Cette situation a conduit les ingénieurs à rechercher des enrobés plus rigides, capables de résister à ces sollicitations.

La rigidité accrue a été rendue possible grâce à l'utilisation de bitumes plus durs et à l'optimisation des mélanges granulaires. L'évolution des techniques d'enrobés et l'émergence des EME et BBME peuvent être résumées chronologiquement comme suit :

- **1912** : Première application significative des enrobés pour les chaussées.
- **1924** : Début de l'utilisation des bitumes de raffinage, améliorant la qualité et la cohérence des enrobés.
- À partir de **1945** : L'utilisation des enrobés connaît un essor considérable grâce à la mécanisation de la mise en œuvre et à l'intensification du trafic.
- Années **1960** : Les techniques d'enrobés commencent à être codifiées avec les premières directives techniques.
- **1968** : Apparition des premiers graviers bitumineux (GB) et des bétons bitumineux semi-grenus (BBSG).
- **1975** : Introduction des bitumes modifiés, qui seront normalisés en 2003, permettant d'améliorer la résistance à la fatigue et à la déformation permanente.
- **1982** : Utilisation du bitume dur 10/20 en Europe pour les enrobés de couche de base (EME), généralisée à partir de 1988. Les bitumes durs seront également normalisés en 2003.
- **1990** : Normalisation des enrobés en France pour garantir la qualité et la performance des matériaux.
- **1991** : Édition de la norme française sur l'EME, encadrant la conception et la mise en œuvre des enrobés à module élevé.
- **1993** : Édition de la norme française sur le BBME, officialisant l'usage de ces enrobés pour les couches de surface.

- **2007** : Apparition des normes européennes pour les enrobés, harmonisant les critères de conception et de performance à l'échelle continentale.

Cet historique illustre clairement la progression technique et normative des enrobés bitumineux, depuis les premiers essais jusqu'à l'industrialisation et la standardisation des EME et BBME. L'évolution des matériaux, notamment des bitumes, et l'augmentation des exigences en matière de trafic ont été les moteurs principaux de cette avancée

4.4 Objectifs et intérêt de l'utilisation des BBME

Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) ont été développés pour répondre aux exigences croissantes des chaussées modernes, en particulier face à l'augmentation du trafic de poids lourds et à la répétition des sollicitations mécaniques. Les chaussées traditionnelles en bétons bitumineux classiques ou semi-grenus montrent souvent des signes de déformations permanentes, comme les ornières, lorsque la charge appliquée dépasse leur capacité de résistance. Les BBME constituent une solution technique avancée pour réduire ces phénomènes et prolonger la durée de vie des revêtements.

4.4.1 Amélioration du comportement mécanique

La performance mécanique des BBME repose sur plusieurs facteurs :

- Rigidité élevée (module de rigidité) : le module des BBME est significativement plus élevé que celui des BBSG, ce qui permet de réduire les déformations permanentes sous trafic lourd.
- Résistance à la fatigue : grâce à une meilleure cohésion interne du mélange, les BBME tolèrent un plus grand nombre de cycles de charge avant l'apparition de fissures.
- Comportement viscoélastique optimisé : la combinaison bitume dur + additifs polymères confèrent à l'enrobé une réponse élastique à court terme et une capacité d'amortissement à long terme, essentielle pour les chaussées exposées aux variations de température et aux charges répétées.

4.4.2 Rôle des matériaux dans l'amélioration des performances

4.4.2.1 Bitume de grade plus dur

L'utilisation d'un bitume plus rigide (grade supérieur ou bitume modifié) augmente la résistance à l'ornierage et à la déformation permanente. Le bitume dur améliore la cohésion entre granulats, permettant à l'enrobé de conserver sa forme sous charges importantes et répétées.

4.4.2.2 Polymères et additifs spéciaux

- Polymères (SBS, EVA, etc.) : ils augmentent l'élasticité du liant, améliorent la résistance à la fatigue et limitent le fluage.
- Poudre d'asphalte et fibres : ces additifs augmentent la cohésion interne et la résistance à la fissuration, tout en améliorant la stabilité du mélange pendant la mise en œuvre.
- Fillers (calcaire, ciment fin) : ils complètent le liant, augmentent la densité et contribuent à l'augmentation du module de rigidité.

4.4.2.3 Granulats

La granulométrie des BBME reste similaire à celle des bétons bitumineux classiques, garantissant un assemblage dense des granulats et une bonne maniabilité. Les granulats anguleux concassés sont privilégiés pour renforcer l'interlocking mécanique, ce qui améliore la résistance à l'ornierage et à la fatigue.

4.4.3 Teneur en bitume et rapport granulats/bitume

La teneur en bitume des BBME est généralement plus élevée que celle des BBSG. Cette augmentation permet de :

- Améliorer la cohésion du mélange et la résistance à la fissuration.
- Faciliter l'adhésion entre granulats et liant, limitant le décollement des granulats sous charges répétées.
- Maintenir une maniabilité suffisante lors du transport et de la pose sur chantier, malgré l'augmentation du module.

4.4.4 Avantages techniques des BBME

En résumé, l'emploi des BBME permet :

- Réduction de l'orniérage et des déformations permanentes sous trafic lourd.
- Augmentation de la durée de vie de la couche de surface.
- Meilleure résistance à la fatigue, réduisant le besoin de réparations fréquentes.
- Adaptabilité aux conditions climatiques extrêmes, grâce à l'optimisation du liant et aux additifs.
- Possibilité de réduire l'épaisseur de la couche de surface, ce qui permet des économies sur le matériau et une réduction des coûts de construction.

En conclusion, les BBME ne représentent pas simplement un enrobé plus rigide, mais un système de revêtement optimisé, combinant granulats, bitume dur et additifs pour offrir une résistance mécanique, une durabilité et une adaptabilité supérieures aux chaussées modernes.

4.5 Caractéristiques des BBME

Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) se distinguent par des propriétés mécaniques supérieures à celles des bétons bitumineux classiques (BB). Ces caractéristiques leur permettent de résister aux sollicitations importantes des chaussées modernes, tout en optimisant l'épaisseur des couches et la durabilité des revêtements. Les principales propriétés des BBME sont détaillées ci-dessous.

4.5.1 Rigidité

La rigidité est une caractéristique fondamentale des BBME. Elle est obtenue grâce à l'utilisation de liants et d'additifs spécifiques, qui permettent d'atteindre des modules de rigidité très supérieurs à ceux des BB classiques.

- Un module élevé réduit les contraintes transmises au sol, limitant la déformation permanente et l'orniérage.
- Pour une même durée de vie, l'épaisseur de la couche de surface peut être réduite, ce qui permet des économies sur les matériaux et une optimisation du dimensionnement des chaussées.

- Cette rigidité élevée est particulièrement importante pour les chaussées soumises à un trafic intense ou à des charges lourdes répétées.

4.5.2 Endurance

L’endurance des BBME se traduit par leur résistance à la fatigue.

- Le choix des liants et des additifs, ainsi que l’ajustement précis de leur teneur dans le mélange, permet d’atteindre des niveaux de tenue en fatigue très élevés.
- Cette propriété assure la longévité de la chaussée, même sous des conditions de trafic intensif et varié.
- L’endurance élevée réduit la fréquence des réparations et l’entretien nécessaire, garantissant une performance durable sur le long terme.

4.5.3 Stabilité

La stabilité des BBME est directement liée à la composition granulométrique et à l’interlocking mécanique des granulats.

- Les BBME utilisent des granulats concassés et anguleux, formant un squelette minéral très frottant, ce qui limite le déplacement des particules sous charge.
- Cette configuration confère une excellente résistance à l’orniérage, essentielle pour les routes à fort trafic, les autoroutes et les zones très sollicitées.
- La stabilité mécanique élevée permet également de maintenir la forme et la planéité de la surface, même sous des conditions climatiques variables.

4.5.4 Propriétés normalisées des BBME

Les propriétés des BBME sont encadrées par les normes françaises, notamment la NF P 98-141 (11/99). Ces normes définissent la classification des BBME selon leur granulométrie, leur rigidité et leur compacité.

Tableau 4. 1.Propriétés normalisées des BBME et BBSG

Produit	Granulométrie	Classe	Norme	Épaisseur (cm)	Module de rigidité (GPa)	Module complexe (MPa) à 15°C, 10 Hz	Compacité chantier (% vide)	Fatigue à 10°C, 25 Hz (μ def)	Résistance à l'orniérage à 30 000 cycles, 60°C (%)
BBME	0/14	1	NF P 98-141 (1993) / NF EN 13108-1 (2007)[17]	6–7	≥3,3	≥9 000	4–9	≥110	≤10
BBME	0/14	2	NF P 98-141 (1999) / NF EN 13108-1 (2007)[17]	5–7	≥3,3	≥12 000	4–8	≥100	≤7,5
BBME	0/14	3	NF P 98-141 (1993/1999) / NF EN 13108- 1 (2007)[17]	5–7	≥3,3	≥12 000	4–8	≥100	≤5
BBSG	0/14	2	NF P 98-138 (1999)	5–6	≥3,2	≥7 000	4–8	≥100	≤7,5
BBSG	0/14	3	NF P 98-138 (1999)	5–6	≥3,2	≥7 000	4–8	≥100	≤5

4.6 Les classes de BBME

Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) sont classés en trois catégories selon leurs performances mécaniques, notamment leur résistance à l'orniérage et leur module de rigidité. Cette classification permet d'adapter le type de BBME au niveau de trafic et aux contraintes spécifiques de la chaussée :

- **Classe 1** : destinée aux chaussées à trafic modéré à intense. Elle présente un pourcentage d'ornière après 30 000 cycles inférieur à 10 % et un module de rigidité $E \geq 9000$ MPa.
- **Classe 2** : adaptée aux chaussées à trafic élevé. Le pourcentage d'ornière à 30 000 cycles est inférieur à 7,5 %, avec un module de rigidité $E \geq 11 000$ MPa.
- **Classe 3** : pour les chaussées très sollicitées. Le pourcentage d'ornière à 30 000 cycles est inférieur à 5 %, avec un module de rigidité $E \geq 11 000$ MPa.

Cette classification reflète la capacité du BBME à résister aux déformations permanentes sous passage répété de véhicules lourds, et guide le choix des matériaux selon les exigences de durabilité et de performance de la chaussée.

4.7 Domaine d'emploi des BBME

Les bétons bitumineux à module élevé (BBME) sont principalement utilisés dans le cadre de travaux neufs (chaussées neuves) ou de renforcement (entretien ou recyclage) lorsque la chaussée est fortement sollicitée. Ils peuvent être appliqués en couche de liaison (EME ou BBME) ou en couche de roulement (BBME) pour garantir une résistance optimale au trafic intense.

Les domaines d'emploi typiques incluent :

- Les routes ordinaires à trafic modéré à élevé,
- Les autoroutes,
- Les quais et aires de manœuvre des ports,
- Les pistes et voies de circulation des aéroports,
- Les routes à vitesse élevée.

Pour assurer la durabilité et la performance des BBME, le support doit être en bon état, c'est-à-dire exempt d'ornières (≤ 1 cm), de fissures importantes ou de faïençage.

4.8 Formulation des BBME

La formulation des bétons bitumineux à module élevé (BBME) est une étape essentielle pour garantir les performances mécaniques et la durabilité des chaussées. Elle est généralement réalisée selon la méthode du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), qui définit une démarche standardisée pour la sélection et le dosage des composants des enrobés.

4.8.1 Contenu de l'épreuve de formulation

L'épreuve de formulation vise à définir le mélange optimal à partir des constituants sélectionnés. Elle comprend les étapes suivantes :

- Choix des constituants et vérification de leurs propriétés
 - Sélection des granulats (type, forme, dureté, granulométrie).
 - Choix du liant bitumineux et vérification de ses caractéristiques (pénétration, viscosité, grade de dureté, polymérisation éventuelle).
 - Intégration éventuelle d'additifs et fillers (poudre de calcaire, fibres, polymères) pour améliorer les performances mécaniques.
- Définition des compositions minérales
 - Détermination de la distribution granulométrique optimale pour assurer un squelette minéral dense et stable.
 - Optimisation de l'interlocking mécanique pour maximiser la rigidité et la résistance à la déformation permanente.
- Définition du module de richesse minimal
 - Le module de richesse correspond au dosage minimal de liant nécessaire pour assurer un enrobé cohésif et durable, en fonction de la surface spécifique du mélange minéral.
 - Ce paramètre garantit que le liant enrobe correctement les granulats et contribue aux performances mécaniques globales du BBME.

- Niveau d'étude
 - Détermination du degré d'exigence de l'épreuve de formulation, en fonction de l'importance du chantier, du volume d'enrobé et des sollicitations prévues sur la chaussée.
- Vérification des performances fixées
 - Contrôle que le mélange répond aux critères mécaniques et physiques attendus avant la production à grande échelle.

4.8.2 Objectifs d'une épreuve de formulation

L'objectif principal de l'épreuve de formulation est de déterminer, pour une composition donnée (module K spécifique), les caractéristiques clés de l'enrobé[10] :

- Pourcentage de vides : mesure de la compacité et de la densité du mélange.
- Tenue à l'eau (Duriez) : évaluation de la résistance à l'humidité et à la désagrégation du mélange.
- Résistance à la déformation permanente : aptitude du BBME à limiter l'orniérage et les déformations sous charges répétées.
- Performances mécaniques supplémentaires : lorsque nécessaire, évaluation de l'orniérage, du module complexe et de la résistance à la fatigue.

Ces tests permettent de valider la formulation avant la mise en œuvre, en garantissant que le BBME répondra aux exigences du chantier et aux sollicitations mécaniques prévues.

4.8.3 Niveau d'étude

Le niveau de l'épreuve de formulation est adapté selon :

- L'objectif de recherche ou d'expérimentation, si le BBME est développé pour un projet particulier ou une innovation technique.
- L'enjeu du chantier et son volume : plus le projet est critique et le trafic attendu important, plus l'épreuve doit être exhaustive.
- L'importance des sollicitations mécaniques : pour les routes fortement sollicitées (autoroutes, routes nationales), un niveau

d'étude élevé est nécessaire pour vérifier tous les paramètres de performance.

En pratique, plus l'enrobé sera soumis à des contraintes mécaniques importantes, plus le niveau de formulation devra être rigoureux et complet, incluant des tests approfondis de fatigue, de module complexe et de résistance à l'orniérage.

Tableau 4. 2. Les essais expérimentaux selon les niveaux d'études [10]

Niveau de l'épreuve de formulation	Tenue à l'eau (NF P 98-251-1)	PCG (NF P 98-52)	Orniérage (NF P 98-260-2)	Module (NF P 98-261-1)	Résistance en fatigue (NF P 98-261-1)
Niveau 1	X	X			
Niveau 2	X	X	X		
Niveau 3	X	X	X	X	
Niveau 4	X	X	X	X	X

4.9 Durée de validité des études de formulation

La durée de validité des études de formulation des enrobés bitumineux, et en particulier des BBME (Bétons Bitumineux à Module Élevé), est encadrée par la réglementation nationale et européenne. Cette durée correspond à la période pendant laquelle les résultats des essais et les formulations validées peuvent être utilisés pour la production et la mise en œuvre sans nécessiter de nouvelle étude complète.

- **En France :** la durée de validité est généralement de 3 ans, conformément aux normes et recommandations en vigueur.
- **En Europe :** selon les directives européennes et la norme EN 13108, la durée de validité peut atteindre 5 ans, sous réserve que les conditions de production et les matériaux n'aient pas été modifiés.

❖ Remarques importantes

- Tout changement de fournisseur de liant ou de granulats, ou modification significative de la composition, impose la réalisation d'une nouvelle étude de formulation, même si la période de validité n'est pas expirée.

- Ces durées visent à garantir la fiabilité des performances mécaniques et physiques des enrobés au fil du temps, en particulier pour les couches de roulement et de liaison exposées à un trafic intense.
- La validité est également liée à l'évolution des normes et exigences réglementaires ; tout changement normatif peut réduire la période de validité

4.10 Fabrication de l'enrobé Bétons Bitumineux à Module Élevé

La fabrication des enrobés bitumineux, et en particulier des BBME (Bétons Bitumineux à Module Élevé), débute par la vérification de la fiabilité de la centrale de production. Cette étape inclut :

- L'examen du niveau d'équipement de la centrale (malaxeurs, cuves, systèmes de chauffage, etc.).
- L'étalonnage des systèmes de pesage pondéraux ou volumétriques, ainsi que des dispositifs de mesure et de relève des températures pour assurer une précision maximale.

4.10.1 Réception des matières premières

Avant toute production, la qualité des granulats et du bitume est vérifiée afin de garantir la conformité aux spécifications de la formulation.

4.10.2 Contrôle des paramètres thermiques

Les températures des granulats et de l'enrobé doivent être strictement respectées :

- Température des granulats :
 - Minimum : valeur requise pour le bitume utilisé
 - Maximum : 180 °C
- Température de fabrication de l'enrobé selon le type de bitume :

4.10.3 Teneur en bitume et module de richesse

La teneur en bitume, directement liée au module de richesse K, doit respecter les valeurs minimales suivantes :

- BBME 0/10 mm : $\geq 3,5\%$
- BBME 0/14 mm : $\geq 3,3\%$

Cette teneur est calculée en moyenne sur quatre échantillons, avec des tolérances définies par la formule de mélange validée lors de l'étude de

formulation. Ces contrôles rigoureux garantissent la qualité, la compacité et la performance mécanique de l'enrobé, avant sa mise en œuvre sur le chantier.

4.11 Analyse comparative des Enrobés à Haut Module (EME/BBME) vs Enrobés Classiques (GB / BBSG)

4.11.1 Bénéfices techniques

a) Rigidité / Module

- EME/BBME : module de rigidité ciblé $\geq 11\ 000\text{--}14\ 000\text{ MPa}$, avec EME2 atteignant $\geq 14\ 000\text{ MPa}$.
- Enrobés classiques : module beaucoup plus faible, typiquement $3\ 000\text{--}6\ 000\text{ MPa}$.

Impact : meilleure répartition des efforts dans la chaussée, réduction des sollicitations sur la plateforme et meilleure performance structurelle.

b) Réduction d'épaisseur possible

- Les catalogues français et les études TRL montrent une réduction totale d'enrobé de 25–40 % lors du remplacement de la base classique par EME2.
- Exemple : une structure initiale de 410 mm peut être réduite à 330 mm tout en conservant la performance.

c) Résistance à l'orniérage et à la fatigue

- Les essais wheel-tracker et MSCR indiquent une résistance au fluage et à l'orniérage nettement améliorée.
- Les études montrent une réduction de la déformation permanente et une augmentation de la durée de vie en fatigue de +9 % à +30 % selon formulations et conditions.

d) Durée de service / Maintenance

- Durée de vie projetée : 20–30 ans pour EME/BBME vs 10–15 ans pour enrobés classiques.
- Moins d'interventions lourdes, moins de perturbations du trafic, retours d'expérience internationaux confirment la diminution des opérations de remise en état.

4.11.2 Inconvénients techniques & opérationnels

a) Exigences centrales et logistique

- Les centrales doivent gérer bitumes durs / PMB, cuves isolées, agitation continue, dosage précis du filler et des additifs, silos spécifiques, doseurs de fibres.
- Transport : bennes thermo-isolées, contrôle strict de la température à l'arrivée (≥ 150 °C).
Conséquence : investissements initiaux élevés et management logistique plus strict.

b) Coût initial matériaux & pose

- Le coût unitaire du mélange EME est plus élevé : +10–30 % selon pays et prix PMB/filler/énergie.
- Cependant, la réduction d'épaisseur et la diminution de maintenance compensent souvent ce surcoût sur le cycle de vie.

c) Sensibilité climatique

- Dans les climats très froids, un bitume trop dur peut favoriser la fissuration thermique.
- Solution : adaptation de la formulation (choix du grade de bitume, PMB, fibres).

d) Besoin de savoir-faire

- Contrôles stricts : compaction ≥ 97 %, suivi de température et tests performanciers.
- Formation nécessaire pour le personnel ; manque d'expérience locale augmente le risque d'échec.

4.11.3 Analyse économique et Life Cycle Cost (LCC)

a) Coût initial

- EME/BBME : surcoût initial par m^2 par rapport aux GB classiques.
- Réduction d'épaisseur de 20–25 % permet parfois de compenser partiellement le coût plus élevé du mélange (+10–30 %/tonne).

b) Économies sur cycle de vie

- Moins de matériaux et maintenance → LCC favorable : certaines études montrent une réduction possible de 0–30 % sur 20–30 ans, selon fréquence de maintenance et scénario.

c) Coût utilisateur (user costs)

- Moins d'interventions lourdes → réduction des coûts liés aux ralentissements et fermetures, surtout sur axes à fort trafic.
- Ces économies sont souvent le facteur principal rendant l'option EME/BBME rentable à l'échelle sociétale.

4.11.4 Impact environnemental (LCA)

a) Sources d'émissions

- Production : chauffage granulats plus élevé, bitume dur/PMB, transport renforcé → plus énergivore.

b) Gains potentiels

- Réduction d'épaisseur → moins d'extraction de granulats, moins de trajets camions, moins d'interventions futures.
- Exemple indicatif : réduction de 30 % d'épaisseur et évitement d'une réfection majeure sur 30 ans peut économiser plusieurs dizaines à centaines kg CO₂e/m² sur le cycle de vie.

4.11.5 Expérience internationale

- France : berceau des EME, retours positifs sur réduction d'épaisseur et durabilité (catalogues LCPC/SETRA).
- UK (TRL) : gains démontrés en résistance et durabilité, recommandations pour adaptation locale.
- Australie (WARRIP/TMR) : projet pilote EME2, spécifications techniques mises au point.
- Afrique du Sud, Louisiane, NZ, Polynésie : projets pilotes et recherche pour adaptation aux matériaux locaux.

4.11.6 Impact macro-économique

- Multiplicateur d'investissement routier : 1 € dépensé → 1,5–3,6 € d'activité économique cumulée.
- EME/BBME améliore la productivité de l'investissement : durabilité accrue, moins de fermetures, coûts de maintenance réduits.
- Effet positif sur le PIB local via économies pour les usagers et meilleure fiabilité du réseau.

4.12 Conclusion

Les enrobés à haut module (EME/BBME) constituent une solution technique supérieure pour les axes à trafic élevé. Ils présentent plusieurs avantages majeurs :

- Rigidité accrue : meilleure répartition des efforts et performance structurelle améliorée.
- Durée de vie prolongée : réduction des interventions de maintenance lourde et limitation des nuisances pour les usagers.
- Résistance à l'orniérage et à la fatigue : diminution des déformations permanentes et augmentation de la durabilité des chaussées.
- Réduction d'épaisseur : économies sur les granulats et terrassements, tout en conservant la performance.

Cependant, ces bénéfices s'accompagnent de contraintes importantes :

- Investissements initiaux élevés : équipements de centrales adaptés, bennes isolées, doseurs précis, bitumes spéciaux.
- Exigences en compétences et contrôles qualité : compaction stricte, suivi thermique, tests performanciers.

Sur le cycle de vie et l'empreinte carbone, l'option EME/BBME est souvent avantageuse si la réduction d'épaisseur et la baisse de maintenance se confirment dans le contexte local. Dans le cas contraire, il est nécessaire de réaliser des calculs précis via LCCA et LCA avant décision.

Enfin, l'impact macro-économique est positif grâce au multiplicateur d'investissement et à la réduction des coûts pour les usagers, ce qui en fait une option stratégique tant sur le plan technique qu'économique et environnemental.

Références

- [1] Y. Brosseau et V. Gaudefroy, « Les enrobés tièdes et semi-tièdes », févr. 2009.
- [2] L. Sétra, « Catalogue des structures types de chaussées neuves », Laboratoire Central des Ponts et Chaussées et Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme, Paris, 1998.
- [3] B.-J. DONGMO-ENGELAND, « Caractérisation des déformations d'orniérage des chaussées bitumineuses », 2005.
- [4] K. Safia, « Valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable-bitume », Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie. Annexe I, 2013.
- [5] « Cahier des Charges « Enrobés à Chaud » », in CDC-ENR05, Ben aknoun, Alger, Algérie: Le Ministre des Travaux Publics, Algérie, 2005.
- [6] Contrôle Technique des Travaux Publics. Algérie.: Le Ministre des Travaux Publics, Algérie., 2001.
- [7] H. DINE, « Formulation par la méthode Marshall d'un béton bitumineux à module amélioré par ajout de PR PLAST SAHARA », Département de Génie Civil Ecole Nationale Polytechnique alger, 2014.
- [8] BOUAZZA Mohamed SeyfEddene et MELLAKH Abdelhafid, « Enrobé à module élevé : formulation et utilisation cas d'une formulation à 04 niveaux », faculté des sciences appliquées département de génie civil et hydraulique université Kasdi merbah, Ouargla, 2017.
- [9] Jean-Luc DELORME, Chantal de la ROCHE, et Louisette WENDLING, « Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés », Paris, France: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2007.
- [10] Redouane NABAoui, « enrobes à module élevé (EME) et bétons bitumineux à module élevé (BBME) évolutions d'utilisation », algerie.
- [11] ISO 14040 & 14044 — Principes et cadre de l'ACV.

- [12] NF EN 12697-26 - Mélanges bitumineux - Méthodes d'essai – Partie 26 : Rigidité (Stiffness).
- [13] NF EN 12697-22 - Mélanges bitumineux -Méthodes d'essai — Partie 22 : Essai d'orniérage (Wheel Tracking)
- [14] NF EN 12697-12:2018- Mélanges bitumineux : Méthodes d'essai — Partie 12 : Détermination de la sensibilité à l'eau des éprouvettes bitumineuses.
- [15] NF EN 12697-8:2018 / EN 12697-8:2018 — Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai — Partie 8 : Détermination de la teneur en vides caractéristiques des matériaux bitumineux.
- [16] NF EN 12697-34:2020 - Mélanges bitumineux — Méthodes d'essai — Partie 34 : Essai Marshall.
- [17] NF EN 13108-1- Mélanges bitumineux : Spécifications des matériaux – Partie 1 : Enrobés bitumineux.
- [18] NF P 98 251-1 — Essais relatifs aux chaussées - Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés - Partie 1.
- [19] NF P 98 261-1 - Essais relatifs aux chaussées - Détermination de la résistance en fatigue des mélanges hydrocarbonés — Partie 1 : Essai de fatigue par flexion (à amplitude de flèche constante) sur éprouvettes trapézoïdales isocèles.
- [20] NF EN 12606-1:2015 — Bitumes et liants bitumineux — Détermination de la teneur en paraffines — Partie 1 : méthode par distillation.
- [21] N 15326:2007 + A1:2009 — Bitumen and bituminous binders — Measurement of density and specific gravity — Capillary stoppered pyknometer method.
- [22] NF P 98 141 — Enrobés hydrocarbonés : Couches de roulement et couches de liaison — Bétons bitumineux à module élevé (BBME) — Définition, classification, caractéristiques, fabrication, mise en œuvre.



دار بصمة علمية

ISBN : 978- 9969 - 02 - 899- 7

9 789969 028997