



Etude de l'influence de la température sur le dimensionnement structurel de la chaussée et évaluation des performances des bétons bitumineux utilisés en couche de roulement : Cas du projet d'élargissement de la route nationale N°4 à Ouagadougou

**MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC
GRADE DE
MASTER**

SPECIALITE GENIE CIVIL-BATIMENTS ET TRAVAUX PUBLICS

Présenté et soutenu publiquement le 17 Juillet 2024 par
CATRAYE Séssi Josée Fabiola (20190063)

Directeur de mémoire : Pr Adamah MESSAN,

Maître de stage : M. Imer Jesly DEGBEY

Structure d'accueil du stage : GLOBEX CONSTRUCTION

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr Malicki ZOROM

Membres et correcteurs : Dr Louis Arnaud OUEDRAOGO

M. Mamadou Pousga Junior KABORE

Promotion [2023/2024]

DEDICACE

Je dédie ce travail :

- Au Dieu tout puissant que je sers, en qui j'ai trouvé la force pour mener à bien ce travail ;
- A mes précieux parents, M. et Mme. CATRAYE qui ne cessent de me soutenir, de me conseiller et de m'accompagner dans tous mes projets ;
- A mes frères et sœurs pour tout leur soutien ;
- A toute ma grande famille CATRAYE et OUEDRAOGO ;
- A tous mes amis qui ont été là pour moi.

REMERCIEMENTS

Mes sincères remerciements sont adressés :

- A l'Institut Internationale de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), pour la qualité d'enseignement qu'elle dispense ;
- Au Directeur Technique de GLOBEX CONSTRUCTION, M. Jonas KPOCHAN pour l'honneur qu'il m'a fait d'apprendre au sein de leur entreprise, pour l'encadrement que j'ai reçu de lui et pour sa disponibilité ;
- A mon Directeur de mémoire, Pr Adamah MESSAN pour le challengeur qu'il est, pour son accompagnement et pour la qualité d'enseignement que j'ai reçu de lui ;
- Au, Dr. Marie Thérèse Marame MBENGUE, pour sa disponibilité et ses nombreux conseils ;
- A mon maître de stage, M. Imer Jesly DEGBEY, pour son assistance, sa disponibilité et tout son soutien ;
- A M. ABJIBOLO, Responsable du Suivi des projets à la RN4 et Conducteur des Travaux de la mission de contrôle à AGEIM Conseil, pour son investissement dans mon travail, pour ses précieux conseils et tout le soutien qu'il m'a apporté ;
- A M. Jean GOMENOU, Ing. Géotechnicien à AGEIM Conseil, pour sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien ;
- A Monsieur SANA ALI pour tous ses conseils et sa disponibilité ;
- A Tout le personnel de GLOBEX CONSTRUCTION et du LNBTP, pour l'accueil et la bonne ambiance de travail dans laquelle ils m'ont introduit ;
- A Tout ceux qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

RESUME

Largement utilisés en construction routière, les performances des enrobés bitumineux peuvent être influencés par le trafic et la température. Leur module de rigidité varie avec la température et est crucial pour définir la rigidité d'une structure de chaussée. La température est donc un paramètre clé dans le dimensionnement des chaussées. Au Burkina Faso, avec les températures pouvant monter jusqu'à 47°C, il est intéressant de porter un regard sur les déformations permanentes de ces chaussées. L'augmentation de la température doit nous contraindre à une meilleure prise en compte de la température équivalente de dimensionnement des chaussées. Cette étude se propose d'évaluer l'influence de la température sur le dimensionnement structurel, en se basant sur le projet d'élargissement de la route nationale N°4. Une formulation de BBME et de BBSG a été réalisée pour ce projet. Les résultats montrent que le BBME résiste mieux à des conditions climatiques élevées en minimisant les dégradations contrairement au BBSG. L'analyse s'est poursuivie à travers une modélisation de la structure de chaussée sur le logiciel Alizé à différentes températures (30°C, 32°C, 34°C, 36°C, et 38°C) afin d'évaluer leur impact sur la chaussée. Les matériaux utilisés en couche de roulement, BBME et BBSG, possèdent respectivement des modules de rigidité de 10280 MPa et 8020 MPa. L'évaluation du taux de travail des matériaux des sollicitations par des déformations en traction à des températures élevées. Le BBME présente un taux de travail inférieur à celui du BBSG à 30°C, indiquant une plus grande résistance aux déformations permanentes. Ces résultats démontrent que le BBME est un matériau optimal à utiliser pour les constructions routières au Burkina Faso.

Mots-clés :

1. Influence de température
2. Béton bitumineux semi grenu
3. Béton bitumineux à module élevé

ABSTRACT

Widely used in road construction, the performance of bituminous coatings can be influenced by traffic and temperature. Their modulus of rigidity varies with temperature and is crucial for defining the rigidity of a pavement structure. Temperature is therefore a key parameter in the design of pavements. In Burkina Faso, with temperatures reaching up to 47°C, it is interesting to take a look at the permanent deformations of these roads. The increase in temperature must force us to take better account of the equivalent temperature when designing roadways. This study aims to evaluate the influence of temperature on structural design, based on the project to widen National Road No. 4. A formulation of HMAC and SGAC was carried out for this project. The results show that HMAC resists better to high climatic conditions by minimizing degradation unlike SGAC. The analysis continued through modeling of the roadway structure on the Alize software at different temperatures (30°C, 32°C, 34°C, 36°C, and 38°C) in order to assess their impact on the roadway. . The materials used in the wearing course, HMAC and SGAC, respectively have stiffness moduli of 10280 MPa and 8020 MPa. Evaluation of the work rate of materials subjected to tensile deformations at high temperatures. HMAC exhibits a lower work rate than SGAC at 30°C, indicating greater resistance to permanent deformation. These results demonstrate that HMAC is an optimal material to use for road construction in Burkina Faso.

Key words :

1. Temperature influence
2. Semi-grained asphalt concrete
3. High modulus asphalt concrete

LISTE DES ABREVIATIONS

2iE	Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AGEIM	Agence d'Etudes, d'Ingénierie Et De Maîtrise D'œuvre
BBA	Béton Bitumineux Aéronautique
BBME	Béton Bitumineux A Module Elevé
BBSG	Béton Bitumineux Semi Grenu
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
BBUM	Béton Bitumineux Ultra Mince
CACO	Consortium Africain de Conseil et d'Organisation
CBR	California Bearing Ratio
CAM	Coefficient d'Agressivité Moyen
CEBTP	Centre d'Essais du Bâtiment et des Travaux Publics
GAL	Grave Argileuse Latéritique
GTR	Gide de Terrassement Routier
LCPC	Laboratoire Central Des Ponts Et Chaussées
MVA	Masse Volumique Apparente
MVRe	Masse Volumique Réelle
MVRg	Masse Volumique Réelle Des Granulats
OPM	Optimum Proctor Modified
PCG	Presse à Cisaillement Giratoire
PIK	Potsdam Institute for Climate Impact Research
PL	Poids Lourd
PMB	Polymer Modified Bitumen
RW PLAST	RailWay Plastique
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test
SETRA	Service D'études Sur Les Transports, Les Routes Et Leurs Aménagements

TMJ Trafic Moyen Journalier

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	viii
LISTE DES FIGURES	ix
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	3
Introduction	3
I.1 Généralité sur les types de chaussées.....	3
1. Définition de la chaussée.....	3
2. Les types de chaussées	4
I.2 Généralité sur les enrobés bitumineux	5
1. Définition des enrobés bitumineux	5
2. Classification des enrobés bitumineux	5
I.3 Composition des enrobés bitumineux	6
I.4 Rhéologie des enrobés bitumineux	8
I.5 Formulation des enrobés bitumineux.....	9
I.6 Exemples d'enrobés bitumineux.....	10
1. Le béton bitumineux à module élevé (BBME)	10
2. Classes et caractéristiques des BBME	10
3. Le béton bitumineux semi grenu (BBSG).....	11
I.7 Effet de la température sur la chaussée.....	13
1. Sollicitations des couches en enrobés bitumineux	13
I.8 Notion de température équivalente	14
1. Condition climatique au Burkina Faso.....	14
2. Température équivalente de dimensionnement des chaussées.....	15

Conclusion.....	16
CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET, MATERIAUX, MATERIELS ET METHODES	17
Introduction	17
II.1 Présentation de la structure d'accueil	17
1. Historique	17
2. Présentation du projet.....	17
2. Contexte et justification du projet	18
II.2 Matériaux utilisés	18
II.3 Méthodologie du travail.....	19
1. Formulation des enrobés bitumineux	19
2. Dimensionnement structural de la chaussée.....	19
CHAPITRE III : RESULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS	20
Introduction	20
III.1 Formulation des bétons bitumineux	20
1. Essai de presse à Cisaillement Giratoire PCG	21
2. Essai de détermination de la sensibilité à l'eau	24
3. Essai d'orniérage.....	27
4. Essai de module de rigidité	30
III.2 Evaluation des performances des enrobés bitumineux	30
III.3 Dimensionnement de la structure de chaussée	32
1. Choix de la classe de portance du sol et du type de plateforme.....	32
2. Hypothèses et données du trafic.....	33
3. Choix de la structure de chaussée selon le CEBTP.....	35
4. Vérification de la structure de chaussée sur Alizé.....	37
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	43
BIBLIOGRAPHIE	45
ANNEXES	x
Annexe 1 : Définitions et mode opératoire des essais.....	x
Annexe 2 : Résultats du dimensionnement structural de la variante 1 en BBME	xvii
Annexe 3 : Résultats du dimensionnement structural de la variante 2 en BBSG	xviii

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classification des performances mécaniques du BBME	11
Tableau 2 : Classification des performances mécaniques du BBSG	12
Tableau 3: Caractéristiques de formulation des bétons bitumineux	20
Tableau 4: Résultat de l'essai PCG sur le BBME	22
Tableau 5: Résultat de l'essai PCG sur le BBSG	23
Tableau 6: Résultat de l'essai Duriez pour le BBME.....	25
Tableau 7 : Rapport des résistances de l'essai Duriez pour le BBME	25
Tableau 8: Résultat de l'essai Duriez sur le BBSG	26
Tableau 9 : Rapport des résistances de l'essai Duriez pour le BBSG	26
Tableau 10 : Profondeur d'ornièrè en fonction du nombre de cycles pour le BBME	28
Tableau 11 : Caractéristiques de l'essai d'ornièrage pour le BBME	28
Tableau 12: Profondeur d'ornièrè en fonction du nombre de cycles pour le BBSG	28
Tableau 13: Caractéristiques de l'essai d'ornièrage pour le BBSG	29
Tableau 14: Résultat de l'essai de module de rigidité du BBME et du BBSG	30
Tableau 15: Résultats des sondages géotechniques	32
Tableau 16: Classe de portance du sol selon le CEBTP	33
Tableau 17: Valeur de CAM utilisé pour le dimensionnement des chaussées	34
Tableau 18 : Classe de trafic selon le CEBTP	35
Tableau 19: Classe de trafic selon SETRA LCPC	35
Tableau 20: Modèle de structure de la chaussée.....	36
Tableau 21: Valeurs calculées des déformations admissibles de déformations.....	38
Tableau 22: Pourcentage de perte des modules des matériaux en fonctions de la température.....	38
Tableau 23: Synthèse des résultats du dimensionnement structurel.....	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Les différentes couches constitutives d'une chaussée	4
Figure 2 : Classification des enrobés bitumineux	6
Figure 3: Représentation schématique de la microstructure d'un bitume et d'un goudron	7
Figure 4: Comportement rhéologique des matériaux, Hunter [2000]	9
Figure 5 : Niveaux de formulation des enrobés bitumineux, Delorme [2007].....	10
Figure 6 : Effet du trafic sur la chaussée, Mathieu [2012]	13
Figure 7 : Effet de la température sur la chaussée, Mathieu [2012].....	14
Figure 8 : Moyennes des températures présentes au Burkina Faso en 2021	15
Figure 9 : Situation géographique du projet d'étude	17
Figure 10 : Carrière de Globex Construction	18
Figure 11 : Courbe granulométrique du BBME	21
Figure 12 : Courbe d'évolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de giration pour l'essai PCG.....	24
Figure 13 : Les différents types d'orniérage, Mathieu [2012]	27
Figure 14 : Courbe de l'évolution de l'orniérage à 30 000 cycles pour le BBME et le BBSG 29	
Figure 15 : Courbe comparative de l'évolution du module de rigidité par rapport à la température pour le BBSG	39
Figure 16 : Courbe comparative de l'évolution du module de rigidité par rapport à la température pour le BBME	39
Figure 17: Evolution du taux de travail des matériaux en fonction de l'augmentation des températures	41

INTRODUCTION GENERALE

La construction d'infrastructures routières est un enjeu majeur pour le développement économique et social au Burkina Faso. En effet, le taux de dégradations des routes passe de 47,4% en 2021 à 51,7% en 2022. Les facteurs pouvant influencer la durabilité des chaussées en matériaux bitumineux sont les sollicitations existantes sur le corps de la chaussée telles que l'effet du trafic et de la température. Le Burkina Faso possède un climat pré sahélien au nord et tropical au sud avec des températures variables dont le maximum en 2021 a pu atteindre 47 voire 48°C. L'augmentation des températures participe considérablement à la dégradation et à l'apparition des déformations permanentes sur la chaussée. Lorsque la température augmente, le béton bitumineux de par constitution du bitume qui a une bonne capacité thermique, absorbe la chaleur et se retrouve avec une température supérieure à la température environnante. Selon les prédictions météorologiques au Burkina Faso, une hausse de la température d'environ 2°C est prévue à l'horizon 2030, élément important à prendre en compte lors du dimensionnement des structures. Plus la température augmente, plus la température équivalente de dimensionnement des chaussées est affectée.

Dans cette optique, l'objectif général de ce travail vise à améliorer la conception des chaussées au Burkina Faso. Plus spécifiquement il sera question de :

- Evaluer les performances d'un béton bitumineux semi grenu et un béton bitumineux à module élevé afin de comparer leur rendement ;
- Faire un dimensionnement de la structure de la chaussée en faisant varier la température de dimensionnement ainsi que le matériau en couche de roulement. L'idée est d'évaluer le comportement de la chaussée face à l'augmentation des températures avec ces deux matériaux.

Le projet considéré est celui de l'élargissement de la route nationale N°4 au Burkina Faso. La formulation des bétons bitumineux utilisés a été réalisé par le Laboratoire CACO au Sénégal. Les spécifications demandées par le projet pour la formulation sont des bétons bitumineux de niveaux 4 constitués de la formulation de niveau 3 plus l'essai de fatigue. Compte tenu de l'indisponibilité de l'essai du niveau 4, notre étude se portera uniquement sur la formulation de niveau 3 qui regroupe l'essai de presse à cisaillement giratoire, l'essai de sensibilité à l'eau, l'essai d'orniérage et l'essai de module de rigidité. Les résultats de cette étude



contribueront entre autres à améliorer le rendement de nos routes ainsi qu'à réduire les différentes dégradations qui peuvent être rencontrées sur la chaussée.

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

Les enrobés bitumineux sont des matériaux beaucoup utilisés en construction routière. Ils ont des caractéristiques variables en fonctions des températures et des trafics auxquels ils sont exposés. Dans ce chapitre il sera question de faire d'abord une présentation de la littérature sur les chaussées routières, leurs classifications et les matériaux constitutifs. Puis nous aborderons ensuite une généralité sur les enrobés bitumineux, leurs caractéristiques et leurs performances mécaniques. Enfin ce chapitre nous proposera également une revue sommaire sur les sollicitations existantes sur les enrobés bitumineux ainsi que les tendances climatiques rencontrées au Burkina Faso.

I.1 Généralité sur les types de chaussées

1. Définition de la chaussée

La chaussée est définie comme une portion de route qui comprend différentes voies de circulation pour différentes classes de véhicules. Au sens structural, c'est la partie de la route qui supporte les différentes charges des véhicules de toutes sortes. C'est l'ensemble des couches de matériaux disposés sur la plateforme. Pour pouvoir remplir sa fonction, la chaussée est constituée de plusieurs couches jouant chacune un rôle spécifique.

- **Le sol support** : C'est la zone supérieure des terrains en place ou remblai sur laquelle va reposer le corps de chaussée
- **La couche de forme** : La couche de forme assure la transition entre la plateforme supérieure de terrassement et les couches d'assise de la chaussée. Son utilisation n'est pas systématique, et intervient lorsqu'on rencontre sur un même projet, des sols de caractéristiques très variables. Elle a pour but, d'améliorer la portance du sol support, en répartissant de manière uniforme sur lui, les efforts dus au trafic. La couche de forme peut être constituée soit de matériaux grenus, roulés ou concassés, soit de matériaux traités aux liants hydrauliques.
- **La couche d'assise** : elle regroupe la couche de base et la couche de fondation. Son rôle est d'assurer la résistance mécanique en recevant, et en répartissant à la couche de forme éventuelle et au sol support les efforts et pressions induits par le trafic.

- **La couche de surface** : cette couche est la partie supérieure de la chaussée composée d'une couche de roulement et d'une couche de liaison. On l'appelle plus communément le "revêtement de route". Elle est donc en contact direct avec les pneumatiques des véhicules, les usagers et fait face aux conditions climatiques. Son rôle est de résister aux efforts des pneus, de garantir une bonne étanchéité pour éviter l'infiltration de l'eau, et d'assurer un certain confort à la circulation.

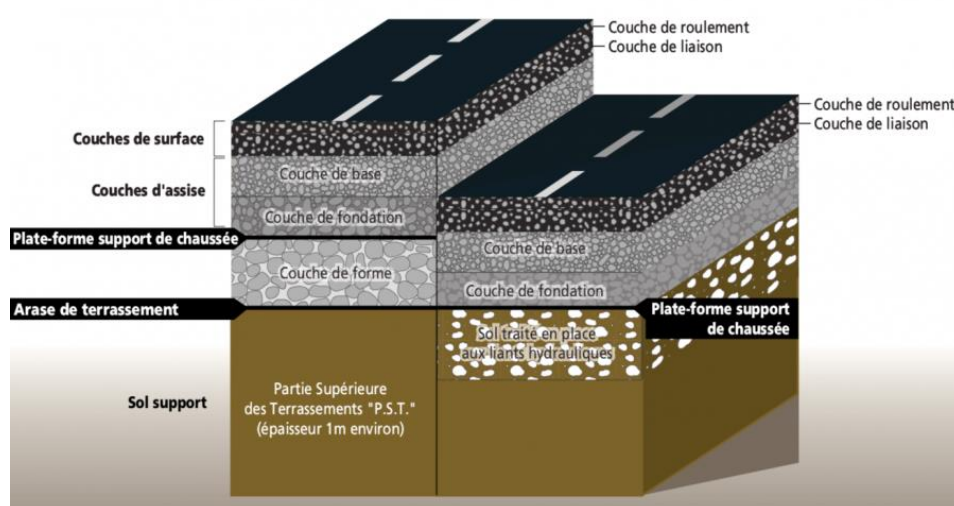


Figure 1: Les différentes couches constitutives d'une chaussée

Source : Infociments (Caractéristiques générales des chaussées)

2. Les types de chaussées

L'ensemble des structures de chaussée selon le guide de Service d'études Techniques des Routes et Autoroutes SETRA [1998] sont les suivantes :

- **Les chaussées bitumineuses épaisses** : elles possèdent une couche de surface en matériaux bitumineux qui repose sur une assise en matériaux traités aux liants hydrocarbonés.
- **Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques** : elles sont composées d'une couche de surface en matériaux bitumineux reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques.
- **Les structures mixtes** : elles comprennent une couche de surface et de base en matériaux bitumineux avec des matériaux traités aux liants hydrauliques en couche de fondation.

- **Les chaussées en béton de ciment** : elles ont une couche de roulement en béton de ciment. Cette couche repose soit sur une fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton maigre, soit sur une couche drainante constituée de matériaux granulaires (dalle épaisse), ou encore sur une couche d'enrobé elle-même posée sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques.
- **Les structures souples** : elles possèdent revêtement bitumineux relativement mince, reposant sur de matériaux granulaires non traités.
- **Les structures Inverses** : elles possèdent une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux, reposant sur une fine couche de grave non traitée. Cette dernière est elle-même posée sur une couche de forme servant aussi de fondation, en matériaux traités aux liants hydrauliques.

I.2 Généralité sur les enrobés bitumineux

1. Définition des enrobés bitumineux

L'enrobé bitumineux est un matériau constitué d'un mélange de granulats (graviers, sable, fines) et d'un liant hydrocarboné (bitume, parfois avec des additifs). Les granulats forment la structure rigide de l'enrobé, tandis que le bitume assure la cohésion de l'ensemble et confère au matériau son caractère visqueux [Safia, 2013].

2. Classification des enrobés bitumineux

On distingue plusieurs types d'enrobé repartit selon différents groupes :

- **Selon le procédé de fabrication on distingue** : L'enrobé à chaud et l'enrobé à froid
L'enrobé à chaud est un mélange de sable, de gravier et de liants hydrocarbonés formulé et appliqué à une température élevée. Il est chauffé à environ 180°C dans la station de production, puis transporté vers une machine d'enrobage mobile, coulé sur le sol et compacté [Amenexter, 2021].
L'enrobé à froid est un mélange de bitume, de granulats et de sable préparé et appliqué à température ambiante (généralement entre 10 et 20°C). Moins résistant que les enrobés à chaud, il est principalement utilisé pour réparer les nids-de-poule, fissures et autres petits dégâts sur les routes [Amenexter, 2021].
- **Selon la couche de chaussée on distingue** :

La couche d'assise, pour laquelle on utilise généralement les enrobés bitumineux à module élevé (EME) et les graves bitumes (GB).

Pour la couche de roulement il existe plusieurs catégories

- Selon le module de rigidité : Il convient d'utiliser les bétons bitumineux semi-grenu (BBSG), les bétons bitumineux à module élevé (BBME), les bétons bitumineux aéronautiques (BBA).
- Selon l'épaisseur : Nous pouvons citer les bétons bitumineux minces (BBM), les bétons bitumineux très minces (BBTM), les bétons bitumineux ultra minces (BBUM).
- Selon la perméabilité on distingue : les bétons bitumineux étanches et les bétons bitumineux drainants.

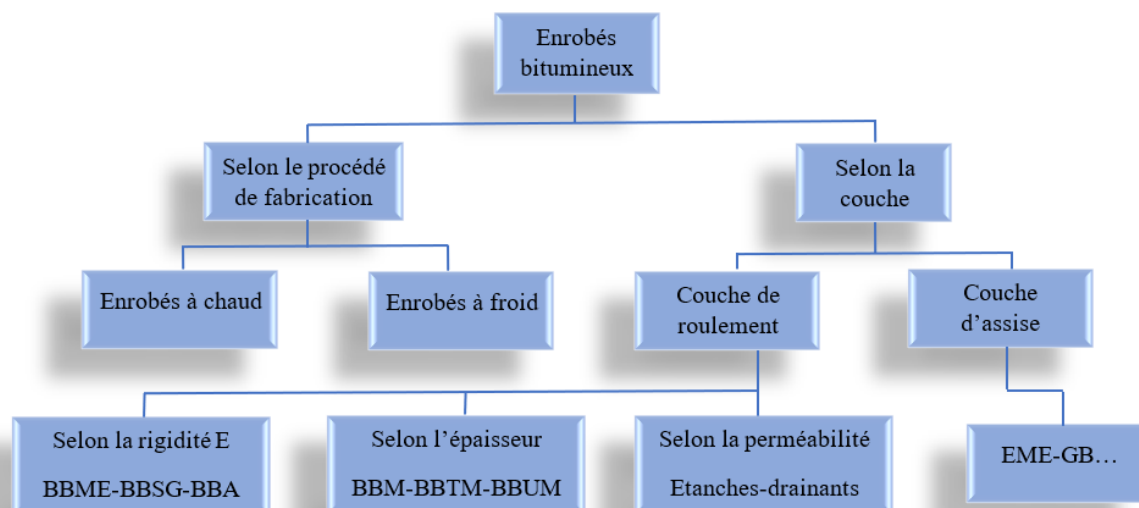


Figure 2 : Classification des enrobés bitumineux

I.3 Composition des enrobés bitumineux

➤ Les liants hydrocarbonés

Les liants hydrocarbonés sont des matériaux principalement constitués d'atomes de carbone et d'hydrogène. Autrement dit, un liant hydrocarboné est un liant organique. Les deux grandes catégories de liants hydrocarbonés, utilisées dans la construction et l'entretien des routes, sont les goudrons de houille et les bitumes, ainsi que leurs produits dérivés qui peuvent être combinés. [Bernard, 2007]

- **Les goudrons de houille** : Inexistant à l'état naturel, il résulte de la pyrolyse de matières organiques, à l'abri de l'oxygène.
- **Les bitumes** : Ce sont des substances composées d'un mélange d'hydrocarbures, très visqueuses (voir solides) à la température ambiante et de couleur noires et proviennent de la distillation des pétroles bruts. On en distingue 3 types : le bitume naturel, l'asphalte naturel et le bitume de pétrole.



Figure 3: Représentation schématique de la microstructure d'un bitume et d'un goudron

Source : [Cours de liant hydrocarboné](#)

Le bitume routier est le liant le plus utilisé dans la construction des routes. C'est un matériau très visqueux, solide à température ambiante mais qui devient liquide lorsqu'il est chauffé. Afin de mieux caractériser et classer ce matériau, il convient de faire certains essais tels que l'essai de pénétrabilité à l'aiguille, l'essai de température de ramollissement bille et anneau (TBA) et l'essai de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air RTFOT. Ces dernières sont mentionnées et détaillées dans l'annexe 1.

➤ Les granulats

Il existe différents types de granulats, définis selon la granulométrie des grains (distribution dimensionnelle des grains). Leur classification se fait selon le plus grand diamètre du granulat D et la plus petite d noté d/D . Lorsque d est inférieur à 0.5 mm, le granulat est désigné $0/D$. Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm. La norme NF P 18-545 classe les granulats pour les mélanges bitumineux comme suit [Fasfox, 2023] :

- Le filler et fines : granulat inférieur à 0,063 mm ;
- Le sable : $D \leq 2$ mm et $d = 0$ mm ;
- Le gravillon : $2 \leq D \leq 45$ mm et $d \geq 2$ mm ;
- La grave : $2 < D \leq 45$ mm et $d = 0$ mm ;

Il existe certains essais pratique en laboratoire afin de mieux connaître et classer les granulats utilisés dans les mélanges hydrocarbonés. L'essai d'analyse granulométrique, l'essai Los Angeles, la détermination du coefficient d'aplatissement, L'essai Micro-Deval, détermination de la masse volumique et du coefficient d'absorption d'eau, la détermination de la masse volumique en vrac et du coefficient intergranulaire sont nécessaires (annexe 1).

➤ Les additifs

Les additifs sont des substances utilisées pour améliorer les propriétés du liant bitumineux et le rendre plus résistant. Ils concernent principalement les propriétés thermos-visqueuses et viscoélastiques du liant. Il est possible de fabriquer un mélange bitumineux en utilisant que du bitume, cependant la substitution partielle d'une certaine quantité de bitume par des additifs est bénéfique aussi bien sur le plan économique que sur le plan rhéologique et sur les performances de l'enrobé. Ils permettent d'augmenter notamment [Harkat, 2010] :

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

I.4 Rhéologie des enrobés bitumineux

La rhéologie des enrobés bitumineux selon Hunter [2000], est définie comme l'étude de la déformation et de l'écoulement de la matière. Elle explique le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à une contrainte. Il expose deux extrêmes de comportement pour tout matériau élastique et visqueux. Un matériau dit parfaitement élastique réagit immédiatement à la déformation lorsqu'une contrainte lui est appliquée, et a la capacité de retrouver sa forme initiale lorsque la contrainte est supprimée. A contrario, les matériaux visqueux se comportent différemment car la déformation résultante n'apparaît que lorsque la contrainte est supprimée, sans possibilité de récupérer sa forme initiale en l'absence de la contrainte. La viscosité fait en sorte que la contrainte et la déformation sont déphasées. Si un matériau est soumis à des cycles de chargement et de déchargement, et que les déformations suivent des cycles qui sont en phase (0°) avec les cycles de chargement, alors le comportement est élastique. Au contraire, si les cycles sont complètement déphasés (90°) le comportement est dit parfaitement visqueux

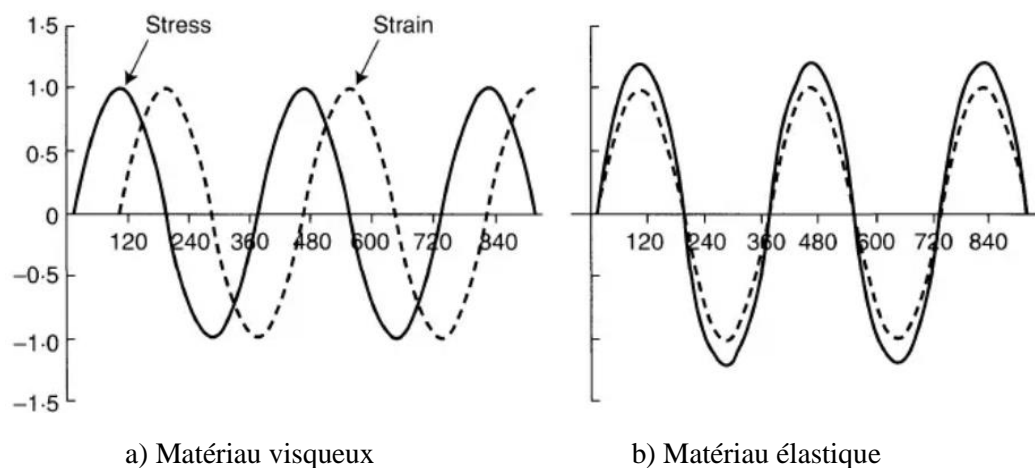


Figure 4: Comportement rhéologique des matériaux, Hunter [2000]

I.5 Formulation des enrobés bitumineux

La formulation des enrobés bitumineux consiste en la détermination d'un mélange optimum de liant et de granulats en vue d'atteindre les performances visées par le projet. L'épreuve de formulation est réalisée en fonction de l'utilisation projetée, du type d'enrobé et des sollicitations existantes. Les niveaux de formulation de l'enrobé varient de 1 à 4 en fonction des exigences attendus. D'après Delorme [2007] dans son manuel d'aide à la formulation des enrobés bitumineux, il existe un niveau 0 qui a été introduit dans la norme (NF P98-150-1) et qui correspond à une description de la granularité et de la teneur en bitume. Notons que plus le niveau de formulation est élevé, plus l'enrobé devient performant et résiste mieux à certaines pathologies qui surviennent dans le temps. L'annexe 1 nous donne un aperçu détaillé sur les essais réalisés sur l'enrobé lors de sa formulation.

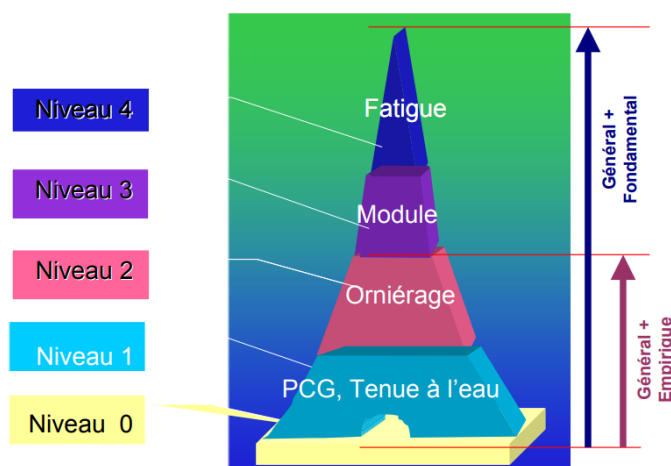


Figure 5 : Niveaux de formulation des enrobés bitumineux, Delorme [2007]

I.6 Exemples d'enrobés bitumineux

1. Le béton bitumineux à module élevé (BBME)

➤ Définition

Le Béton Bitumineux à Module Elevé (BBME) est un enrobé « structurant », obtenu à partir d'un mélange de liant hydrocarboné, de granulats (éventuellement de dopes) et/ou d'additifs minéraux ou organiques, dosés, chauffés et malaxés dans une installation appelée centrale d'enrobage. Il se caractérise par une bonne résistance à l'orniérage, une rigidité élevée, une durée de vie élevée, une épaisseur de mise en œuvre réduite. Il est particulièrement bien adapté en couche de roulement de chaussées fortement sollicitées par des trafics lourds canalisés (autoroutes, voies lentes, rampes et voies de bus), en plate-forme industrielles et en chaussées aéroportuaires.

2. Classes et caractéristiques des BBME

Les bétons bitumineux à module élevé se classe en deux types en fonction de leur granularité. On distingue les BBME 0/10 et les BBME 0/14. Le tableau 1 donne un aperçu des exigences attendues selon la norme (NF EN 13108-1) sur les performances mécaniques pour un béton bitumineux à module élevé lors de sa formulation.

Tableau 1: Classification des performances mécaniques du BBME

Essais sur BBME	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Essai de presse à cisaillement giratoire PCG : 5 à 10 % de vide à 60 girations	5 à 10%	5 à 10%	5 à 10%
Essai Duriez à 18°C (NF P 98-251-1) Rapport : $\frac{r(\text{en Mpa}) \text{ après immersion}}{R(\text{en Mpa}) \text{ à sec}}$	$\geq 0,80$	$\geq 0,80$	$\geq 0,80$
Essai d'orniérage Profondeur d'ornière en pourcentage de l'épaisseur de la dalle pour une dalle de 10 cm d'épaisseur à 30 000 cycles et 60°C, à un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%	$\leq 10 \%$	$\leq 7,5 \%$	$\leq 5 \%$
Essai de module complexe Module, en mégapascals, à 15°C, 10 Hz à un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%	$\geq 9\ 000$	$\geq 11\ 000$	$\geq 11\ 000$
Essai de fatigue Déformation relative à 10^6 cycles, 10°C et 25 Hz et pour un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%, ϵ_6	$\geq 100 \mu\text{def}$	$\geq 100 \mu\text{def}$	$\geq 100 \mu\text{def}$

3. Le béton bitumineux semi grenu (BBSG)

➤ Définition

Le Béton Bitumineux Semi-Grenu (BBSG), considéré comme l'enrobé de référence est également obtenu à partir d'un mélange de liant hydrocarboné et de granulat avec ajout ou non d'additif. Il est couramment utilisé en couche de roulement de chaussées fortement sollicitées par des trafics lourds. Possédant un module de rigidité moins élevé que le BBME, il résiste aussi bien à l'orniérage, avec une épaisseur de mise en œuvre réduite et une durée de vie élevée.

➤ **Classes et caractéristiques des BBSG**

Les bétons bitumineux semi-grenu se classent en deux types en fonction de leur granularité. On distingue les BBSG 0/10 et les BBSG 0/14. Le tableau 2 donne un aperçu des exigences attendu selon la norme (NF EN 13108-1) sur les performances mécaniques pour un béton bitumineux semi-grenu lors de sa formulation.

Tableau 2 : Classification des performances mécaniques du BBSG

Essais sur BBSG	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Essai de presse à cisaillement giratoire PCG : 5 à 10 % de vide à 60 girations	5 à 10%	5 à 10%	5 à 10%
Essai Duriez à 18°C Rapport : $\frac{r(\text{en Mpa})\text{après immersion}}{R(\text{en Mpa})\text{à sec}}$	$\geq 0,70$	$\geq 0,70$	$\geq 0,70$
Essai d'orniérage Profondeur d'ornière en pourcentage de l'épaisseur de la dalle pour une dalle de 10 cm d'épaisseur à 30 000 cycles et 60°C, à un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%	$\leq 10 \%$	$\leq 7,5 \%$	$\leq 5 \%$
Essai de module complexe Module, en mégapascals, à 15°C, 10 Hz à un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%	$\geq 5\,500$	$\geq 7\,000$	$\geq 7\,000$
Essai de fatigue Déformation relative à 10^6 cycles, 10°C et 25 Hz et pour un pourcentage de vides compris entre 5% et 8%, ϵ_6	$\geq 100 \mu\text{def}$	$\geq 100 \mu\text{def}$	$\geq 100 \mu\text{def}$

I.7 Effet de la température sur la chaussée

1. Sollicitations des couches en enrobés bitumineux

Les enrobés bitumineux subissent de nombreuses sollicitations tout au long de leur durée de vie dont les principales causes sont les chargements mécaniques dus aux trafics et les sollicitations climatiques. Sous ces sollicitations se produisent des phénomènes complexes impliquant la mécanique, la thermique, la physique et chimie entre les composants des matériaux.

➤ Les effets du trafic

L'effet du trafic est issu du passage des véhicules qui imposent un chargement sur la surface de la chaussée sous forme de chargements surfaciques répétés. Le passage des charges lourdes crée des dommages qui apparaissent sur les différentes couches.

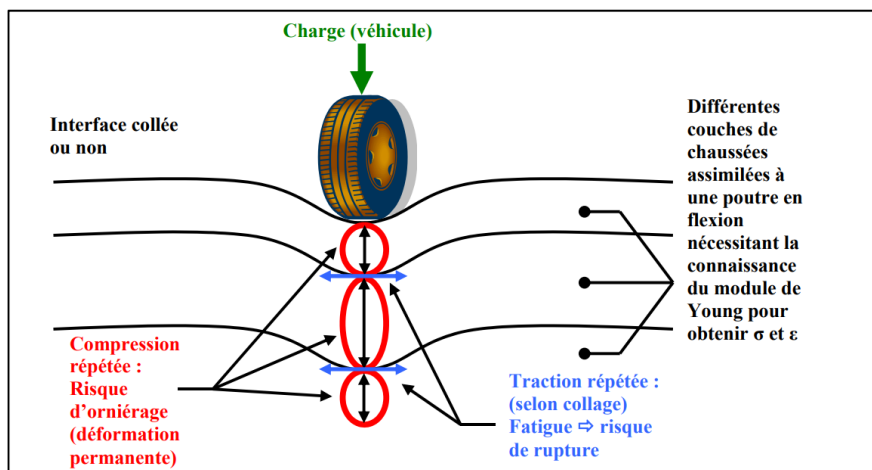


Figure 6 : Effet du trafic sur la chaussée, Mathieu [2012]

➤ Les effets de la température

Selon Nguyen [2006], outre les chargements mécaniques, les chaussées subissent des chargements consécutifs aux variations de la température. Ces variations thermiques entraînent des changements de la rigidité du mélange : quand la température baisse, le mélange bitumineux est rigide et fragile tandis que quand elle augmente la rigidité du mélange chute et que sa ductilité augmente. D'autre part, le changement de température peut entraîner des contraintes et des déformations au sein des matériaux en raison des contractions-dilatations thermiques.

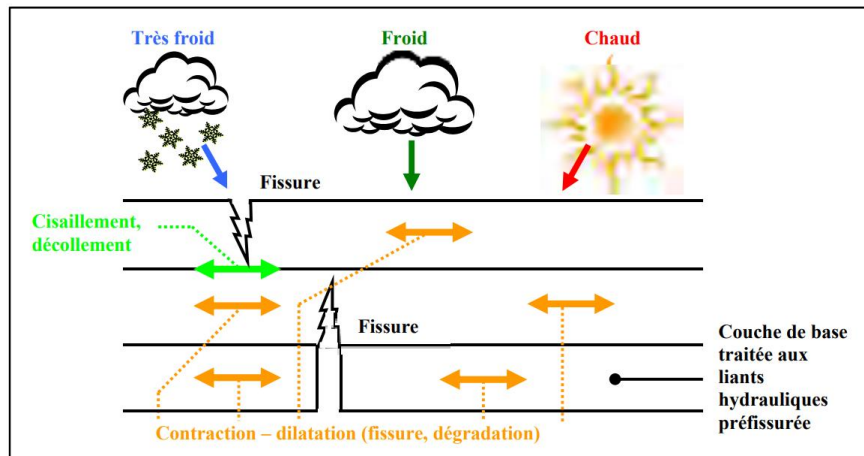


Figure 7 : Effet de la température sur la chaussée, Mathieu [2012]

D'après Junod et Dumont [2004], ce phénomène est particulièrement important car il crée des dommages sur la chaussée tel que :

- Les fissurations de surface sous la forme de fissures isolées ou, dans les cas les plus graves, sous la forme de faïençage généralisé
- Les déformations permanentes (ou orniérage) suite à l'accumulation de déformations irréversibles
- Les dégradations de surface sous la forme de polissage des granulats, les désenrobages et perte de gravillons, les pelades et les nids de poule.

Selon Domec [2005], les matériaux bitumineux sont thermo susceptibles d'où leur propriété sont dépendant de la température. Il affirme que la chaussée subit des variations importantes de température au fil des saisons impliquant que la loi de fatigue des enrobés varie avec la température et les matériaux se détériorent plus ou moins rapidement.

I.8 Notion de température équivalente

1. Condition climatique au Burkina Faso

Le Burkina Faso est un pays au climat tropical sec connaissant de grandes variations de température tout au long de l'année. La moyenne maximale se situe autour de 30 à 32 °C au nord et de 32 à 33 °C au sud. Cependant, les records de chaleur les plus élevés souvent enregistrés sont d'environ 47 à 48 °C dans le nord du pays en avril et en mai, et de 42 à 44 °C dans le sud. Les projections réalisées par le PIK (Potsdam Institute for Climate Impact Research) en 2021 prévoient des augmentations de la médiane de température de l'ordre de

2,0 °C en 2030, 2,4 °C en 2050 et 3 °C en 2080 par rapport à la période préindustrielle. Ministère de l'environnement [2021].

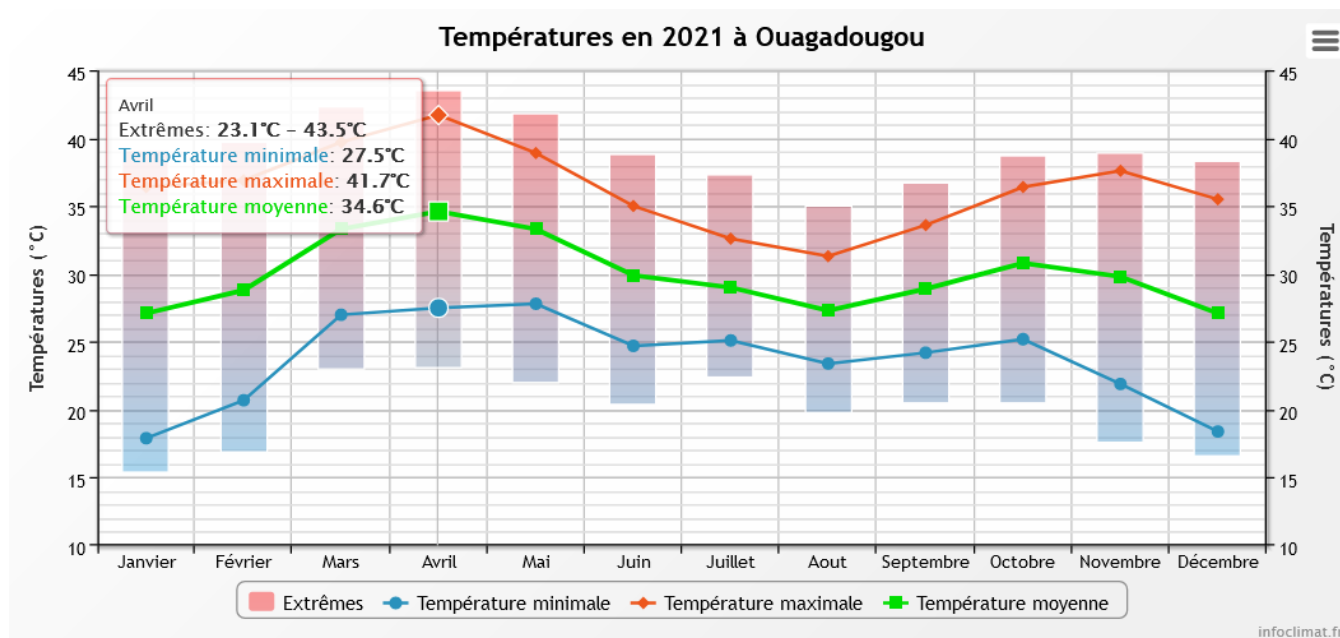


Figure 8 : Moyennes des températures présentes au Burkina Faso en 2021

Source : [infoclimat](http://infoclimat.fr)

2. Température équivalente de dimensionnement des chaussées

D'après le Guide SETRA [1994], le dimensionnement des structure se fait avec une température équivalente θ_{eq} . Elle se définit comme étant la température constante produisant les mêmes dommages cumulés sur la structure pendant une année, que celle que devrait subir la chaussée sous l'effet des changements climatique aux cours d'une année sous les mêmes conditions de trafic. Elle est régie selon la loi de Miner :

$$\frac{1}{N_{(\theta_{eq})}} = \frac{1}{\sum_i n_{i(\theta_i)}} \left[\sum_i n_{i(\theta_i)} \left\{ \frac{\varepsilon_6(\theta_i)}{\varepsilon(\theta_i)} \right\}^{\frac{1}{b}} \times 10^{-6} \right]$$

- $\varepsilon(\theta_i)$ la déformation en traction dans la chaussée sous l'essieu standard de dimensionnement ;
- $\varepsilon_6(\theta_i)$ amplitude de déformation pour laquelle la rupture en flexion sur l'éprouvette est obtenue en laboratoire au bout de un million de cycle pour une probabilité de 50% à la température θ_i pour une fréquence de 25 Hz

- $N_i(\theta_i)$ le nombre de chargements provoquant la rupture en fatigue pour le niveau de déformation $\varepsilon(\theta_i)$
- $n_i(\theta_i)$ le nombre de passages d'essieux équivalents subis par la chaussée, à la température θ_i

Cela se traduit par le fait que lorsque la température augmente, la chaussée est beaucoup plus sollicitée d'où il se crée des déformations plus importantes sous l'effet du trafic qui contribue à faire croître la température équivalente θ_{eq} .

Conclusion

Le parcours de la bibliographie des études réalisées sur les enrobés bitumeux permet de mieux connaître ces matériaux et de comprendre le rôle important d'une formulation adaptée lors de leur usage. Il en ressort que la température joue un rôle non négligeable sur la structure de chaussée et sur les enrobés bitumineux. Lorsqu'elle augmente, elle contribue à la réduction des performances de l'enrobé et à la dégradation des chaussées si les matériaux utilisés sont de mauvaises qualités. Pour cela des études faites en respectant les normes en vigueur et les réalités climatiques auxquelles sont exposés les matériaux doivent être fait en vue d'une meilleure optimisation. Les travaux qui seront effectués dans la suite de ce document auront pour but d'évaluer les performances des bétons bitumineux (BBME et BBSG) en vue de leur optimisation et d'observer leur comportement en structure de chaussée lorsqu'ils sont soumis à des températures élevées et variables, afin de définir lequel convient le mieux à nos réalités climatiques.

CHAPITRE II : PRESENTATION DU PROJET, MATERIAUX, MATERIELS ET METHODES

Introduction

Ce chapitre fait ressortir la présentation du projet, des matériaux, des matériels et des méthodes utilisés pour l'aboutissement de cette étude. Il sera donc question de faire la description du projet sur lequel va porter cette étude, de présenter les matériels qui ont été utilisés et leurs lieux de provenance ainsi que la méthodologie de travail adopter.

II.1 Présentation de la structure d'accueil

1. Historique

Fondée en 2007 au Burkina Faso par M. Issaka KANAZOE, Globex Construction est une entreprise de génie civil aux perspectives pluridisciplinaires. Basée à Ouagadougou dans la province du Kadiogo, elle s'est distinguée par de nombreuses réalisations dans le secteur des travaux publics, consolidant ainsi sa position en Afrique de l'Ouest. Globex Construction intervient dans divers domaines, notamment le bâtiment, les travaux publics, la location d'engins, et la production de matériaux concassés.

2. Présentation du projet

➤ Situation géographique

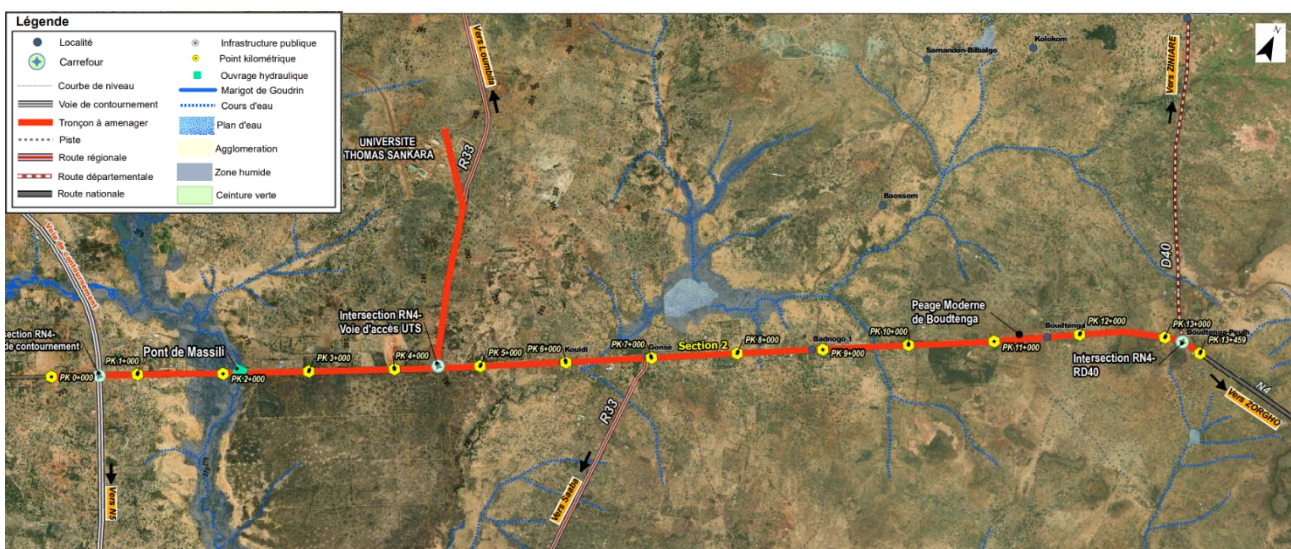


Figure 9 : Situation géographique du projet d'étude

2. Contexte et justification du projet

En vue d'améliorer les infrastructures routières, le Burkina Faso, par le biais du Ministère des Infrastructures et du Désenclavement, a initié un projet pour développer la route nationale N°4. Ce projet comprend l'élargissement en 2x2 voies sur 21,252 km et de la voie d'accès à l'Université Thomas Sankara sur environ 3 km. Le projet est divisé en trois sections. La section 1 regroupe la route départementale N°152 jusqu'à l'intersection de la voie de contournement ; La section 2 se délimite à partir de la voie de contournement jusqu'à l'intersection de la route département N°40 (route de Ziniaré). Quant à la section 3, elle concerne la voie d'accès à l'Université Thomas Sankara qui s'étend jusqu'à 3 km environ. Les travaux seront réalisés par l'entreprise Globex Construction sous la supervision du bureau d'étude AGEIM Conseil.

Notre étude s'intéresse principalement à la section 1 sur la route départementale N°152 qui va du PK début (0+00) au PK 8+500 et se situe dans la commune Saaba.

II.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés pour la fabrication des enrobés bitumineux proviennent de divers horizons. Il s'agit de la formulation d'un béton bitumineux semi grenu et à module élevé pour la couche de roulement.

- Les granulats utilisés pour les bétons bitumineux sont du type 0/10 reparti en fraction 0/4 ; 4/6,3 ; 6,3/10. Ils proviennent de la carrière de Globex Construction situé à Gonsé au Burkina Faso.

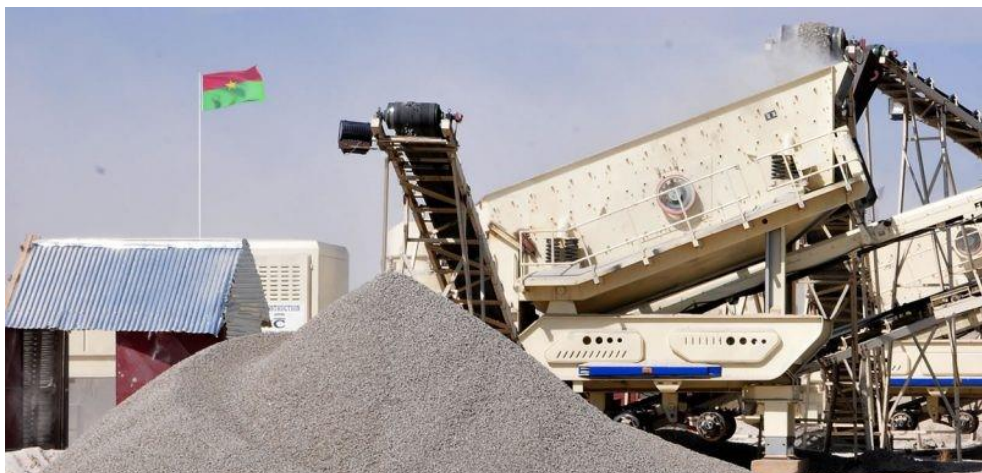


Figure 10 : Carrière de Globex Construction

- Le bitume utilisé est de grade 35/50 provenant de la Société de Multiproduits et de Bitumes (SMB) à Ouagadougou au Burkina Faso.
- Des additifs RW PLAST et des dopes.

II.3 Méthodologie du travail

1. Formulation des enrobés bitumineux

Dans le cas de ce projet les échantillons utilisés ont été transféré au Sénégal et réceptionné par le laboratoire CACO (Consortium Africain de Conseil et d'Organisation) qui s'est chargé de la formulation complète des bétons bitumineux utilisés en couche de roulement. Il s'agissait donc de la formulation d'un BBME 0/10 de classe 1 et de niveau 4 et d'un BBSG 0/10 de classe 2 et de niveau 4. Les résultats de ces formulations nous sont parvenus jusqu'au niveau 3 et ont servi pour notre étude en vue d'évaluer les performances des matériaux et voir s'ils résistent aux conditions climatiques rencontrées dans notre pays.

2. Dimensionnement structurel de la chaussée

Pour notre étude nous ferons un dimensionnement de la structure de chaussée avec le logiciel Alizé en utilisant en couche de roulement un béton bitumineux semi grenu et a module élevé pour une étude comparative. L'idée principale est d'évaluer les déformations qui peuvent s'observer sur la chaussée avec ces deux types de matériaux lorsque la température équivalente augmente. Pour ce faire nous allons créer de nouveaux matériaux sur Alizé ayant les valeurs des modules des bétons bitumineux obtenues lors de la formulation.

Conclusion

En somme, ce chapitre nous a fourni des informations sur le projet de la route nationale n°4 qui sera mise en œuvre par l'entreprise Globex Construction. Aussi, la méthodologie de travail ainsi que les matériels et matériaux pour la suite de cette étude ont été abordé.

CHAPITRE III : RESULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS

Introduction

L'ensemble des essais et études expérimentales réalisés sur les matériaux bitumineux ont conduit à des résultats concluants qui seront présentés et discutés dans ce chapitre. Il sera question de faire une analyse des résultats obtenus lors de la formulation en vue de les optimiser pour qu'ils correspondent mieux à nos réalités climatiques. En supposant que la température ne reste pas constante au fil des années, la suite de l'étude visera à étudier l'impact de la variation de la température sur les déformations que subissent la chaussée. L'étude se fera entre une chaussée dont la couche de roulement est en béton bitumineux à module élevé et une autre en béton bitumineux semi grenu possédant les caractéristiques de la formulation réalisée. Cette étude nous permettra de déterminer lequel de ces deux matériaux correspond le mieux aux réalités rencontrées dans nos pays.

III.1 Formulation des bétons bitumineux

Le tableau 3 propose une synthèse des caractéristiques observées sur les deux matériaux bitumineux. Nous avons un dosage optimal en granulat assez similaire pour les deux matériaux dont le mélange se rapproche de la courbe granulométrique visée pour la formulation.

Tableau 3: Caractéristiques de formulation des bétons bitumineux

Matériaux	BBME	BBSG
MVRe (g/cm ³)	2,442	2,454
MVRg (g/cm ³)	2,651	2,651
Module de richesse K	3,14	3,33
Surface spécifique (%)	10,68	11,04
Bitume 35/50	4,76%	5,1%
RW plast (additif)	0,57%	-
Dope	0,30%	0,30%
Granite 0/4	40,70%	40,81%
Granite 4/6,3	18,93%	18,98%
Granite 6,3/10	35,02%	35,11%

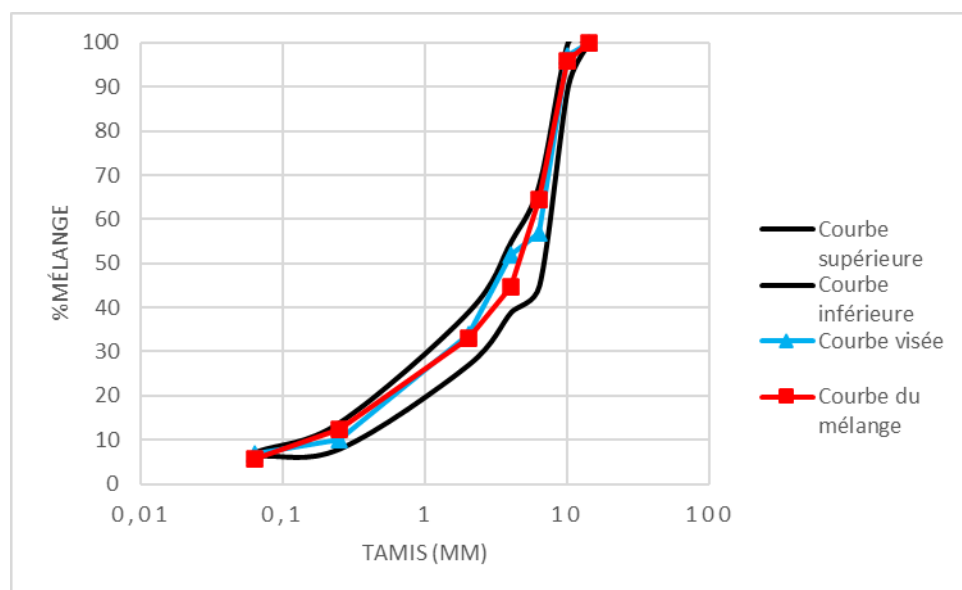


Figure 11 : Courbe granulométrique du BBME

La figure 11 représente l'allure de la courbe granulométrique du BBME par rapport à la courbe visée par le projet et les courbes maximales et minimales à atteindre. La courbe du mélange granulométrique est continue et se rapproche plus ou moins de la courbe visée par le projet mais il se crée une disproportion au niveau des granules de tailles 4/6,3, ce qui stipule un dosage inférieur de pour les grains de cette taille.

1. Essai de presse à Cisaillement Giratoire PCG

L'essai PCG est l'un des essais effectués sur les enrobés pour une formulation de niveau 1. Il vise à mesurer le pourcentage de vide contenu dans un mélange bitumineux lors de son compactage en fonction du nombre de giration effectué par l'éprouvette pendant l'essai. L'essai est réalisé selon la norme NF P 98 252 qui indique qu'un résultat d'essai est la moyenne d'au moins trois déterminations. L'essai est évalué à 60 girations pour les enrobés du type BBSG et BBME pour un résultat compris entre (5-10) en pourcentage de vide. Les tableaux 4 et 5 présentent les résultats obtenus lors de la formulation.

Tableau 4: Résultat de l'essai PCG sur le BBME

Essai PCG BBME						
Giration	Eprouvette 1 H (mm)	Eprouvette 2 H(mm)	Eprouvette 3 H (mm)	H moyen (mm)	Moyenne %vides	Compacité %
5	125,06	123,775	124,202	124,346	19,58	80,4
10	120,766	119,824	120,106	120,232	16,83	83,2
15	118,382	117,575	117,853	117,937	15,21	84,8
20	116,723	116,036	116,331	116,363	14,06	85,9
25	115,449	114,887	115,19	115,175	13,18	86,8
30	114,453	113,942	114,257	114,217	12,45	87,6
40	112,926	112,546	112,872	112,781	11,33	88,7
50	111,771	111,479	111,865	111,705	10,48	89,5
60	110,868	110,652	111,026	110,849	9,79	90,2
80	109,512	109,404	109,833	109,583	8,74	91,3
100	108,508	108,471	108,944	108,641	7,95	92
120	107,785	107,789	108,267	107,947	7,36	92,6
150	106,844	106,956	107,474	107,091	6,62	93,4
200	105,744	105,971	106,597	106,104	5,75	94,2

Tableau 5: Résultat de l'essai PCG sur le BBSG

Essai PCG BBSG						
Giration	Eprouvette 1 H (mm)	Eprouvette 2 H(mm)	Eprouvette 3 H (mm)	H moyen (mm)	Moyenne %vides	Compacité %
5	123,785	123,457	122,304	123,182	18,82	81,2
10	119,773	119,439	118,297	119,170	16,09	83,9
15	117,497	117,16	116,037	116,898	14,46	85,5
20	115,95	115,597	114,484	115,344	13,3	86,7
25	114,762	114,405	113,332	114,166	12,41	87,6
30	113,87	113,474	112,433	113,259	11,71	88,3
40	112,461	112,057	111,045	111,854	10,6	89,4
50	111,391	111,006	110,049	110,815	9,76	90,2
60	110,552	110,164	109,218	109,978	9,07	90,9
80	109,352	108,941	108,038	108,777	8,07	91,9
100	108,443	108,059	107,115	107,872	7,3	92,7
120	107,722	107,357	106,424	107,168	6,69	93,3
150	106,923	106,584	105,655	106,387	6	94
200	106,015	105,66	104,723	105,466	5,18	94,8

Les essais de presse à cisaillement giratoire (PCG) fournissent un pourcentage de vide de 9,79 % pour le BBME et 9,07 % pour le BBSG à 60 girations, pour une compacité de 90,2 % et 90,9 % respectivement (Tableau 4 et 5). D'après les normes présentées dans les tableaux 1 et 2, les spécifications requises des deux matériaux sont atteintes, soit un pourcentage de vide compris entre 5 à 10% pour les deux matériaux. Plus le pourcentage de vide est réduit, plus la compacité est élevée et plus le matériau est résistant. Le BBSG obtenu a une compacité légèrement supérieure que celle du BBME or les deux matériaux ont une distribution granulométrique assez similaire. La figure 12 nous montre l'allure de la courbe d'évolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de giration. Nous pouvons constater que le pourcentage de vide dans l'enrobé diminue considérablement quand on augmente de nombre de giration. Ces résultats permettent d'apprécier les comportements qu'auront les enrobés lors de leur mise en œuvre sur le terrain.

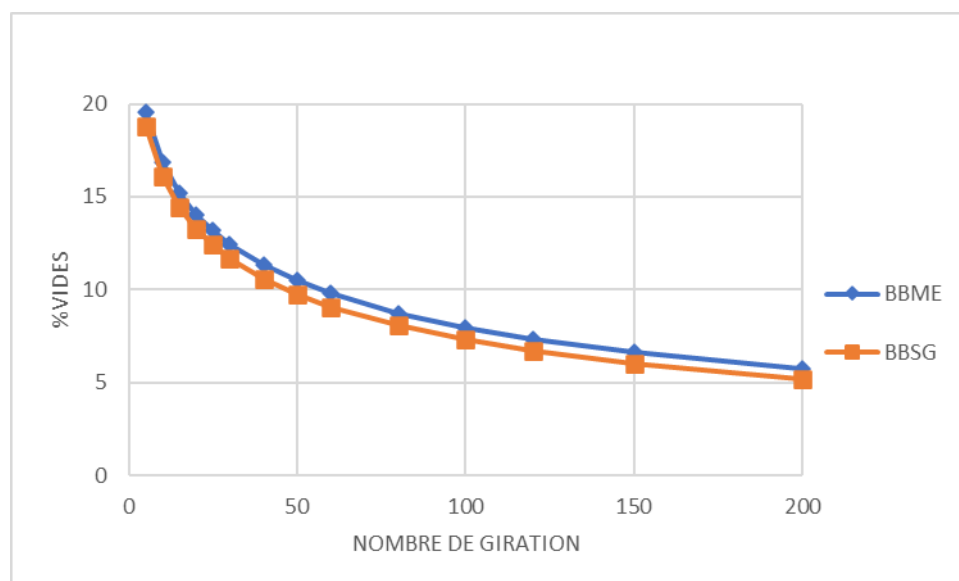


Figure 12 : Courbe d'évolution du pourcentage de vide en fonction du nombre de giration pour l'essai PCG

2. Essai de détermination de la sensibilité à l'eau

L'essai de détermination à la sensibilité à l'eau (essai Duriez) est le deuxième essai à réaliser pour une formulation de niveau 1. L'essai a été réalisé par le moyen de 10 éprouvettes dont 5 ont été immergées et les 5 autres à sec. Chacune d'elle a été mise sous une pression qui a permis d'obtenir des résistances moyennes à partir desquelles la tenue à l'eau a été évaluée. Ci-dessous les résultats des essais :

Tableau 6: Résultat de l'essai Duriez pour le BBME

N° éprouvette		Masse initiale éprouvette (g)	Masse finale éprouvette (g)	Force maximale (KN)	Résistance maximale (MPa)	Résistance moyenne maximale (MPa)
Immergée	10°	999,70	1009,10	43,345	8,623	7,740
	3°	999,90	1011,60	41,557	8,267	
	6°	1000,80	1012,00	31,431	6,253	
	9°	1001,00	1011,40	43,017	8,558	
	5°	1001,50	1014,00	35,182	6,999	
Non immergée	1	1002,20	1002,20	42,285	8,412	8,418
	7	1004,00	1004,20	46,504	9,252	
	8	1002,20	1002,30	40,539	8,065	
	2	1003,40	1003,40	38,991	7,757	
	4	1002,20	1002,20	43,254	8,605	

Tableau 7 : Rapport des résistances de l'essai Duriez pour le BBME

Masse volumique apparente (g/cm ³)	2,207	r/R (%)	91,9
Absorption d'eau après immersion (%)	1,2		

Tableau 8: Résultat de l'essai Duriez sur le BBSG

N° éprouvette		Masse initiale éprouvette (g)	Masse finale éprouvette (g)	Force maximale (KN)	Résistance maximale (Mpa)	Résistance moyenne maximale (Mpa)
Immergée	4°	1007	1018,50	46,932	9,337	9,494
	6°	1008,40	1021,50	48,4	9,629	
	7°	1008,40	1019,10	45,312	9,014	
	8°	1008,80	1018,80	48,034	9,556	
	10°	1008,30	1024,70	49,999	9,933	
Non immergée	1	1010,10	1009,80	51,274	10,201	10,789
	2	1009,80	1009,70	54,598	10,862	
	3	1011,80	1011,80	53,935	10,730	
	5	1010,00	1010,00	51,401	10,226	
	9	1010,30	1010,30	59,946	11,926	

Tableau 9 : Rapport des résistances de l'essai Duriez pour le BBSG

Masse volumique apparente (g/cm ³)	2,223	r/R (%)	88,0
Absorption d'eau après immersion (%)	1,2		

Les essais de tenue à l'eau sont conformes aux spécifications requises sur les tableaux 1 et 2 et les valeurs exigées pour le projet. La résistance obtenue pour le BBME s'élève à 91,9 % > 80 % et pour le BBSG 88 % > 70 %. Cet essai permet d'évaluer la capacité des enrobés à conserver leur propriété mécanique en présence de l'eau. Le BBME a des exigences plus élevées que le BBSG car il est reconnu comme étant un enrobé plus performant.

3. Essai d'orniérage

L'orniérage est une déformation permanente que subit la chaussée suite au passage répété des véhicules poids lourds qui créent un tassement différentiel. Le phénomène d'orniérage peut s'appliquer à différents niveaux sur les couches de chaussée. Ces déformations peuvent affecter uniquement les couches de surface, comme elles peuvent affecter toute la structure de la chaussée. Cependant, lorsque la température augmente, l'effet lubrifiant créé par le bitume devient plus significatif et favorise l'apparition de déformation viscoplastique de l'enrobé [Perraton, 2011]. Cette déformation s'identifie généralement par les traces de roues visibles sur la chaussée. Ce paramètre touche directement la formulation des enrobés, d'où l'importance d'avoir une formule optimale avant la mise en œuvre des enrobés.

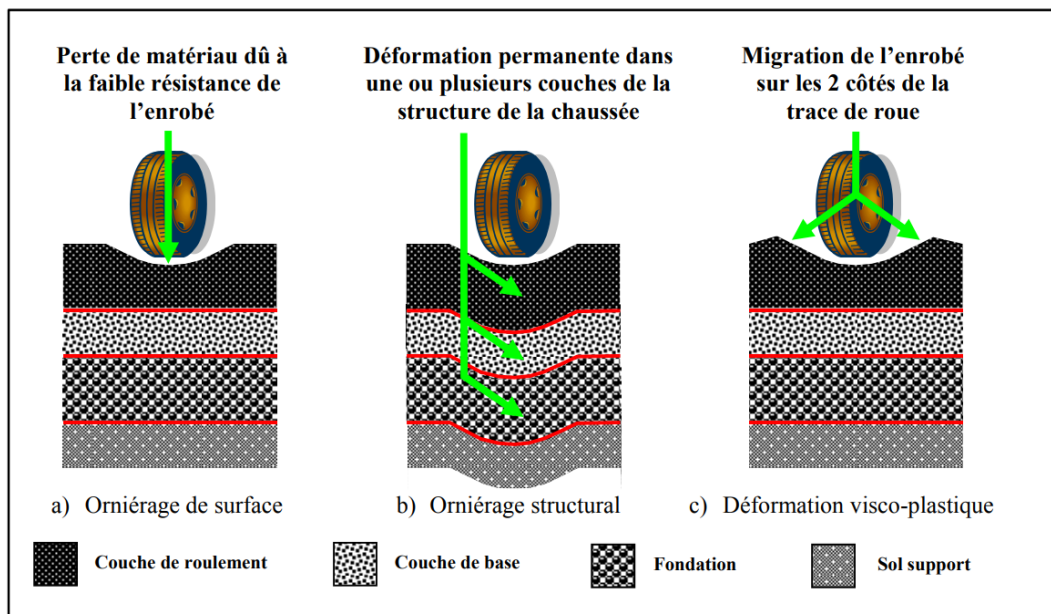


Figure 13 : Les différents types d'orniérage, Mathieu [2012]

L'essai d'orniérage vise donc à évaluer la profondeur d'ornière que peut subir la chaussée à 30 000 cycles sous une température de 60°C par simulation d'un trafic poids lourd sur deux plaques d'essai. Plus la profondeur d'ornière est réduite plus le matériau est capable de résister aux déformations permanentes sous des conditions climatiques sévères. Les tableaux 8 et 9 présentent les résultats obtenus lors de la formulation des enrobés.

Tableau 10 : Profondeur d'ornièrè en fonction du nombre de cycles pour le BBME

Nombre de cycles	30	100	300	1000	3000	10000	30000
Plaque 1 (%)	0,46	0,76	1,08	1,32	1,60	1,88	2,14
Plaque 2 (%)	0,56	0,98	1,38	1,86	2,24	2,60	2,86
Moyenne	0,51	0,87	1,23	1,59	1,92	2,24	2,50

Tableau 11 : Caractéristiques de l'essai d'ornièrage pour le BBME

N° plaque	Epaisseur (mm)	Masse (kg)	MVA (g/cm ³)	Compacité %	% vides
Plaque 1 (%)	50,068	14,001	2,292	93,9	5,528
Plaque 2 (%)	50,940	14,433	2,322	95,1	
Moyenne	50,504	14,217	2,307	94,47	

Tableau 12: Profondeur d'ornièrè en fonction du nombre de cycles pour le BBSG

Nombre de cycles	50	150	500	1500	5000	10000	15000	30000
Plaque 1 (%)	1,22	1,70	2,22	2,82	3,50	4,00	4,36	4,98
Plaque 2 (%)	1,42	1,84	2,28	2,84	3,62	4,22	4,62	5,30
Moyenne	1,32	1,77	2,25	2,83	3,56	4,11	4,49	5,14

Tableau 13: Caractéristiques de l'essai d'orniérage pour le BBSG

N° plaque	Epaisseur (mm)	Masse (kg)	MVA (g/cm ³)	Compacité %	% vides
Plaque 1 (%)	49,897	14,071	2,312	94,2	5,848
Plaque 2 (%)	49,945	14,071	2,309	94,1	
Moyenne	49,921	14,071	2,311	94,15	

Le BBME est reconnu pour sa grande capacité à résister à l'orniérage. Les résultats des essais d'orniérage réalisés sur les deux matériaux montrent pour le BBME, une profondeur d'ornièr de 2,5 % à 30 000 cycles par rapport au BBSG qui va à 5,14 %. Les spécifications mentionnées les tableaux 1 et 2 requièrent une profondeur d'ornièr maximale $\leq 10\%$ et minimale $\leq 5\%$. Ces résultats confèrent au BBME une performance de classe 1,2 ou 3 et au BBSG une performance de classe 1 ou 2.

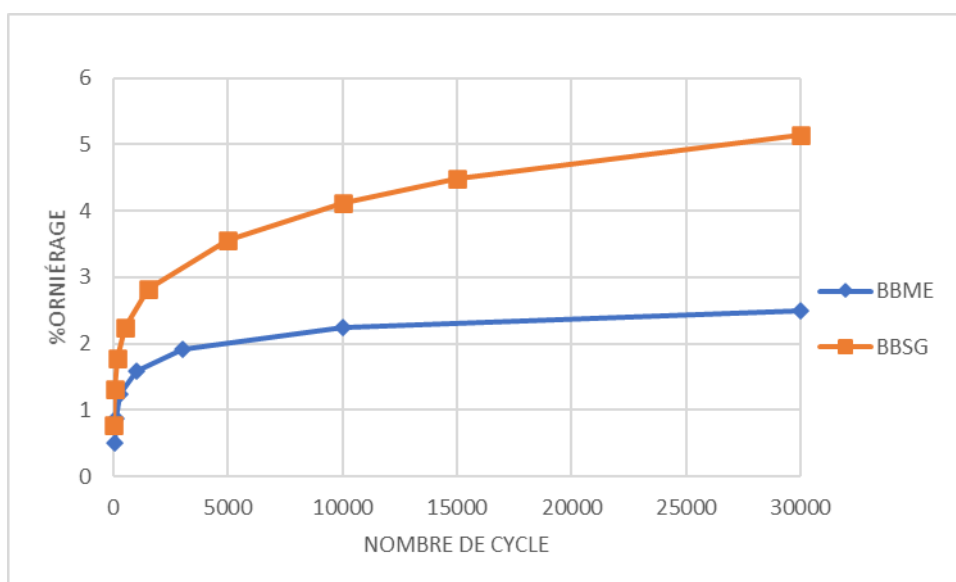


Figure 14 : Courbe de l'évolution de l'orniérage à 30 000 cycles pour le BBME et le BBSG

4. Essai de module de rigidité

Le module de rigidité est l'essai de performance évaluer au niveau 3 des enrobés bitumineux. Cet essai permet de mesurer la rigidité d'un mélange bitumineux au travers de différentes méthodes. La technique utilisée ici est l'essai de flexion en deux points sur des éprouvettes de forme trapézoïdale. Le module de rigidité est une caractéristique mécanique utilisée lors du dimensionnement structural des chaussées. Il a été évalué pour une température de 15°C et une fréquence de 10 Hz. Les résultats obtenus pour le BBME et le BBSG sont les moyennes de 2 et 4 éprouvettes d'essai respectivement. Le tableau 10 montre un récapitulatif de l'essai.

Tableau 14: Résultat de l'essai de module de rigidité du BBME et du BBSG

Désignation	BBME		BBSG			
Eprouvette	7	8	3	7	9	10
Déformation appliquée en μdef	15	15	40	40	40	40
Déplacement appliqué en μm	20	19,6	53	54	54	54
Force appliquée en N	7,8	7,4	14,4	14,8	16,5	14,5
Module de rigidité (MPa)	10231,9	10327,9	7300	7998	8723	8059
Module de rigidité à 15°C – 10 Hz en MPa	10280		8020			

Les essais de module de rigidité sont déterminants pour évaluer la rigidité de la structure. Nous obtenons pour le BBME un module de rigidité égal à 10 280 MPa > 9 000 MPa et pour le BBSG un module égal à 8 020 MPa > 5 500 MPa. Ces valeurs viennent déterminer les classes définitives des enrobés, d'où la classe 1 pour les BBME et la classe 2 pour les BBSG. Les déformations et les forces appliquées sur le BBME sont réduites par rapport à celle appliquées sur le BBSG. Bien qu'il soit d'une classe inférieure au BBSG, le BBME renferme des performances supérieures et plus adaptées aux forts trafics et aux sollicitations climatiques élevées dans les zones tropicales.

III.2 Evaluation des performances des enrobés bitumineux

Le béton bitumineux semi grenu est le matériau le plus utilisé en couche de roulement pour les structures routières au Burkina Faso. Mais la remarque est que les routes n'atteignent pas leur durée de vie et se dégradent très rapidement. Ceci peut être dû aux sollicitations de trafics

ou climatiques, à une mauvaise formulation ou un mauvais choix des matériaux constitutifs, ou encore un sous dimensionnement de la structure de chaussée.

Pour la formulation des matériaux bitumineux utilisés en couche de roulement, certains éléments importants sont à considérer afin de limiter les déformations sur la chaussée, notamment :

- Le trafic auquel sera exposé la chaussée afin de ne pas minimiser le choix des matériaux.
- Les données climatiques : Une formule d'enrobé doit être conçue afin de répondre aux besoins climatiques du pays et résister aux températures auxquelles elle sera exposée.
- Le choix des granulats, des liants et des additifs à utiliser pour optimiser la formule et obtenir des performances plus élevées.

Les résultats de la formulation des deux modèles d'enrobés bitumineux sont conformes aux prescriptions requises d'après le Tableau 1 et 2. La formulation s'est limitée jusqu'au niveau 3 pour le BBME et le BBSG. Les mélanges obtenus reflètent des performances de classe 1 pour le BBME et de classe 2 pour le BBSG. La comparaison entre les deux matériaux nous permet d'affirmer que les performances du BBME sont plus élevées que celles du BBSG malgré la similarité rencontrée au niveau du choix des granulats. Le BBME présente des performances meilleures que le BBSG compte tenu de la substitution d'une partie de sa teneur en bitume par l'ajout d'additif en vue optimiser son rendement (tableau 3).

La qualité et la proportion du bitume utilisé lors de la formulation joue un rôle incontournable dans les performances du mélange. La formulation du BBME s'est faite avec un bitume pur et semi dur de classe 35/50 dosé à **4,76 %** en présence de dope et d'additif RW plast (anti orniérant), dosé à 0,3% et 0,57% respectivement. Ce mélange a produit un module de rigidité de **10 280 MPa**. L'essai de module a été repris pour la même distribution de granulat mais en utilisant cette fois un bitume modifié au polymère (PMB) dosé à 5,10 % avec ajout de dope à 0,3%. Le module de rigidité obtenu pour ce mélange est de **9 015 MPa**. Ces résultats viennent confirmer le fait que le choix du bitume impact grandement les performances de l'enrobé.

III.3 Dimensionnement de la structure de chaussée

1. Choix de la classe de portance du sol et du type de plateforme

La synthèse des essais réalisés sur les matériaux prélevés dans les différents sondages fait ressortir les caractéristiques géotechniques figurant sur le tableau 11. Ces données concernent le PK 0+00 au PK 8+500 sur lequel s'accrochera notre étude. Le constat fait est que le sol est de bonne portance, constitué en majeure partie d'argile et de grave argileuse latéritique. En faisant une moyenne des CBR obtenus à 95% de l'OPM, le résultat obtenu est égal à **23,78**. Selon le guide CEBTP, ce résultat équivaut à une classe de portance de type **S4** dont le module de déformation **EV = 150 MPa**. Pour la suite du dimensionnement nous considérerons cette classe de portance.

Tableau 15: Résultats des sondages géotechniques

Profil	Position	CBR		Désignation géotechnique	
		95%	98%		
1	Gauche	9	14	Sol limoneux	S2
21	Droite	22	31	Sol argileux	S4
40	Gauche	8	12	Sol argileux	S2
56	Droite	21	43	GAL	S4
75	Gauche	33	49	GAL	S5
91	Droite	17	23	Sol argileux	S4
108	Gauche	20	27	GAL	S4
123	Droite	12	17	Sol argileux	S3
140	Gauche	43	58	GAL	S5
157	Droite	56	80	GAL	S5
174	Gauche	12	17	Sol argileux	S3
191	Droite	15	22	Sol argileux	S3
207	Gauche	Cuirasse			
224	Droite	29	44	GAL	S4
242	Gauche	33	50	GAL	S5
261	Droite	10	15	Sol argileux	S2
281	Gauche	9	12	Sol argileux	S2
299	Droite	21	28	Sol argileux	S4
320	Gauche	58	78	GAL	S5

Tableau 16: Classe de portance du sol selon le CEBTP

S1	CBR < 5	Portance très faible
S2	5 < CBR < 10	Portance faible
S3	10 < CBR < 15	Portance moyenne
S4	15 < CBR < 30	Portance bonne
S5	CBR > 30	Portance très bonne

Le guide de terrassement routier (GTR) de 2000 classe la portance des sols en fonction du module de Young. En s'y référant, nous avons une plateforme de type **PF3** donc très peu déformable, pour un module de $120 \leq \text{PF3} \leq 200$.

2. Hypothèses et données du trafic

Le comptage routier pour ce projet a été effectué en 2021 et la mise en service de la route était initialement prévue pour l'année 2023.

- $\text{TMJ}_{2021} = 1094 \text{ PL/j}$
- $\text{TMJ}_{2023} = 1229 \text{ PL/j}$
- Taux de d'accroissement géométrique $\tau = 6\%$
- Taux d'accroissement arithmétique $i = 7,88\%$
- Coefficient de répartition transversale 2x2 voies = 0,5

a. Calcul du trafic cumulé poids lourds

Selon le « Manuel du renforcement des chaussées souples en pays tropicaux CEBTP LCPC », le facteur de cumule est déterminé par la formule suivante :

$$C = \frac{(1+\tau)^n - 1}{\tau} \text{ avec } n = \text{la durée de service pris égale à 15 ans}$$

$$C = \frac{(1 + 0,06)^{15} - 1}{0,06} = 23,28$$

Le nombre de poids lourd estimé tout au long de la durée de service de la route est calculé de la manière suivante :

$$N = 365 \times TMJ \times C \rightarrow N = 365 \times 1229 \times 23,28 = 10\,443\,059 \text{ PL}$$

En prenant en compte le coefficient de répartition transversale on retient : $10\,443\,059 \times 0,5 =$
5 221 529 PL

Le coefficient d'agressivité permet d'estimer les dommages engendrés par la fatigue de la chaussée. Sa valeur est conciliée dans le tableau ci-dessous en fonction du type de structure.

Tableau 17: Valeur de CAM utilisé pour le dimensionnement des chaussées

TYPES DE STRUCTURES	CAM
Chaussées souples	0,8
Chaussées neuves semi-rigides	1,3
Renforcements bitumineux de chaussées souples	0,8
Chaussées neuves bitumineuses épaisses	1
Chaussées en béton	1,3
Chaussées granulaires (sol, GNT)	1

Pour ce projet le dimensionnement sera celui d'une chaussée bitumineuse épaisse d'où le CAM est pris égal à 1.

En prenant en compte l'effet de fatigue subit par la chaussée, le trafic cumulé poids lourd tout au long de la durée de vie de la route se calcul comme suit :

$$NE = N \times CAM \rightarrow NE = 5,2215 \times 10^6 \text{ PL/j (En nombre d'essieu)}$$

➤ Classe du trafic

Pour cette valeur de trafic obtenue, la classe de trafic correspondante est un trafic **T4** selon le CEBTP. Le catalogue SETRA LCPC classe les routes en deux catégories :

- Voies du réseau structurant (VRS) : autoroute et route express à une chaussée, dimensionnée pour une durée de vie de 30 ans.
- Voies du réseau non structurant (VRNS) : artères interurbaines et autres routes, dimensionnées pour une durée de vie de 20 ans.

Selon le catalogue SETRA [1998], nous nous situons dans le cas d'une voie de type VRNS d'où le trafic cumulé obtenu correspond à une classe de trafic **TC5**.

Tableau 18 : Classe de trafic selon le CEBTP

Classe	T1	T2	T3	T4	T5
Trafic (en millions de poids lourds)	0,5	1,5	4	10	20

Tableau 19 : Classe de trafic selon le SETRA LCPC

Tableau 6: Bornes supérieures des classes de trafic cumulé pour les VRS et le VRNS (en millions de poids lourds)										
VRS	TC ₁ ₃₀	TC ₂ ₃₀	TC ₃ ₃₀	TC ₄ ₃₀	TC ₅ ₃₀	TC ₆ ₃₀	TC ₇ ₃₀	TC ₈ ₃₀		
	0	0,5	1	3	6	14	38	94		
VRNS	TC ₁ ₂₀	TC ₂ ₂₀	TC ₃ ₂₀	TC ₄ ₂₀	TC ₅ ₂₀	TC ₆ ₂₀	TC ₇ ₂₀	TC ₈ ₂₀		
	0	0,2	0,5	1,5	2,5	6,5	17,5	43,5		

3. Choix de la structure de chaussée selon le CEBTP

Pour notre étude nous ferons varier la couche de roulement en intégrant un béton bitumineux semi grenu (BBSG) et un béton bitumineux à module élevé (BBME) et en conservant les mêmes couches pour le reste du corps de la chaussée. Sachant que le sol support est constitué d'un sol de classe S2 par endroit, une couche de forme en graveleux latéritique sera insérée afin d'améliorer les performances de la chaussée. Le tableau 16 montre le modèle de structure choisi selon le CEBTP et le modèle de structure qui sera adopté pour la modélisation de la chaussée.

Tableau 20 : Modèle de structure de la chaussée

Modèle de structure selon le CEBTP	
Couche de roulement : Béton bitumineux	7 cm
Couche de base : Grave Bitume	18 cm
Couche de fondation : Graveleux latérique ou grave naturelle tout venant de concassage	25 cm
Modèle de structure adopté	
Couche de roulement : BBME / BBSG	5 cm
Couche de base : Grave bitume 3	15 cm
Couche de fondation : graveleux latéritique litho-stabilisé	20 cm
Couche de forme : Graveleux latérique	20 cm
Plateforme : PF3	-

Les graveleux latéritiques sont très répandus au Burkina Faso et beaucoup utilisés en construction routière. Pour optimiser ce matériau, il est amélioré par ajout de granite concassé et le mélange obtenu est appelé graveleux latéritique litho-stabilisé.

➤ **Température de dimensionnement**

La température joue un rôle important dans le dimensionnement des chaussées. En effet le comportement mécanique des matériaux bitumineux dépend en grande partie de la température. Ils sont caractérisés par leur module de rigidité qui varie selon que la température augmente ou diminue. Plus la température augmente, plus le module de rigidité diminue ce qui génère sur la chaussée des déformations permanentes qui contribuent à leur dégradation. Au Burkina Faso, il n'a pas été retenu officiellement une température fixe de dimensionnement mais la plupart des bureaux d'étude utilise la température de 30°C pour les études. Par contre, au Sénégal des études officielles ont été réalisées et sont applicables sur tout l'ensemble du territoire Sénégalais. Ils ont à leur disposition un catalogue de

dimensionnement propre à leur pays et la température de dimensionnement utilisée est égale à 34°C.

Pour ce projet routier, les études ont été réalisées à une température de 30°C. Il se peut que cette température soit minimisée et ne réponde pas à nos réalités climatiques. Sur la base des prédictions météorologiques qui annoncent une hausse de la température de 2°C à l'horizon 2030, notre étude visera à faire varier la température équivalente de dimensionnement afin de voir l'impact créer sur la chaussée en termes de déformations. Le dimensionnement sera étudié pour les températures de 30°C, 32°C, 34°C, 36°C et 38°C afin d'évaluer les différentes déformations qui se créent sur la chaussée. Les résultats obtenus permettront de mieux prédire le comportement de la structure de chaussée au fil du temps avec l'augmentation de la température et trouver des solutions appropriées pour répondre aux soucis de dégradations précoces des chaussées.

4. Vérification de la structure de chaussée sur Alizé

Pour le dimensionnement de la chaussée, nous utiliserons comme matériaux en couche de forme et de fondation la GNT car elle reflète les caractéristiques de la grave latéritique litho-stabilisé utilisé au Burkina. Les contraintes de déformations seront d'abord calculées manuellement puis vérifiées avec le logiciel Alizé.

- Contrainte de déformation verticale admissible sur le sol support

$$\varepsilon_{z,adm} = A \times (NE)^{-0,222} \text{ avec } A = 12\ 000 \text{ pour les trafics forts}$$

$$\varepsilon_{z,adm} = 12000 \times (5\ 221\ 529)^{-0,222} = 387,1 \mu\text{def}$$

- Contrainte de déformation horizontale admissible sur les matériaux bitumineux

$$\varepsilon_{t,adm} = \varepsilon_6 \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^b \times \left(\frac{E(10^\circ\text{C})}{E(\theta)}\right)^{0,5} \times Kc \times Kr \times Ks$$

Tableau 21 : Valeurs calculées des déformations admissibles de déformations

T(°C)	BBME ($\varepsilon_{t,adm}$)	BBSG ($\varepsilon_{t,adm}$)
30°C	152,6	152,7
32°C	156,2	156,3
34°C	160,2	160,3
36°C	164,4	164,5
38°C	169,0	169,1

Les valeurs conciliées dans le tableau 17 résumant les déformations horizontales admissibles calculées pour chaque matériau qui sera utilisé dans la structure de la chaussée. Ces valeurs sont plus ou moins semblables à celles définies dans le logiciel Alizé. Les valeurs des différents coefficients ont été obtenues dans les annexes du guide SETRA [1994].

En fonction des différentes températures d'étude, une approximation a été faite pour le BBME et le BBSG, afin d'évaluer leur module de rigidité à ces différentes températures. De nouveaux matériaux possédant des modules de rigidité égaux à ceux obtenus lors de la formulation à 15°C-10 Hz ont été créés sur le logiciel Alizé. Partant sur la base que chaque matériau a une variation du module de rigidité qui lui est propre, nous avons évalué pour chacun en termes de pourcentage la variation du module en se référant aux données disponibles dans la bibliothèque des matériaux du logiciel Alizé. Ces pourcentages ont été appliqués sur les modules obtenus à 15°C-10 Hz lors de la formulation pour définir les différents modules aux températures de dimensionnement.

Tableau 22 : Pourcentage de perte des modules des matériaux en fonctions de la température

Température (°C)	10°C	15°C	20°C	30°C	34°C	36°C	40°C	43°C	45°C
BBSG (%)	133,3	100	66,7	24,1	21,9	20,8	18,6	16,9	15,8
BBME (%)	133,3	100	66,7	24,1	21,9	20,8	18,6	16,9	15,8

Le tableau 22 montre comment les deux matériaux perdent en module de rigidité avec la variation de la température. On peut remarquer que les deux matériaux évoluent pratiquement de la même manière. Pour des températures plus basses, le pourcentage de perte est plus

important et significatif. A partir de 30°C, les taux de perte se retrouvent minimisés, d'où le module de rigidité décroît faiblement quand la température est élevée.

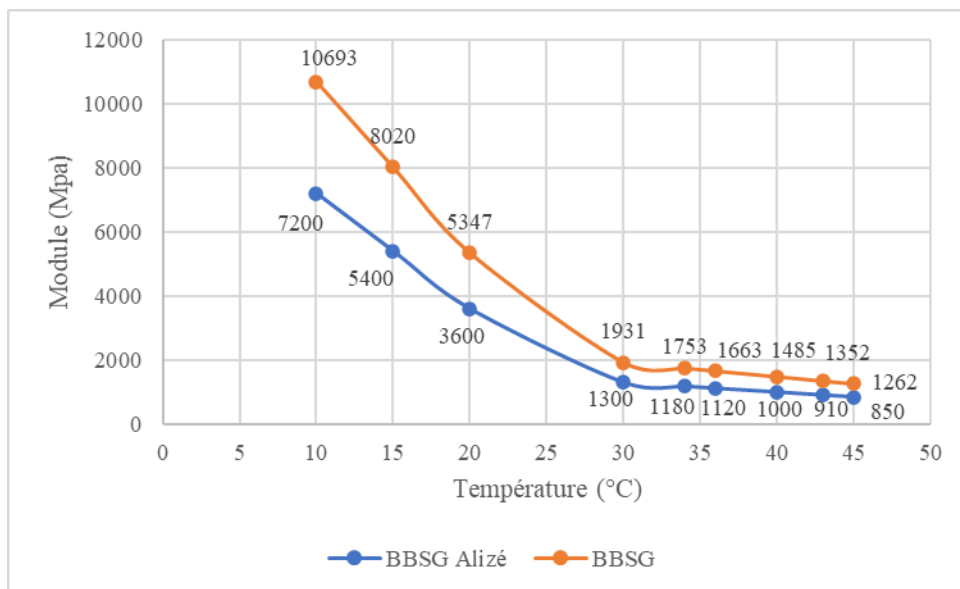


Figure 15 : Courbe comparative de l'évolution du module de rigidité par rapport à la température pour le BBSG

La courbe bleue concerne le BBSG disponible dans la bibliothèque Alizé et la courbe orange représente le BBSG de niveau 2 obtenu lors de la formulation des matériaux bitumineux.

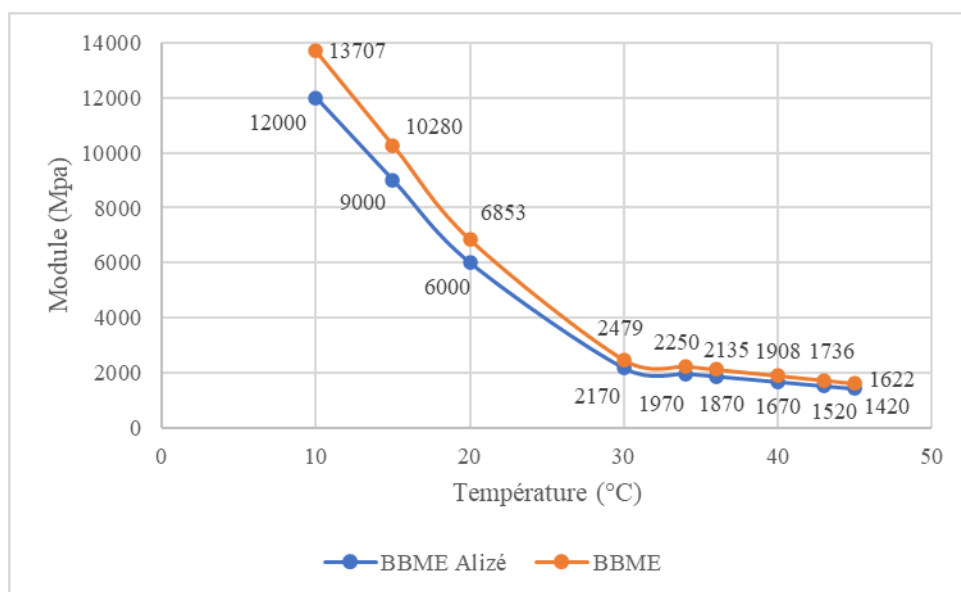


Figure 16 : Courbe comparative de l'évolution du module de rigidité par rapport à la température pour le BBME

La courbe bleue concerne le BBME disponible dans la bibliothèque Alizé et la courbe orange représente le BBME de niveau 1 obtenu lors de la formulation des matériaux bitumineux.

Tableau 23 : Synthèse des résultats du dimensionnement structural

Variante 1 : BBME					
Température (°C)	30°C	32°C	34°C	36°C	38°C
Ep BBME (cm)	5	5	5	5	5
et réelle BBME (μdef)	4,4	-0,7	-7,9	-18,6	-35,3
et adm BBME (μdef)	151,5	151,5	151,5	151,5	151,5
Taux de travail (%)	2,90	0,46	5,21	12,28	23,30
Déflexion / 100 (mm)	28,9	29,3	29,8	30,4	31,2
Variante 2 : BBSG					
Température (°C)	30°C	32°C	34°C	36°C	38°C
Ep BBSG (cm)	5	5	5	5	5
et réelle BBSG (μdef)	10,4	5,7	-1,1	-11,2	-27,5
et adm BBSG (μdef)	151,6	151,6	151,6	151,6	151,6
Taux de travail	6,86	3,76	0,73	7,39	18,14
Déflexion /100 (mm)	29,2	29,6	30,1	30,7	31,4

L'étude comparative entre le BBME et le BBSG sur le dimensionnement structural de la chaussée a été réalisé en gardant toutes les épaisseurs des couches constantes et en faisant varier uniquement la température. Le tableau 19 nous présentes les résultats obtenus. Pour mieux prédire le comportement de la chaussée, la contrainte admissible du dimensionnement à 30°C a été imposée pour toutes les autres températures. Nous pouvons remarquer que à 30°C et 32°C, la structure de chaussée est vérifiée pour les deux variantes. Mais à partir de la température de 34°C jusqu'à 38°C, la contrainte réelle au niveau de la couche de roulement devient négative pour les deux variantes, ce qui signale un risque de déformation en traction.

- Pour toutes ces variations de température, la déflexion mesurée est conforme à la norme requise au Burkina Faso (< 60 mm). Le taux de travail des matériaux sur la figure 17 a été évalué par application de la formule $\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_{tadm}}$ et permet de mieux apprécier les résultats du dimensionnement.

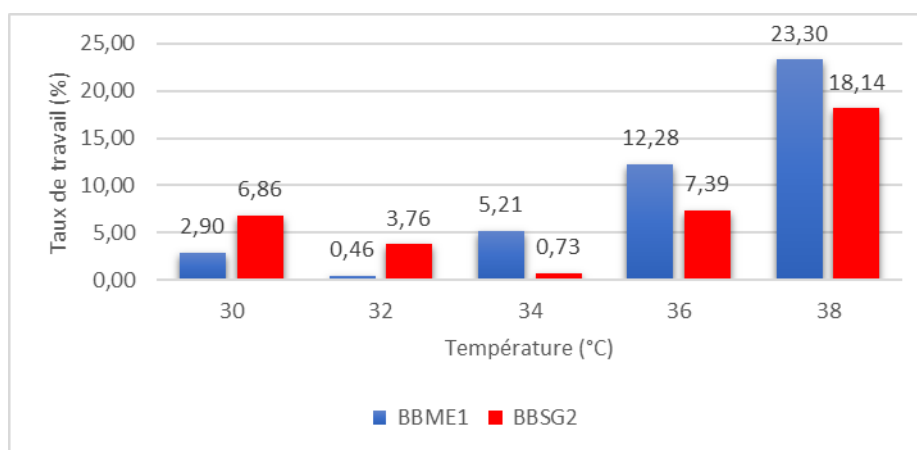


Figure 17: Evolution du taux de travail des matériaux en fonction de l'augmentation des températures

Nous pouvons constater que le taux de travail des deux matériaux augmente avec l'augmentation de la température. A 34°C, il se crée une déformation en traction qui évolue au fur et à mesure que la température augmente, de par la présence de la contrainte négative dans la couche de roulement. Or les figures (15 et 16) rappellent que les matériaux perdent en rigidité avec l'augmentation de la température. Etant donné que le béton bitumineux est un corps absorbant, la quantité de chaleur qu'il emmagasine est supérieure à la quantité de chaleur du milieu ambiant. De ce fait sous l'effet du trafic important, la chaussée peut être exposée à des déformations en compression avec des risques d'ornièrage. La température équivalente de dimensionnement occupe donc une place non négligeable dans la conception des chaussées et doit être choisie avec précaution.

Cette étude vient également confirmer les résultats de la formulation qui a été réalisée sur les bétons bitumineux. A 30°C et 32°C le taux de travail enregistré sur le BBME est respectivement à 2,90% et 0,46%, inférieur à celui enregistré dans le BBSG. Cela signifie qu'il y'a moins de risque de déformation avec l'utilisation de ce matériau. Il peut également

être utilisé pour les températures de 34°C, 36°C et 38°C et faire bénéficier à la structure de sa performance, mieux que le BBSG, à condition d'augmenter les épaisseurs aux niveaux des différentes couches de sorte à supprimer la contrainte de traction présente dans la couche.

Le béton bitumineux à module élevé est donc le matériau le plus adapté pour les pays au climat supérieur à 30°C compte tenu de sa plus grande résistance aux déformations permanentes et de ses performances élevées.

D'après une étude menée par Hornyh [2020] sur une chaussée bitumineuse épaisse pour des températures équivalentes variant de 10°C à 35°C, les résultats montrent comment la chaussée est sollicitée en épaisseur au niveau de la couche de base, lorsque les températures augmentent. Il affirme dans son étude qu'une augmentation de la température de 1°C engendre une réduction de 8% de la durée de vie de la chaussée. Pour une durée de vie de 32 ans à 10°C, il passe à une durée de vie de 5 ans à 35°C. Ceci peut encore témoigner de l'impact non négligeable que la température engendre sur la chaussée. En se basant sur cette théorie dans le cas de notre étude, si une augmentation de 1°C revenait à réduire la durée de vie de la chaussée de 8% alors pour nos températures d'étude, la durée de vie de la chaussée se retrouverait réduite à 32% pour 34°C, 48% pour 36°C et 64% pour 38°C. Pour une durée de vie prévue pour 15 ans, ceci correspondrait à une durée de vie restante de 10,2 ans à 34°C, 7,8 ans à 36°C et 5,4 ans à 38°C. Si donc la température a été minimiser à 30°C, et que nos réalités climatiques sont plus ou moins similaire à celles du Sénégal, cela impliquerait une perte déjà engendrée lors du dimensionnement sur la durée de vie de l'ouvrage de 4,8 ans.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'obtenir des résultats probants pour cette étude. Il en ressort que l'utilisation du BBME correspond mieux aux pays à climat chaud par rapport au BBSG, car il offre une profondeur d'ornièrè réduite. Avec l'augmentation des températures les chaussées sont beaucoup plus sollicitées et leur taux de travail augmentent. Or l'augmentation du taux de travail concourent à un risque de déformation en traction et en compression avec l'effet combiné du trafic et de la température. Il est donc en notre avantage de mener des études sur la température équivalente de dimensionnement applicable afin d'optimiser le rendement de nos routes.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les enrobés bitumineux sont les matériaux les plus utilisés dans le domaine de la construction routière. Ils sont caractérisés par leur classe de performance qui leur confère une certaine durabilité dans le temps en fonction des conditions auxquelles ils sont soumis. Au Burkina Faso, la majorité des routes sont revêtues de béton bitumineux semi grenu. Force est de constater que les routes se dégradent très rapidement sans atteindre la durée de vie fixée. Les dégradations des chaussées peuvent être dû à l'effet grandissant du trafic et de la température rencontrée dans le pays. En effet les enrobés bitumineux perdent en performances lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées. Or le Burkina Faso est un pays possédant un climat chaud et des températures variables au fil des saisons. De plus, les prédictions météorologiques prévoient une hausse de la température de l'ordre de 2°C à l'horizon 2030. Cette augmentation de la température est susceptible d'affecter négativement les chaussées routières si des dispositions ne sont pas prises.

C'est dans ce sens que notre étude a eu pour objectif principal d'évaluer l'impact que crée la température sur le dimensionnement structural des chaussées, mais encore l'évaluation des matériaux utilisés en couche de roulement, en prenant pour référence le projet d'élargissement de la route nationale N°4 au Burkina Faso. Il s'agissait donc de faire une évaluation de la formule d'enrobé utilisée pour le projet et un dimensionnement de la structure de chaussée avec le logiciel Alizé en faisant varier uniquement la température et le matériau en couche de roulement. L'évaluation s'est faite pour des températures de 30°C, 32°C, 34°C, 36°C et 38°C. L'idée est de voir les déformations permanentes susceptibles d'être créées lorsque la chaussée est exposée à des températures élevées et d'avoir une formule optimale d'enrobés qui peuvent résister à de telles conditions climatiques. Les bétons bitumineux qui ont fait l'objet de cette étude sont les BBME et les BBSG.

Les résultats de la formulation des bétons bitumineux révèlent que le BBME est plus adapté aux forts trafics et aux températures élevées. En effet il présente des performances meilleures au BBSG compte tenu de son module élevé s'élevant à 10 280 MPa à 15°C-10Hz contre 8020 MPa pour le BBSG. Le dimensionnement de la structure de chaussée pour des températures variables viennent confirmer ces affirmations. En effet à 30°C et 32°C le BBME présente un taux de travail respectivement égale à 2,90% et 0,46%, inférieur à celui du BBSG, ce qui signifie qu'il est moins susceptible de se déformer par rapport au BBSG. Pour les températures de 34°C, 36°C et 38°C les conditions de vérification de la structure ne sont pas

vérifié mais ceci ne diminue pas la performance du BBME. Il peut être utilisé pour des températures supérieures à 30°C à condition d'augmenter les épaisseurs afin que les contraintes soient vérifiées. L'évaluation du taux de travail a révélé que le taux évolue avec l'augmentation de la température et crée à l'intérieur de la couche une contrainte de traction pour les températures de 34°C, 36°C, 38°C. D'où, avec l'évolution de la température il y'a non seulement des contraintes de traction à l'intérieur de la couche, mais également des contraintes de compression avec des risques de déformations permanentes, dû au passage répété des véhicules poids lourds. La température de dimensionnement joue un rôle important dans la conception routière et doit être évaluée afin d'assurer une meilleure durabilité de la chaussée.

Malgré les résultats significatifs obtenus pendant cette étude, il serait en notre avantage de mûrir ce sujet afin d'obtenir des données répondant plus à nos réalités. Pour cela, les perspectives à envisager pour la suite des études pourraient être :

- De faire des études sur la température équivalente de dimensionnement à appliquer au Burkina Faso afin d'augmenter la durée de vie des chaussées ;
- De trouver le type de bitume répondant mieux à nos conditions climatiques en faisant des essais au laboratoire avec différents grades de bitume
- D'opter pour l'utilisation du béton bitumineux à module élevé pour la conception des chaussées, en priorisant les voies les plus sollicitées par des trafics poids lourds.

BIBLIOGRAPHIE

1. A. Junod, A.-G. Dumont « Formulation et optimisation des formules d'enrobés » .pdf. (s. d.). Consulté 14 juin 2024, à l'adresse <https://core.ac.uk/download/pdf/147934816.pdf>
2. AGIR Laboratoire, Catalogue d'essais in situ et essais en labo. (s. d.). AGIR Laboratoire. Consulté 15 mai 2024, à l'adresse <https://www.agir-labo.fr/catalogue-essais/>
3. Bernard LOMBARDI (2007). Liants hydrocarbonés.pdf. (s. d.). Consulté 20 avril 2024, à l'adresse <https://www.techniques-ingenieur.fr/res/pdf/extract/Encyclopedia/c904?offerId=ti254>
4. Catalogue SETRA 1994 «Conception et dimensionnement des structures de chaussée ».pdf. (s. d.).
5. Catalogue SETRA 1998.pdf. (s. d.).
6. CiviLab : Logiciel des essais de sol et béton. (s. d.). Consulté 5 juin 2024, à l'adresse <https://www.fr.bakhtissoftware.com/extraction-de-bitume.html>
7. Cours "caractéristiques générales des chaussées".pdf. (s. d.).
8. Dang-Truc NGUYEN (2006) Mémoire de thèse « Prédiction des déformation permanentes des couches de surface des chaussées bitumineuses ».pdf. (s. d.).
9. Delorme, J.-L., De La Roche, C., & Wendling, L. (2007). Manuel LPC d'aide à la formulation des enrobés. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. <https://www.academia.edu/download/56216959/ManuelLPC.pdf>
10. Différences entre enrobé à chaud et à froid | Amenexter, Mulhouse. (2021, février 9). Amenexter. <https://www.amenexter.fr/actualites/enrobe-a-froid-et-a-chaud-comment-les-differencier/>
11. Domec, V. (2005). Endommagement par fatigue des enrobés bitumineux en condition de trafic simulé et de température [PhD Thesis, Bordeaux 1]. <https://www.theses.fr/2005BOR13117>
12. Dr Robert. N Hunter, 2000 « Asphalts in road construction ». (s. d.). Scribd. Consulté 13 juin 2024, à l'adresse <https://www.scribd.com/document/370654431/Bituminous-Mixtures-in-Roads-1>
13. Fasfox. (2023, janvier 25). Enrobés, bitumes, goudron, asphalte : Quels sont les différents matériaux constituant la chaussée routière ? <https://www.concretedispatch.eu/blog/materiaux-chaussee-routiere-enrobes-bitumes/>
14. HARKAT Billal et BENDJABALLAH Med El Hadi (2010) Mémoire master «Techniques innovantes en construction routière pour assise de chaussée » .pdf. (s. d.).
15. Horny, P. (s. d.). Directeur de Recherche Docteur ENPC.

16. MEUNIER_Mathieu.pdf. (s. d.). Consulté 18 juin 2024, à l'adresse https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/1095/1/MEUNIER_Mathieu.pdf
17. Ministère de l'environnement, 2021 « Communication sur l'adaptation aux changements climatiques du Burkina Faso ». (s. d.). Consulté 13 juin 2024, à l'adresse <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/burkina-faso-2021-communication-sur-l-adaptation.pdf>
18. NF EN 933-1. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-9331/essais-pour-determiner-les-caracteristiques-geometriques-des-granulats-part/fa163900/39221>
19. NF EN 933-3. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-9333/essais-pour-determiner-les-caracteristiques-geometriques-des-granulats-part/fa163867/38938>
20. NF EN 1097-1. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-10971/essais-pour-determiner-les-caracteristiques-mecaniques-et-physiques-des-gra/fa163865/37734>
21. NF EN 1097-2. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-10972/essais-pour-determiner-les-caracteristiques-mecaniques-et-physiques-des-gra/fa192649/85563>
22. NF EN 1426. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 27 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1426/bitumes-et-liants-bitumineux-determination-de-la-penetrabilite-a-laiiguille/fa176340/1703>
23. NF EN 1427. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1427/bitumes-et-liants-bitumineux-determination-du-point-de-ramollissement-metho/fa176342/1705>
24. NF EN 12607-1. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-126071/bitumes-et-liants-bitumineux-determination-de-la-resistance-au-durcissement/fa176328/44523>
25. NF EN 12697-12. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1269712/melanges-bitumineux-methodes-dessai-partie-12-determination-de-la-sensibili/fa060179/83314>
26. NF EN 12697-22+A1. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1269722-a1/melanges-bitumineux-methodes-dessai-partie-22-essai-dornierage/fa208593/366516>
27. NF EN 12697-24. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1269724/melanges-bitumineux-methodes-dessai-pour-melange-hydrocarbure-a-chaud-parti/fa060245/83302>
28. NF EN 12697-26+A1. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1269726-a1/melanges-bitumineux-methodes-dessai-partie-26-rigidite/fa205885/340374>

29. NF EN 12697-31. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1269731/melanges-bitumineux-methodes-dessai-partie-31-confection-deprouvettes-a-la-fa192280/84407>
30. NF EN 13108-1. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-131081/melanges-bitumineux-specifications-pour-le-materiau-partie-1-enrobes-bitumi/fa179881/335220>
31. NF P 98 252—PCG PDF | PDF | Dureté (matériau) | Asphalte. (s. d.). Scribd. Consulté 21 mai 2024, à l'adresse <https://fr.scribd.com/document/470277328/NF-P-98-252-PCG-pdf>
32. NF P98-150-1. (s. d.). Afnor EDITIONS. Consulté 23 juin 2024, à l'adresse <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-p981501/enrobes-hydrocarbonees-execution-des-assises-de-chaussees-couches-de-liaison/fa166684/35522>
33. Perraton, D., Di Benedetto, H., Sauzéat, C., De La Roche, C., Bankowski, W., Partl, M., & Grenfell, J. (2011). Rutting of bituminous mixtures : Wheel tracking tests campaign analysis. *Materials and Structures*, 44(5), 969-986. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9680-y>
34. Safia, K. (2013). Valorisation du sable de dunes en couche de roulement sable-bitume. Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie. Annexe I. <https://scholar.archive.org/work/42gzbrw6mrbc1pqnnwbfvuyrm/access/wayback/http://bu.univ-ouargla.dz/Khengaoui-Safia.pdf?idthese=4274>

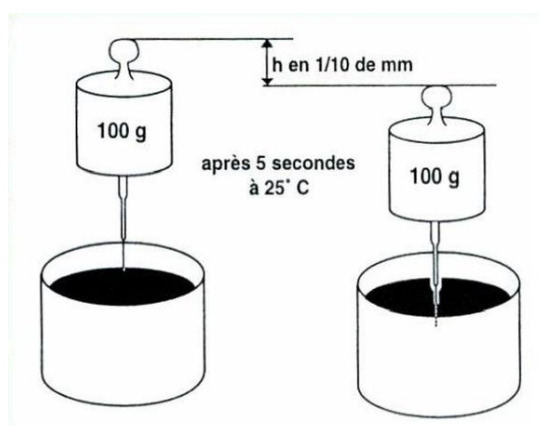
ANNEXES

Annexe 1 : Définitions et mode opératoire des essais

Essais de caractérisation du bitume

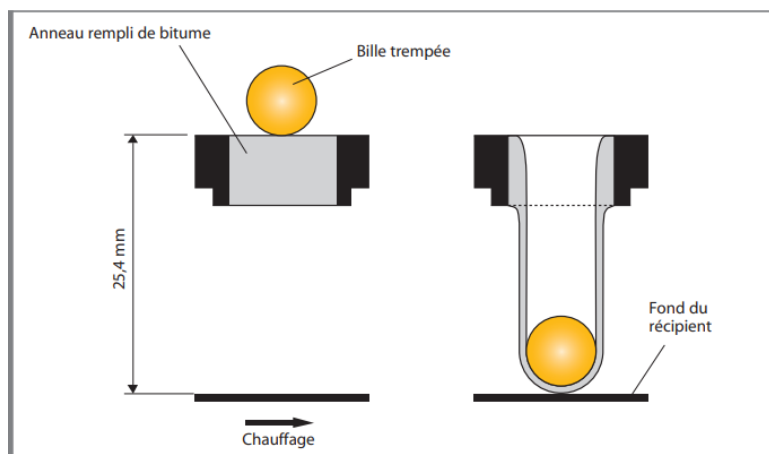
➤ Essai de pénétrabilité à l'aiguille (NF EN 1426)

La pénétrabilité est un essai qui permet de définir la classe d'un bitume. L'essai se réalise grâce à une aiguille normalisée de 1mm de diamètre, pour laquelle on évalue la profondeur d'enfoncement en dixièmes de millimètre, pour une durée de 5 s sous une charge de 100 g, appliquée sur une portion de bitume à 25°C. L'appellation du bitume est définie par la borne supérieure et inférieure lors de l'enfoncement. L'essai est réalisé à l'aide d'un pénétromètre à aiguille [Bernard, 2007].



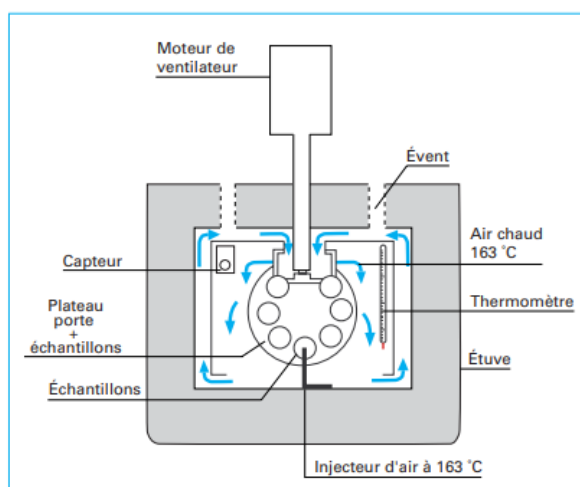
➤ La Température de ramollissement Bille et Anneau (TBA) (NF EN 1427)

Ce test vise à déterminer la température à laquelle la poche de bitume, formée pendant la chute de la bille, atteint la plaque de référence située à 25,4 mm sous l'anneau de bitume. Le bain est chauffé à un rythme constant de 5 °C par minute. Le point de ramollissement constitue la deuxième caractéristique essentielle d'un bitume. Dans ce test, plus le point de ramollissement est élevé, plus le bitume est dur [Bernard, 2007].



➤ **Essai de la résistance au durcissement sous l'effet de la chaleur et de l'air RTFOT (NF EN 12607-1)**

L'essai RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) consiste à mesurer la résistance au durcissement du bitume pendant la phase d'enrobage (court terme). Il mesure les effets de la chaleur et de l'air sur une couche mince de bitume en renouvellement permanent. Pratiquement, une petite quantité de bitume est coulée dans un flacon à ouverture réduite placé horizontalement sur un disque rotatif disposé verticalement au fond d'une étuve ventilée. La température est réglée à 163 °C et à chaque tour, c'est-à-dire toutes les 4 secondes, l'ouverture du flacon passe devant un jet d'air chaud. Le test dure 75 minutes. Après essai, toutes les caractéristiques du bitume peuvent être évaluées. Principalement, l'évolution de la pénétrabilité, celle du point de ramollissement et celle de la masse du bitume, sont prises en considération [Bernard, 2007].



Essais de caractérisation des granulats

➤ Détermination du coefficient d'aplatissement (NF EN 933-3)

Cet essai nous permet de déterminer la forme des granulats. Les granulats sont tamisés au moyen de tamis à mailles carrées afin de les répartir en classes granulaire d/D . Chacune des classes obtenues sont tamisées individuellement sur la grille à fente parallèle d'écartement $E = d/1.58$. Le coefficient d'aplatissement est le rapport de la masse passant à travers le tamis sur la masse de la classe granulaire (AGIR Laboratoire).

➤ Résistance à la fragmentation : Essai Los Angeles (NF EN 1097-2)

L'évolution des granulats dans la structure de chaussée se fait par frottement mutuel et par chocs. Les chocs ou les poinçonnements conduisent à une fragmentation avec formation de particules de toutes dimensions. L'essai a pour but de mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1.6 mm produite en soumettant un échantillon de granulats de masse sèche 5 000 grammes aux chocs de 11 boulets normalisés et aux frottements réciproques dans un tambour en rotation. L'essai Los Angeles est donc le pourcentage de fines produites pendant l'essai (AGIR Laboratoire).



Tambour Los Angeles

➤ Essai Micro Deval Normes (NF EN 1097-1)

Les frottements créés dans la chaussée par les granulats conduisent à une usure par formation de petites particules inférieures à 0.1 mm. Cette usure augmente en présence d'eau pour certaines roches. Le pourcentage micro-Deval représente la quantité d'éléments fins inférieurs

à 1,6 mm qui se produit au cours de l'essai lorsque le matériau est soumis à une usure par frottement au moyen d'acier dans un cylindre (AGIR Laboratoire).

Niveaux de Formulation des enrobés bitumineux

➤ Niveau 0

– Détermination de la teneur en liant

La détermination de la teneur en liant se fait en laboratoire par extraction du bitume dans l'enrobé afin de déterminer la quantité de liant réellement utilisée dans le mélange bitumineux. Cet essai vise en la détermination d'une teneur en liant optimale dans un enrobé bitumineux. Il consiste en la détermination simultanée de la teneur en eau et en liant d'un enrobé en les extrayant à chaud à l'aide d'un solvant qui forme avec l'eau un mélange azéotrope. Le poids du liant est calculé par différence entre celui de l'échantillon et celui du granulat et de l'eau (CiviLab).

– Essai granulométrique par tamisage (NF EN 933-1)

L'essai consiste à séparer l'ensemble des grains du matériau au moyen d'une série de tamis décroissantes du haut vers le bas, empilé les uns sur les autres. Le matériau étudié est placé en partie supérieure de la colonne puis séparé par vibration suivie d'un tamisage manuel. Les refus sur chaque tamis sont enregistrés (AGIR Laboratoire).

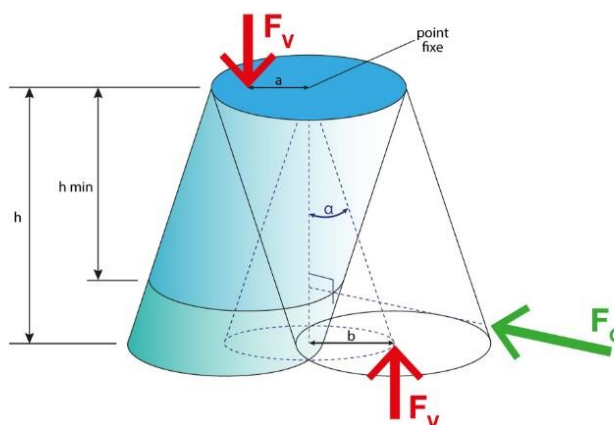
➤ Niveau 1

Le mélange doit satisfaire une fenêtre de pourcentages de vides à l'essai **de Presse à Cisaillement Giratoire** ainsi que le seuil de **tenue à l'eau**. Ce niveau est commun à toutes les épreuves de formulation. Dans le cas d'applications à faible niveau de sollicitation, le niveau 1 peut être suffisant sans essai complémentaire. La tenue à l'eau est mesurée selon NF EN 12697-12, méthode B en compression [Delorme, 2007].

– Principes de l'essai de Presse à Cisaillement Giratoire PCG (NF EN 12697-31)

Le mélange hydrocarboné est préparé en laboratoire et placé dans un moule cylindrique de 150 mm ou 160 mm de diamètre à la température d'essai (environ 130 °C à 160 °C). Une pression verticale de 0,6 MPa est appliquée sur le sommet de l'éprouvette. Simultanément,

l'éprouvette est inclinée d'un angle faible, soit environ 1° à l'externe ou $0,82^\circ$ à l'interne, et soumise à un mouvement circulaire. Ces actions combinées exercent un compactage par pétrissage. On observe alors l'augmentation de la compacité, mesurée par la diminution du pourcentage de vides, en fonction du nombre de tours [Delorme, 2007].



– Principes de l'essai de tenue à l'eau Duriez (NF EN 12697-12)

Le mélange hydrocarboné est compacté dans un moule cylindrique par une pression statique à double effet. Une partie des éprouvettes est conservée sans immersion à température (18°C) et hygrométrie contrôlée, l'autre partie est conservée immergée. Chaque groupe d'éprouvette est écrasé en compression simple [Delorme, 2007].

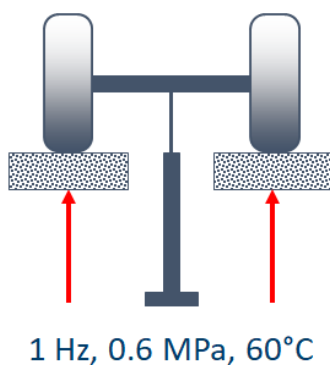


➤ Niveau 2

Ce niveau de formulation vise à rajouter au niveau 1, les essais d'orniérage qui ont pour but d'évaluer la profondeur d'ornière qui peuvent être observées sur la chaussée sous les conditions de trafic et de température.

– Principe de l'essai d'orniérage (NF EN 12697-22)

Le corps d'épreuve est une plaque parallélépipédique de 5 cm ou de 10 cm d'épaisseur, selon que l'épaisseur de mise en œuvre de l'enrobé est inférieure ou supérieure à 5 cm. Cette plaque est soumise au trafic d'une roue équipée d'un pneumatique (fréquence : 1 Hz, charge : 5 kN, pression : 6 bars), dans des conditions sévères de température (60 °C) [Delorme, 2007].



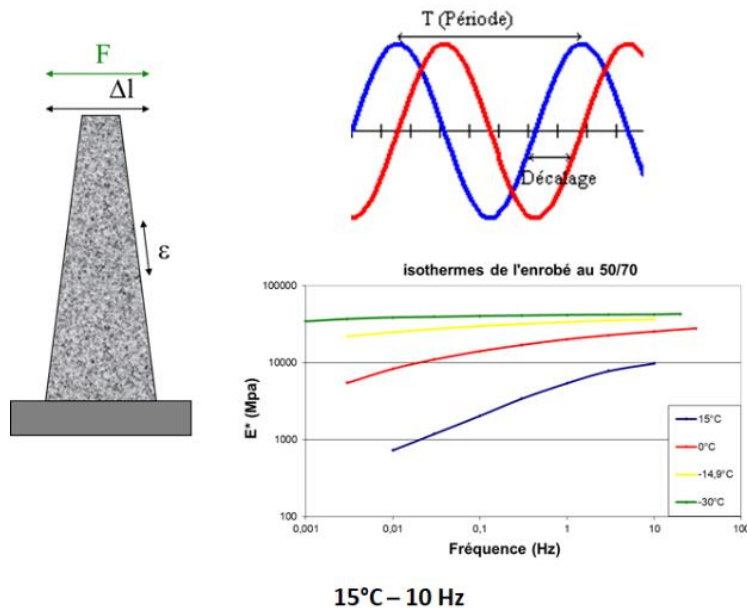
➤ Niveau 3

La formulation du niveau 3 des enrobés comprends l'ensemble des essais du niveau 2 ainsi que la détermination du module de rigidité. La connaissance de la rigidité du mélange est très importante pour des projets de grandes envergures ainsi que pour les couches fortement sollicitées. Ce module est mesuré à une température de 15°C et à une fréquence de 10 Hz ou un temps de chargement de 0,02s. Ce sont des caractéristiques qui interviennent directement dans les modèles de calcul de dimensionnement des chaussées.

– Principes de l'essai de module en deux points de flexion (NF EN 12697-26)

Cette méthode permet de mesurer le module de rigidité des mélanges hydrocarbonés en utilisant un essai de flexion sur une éprouvette console. Une force sinusoïdale, $F = F_0 \times \sin(\omega t)$, ou une déflexion sinusoïdale, $Z = Z_0 \times \sin(\omega t)$, est appliquée à l'extrémité libre d'une éprouvette

fixée à sa base sur un support rigide. La force F_0 ou la déflexion Z_0 doit être choisie de manière à induire une déformation $\varepsilon \leq 50 \times 10^{-6}$ dans la zone de contrainte maximale, assurant ainsi que le matériau reste dans un domaine de comportement linéaire. Le module complexe du mélange est déterminé à différentes températures et fréquences en fonction de F_0 , Z_0 et de l'angle de phase ϕ .



➤ Niveau 4

La formulation de niveau 4 prend en compte tous les niveaux inférieurs rajouté à l'essai de fatigue des enrobés. Cet essai intervient dans le cas des grands chantiers ou lorsque la couche concernée est sollicitée en fatigue.

– Principe de l'essai de fatigue (NF EN 12697-24)

Une éprouvette trapézoïdale est soumise, à une température et pour une fréquence de chargement fixées, à une déformation imposée. Lorsque la contrainte appliquée pour maintenir la déformation constante est diminuée de moitié, l'éprouvette est considérée comme endommagée au nombre de cycles considéré [Delorme, 2007].

Annexe 2 : Résultats du dimensionnement structural de la variante 1 en BBME

Cette annexe présente les résultats du dimensionnement avec le BBME en couche de roulement pour des températures de 30°C ; 32°C ; 34°C ; 36°C ; 38°C respectivement. Les contraintes admissibles sont affichées par ordre des couches.

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	2478,0	0,400	0,000	28,6	0,232	-23,9	0,659
			collé 0,050	4,4	0,243	99,4	0,609
0,150	2700,0	0,400	0,050	4,4	0,262	90,0	0,609
			collé 0,200	-124,8	-0,404	164,2	0,153
0,200	600,0	0,400	0,200	-124,8	-0,012	257,0	0,153
			collé 0,400	-114,0	-0,065	173,8	0,058
0,200	300,0	0,400	0,400	-114,0	-0,013	219,0	0,058
			collé 0,600	-97,7	-0,025	170,0	0,032
infini	150,0	0,400	0,600	-97,7	-0,002	220,4	0,032

Déflexion = 28,9 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 440,4 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

10-EpsiT= 151,5

11-EpsiT= 133,5

12-Epsiz= 387,1

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	2363,8	0,400	0,000	21,7	0,207	-26,8	0,659
			collé 0,050	-0,7	0,234	112,2	0,610
0,150	2360,0	0,400	0,050	-0,7	0,234	112,4	0,610
			collé 0,200	-130,6	-0,356	175,8	0,161
0,200	600,0	0,400	0,200	-130,6	-0,013	269,2	0,161
			collé 0,400	-117,6	-0,067	178,3	0,060
0,200	300,0	0,400	0,400	-117,6	-0,014	224,9	0,060
			collé 0,600	-100,0	-0,026	173,7	0,033
infini	150,0	0,400	0,600	-100,0	-0,002	225,1	0,033

Déflexion = 29,3 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 405,8 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

4-EpsiT= 155,1

5-EpsiT= 142,8

6-Epsiz= 387,1

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	2249,6	0,400	0,000	11,9	0,177	-31,3	0,659
			collé 0,050	-7,9	0,224	128,8	0,610
0,150	2020,0	0,400	0,050	-7,9	0,205	143,1	0,610
			collé 0,200	-137,0	-0,303	190,3	0,170
0,200	600,0	0,400	0,200	-137,0	-0,013	283,1	0,170
			collé 0,400	-121,7	-0,069	183,4	0,062
0,200	300,0	0,400	0,400	-121,7	-0,014	231,4	0,062
			collé 0,600	-102,6	-0,026	177,8	0,034
infini	150,0	0,400	0,600	-102,6	-0,002	230,3	0,034

Déflexion = 29,8 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 368,9 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

13-EpsiT= 159,0

14-EpsiT= 154,3

15-Epsiz= 387,1

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	2135,4	0,400	0,000	-2,2	0,139	-38,4	0,659
			collé 0,050	-18,6	0,212	151,0	0,610
0,150	1680,0	0,400	0,050	-18,6	0,174	187,1	0,610
			collé 0,200	-144,2	-0,244	209,1	0,180
0,200	600,0	0,400	0,200	-144,2	-0,013	299,2	0,180
			collé 0,400	-126,4	-0,071	189,2	0,064
0,200	300,0	0,400	0,400	-126,4	-0,014	238,9	0,064
			collé 0,600	-105,7	-0,027	182,5	0,035
infini	150,0	0,400	0,600	-105,7	-0,002	236,5	0,035

Déflexion = 30,4 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 329,0 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

16-EpsiT= 163,2

17-EpsiT= 169,2

18-Epsiz= 387,1

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	2021,2	0,400	0,000	-23,9	0,088	-50,4	0,659
			collé 0,050	-35,3	0,196	182,7	0,610
0,150	1340,0	0,400	0,050	-35,3	0,144	254,3	0,610
			collé 0,200	-152,1	-0,178	235,1	0,193
0,200	600,0	0,400	0,200	-152,1	-0,012	318,0	0,193
			collé 0,400	-131,9	-0,074	196,1	0,067
0,200	300,0	0,400	0,400	-131,9	-0,015	247,9	0,067
			collé 0,600	-109,5	-0,028	188,3	0,036
infini	150,0	0,400	0,600	-109,5	-0,002	244,0	0,036

Déflexion = 31,2 mm/100
entre-jumelage
Rdc = 285,4 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

- 19-EpsiT= 167,8
- 20-EpsiT= 189,5
- 21-EpsiZ= 387,1

Annexe 3 : Résultats du dimensionnement structural de la variante 2 en BBSG

Cette annexe présente les résultats du dimensionnement avec le BBSG en couche de roulement pour des températures de 30°C ; 32°C ; 34°C ; 36°C ; 38°C respectivement. Les contraintes admissibles sont affichées par ordre des couches.

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	1931,0	0,400	0,000	41,1	0,213	9,9	0,659
	collé		0,050	10,4	0,216	122,7	0,613
0,150	2700,0	0,400	0,200	10,4	0,292	80,5	0,613
	collé		0,200	-125,9	-0,405	166,0	0,158
0,200	600,0	0,400	0,200	-125,9	-0,010	261,3	0,158
	collé		0,400	-116,4	-0,066	177,4	0,060
0,200	300,0	0,400	0,600	-116,4	-0,013	223,9	0,060
	collé		0,600	-99,9	-0,026	173,8	0,033
infini	150,0	0,400	0,600	-99,9	-0,002	225,4	0,033

Déflexion = 29,2 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 443,1 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

1-EpsiT= 151,6

2-EpsiT= 133,5

3-EpsiZ= 387,1

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	1841,8	0,400	0,000	34,4	0,193	8,7	0,659
	collé		0,050	5,7	0,210	136,6	0,614
0,150	2360,0	0,400	0,200	5,7	0,261	102,5	0,614
	collé		0,200	-131,6	-0,356	177,7	0,165
0,200	600,0	0,400	0,200	-131,6	-0,011	273,5	0,165
	collé		0,400	-120,0	-0,068	181,9	0,061
0,200	300,0	0,400	0,400	-120,0	-0,014	229,6	0,061
	collé		0,600	-102,2	-0,026	177,5	0,034
infini	150,0	0,400	0,600	-102,2	-0,002	230,1	0,034

Déflexion = 29,6 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 408,6 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

1-EpsiT= 155,2

2-EpsiT= 142,8

3-EpsiZ= 387,1

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	1752,6	0,400	0,000	24,8	0,169	6,0	0,659
	collé		0,050	-1,1	0,202	154,4	0,614
0,150	2020,0	0,400	0,200	-1,1	0,229	132,7	0,614
	collé		0,200	-137,9	-0,302	192,3	0,174
0,200	600,0	0,400	0,200	-137,9	-0,011	287,4	0,174
	collé		0,400	-123,9	-0,070	186,8	0,063
0,200	300,0	0,400	0,400	-123,9	-0,014	236,0	0,063
	collé		0,600	-104,8	-0,027	181,5	0,035
infini	150,0	0,400	0,600	-104,8	-0,002	235,3	0,035

Déflexion = 30,1 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 371,7 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

4-EpsiT= 159,1

5-EpsiT= 154,3

6-EpsiZ= 387,1

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	1663,4	0,400	0,000	10,5	0,137	0,9	0,659
	collé		0,050	-11,2	0,193	178,0	0,614
0,150	1680,0	0,400	0,200	-11,2	0,195	176,3	0,614
	collé		0,200	-145,0	-0,243	211,2	0,185
0,200	600,0	0,400	0,200	-145,0	-0,011	303,5	0,185
	collé		0,400	-128,5	-0,072	192,5	0,065
0,200	300,0	0,400	0,400	-128,5	-0,014	243,3	0,065
	collé		0,600	-107,8	-0,027	186,2	0,036
infini	150,0	0,400	0,600	-107,8	-0,002	241,4	0,036

Déflexion = 30,7 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 331,8 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

7-EpsiT= 163,3

8-EpsiT= 169,2

9-EpsiZ= 387,1

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	1574,2	0,400	0,000	-11,7	0,095	-8,8	0,659
	collé		0,050	-27,5	0,182	211,4	0,615
0,150	1340,0	0,400	0,050	-27,5	0,160	243,3	0,615
	collé		0,200	-152,8	-0,176	237,5	0,197
0,200	600,0	0,400	0,200	-152,8	-0,010	322,3	0,197
	collé		0,400	-133,9	-0,075	199,0	0,068
0,200	300,0	0,400	0,400	-133,9	-0,015	252,0	0,068
	collé		0,600	-111,5	-0,028	191,8	0,037
infini	150,0	0,400	0,600	-111,5	-0,002	248,8	0,037

Déflexion = 31,4 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 287,9 m

Imprimer Enregistrer

Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc M... X

10-EpsiT= 167,9

11-EpsiT= 189,5

12-EpsiZ= 387,1