

NOTE D'INFORMATION TECHNIQUE**ANALYSE DE LA PATHOLOGIE D'ORNIÉRAGE SUR LES CHAUSSÉES BITUMINEUSES DANS DES SECTION LONGUES A FORTE PENTE ET SON APPLICATION DANS LA CONCEPTION****ANALYSIS OF RUTTING DISEASE ON BITUMIOUS PAVEMENTS IN LONG SECTIONS WITH STEEP SLOPE AND ITS APPLICATION IN DESIGN****(CSCEC en Algérie)**

Réception : 27/12/2022

Acceptation : 26 /03/2023

Publication : 20/06/2023

¹HE XU, Ingénieur en travaux publics, Ingénieur en chef de la direction des travaux publics²SUN JIAN, Ingénieur en travaux publics, Directeur général adjoint³GAO YUNFEI, Ingénieur en Génie civil, Chef de chantier⁴WANG CHONG, Ingénieur en Génie civil, Chef de chantier⁵ZHU LANGZI, Ingénieur en tunnels, Responsable du département technique⁶ADELI MIERZHATI, Ingénieur en travaux publics, Responsable du département de qualité^{1,2,3,4,5,6} CSCEC Algérie, Cité des 56 logements, Rue des frères CHIKIROUS, Staoueli**Résumé**

Cet article analyse les dégradations causées par l'orniérage sur les chaussées bitumineuses dans des sections autoroutières longues à forte pente, identifie les principales causes de la provenance de l'orniérage et étudie l'application d'un béton bitumineux à module élevé résistant à l'orniérage dans le contexte du projet de dédoublement de la RN01 entre Chiffa et Berrouaghia en Algérie.

Mots clés : Chaussée bitumineuse, long tronçon à forte pente, orniérage, BBME.**Abstract**

This article analyzes the damage caused by rutting on bituminous pavements in long, steeply sloping road sections, identifies the main causes of rutting and studies the application of a high modulus bituminous concrete resistant to rutting in the context of the project of twining the RN01 between Chiffa and Berrouaghia in Algeria.

Key words: Bituminous Road, long road section with steep slope, rutting, HMBC**1. Contexte de la recherche**

Avec le boom économique que connaît l'Algérie depuis l'an 2000, la construction des autoroutes s'est développée en parallèle à pas de géant. Dans les régions montagneuses et vallonnées, les dégradations causées par l'orniérage sur les chaussées bitumineuses dans

des tronçons montants longs à forte pente sont devenues un problème inévitable.

L'orniérage est un phénomène courant dans le domaine routier. La recherche d'un enrobé bitumineux offrant d'excellentes performances est devenue une tâche très urgente. Les travailleurs routiers de différents pays l'explorent



sans relâche. Dans les années 1980, les ingénieurs routiers français ont imaginé un nouveau concept de béton bitumineux, à savoir le béton bitumineux à module élevé (BBME). Ce béton bitumineux a une excellente résistance à l'orniérage, en particulier son concept et sa méthode de conception, fournit une idée réalisable pour résoudre le problème actuel exceptionnel du dégât des chaussées bitumineuses. Par conséquent, les chercheurs du domaine routier de différents pays l'ont beaucoup apprécié.

2. Analyse des principales causes de la provenance de l'orniérage sur les tronçons longs à forte pente

La région côtière du nord de l'Algérie, où l'économie est la plus développée du pays, traverse sur des milliers de kilomètres de l'Atlas. C'est l'une des plus vastes régions montagneuses plissées et fracturées en Afrique, avec un terrain vallonné et un grand nombre d'autoroutes sont construites dans ces zones. Le terrain le long des autoroutes est complexe, avec de fortes pentes longitudinales qui sont affectées par de nombreux facteurs défavorables tels que des charges lourdes, des surcharges et un trafic à faible vitesse etc., ce qui entraîne un grand nombre de problèmes d'orniérage, en particulier sur les sections en montée avec de fortes pentes. Lorsque la chaleur est soutenue, l'orniérage se forme et se développe rapidement, ce qui affecte sérieusement la sécurité du transport. Il est donc nécessaire d'étudier les causes de la survenance de l'orniérage sur les longues sections à forte pente.

2.1. Diagnostic des dégradations d'orniérage pour les longues sections avec une forte pente

La pathologie d'orniérage survient sur les longues sections d'autoroute à forte pente causée par les matériaux, la structure, la pente, la longueur de pente, l'environnement et les charge

du trafic. Les dommages causés par l'orniérage sont différents de ceux des sections normales. Dans cet article, les données de recherche sur l'orniérage d'une autoroute sont analysées et les résultats statistiques de l'orniérage sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1 : Dommages dus à l'orniérage sur de longues sections à fortes pentes

Table 1: Rutting Damage on Long Sections with Steep Slopes

Section	Kilométrage	Pente /%	Longueur de pente /m	Profondeur moyenne de l'orniérage/mm
Sec A	K236+763~K236+668	3.87	505	45.0
	K236+200~K236+105	2.20	250	30.0
	K235+800~K236+705	3.80	730	49.5
	K235+500~K235+405	3.80	730	60.4
Sec B	K162+200~K162+400	2.30	1050	13.1
	K162+900~K163+000	2.30	1050	34.8
	K163+200~K163+300	1.30	1050	23.5
	K175+200~K176+100	3.80	900	39.2

Comme ceux qui sont montrés dans le tableau 1, sur la même section, la profondeur de l'orniérage a tendance à augmenter avec la pente. Il existe une bonne corrélation entre la pente et la profondeur de l'orniérage sur les longs tronçons à forte pente : plus la pente est forte, plus la profondeur de l'orniérage est importante. Les résultats de l'ajustement des données montrent que pour chaque augmentation de 1 % de la pente, la profondeur des ornières augmente d'environ 16,4 mm. Par conséquent, la valeur de la pente est le principal facteur affectant la profondeur des ornières.

2.2. Analyse sur le facteur de vitesse du trafic

Grâce à l'analyse ci-dessus, nous constatons que la distribution spatiale de la profondeur d'orniérage présente les caractéristiques suivantes : dans un tronçon long avec une pente invariable, la profondeur

d'orniérage augmente progressivement du bas vers le haut de la pente ; la profondeur d'orniérage des voies lourdes est supérieure à celle des voies rapides. Il est facile de voir que la vitesse du trafic est étroitement liée aux dommages causés par les ornières sur les longues sections à forte pente. En fait, la vitesse du trafic est étroitement liée à la valeur de la pente et à sa longueur, la vitesse des véhicules lourdement chargés à différentes pentes devenant plus lente à mesure que la pente augmente.

L'analyse des dommages causés par la vitesse de circulation repose sur deux principes fondamentaux de la viscoélasticité : le principe de superposition de Boltzmann et le principe d'équivalence temps-température.

2.2.1. Principe de superposition de Boltzmann

Le principe de superposition de Boltzmann stipule que la fonction de relaxation d'un polymère momentanée est une superposition linéaire à chaque relaxation précédente qu'il a subie, c'est-à-dire que la déformation du matériau est fonction de l'historique des charges. L'expression pour cela est :

$$\varepsilon(t) = \sigma_1 D(t - u_1) + \sigma_2 D(t - u_2) \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \int_{-\infty}^t D(t - u_i) d\sigma(u_i) \quad (2)$$

Où $\varepsilon(t)$ désigne la déformation à l'instant t ; u_i

t est l'incrément de temps et

$D(t - u_i)$ est le module d'élasticité du matériau à u_i .

u_i

L'effet de chaque action de la charge du véhicule sur la chaussée peut donc être superposé en fonction du temps d'action de la charge, c'est-à-dire, si la charge du véhicule est la même, un véhicule lent passant à 40 km/h a un temps d'action de 0,1 s, à le même temps d'action que 2,5 véhicules rapides passant à 100 km/h, et

les dommages causés par ces deux cas sont les mêmes. Sur les longs tronçons à forte pente, un véhicule lourd dont la vitesse descend à 20 km/h augmente considérablement la charge sur la structure de la chaussée.

2.2.2. Principe d'équivalence temps-température

L'équivalence temps-température permet de préciser que la même relaxation mécanique d'un polymère peut être observée à une température plus élevée et pendant une période de temps plus courte, ou à une température plus basse et pendant une période de temps plus longue, et l'équation de conversion de ce principe est la suivante :

$$\lg a_T = \frac{-17.44(T-T_g)}{51.6+(T-T_g)} \quad (3)$$

$$a_T = \frac{t}{t_g} \quad (4)$$

Où : a_T

a_T est le facteur de décalage ; t est la durée correspondant à la température T en s ; t_g

t_g est la durée correspondant à la température T_g en s ; T est la température en °C ; T_g

T_g est la température de transition vitreuse du matériau, qui pour les enrobés bitumineux prend la valeur -27 °C.

La conversion des températures équivalentes à différentes vitesses du véhicule peut être réalisée selon les équations 3 et 4. Il est d'abord nécessaire de déterminer pendant combien de temps la surface de la route est soumise aux charges des roues à différentes vitesses du véhicule. Il est généralement admis que la forme de la surface de contact entre le pneu et la chaussée est approximativement elliptique, alors que dans les calculs mécaniques, elle peut être réduite à un rectangle d'aire équivalente, comme ce qui est indiqué dans la

figure 1. En se basant sur la longueur du rectangle équivalent (226 mm), on peut calculer le temps pendant lequel la surface de la route est soumise à la charge du pneu à différentes vitesses du véhicule.

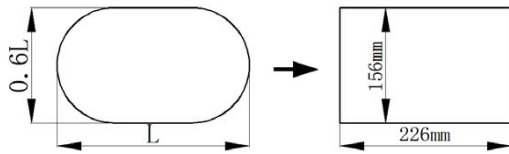


Figure 1 : Simplification des équivalents de surface de contact pneu-route

Figure 1: Simplification of tire-road contact patch equivalents

Après avoir calculé le temps d'action de la charge à différentes vitesses du véhicule, les différents temps d'action de la charge peuvent être convertis en températures équivalentes à la même vitesse du véhicule. En supposant que le véhicule se déplace respectivement à v_1 et v_2 à la température T_{v1} , la déformation de la chaussée lorsque le véhicule se déplace à v_2 peut être assimilée à la température T_{v2} à v_1 . Le processus de conversion est le suivant :

$$lg \frac{T_{v1}}{T_{v2}} = \frac{17.44(T_{v1}-T_g)}{51.6+T_{v1}-T_g} - \frac{17.44(T_{v2}-T_g)}{51.6+T_{v2}-T_g} \quad (5)$$

Où t_{v1} et t_{v2} sont le temps d'action du pneu sur la surface de la route aux vitesses v_1 et v_2 du véhicule en s ; les autres paramètres sont les mêmes que précédemment.

Selon l'équation 5, en utilisant une vitesse de véhicule standard de 80km/h et une température de surface de la route de 60°C comme norme, les différentes vitesses de véhicule sont converties en températures équivalentes à des vitesses de véhicule standard, et les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Température de conversion équivalente pour différentes vitesses de véhicules

Table 2: Equivalent conversion temperature for different vehicle speeds

Vitesse de véhicule /(km/h)	Température équivalente /C°
100	57.96
80	60
60	62.27
40	66.74
20	74.16

Le tableau 2 montre que la température équivalente augmente progressivement lorsque la vitesse de véhicule diminue et que plus la vitesse est faible, plus l'augmentation de la température équivalente est importante. À des vitesses inférieures à 20 km/h, la température équivalente atteint 74 °C, ce qui est déjà supérieur au point de ramollissement de la plupart des matériaux bitumineux, de sorte que le risque d'orniérage des revêtements bitumineux est plus élevé en été lorsque de longues sections à forte pente sont parcourues lentement par des véhicules lourdement chargés.

2.3. Analyse des facteurs de température ambiante

Les enrobés bitumineux sont généralement des matériaux sensibles à la température et leurs propriétés viscoélastiques changent avec la température, ce qui se traduit par des formes de dommages différentes sur la même section du revêtement bitumineux en été et en hiver. L'analyse de l'effet de la température ambiante sur le module des enrobés bitumineux peut être effectuée à l'aide de la formule de calcul du module de l'ASPHALT INSTITUTE (AI) :

$$|E^*| = 100000 \times 10^{\beta_1} \quad (6)$$

$$\beta_1 = \beta_3 + 0.000005\beta_2 \cdot f^{-1.1} \quad (7)$$

$$\beta_2 = \beta_4^{0.5} T^{\beta_5} \quad (8)$$

$$\beta_3 = 0.553833 + 0.028829(p_{200} f^{-0.1703}) - 0.070377\tau + 0.931757f^{-0.02774} \quad (9)$$

$$\beta_4 = 0.483V_b \quad (10)$$

$$\beta_5 = 1.3 + 0.49825 \log f \quad (11)$$

$$\tau = 29508.2(P_{77°F})^{-2.1939} \quad (12)$$

Où $\beta_1 - \beta_5$ est la constante intermédiaire ; f est la fréquence de charge en Hz ; T est la température en $^{\circ}C$; P_{200} est le pourcentage en poids d'agrégat passant au 0,075mm ; V_a est la porosité en % ; τ est la viscosité de l'asphalte à $21,1^{\circ}C$ ($70^{\circ}F$) ;

$P_{77°F}$ est le degré de la pénétration à $25^{\circ}C$ en 0,1mm ; V_b est le pourcentage de bitume par rapport au volume de l'enrobé en %. Sur la base de la formule du module de l'IA, le module du béton bitumineux à différentes températures peut être calculé et les résultats sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Valeurs du module pour les enrobés bitumineux à différentes températures

Température	50C°	60C°	70C°
E^*/MPa	1495	507	156
β_1	0.33	-0.14	-0.65
β_2	5822	7305	8916
β_3	2.18	2.18	2.18

Température	50C°	60C°	70C°
β_4	4.49	4.49	4.49
β_5	1.65	1.65	1.65
f/Hz	5	5	5
$V_a/\%$	4	4	4
$V_b/\%$	9.3	9.3	9.3
$p_{200}/\%$	4	4	4
τ/Pas	11.14	11.14	11.14

Le tableau 3 montre que plus la température est élevée, plus le module de l'enrobé est faible et que pour chaque augmentation de $10^{\circ}C$ de la température, le module de l'enrobé diminue d'environ 3 fois.

A travers la recherche documentaire et études ci-dessus sur les dommages causés par l'orniérage des revêtements bitumineux sur les longues sections d'autoroutes en forte pente, nous avons constaté que le transport en charge lourd avec une vitesse lente est une caractéristique importante du flux de circulation sur les longues sections en forte pente. La combinaison de la longue chaleur estivale, des températures élevées sur la surface de la route en Algérie provoque une survenance très fréquente de l'orniérage sur les autoroutes.

3. Propriétés physiques du béton bitumineux à module élevé et ses caractéristiques

L'analyse des facteurs d'influence de l'orniérage sur de longues sections à forte pente dans le chapitre précédent montre que le module d'élasticité du béton bitumineux et la combinaison structurelle du revêtement bitumineux sont des facteurs clés pour résister à la formation d'orniérage. Le développement d'un matériau de chaussée à module élevé est donc une solution prouvée au problème de l'orniérage. Le béton bitumineux à module élevé est l'un des nouveaux matériaux de chaussée qui ont été créés dans ce contexte.

3.1. Propriétés physiques

La caractéristique la plus importante du béton bitumineux à module élevé est son module complexe élevé ou module d'élasticité qui atteint à 15 ° C la valeur de 9000-12000 MPa pour les (BBME), 5000-7000 MPa pour les béton bitumineux semi grenu BBSG ; 14000 MPa pour les enrobés à module élevé (EME) et 9000-11000 MPa pour la grave bitume (GB).

Le BBME est très efficace pour améliorer la résistance à l'orniérage de la couche de surface, tandis que l'EME est principalement utilisé pour réduire l'épaisseur totale de la structure de chaussée, améliorer la résistance à la déformation et à la fatigue, ce qui va prolonger la durée de vie de la chaussée grâce à son module élevé et à sa résistance à la fatigue. Les tableaux 4 et 5 montrent les spécifications physiques et mécaniques des BBME et des EME.

Tableau 4 : Propriétés physiques du BBME

Table 4 : Physical properties of HMBC

Désignation	indice	Observations
Porosité en %	4~11	Essai de compactage par cisaillement rotatif : 10 à 80 girations
Stabilité à l'eau	≥0.8	Test DURIEZ : 18°C, r (résistance à la compression avant immersion) / R (résistance à la compression après immersion)
Test d'orniérage en %	≤5~10	60°C, 30000 girations, porosité entre 5%~8%
Module	≥9000~12000	15°C, 10Hz,

complexe en MPa		porosité entre 5%~8%
Module d'élasticité en MPa	≥9000~12000	15°C, 0.02s, porosité entre 5%~8%
Fatigue en μ_{def}	≥100~110	1×10 ⁶ rounds, 10°C, 25Hz, porosité entre 5%~8%

Observations :

- La méthode d'essai dans le tableau est la norme française NF P98 série, le même ci-dessous ;
- Selon les différentes propriétés mécaniques de l'enrobé, BBME est divisé en 3 niveaux, le présent projet utilise le niveau 1 du BBME, c'est à dire BBME1

Tableau 5 : Propriétés physiques de EME

Table 5: Physical properties of HMA

Désignation	indice	Observations
Porosité en %	≤4~11	Essai de compactage par cisaillement rotatif : 100 girations
Stabilité à l'eau	≥0.7~0.75	Test DURIEZ : 18°C, r (résistance à la compression avant immersion) / R (résistance à la compression après immersion)
Test d'orniérage en %	≤7.5	60°C, 30000 girations, porosité entre 3%~10%
Module complexe en MPa	≥14000	15°C, 10Hz, porosité entre 3%~10%
Module d'élasticité en MPa	≥14000	15°C, 0.02s, porosité entre 3%~10%
Fatigue en μ_{def}	≥100~130	1×10 ⁶ rounds, 10°C 25Hz, porosité entre 3%~10%

Observations : selon les différentes propriétés mécaniques de l'enrobé, EME est divisé en 2 niveaux, le présent projet utilise le niveau 2 du EME, c'est à dire EME2

3.2. Caractéristiques

1) Le béton bitumineux à module élevé BBME offre une bonne stabilité à l'eau et une bonne résistance à l'orniérage et est donc couramment utilisé dans la couche de roulement et la couche de base ;

2) L'enrobé à module élevé EME améliore la résistance à la fatigue et à la déformation des enrobés bitumineux et est donc couramment utilisé dans la couche de base ou la couche de fondation pour les chaussées. Ce qui convient aux routes à lourde charge pour prolonger leur durée de vie. En particulier, les enrobés à module élevé EME [essai de fatigue $\geq (100 \text{ à } 130) \mu\text{déf}$] présentent des résultats d'essai de fatigue nettement supérieurs à ceux du niveau le plus élevé de grave bitume GB4 [essai de fatigue $\geq (80 \text{ à } 100) \mu\text{déf}$].

3) La solution pour la chaussée en béton bitumineux à module élevé (BBME) + enrobé à module élevé (EME) est efficace pour réduire l'épaisseur de la chaussée par rapport à la solution béton bitumineux normal + GB. Sur les routes à fort trafic, il est possible de réaliser des économies d'agrégats d'environ 30 % et une réduction de l'utilisation de bitume d'environ 20 %. Cette économie considérable de ressources peut contribuer au développement durable de la route. En outre, les enrobés à module élevé présentent une bonne stabilité à l'eau.

4. Application du BBME dans le projet de dédoublement de la RN01 entre Chiffa et Berrouaghia

Ce chapitre analyse et étudie la conception structurelle des chaussées en béton bitumineux à pleine épaisseur et à forte pente en Algérie, ainsi que l'optimisation de la formulation des enrobés bitumineux dans le cadre du projet de dédoublement de la RN01 entre Chiffa et Berrouaghia.

4.1. Présentation

Le projet de dédoublement de la RN01 entre Chiffa et Berrouaghia est une autoroute vallonnée dont la longueur du tracé est d'environ 53,6 km, une pente longitudinale maximale est de 6 % avec une longueur totale de 8,797 km et une longueur maximale de 1,366 km en un seul tronçon.

4.2. Caractéristiques de charge des sections à forte pente du projet

4.2.1. Durée de vie de la chaussée du projet

La durée de vie théorique des routes en Algérie est déterminée en fonction de la classe de route. Le réseau routier du pays est divisé en un réseau routier structurel et un réseau routier non structurel, pour lesquels la durée de vie théorique est de 30 ans, tandis que pour le réseau routier non structurel, la durée de vie théorique est de 20 ans. Le projet est un réseau routier structurel et la durée de vie de la chaussée en béton bitumineux est de 30 ans.

4.2.2. Prévisions de trafic

Selon le rapport d'enquête sur le flux de trafic de ce projet, le flux de trafic du projet est élevé et la proportion de véhicules lourds est également élevée, soit 18% (les résultats de l'analyse de la circulation pour ce projet sont présentés dans le tableau 6).

Tableau 6 : Nombres de charges lourdes.**Table 6** : Numbers of heavy loads.

Année caractéristique	CHIFFA-BERROUAGHIA		
	TMJA	Proportion de véhicules lourds (%)	Nombre/sur une seule voie
2015	32449	18	2920
2017	36209	18	3259
2020	42685	18	3841
2025	57871	18	5209
2046	161240	18	14512

4.2.3. Charges cumulatives (2017-2046)

Sur la base de la répartition des charges lourdes sur les voies, l'indice de voie est pris à 0,8. Après le calcul, les volumes de trafic cumulés des véhicules lourds dans une direction pendant la durée de vie de la conception d'une voie sont indiqués dans le tableau 7. Les volumes de charge cumulés pour ce projet sont importants.

Tableau 7 : Volumes de trafic cumulés des véhicules lourds**Table 7** : Cumulative Heavy Vehicle Traffic Volumes

section	CHIFFA-BERROUAGHIA
2017-2019	3018606
2020-2024	6358413
2025-2046	58565672
Volume de conception	67.94×10 ⁶

4.2.4. Influence climatique

Le calcul des dimensions structurelles du revêtement est effectué à température constante, c'est-à-dire à la température équivalente θ_{eq} . Le calcul de la température équivalente tient compte du cycle annuel de changement de température. La température équivalente est généralement déterminée en fonction de la zone climatique dans laquelle se situe le projet. Selon le Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves (CTTP 2001), la zone climatique de la région dans laquelle se situe le projet appartient à la zone I. Selon la zone climatique dans laquelle se situe le projet, la température équivalente pour le projet est prise égale à 20°C.

4.2.5. Coefficient d'agressivité moyen (CAM) du poids lourd

Le coefficient d'agressivité moyen (CAM) du poids lourd pour ce projet est présenté dans le tableau 8. Lors du calcul de la déformation en compression sur la surface supérieure de la couche de forme, la couche de forme est considérée comme CAM=1. Lors du calcul de la déformation en traction sur le fond de la couche de roulement, la couche de roulement est considérée comme CAM=0.8.

Tableau 8 : Coefficient d'agressivité moyen CAM**Table 8** : Aggressiveness coefficient

Couche structurelle du revêtement	CAM	Notes
Couche de forme	1	Calcul de la déformation en compression sur la surface supérieure de la couche de forme
Couche de roulement	0.8	Calcul de la déformation en traction sur le fond de la couche de roulement

4.3. Optimisation de la conception structurelle des chaussées en enrobés pleine épaisseur sur de longues sections à forte pente

4.3.1. Structure de chaussée pleine épaisseur de la ligne principale

Les dimensions structurelles de la chaussée ont été établies conformément au Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (1998 SETRA/LCPC) et ont été calculées à l'aide du logiciel professionnel Alizé du LCPC, France.

La forme structurelle de la conception de la chaussée pleine épaisseur pour la ligne principale du projet est présentée dans le tableau 9, l'épaisseur de la couche de base étant vérifiée par calcul.

Tableau 9 : Structure de chaussée pleine, épaisseur de la ligne principale

Table 9 : Main line full-thickness pavement structure

Couches structurales de chaussées	Épaisseur	Désignation	Spécification	Matériaux
Couche de roulement	3.5cm	BBMA3	0/10	Béton bitumineux mince type A
Couche de liaison	6cm	BBME1	0/14	Béton bitumineux à module élevé
Couche de base	(12+12) cm	EME2	0/20	Enrobé à module élevé
Couche de forme	50cm	CDF	0/31.5	Gravier granulométrique

4.3.2. Calcul des nombres d'essieux équivalents cumulés

Les nombres d'essieux équivalents cumulés sont calculés selon la formule suivante :

$$Ne = N \times CAM \quad (13)$$

Où : Ne est le nombre d'essieux équivalents cumulés ; N est le trafic de véhicules lourds sur une voie pendant l'année de conception ; CAM est le coefficient d'agressivité moyen des charges lourdes. Selon les données du tableau 7 et 8, le nombre d'essieux de chaque couche est calculé comme suivant :

$$Ne1 = N \times CAM = 67.94 \times 10^6 \times 1 = 67.94 \times 10^6$$

$$Ne2 = N \times CAM = 67.94 \times 10^6 \times 0.8 = 54.35 \times 10^6$$

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau 10.

Tableau 10 : résultats des calculs des nombres d'essieux équivalents cumulés

Table 10: results of calculations of cumulative equivalent numbers of axles

Couches structurelles	CAM	Ne
Couche de forme	1	67.94×10^6
Couche de roulement	0.8	54.35×10^6

4.3.3. Classe de trafic

Selon le Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (1998 SETRA/LCPC), à partir des données du tableau 4, on a $5,38.0 \times 10^6 < Ne < 94.0 \times 10^6$. La classe de trafic est donc TC7.

4.3.4. Risque de calcul

Selon le Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (1998 SETRA/LCPC), le risque du présent calcul est $r = 1\%$.

4.3.5. Valeurs calculées pour la couche de roulement

Le logiciel professionnel Alizé du LCPC, France, est un logiciel de calcul de structures de chaussées. Il est utilisé dans ce projet et les paramètres de calcul pour l'enrobé bitumineux sont pris comme indiqué dans le tableau 11.

Tableau 11 : valeur calculée pour la couche de roulement

Table 11: Calculated value for surface course layer

Type de matériaux	E(10°C, 10Hz) (MPa)	E(20 °C, 10Hz) (MPa)	$\epsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$	b	S N	Kc
BBM A 3	7200	3600	100×10^{-6}	-0.2	0.25	1.1
BBM E 1	12000	6000	110×10^{-6}	-0.2	0.25	1.1
EME 2	17000	11000	130×10^{-6}	-0.2	0.25	1.0

Le coefficient de Poisson du matériau bitumineux est $\nu = 0,35$

4.3.6. Vérification des calculs relatifs aux chaussées en béton bitumineux

La dimension de la chaussée en béton bitumineux doit être validée à travers des calculs : fracture de la couche de base de la chaussée en béton bitumineux due à un dommage par fatigue et les contraintes d'orniérage dans la couche de forme. Pour satisfaire à ces deux exigences, les calculs de dimension de la chaussée doivent répondre aux deux critères suivants :

- La déformation verticale en compression à la surface de la couche de forme doit être inférieure à la limite admissible $\epsilon_{t,ad}$;
- La contrainte de traction horizontale de la couche de base et la couche de fondation doit être inférieure à la valeur limite admissible $\epsilon_{t,ad}$.

4.3.6.1. Valeurs limites tolérables pour la déformation en compression verticale

Lorsque la déformation verticale en compression $\epsilon_{t,ad} = 0.012(N_e)^{-0.222}$ dans la couche CDF, la classe de charge de la plate-forme est PF3, EME2 est utilisé pour la couche de base, le coefficient d'agressivité moyen du poids lourd CAM = 1.0, les nombres d'essieux équivalents cumulés sont :

$$N_e = N \times CAM = 67.94 \times 10^6;$$

$$\epsilon_{t,ad} = 0.012(N_e)^{-0.222} = 219.0 \times 10^{-6}$$

4.3.6.2. Valeurs limites de tolérance de la déformation en traction horizontale

D'après le logiciel Alizé, la déformation horizontale en traction $\epsilon_{t,ad}$ dans la couche EME est calculée comme suit : $\epsilon_{t,ad} = 49.8 \times 10^{-6}$

Une couche d'accrochage ou une couche d'imprégnation a été prévue entre la couche de roulement et la couche de base, les couches sont liées de manière continue et des calculs sont nécessaires sur la déformation horizontale dans la couche de base et la déformation verticale dans la couche de forme. Selon le Catalogue des Structures Types de Chaussées Neuves (1998 SETRA/LCPC), l'épaisseur de la couche de roulement en béton bitumineux est de 9,5 cm, tandis que l'épaisseur du matériau de la couche EME est à déterminer. Les calculs ont été effectués selon le logiciel professionnel Alizé de LCPC France et les résultats sont présentés dans le tableau 12.

Tableau 12 : calcul de la déformation de la couche de base et la couche de forme

Table 12: calculation of the deformation of the base layer and the capping layer

Classe de charge	Type de couche	Épaisseur (cm)	Déformation réelle à la base de la couche EME $\epsilon_{t,ad}$ ($\times 10^{-6}$)	CDF $\epsilon_{t,ad}$ ($\times 10^{-6}$)
PF3	EME 2	23(11+12)	49.7	160.3
		24(12+12)	47.3	152.3

Sur la base des résultats des calculs de déformation admissible et réelle, une épaisseur de 24 cm a été choisie pour l'EME2.

4.4. Mesures d'optimisation de la formulation de l'EME appliquée aux tronçons longs à forte pente

Tenant compte des causes de la dégradation de la chaussée bitumineuse à longue et forte pente et des propriétés de l'EME, les mesures suivantes sont prises pour optimiser la formulation de l'EME.

4.4.1. Application du bitume pur 40/50

Selon la norme et les expériences françaises, le BBME ne peut être obtenu qu'avec l'utilisation d'un bitume de grade dur ou de l'asphalte modifié. Conformément au catalogue CCTP, le BBEM admet le bitume pur 40/50 selon la norme T65-001 et les caractéristiques météorologiques du projet.

4.4.2. Incorporation de l'adjuvant

L'adjuvant est incorporé dans les matériaux de la couche de base pour améliorer le module d'élasticité du béton bitumineux. L'adjuvant est incorporé dans les matériaux de la couche de roulement pour améliorer la résistance du béton bitumineux à la fatigue. L'adjuvant doit être conforme à la norme NF P98-150.

4.4.3. Valeur de la compacité contrôlée doit être légèrement inférieure à celle de la densité maximale

La stabilité maximale au cisaillement n'est pas obtenue quand la densité de l'enrobé est maximale, mais elle est obtenue quand la densité de l'enrobé est légèrement inférieure à la densité maximale. Le taux de vide de l'enrobé est indiqué dans le tableau 13.

4.4.4. Volume du bitume utilisé

Quand le dosage de bitume augmente, la résistance maximale au cisaillement et la

cohésion augmentent d'abord puis diminuent et l'angle de frottement interne diminue. Il est nécessaire de choisir le meilleur rapport bitume-agrégat.

4.4.5. Agrégats

4.4.5.1. Agrégats pour la couche de roulement

Les agrégats pour la couche de roulement doivent être conformes à l'article 8 de la norme NF P 18-545. Pour chaque produit, les caractéristiques sont les suivantes :

Tableau 13 : Descriptions techniques des agrégats pour la couche de roulement

Table 13: Technical descriptions of aggregates for surface course layer

Usage	Couche de roulement
Caractéristique intrinsèque du gravier	Catégorie C
Caractéristique de production du gravier	Catégorie III
Caractéristique de production du sable	Catégorie a
Angularité du gravier et du sable	Ang1

4.4.5.2. Agrégats pour la couche de liaison et la couche de base

Les agrégats pour la couche de liaison et la couche de base doivent être conformes à l'article 7 de la norme NF P 18-545. Pour chaque produit, les caractéristiques sont les suivantes :

Tableau 14 : Descriptions techniques des agrégats pour la couche de liaison et la couche de base

Table 14: Technical descriptions of aggregates for bonding layer and base layer.

Usage	Couche de liaison en BBME1	Couche de base en EME2
Caractéristique intrinsèque du gravier	Catégorie D	Catégorie D
Caractéristique de production du gravier	Catégorie III	Catégorie III
Caractéristique de production du sable	Catégorie a	Catégorie a

4.4.5.3. Sablons

Une certaine quantité de sablons concassés peut être ajoutée dans l'enrobée et dont le dosage est déterminé en fonction de l'objectif de la recherche et des caractéristiques du chantier. Pour le BBME1 appliqué à la couche de liaison de l'axe routier, le volume de sablons toléré dans les graviers 0/14 est $\leq 20\%$. Pour le EME2, le volume de sablons toléré dans les graviers 0/20 est $\leq 40\%$. Pour le BBMA3, aucun sablon n'est toléré dans les graviers 0/10.

4.4.5.4. Fillers

Les fillers doivent être conformes aux catégories F1, F2 ou F3 de la norme XP P18-545. Généralement, les fines minérales sont utilisées comme filler. Une certaine quantité de chaux active peut être utilisée dans les fillers pour remplacer des fines minérales, mais dans les BBMA3, BBME1 et EME2, la teneur en chaux active ne doit pas dépasser 1% du volume total des graviers.

Tableau 15 : Descriptions techniques des fillers

Table 15 : Technical descriptions of fillers

Type de structure	BBMA 3 0/10	BBME 1 0/14	EME2 0/20
Indice de vide RIGDEN	28%~45%	28%~45%	28%~45%
Point de ramollissement	8°C~16°C	8°C~16°C	8°C~16°C
Essai au bleu de méthylène	≤ 10	≤ 10	≤ 10

4.4.6. Formulation pour la mise en œuvre des travaux

L'essai de formulation a pour objet de déterminer les comportements suivants du béton bitumineux : (1) le taux de vide ; (2) la stabilité à eau ; (3) les caractéristiques mécaniques, à savoir l'essai d'orniérage, l'essai de fatigue et l'essai de module.

4.4.7. Caractéristiques mécaniques du béton bitumineux

Selon la norme française, l'essai de formulation se compose de 4 catégories. Pour chaque catégorie et en cas d'exigence particulière, il est susceptible d'imposer d'autres essais applicables à la catégorie correspondante. Dans tous les cas, les résultats d'essai de la catégorie 1 sont obligatoirement présentés. La catégorie de l'essai de formulation est déterminée en fonction de l'objectif de la recherche, de la rentabilité, de l'envergure du projet et de l'importance des autres essais à effectuer sur l'enrobée. L'essai de formulation BBMA3 pour le présent projet s'est effectué conformément aux exigences de la catégorie 2, celui du BBME1 conforme aux exigences de la catégorie 3 et celui du EME2 conforme aux exigences de la catégorie 4. Les détails sont indiqués dans le tableau 16.

4.5. Optimisation des études de formulation

Selon les mesures d'optimisation et les exigences spécifiques présentées ci-dessus, prenant en compte les caractéristiques du projet, les études de formulation du bitume ont été optimisées.

4.5.1. Sélection des agrégats

Les agrégats utilisés pour le projet proviennent de la carrière TAMEZGUIDA de la wilaya de MEDEA. Il s'agit de grès dont la somme de la valeur Los Angeles LA et du micro-Deval en présence d'eau MDE n'est pas supérieure à 55. Les fines ont une valeur $M_b \leq 2$.

4.5.2. Sélection de l'adjuvant pour le BBME

Suite à la comparaison entre la formulation française et la formulation allemande, le projet a choisi celle qui est la meilleure. La résistance à l'orniérage et le module du béton bitumineux sont augmentés grâce à l'incorporation de l'adjuvant.

4.5.2.1. Formulation de EME2 pour la couche de base

Le dosage de l'adjuvant français Pr PLAST Module est de 0,6 % et celui du produit allemand Lucobit 1210A est de 0,3 %. La proportion de chaque matériau dans la formulation de EME2 pour la couche de base est indiquée dans le tableau 16.

Tableau 16 : Formulation de EME2 pour la couche de base

Table 16: HMA2 formulation for the base layer

Formulation (avec adjuvant)	Pr PLAST Module	Lucobit 1210A
0/2	30%	40%
2/6	17%	20%
6/10	18%	10%
10/14	17%	10%
14/20	18%	20%
Bitume 40/50	5.2%	5.1%
Adjuvant	0.6%	0.3%

4.5.2.2. Comparaison des caractéristiques mécaniques de EME2 pour la couche de base

La caractéristique de compactage de Lucobit 1210A est meilleure que celle de Pr PLAST Module, mais la capacité d'anti-orniérage et de stabilité à eau de ce premier est relativement faible, voir Tableau 17.

D'ailleurs, si le dosage de Lucobit 1210A est trop faible, il est susceptible de provoquer un mélange hétérogène. En conséquence, l'adjuvant français Pr PLAST Module a été choisi.

Tableau 17 : Comparaison des caractéristiques mécaniques de EME2 pour la couche de base

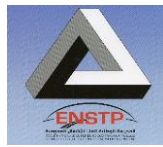
Table 17: Comparison of the mechanical characteristics of HMA for the base layer

Désignation	Pr PLAST Module	Lucobit 1210A	Spécifications
Essai de compactage à la presse à cisaillement giratoire	4.8	2.23	≤6%
Essai d'orniérage	2.6	5.07	≤7.5%
Essai Duriez	0.84	0.82	≥0.7%
Module de rigidité	1445 4	1435 2	≥14000

5. Conclusion

L'Algérie est un pays montagneux dans sa partie Nord ayant des conditions topographiques particulières. Il est donc inévitable de prévoir dans la conception de la route de nombreuses sections longues à forte pente. Suite à l'analyse des éléments susceptibles de provoquer l'orniérage sur des tronçons longs à forte pente et basé sur les pratiques de l'utilisation du BBME, nous sommes convaincus que l'application du BBME dans la couche de liaison peut réduire efficacement la déformation de la chaussée due au cisaillement et la déformation verticale, ce qui va aider à résister aux pathologies survenues sur la route telles que l'orniérage sur des tronçons longs à forte pente.

L'application d'EME en Algérie est à sa phase initiale. Malgré des expériences d'utilisation réussies, la méthodologie mature de la mise en œuvre dans les conditions géographiques de l'Algérie, l'application à grande échelle de ce nouveau type de matériaux nécessite des recherches, à savoir entre autres, l'essai de laboratoire de formulation, la



réalisation des planches d'essai pour le contrôle de qualité, la recherche de la méthodologie de la mise en œuvre des travaux. Sur la base des pratiques de l'application du BBME dans le projet du Dédoublément de la RN01 Chiffa-Berrouhagia et des analyses du volume de trafic, des charges, des nombres d'essieux, des sollicitations, de la formulation et des matériaux dans la conception de chaussée bitumineuse à longue et forte pente, cette présentation a pour objet d'étudier la conception et l'application du BBME aux tronçons longs à forte pente selon les normes européennes afin de donner une référence pour la construction de projets d'autoroute similaires en Algérie.

Références :

- [1] GTR-SETRA-LCPC-2000, Réalisation des remblais et des couches de forme[S].

- [2] JTG D50—2006, Spécifications pour la conception de la chaussée bitumineuse de route [S].

- [3] JTG F40—2004, Spécifications techniques pour la mise en œuvre de la chaussée bitumineuse de route [S].

- [4] JTG/T F20—2015, Prescriptions techniques pour la mise en œuvre de la couche de base de route [S].

- [5] Yang H. Huang. Pavement Analysis and Design [M]. New Jersey : Pearson Education Inc., 2004 Catalogue des Structures Type de Chaussées Neuves SETRA