

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université 20Aout 1955-Skikda
Faculté de Technologie
Département : Génie Civil
Ref : D012120004D



جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم : الهندسة المدنية
المرجع D012120004D

Thèse présentée en vue de l'obtention Du diplôme de
Doctorat LMD

En Génie Civil

Option : Géo-matériaux

**Comportement d'un corps de chaussée souple sous
l'effet du trafic**

Présentée par : **Moudjari Maroua**

Soutenue publiquement le

Devant le jury composé de :

Président	MESSASAT Salah	Professeur	Université de Skikda
Rapporteur	BELACHIA Mouloud	Professeur	Université de Guelma
Examineurs	NINOUH Tarek	Professeur	Université de Tébessa
	HEBHOUB Houria	M.C. A	Université de Skikda

Remerciements

C'est avec une grande émotion et avec un léger pincement au cœur que j'écris ces remerciements, synonyme de la fin de cette belle aventure du doctorat. Au-delà des recherches scientifiques, j'ai eu l'occasion de rencontrer de nombreuses personnes, qui par leur savoir et leur bienveillance ont largement contribué à l'élaboration de cette thèse.

Je tiens à remercier mes enseignants de l'université

Je tiens à remercier également les membres de mon jury pour le temps et l'intérêt qu'ils ont consacrés à ce travail :

Pr. MESSASAT Salah, Pr. NINOUH Tarek, Dr. HEBHOUB Houria

Cette thèse a été effectuée au sein de Centre Technique des Travaux Publics (CTTP) d'Algérie.

J'aimerais exprimer en avant-propos les remerciements adressés à mon Directeur de thèse Monsieur le Pr BELACHIA Mouloud, pour la confiance qu'il m'a accordée tout au long de ma thèse ainsi que pour le temps qu'il m'a consacré ;

Je tiens à remercier tout particulièrement Mmele Dr KHAREF Leila qui m'a toujours soutenue et m'a fait profiter de son enthousiasme et de la franchise de ces critiques sur la façon de mener à terme ce travail.

Je ne saurais oublier mes amies Chettah Wissem et Bouhali Hossna,

Ainsi mes collègues Nefla Djamil et Deyef Nassreddine

Un grand merci enfin à toute l'équipe du laboratoire CTTP pour l'accueil qu'elles m'ont réservé et l'ambiance dans laquelle ce travail a été réalisé.

M. MOUDJARI

Dédicaces

À ma mère et mon père.

À mon époux.

À ma sœur et mes frères.

À ma fille et mon fils.

À mes nièces et mes neveux.

À toutes mes Amies

SOMMAIRE

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre I : Généralités sur le comportement des chaussées

I.1. Introduction	04
I.2. Généralités sur la route	05
I.2.1. Définition.....	05
I.2.2. Les caractéristiques géométriques.....	05
I.2.2.1. Profil en travers.....	05
I.2.2.2. Profil en long.....	06
I.2.2.3. Tracé en plan.....	06
I.2.3. Structure des chaussées : différentes couches.....	06
I.2.3.1. Sol support.....	08
I.2.3.2. Couche de forme.....	08
I.2.3.3. Les couches d'assise.....	08
I.2.3.4. La couche de surface.....	08
I.2.4. Différents types de chaussée.....	09
I.2.4.1. Chaussées souples.....	09
I.2.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses.....	11
I.2.4.3. Les chaussées semi rigides.....	11
I.2.4.4. Les chaussées rigides (ou en béton de ciment).....	13
I.2.4.5. Les chaussées à structure mixte.....	15
I.2.4.6. Les chaussées à structures inverses.....	16
I.2.4.7. Les chaussées à structures composite.....	17
I.2.5. Comparaison des différents types de chaussée.....	18
I.3. Conclusions	18

Chapitre II : Généralités sur les phénomènes de dégradation des chaussées revêtues

II.1. Introduction	20
II.2. Dégradations des chaussées revêtues	21
II.2.1. Les dégradations de type A.....	21
II.2.1.1. La déformation.....	21
II.2.1.1.1. Orniérage.....	21
II.2.1.1.2. Affaissement.....	23
II.2.1.2. Les fissurations.....	24
II.2.1.2.1. Les fissures transversales.....	26
II.2.1.2.2. Fissures en pistes des roues.....	26
II.2.1.2.3. Fissures longitudinales (hors des pistes des roues)	27
II.2.1.2.4. Fissures longitudinales des rives.....	28
II.2.1.2.5. Fissure de gel.....	29
II.2.1.3. Le faïençage.....	29
II.2.2. Les dégradations de type B.....	30
II.2.2.1. Flache.....	31
II.2.2.2. Bourrelet longitudinal.....	32
II.2.2.3. Nid-de-poule.....	34
II.2.2.4. Pelade.....	35
II.2.2.5. Dentelle de rive.....	36
II.2.2.6. Ressuage.....	37
II.2.2.7. Boursoufflure.....	38
II.2.2.8. Les remontées (d'eau ou d'argile).....	39
II.2.2.9. Les épaufrures.....	40
II.2.2.10. Tête de chat.....	41
II.2.2.11. Plumage.....	41
II.2.2.12. Décollement.....	42
II.2.2.13. Dés enrobage.....	43
II.2.2.14. La tôle ondulée.....	44
II.3. Les principales causes de dégradations des chaussées revêtues	44

II.3.1. Le trafic.....	45
II.3.2. Les conditions climatiques.....	45
II.3.3. La qualité des matériaux.....	46
II.3.3.1. Les granulats.....	46
II.3.3.2. Les liants.....	46
II.3.4. La mise en œuvre.....	47
II.4. Conclusions.....	47

Chapitre III : Étude comparative entre les déflexions mesurées et calculées

III.1. Introduction.....	49
III.2. Étude de trafic.....	50
III.2.1. Comptage de trafic.....	51
III.2.1.1. Par catégorie de véhicule.....	51
III.2.1.2. Par classe des poids lourds.....	53
III.2.1.3. Par classe de poids ensemble des essieux.....	54
III.2.2. Calcul de trafic.....	55
III.2.2.1. Le trafic poids lourds à l'année de mise en service.....	55
III.2.2.2. Trafic cumulé prévisionnel.....	56
III.2.2.3. Trafic cumulé écoulé.....	56
III.2.2.4. Trafic global.....	56
III.2.3. Résultats et calculs.....	56
III.2.3.2. Calcul de Tci selon le catalogue Algérien	57
III.3. Sondage sous chaussée.....	57
III.4. Auscultation de la chaussée.....	58
III.4.1. Auscultation par relever visuel.....	58
III.4.2. Auscultation par mesure de déflexion.....	59
III.4.2.1. Description des machines.....	59

III.4.2.1.1. <i>Le déflectomètre à masse tombante (FWD)</i>	59
III.4.2.1.2. <i>Défectographe lacroix</i>	61
III.4.2.1.3. <i>Comparaison du FWD avec Défectographe lacroix</i>	62
III.4.2.2. <i>Exploitation des résultats de déflexion</i>	64
III.4.2.2.1. <i>Sectionnement par Deflectographe Lacroix</i>	65
III.4.2.2.2. <i>Sectionnement par FWD</i>	66
III.4.2.2.3. <i>Résultats des déflexions obtenues par FWD et Deflectographe Lacroix</i>	67
III.4.2.3. <i>Auscultation par mesure d’uni</i>	70
III.5. Rétro calcul par le programme ELMOD6	71
III.5.1. <i>Définition et principe du programme ELMOD6</i>	71
III.5.2. <i>Théorie fondamentale</i>	71
III.5.3. <i>Résultats de déflexion mesurée par ELMOD6</i>	74
III.5.4. <i>Résultats comparative de déflexion mesurée et de calculée</i>	75
III.6. Conclusions	77

Chapitre IV : Application au cas d’un renforcement d’une chaussée souple

IV.1. Introduction	79
IV.2. Méthodes de dimensionnement	79
IV.2.1. <i>La méthode de C.B.R (California -Bearing – Ratio)</i>	80
IV.2.1.1. <i>L’épaisseur équivalente de la chaussée existante</i>	80
IV.2.1.2. <i>Épaisseur équivalent de renforcement</i>	81
IV.2.1.3. <i>Application de la méthode CBR au projet</i>	81
IV.2.2. <i>Méthode de guide algérien de renforcement des chaussées</i>	82
IV.2.2.1 <i>Auscultation par relevé visuel</i>	82
IV.2.2.2. <i>Par mesure de déflexion caractéristique</i>	83
IV.2.2.2.1. <i>Sectionnement en tronçons homogènes</i>	83

IV.2.2.2.2. <i>Exploitation du deflectogramme de la deflection</i>	84
IV.2.2.2.3. <i>Seuils admissibles de deflexion</i>	85
IV.2.2.2.4. <i>La portance residuelle de la chaussée</i>	85
IV.2.2.3. Auscultation par mesure d'uni.....	86
IV.2.2.4. Choix de dimensionnement.....	86
IV.2.2.5. Méthode du catalogue des structures.....	87
IV.2.2.5.1. Les données climatique.....	87
IV.2.2.5.2 Les données du trafic.....	88
IV.2.2.5.3. Choix de dimensionnement.....	89
IV.2.3. Méthode de vérification de renforcement de la chaussée basée sur le Programme ELMODE6.....	90
IV.2.3.1. Modules d'élasticité.....	92
IV.2.3.2. Modules de surface.....	94
IV.2.3.3. Durée de vie et Renforcement (Design Life and Overlay).....	98
IV.2.4. Méthode de vérification de renforcement de la chaussée basée sur le programme ALLIZEIII.....	101
IV.2.4.1. Principe du programme ALIZEIII.....	101
IV.2.4.2. Principe de calcul.....	102
IV.2.4.3. Vérification en fatigue des structures et de la déformation du sol support	103
IV.2.4.3.1. <i>Modélisation de la structure à renforcer</i>	104
IV.2.4.3.2. <i>Calcul la déformation admissible (ϵ_z, adm) de sol support</i>	104
IV.2.4.3.3. <i>Calcul de la déformation admissible de traction ϵ_t, adm</i>	105
IV.2.4.3.4. <i>Performances mécaniques des matériaux bitumineux</i>	106
IV.2.4.3.5. <i>Résultats de calcul par Alize III</i>	107
IV.2.5. Comparaison des méthodes de dimensionnement.....	108
IV.3. Conclusion	108
Conclusion générale et perspectives	110

Figures

Figure I.1 : Profil en travers type d'une route.....	05
Figure I.2 : Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée.....	07
Figure I.3 : Principaux objectifs de compactage des couches de chaussée.....	07
Figure I.4 : Structure type d'une chaussée souple.....	10
Figure I.5 : Structure type d'une chaussée bitumineuse épaisse.....	11
Figure I.6 : Structure type d'une chaussée Semi rigide.....	12
Figure I.7 : Structure type d'une chaussée rigides (ou en béton de ciment).....	13
Figure I.8 : Dalles non goujonnées avec fondation.....	14
Figure I.9 : Dalles goujonnées avec fondation.....	14
Figure I.10 : Dalles sans fondation.....	14
Figure I.11 : Béton armé continu 1.....	14
Figure I.12 : Béton armé continu 2.....	14
Figure I.13 : Chaussée à structure mixte.....	15
Figure I.14 : Chaussée à structure inverse.....	16
Figure I.15 : Chaussée avec une dalle en béton de ciment mince collé (BCMC).....	17
Figure I.16 : Chaussée en béton armé continu sur grave bitume (BAC/GB).....	17
Figure II.1 : Différents types d'orniérage en fonction de la taille.....	22
Figure II.2 : Différents types d'orniérage en fonction de leur forme.....	23
Figure II.3 : Affaissement.....	23
Figure II.4 : Types de fissures transversales.....	26
Figure II.5 : Fissures en pistes des roues.....	27
Figure II.6 : Fissures longitudinales.....	28
Figure II.7 : Fissures longitudinales des rives.....	28
Figure II.8 : Fissures du gel.....	29

Figure II.9 : Le faïençage.....	29
Figure II.10 : Le flache.....	31
Figure II.11 : Le bourrelet.....	33
Figure II.12 : Nid de poule.....	34
Figure II.13 : Pelade.....	35
Figure II.14 : Le Ressuage.....	37
Figure II.15 : Boursouflure.....	38
Figure II.16 : La remontée (A) d'argile, (B) d'eau.....	39
Figure II.17 : Les épaufrures.....	40
Figure II.18 : Tête de chat.....	41
Figure II.19 : Plumage.....	42
Figure II.20 : Décollement.....	42
Figure II.21 : Désenrobage.....	43
Figure II.22 : La tôle ondulée.....	44
Figure III.1 : Présentation du zonage sur la zone d'étude.....	51
Figure III.2. « a » : Graphique de comptage du trafic sens aller.....	52
Figure III.2. « b » : Graphique de comptage du trafic sens retour.....	53
Figure III.2. « a,b » : Graphique de comptage du trafic sens aller-retour.....	53
Figure III.3 : Comptage de trafic par classe de poids ensemble des camions.....	54
Figure III.4 : Comptage de trafic par classe de poids ensemble des essieux.....	54
Figure III.5 : Appareillage général de déflectomètre a masse tombante (FWD).....	59
Figure III.6 : Principe de mesure de FWD.....	60
Figure III.7 : Le déflectographe lacroix	61
Figure III.8 : Principe de déflectographe lacroix.....	62
Figure.III.9 : histogramme de déflexions de la 1 ^{ere} partie mesurée par Deflectographe Lacroix.....	65

Figure III.10 : histogramme de déflexions de la 2 ^{ème} partie mesurée par Deflectographe Lacroix.....	65
Figure III.11 : histogramme de déflexions de la 3 ^{ème} partie mesurée par Deflectographe Lacroix.....	65
Figure III.12 : histogramme de déflexions de la 1 ^{ère} partie mesurée par FWD.....	66
Figure III.13 : histogramme de déflexions de la 2 ^{ème} partie mesurée par FWD.....	66
Figure III.14 : Déflexions de la 3 ^{ème} partie mesurée par FWD.....	67
Figure III.15 : Les déflexions mesurées par Deflectographe Lacroix pour les trois sections de la route d'ELMEDIA.....	68
Figure III.16 : Les déflexions mesurées par FWD pour les trois sections de la route d'ELMEDIA.....	69
Figure III.17 : L'appareil d'Uni.....	70
Figure III.18 : schémas du bassin de déflexion.....	73
Figure III.19 : Déflexions de la section1 calculées par ELMOD6.....	74
Figure III.20 : Déflexions de la section2 calculées par ELMOD6.....	74
Figure III.21 : Déflexions de la section3 calculées par ELMOD6.....	75
Figure III.22 : Résultats de déflexions retro calculées par ELMOD6.....	76
Figure III.23 : Résultats de déflexions mesurées par FWD.....	77
Figure IV.1 : Défectogramme de la déflexion caractéristique.....	84
Figure IV.2 : Evaluation de la portance résiduelle.....	85
Figure IV.3 : Position de projet dans la carte climatique de l'Algérie.....	87
Figure IV.4 : Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq.....	91
Figure IV.5 : Structure type d'un corps de chaussée adopté au calcul avec ELMOD6.....	92
Figure IV.6 : Modules d'élasticité de la 1ère section.....	92
Figure IV.7 : Modules d'élasticité de la 2ème section.....	93
Figure IV.8 : Modules d'élasticité de la 3ème section.....	93

Figure IV.9 : Modules de surface « déflexion » de la 1ere section.....	95
Figure IV.10 : Modules de surface « déflexion » de la 2ème section.....	96
Figure IV.11 : Modules de surface « déflexion » de la 3ème section.....	97
Figure IV.12 : Diagramme de la durée de vie et renforcement de la 1ère section.....	98
Figure IV.13 : Diagramme de la durée de vie et renforcement de la 2ème section.....	99
Figure IV.14 : Diagramme de la durée de vie et renforcement de la 3ème section.....	100
Figure IV.15 : Structure proposée par ELMOD6.....	101
Figure IV.16 : Modèle type d'une chaussée traité par ALIZEIII ;;	102
Figure IV.17 : Problème traité par ALIZE III.....	102
Figure IV.18 : Schéma du modèle multicouche de Burmister.....	103
Figure IV.19 : Mode de fonctionnement de la structure.....	104
Figure IV.20 : Structure type de chaussée à renforcer par ALLIZEIII.....	104
Figure IV.21 : Résultat obtenue par programme AlizeIII.....	107

Tableaux

Tableau I.1 : Comparaison des différents types de chaussée	18
Tableau III.1 : Comptage de trafic par catégorie de véhicule.....	52
Tableau III.2 : Comptage de trafic par classe des poids lourds.....	55
Tableau III.3 : Résultats de Tci selon le catalogue Algérien	57
Tableau III.4 : La nature de sol pour le pk 99+700.....	57
Tableau III.5 : La nature de sol pour le pk 105+000.....	58
Tableau III.6 : La nature de sol pour le pk 108+000.....	58
Tableau III.7 : Tableau comparatif du déflectographe Lacroix et du FWD.....	64
Tableau III.8 : Résultats de la déflexion mesurée par FWD et du Déflexographe Lacroix.....	68
Tableau III.9 : Valeurs comparatives entre les déflexions mesurées et les déflexions calculées.....	76
Tableau IV.1 : Les coefficients d'équivalence pour chaque matériau.....	81
Tableau IV.2 : Les coefficients d'équivalence et l'épaisseur de chaque couche de RN18.....	82
Tableau IV.3 : Relevé de l'état visuel de RN18	83
Tableau IV.4 : Le taux de déflexion de RN18	85
Tableau IV.5 : Les seuils admissibles de déflexion de la RN18.....	85
Tableau IV.6 : Le renforcement des couches de la RN 18 d'ELMEDIA.....	86
Tableau IV.7 : Choix des températures équivalentes.....	88
Tableau IV.8 : Type de réseau	88
Tableau IV.9 : Classe du trafic.....	89
Tableau IV.10 : L'ordre de portance de sol.....	89
Tableau IV.11 : Structures proposées par le catalogue Algérien	90

Tableau IV.12 : Résultats des modules d'élasticité de la 1 ^{ère} section	92
Tableau IV.13 : Résultats des modules d'élasticité de la 2 ^{ème} section.....	93
Tableau IV.14 : Résultats des modules d'élasticité de la 3 ^{ème} section	94
Tableau IV.15 : Résultats des modules de surface « déflexion » de la 1 ^{ère} section	95
Tableau IV.16 : Résultats des modules de surface « déflexion » de la 2 ^{ème} section	96
Tableau IV.17 : Résultats des modules de surface « déflexion » de la 3 ^{ème} section.....	97
Tableau IV.18 : Résultats de la durée de vie et l'épaisseur de renforcement de la 1 ^{ère} section	99
Tableau IV.19 : Résultats de la durée de vie et l'épaisseur de renforcement de la 2 ^{ème} section	99
Tableau IV.20 : Résultats de la durée de vie et l'épaisseur de renforcement de la 3 ^{ème} section	100
Tableau IV.21 : Les performances mécaniques relatives aux différents types de matériaux	106
Tableau IV.22 : Valeurs des déformations admissibles.....	107
Tableau IV.23. Étude comparative entre les méthodes de dimensionnement.....	108

Résumé

La déformation des chaussées souples peut atteindre des niveaux dangereux pour les utilisateurs. C'est pourquoi on cherche à cerner le processus d'évolution de plusieurs phénomènes dû à plusieurs facteurs tel que le trafic ainsi que les conditions d'environnement, notamment les conditions hydriques dans les couches de matériaux composant la chaussée.

L'évaluation des caractéristiques structurelles des chaussées permet l'optimisation de leur maintenance. La mesure de déflexion est une mesure de base de cette évaluation.

Ce travail vise à proposer des méthodes plus performantes d'analyse des bassins de déflexion réalisée au niveau de CTTP d'Alger par le deflectographe à la croix et deflectomètre à masse tombante (FWD) prenant également en compte la dispersion des mesures le long d'un itinéraire de la RN 18 de Médea, en associant un travail de modélisation de la réponse mécanique des chaussées et des traitements statistiques des mesures relevées.

En suite le travail porte une modélisation basée sur le calcul inverse de déflexion avec le programme ELMOD6 et une méthode approximative analytique qui adopte une technique d'adaptation mathématique basée sur la formule de Boussinesq avec le système à trois couches consécutif d'Odemark pour estimer les modules de couche de chaussée.

Les résultats de l'analyse comparative entre la déflexion mesurée et calculée montrent que les modules de couche bitumineuse estimés à partir de deux techniques sont dans une variation moyenne de déflexion minimale de 8.80 %. Considérant que la variation moyenne de déflexion maximale et déflexion caractéristique sur tous les sites d'essai est respectivement de 4.23% et 3.57%.

On s'intéresse à la vérification de renforcement de la chaussée dégradée par deux méthodes basées sur deux programmes ; le premier est ELMODE6 qui se base sur la théorie de BOUSSINESQ, et le deuxième appelé ALIZEIII qui se base sur la théorie de BURMISTER.

Mot clés

Comportement, chaussée souple, trafic, Déflexion, calcul inverse avec ELMOD6, renforcement

Abstract

The flexible pavements deformation can reach dangerous levels for users. This is why we try to identify the process of evolution of several phenomena due to several factors such as traffic and environmental conditions, including the water conditions in the layers of materials in the pavement.

The evaluation of the structural characteristics of pavements makes it possible to optimize their maintenance. The deflection measure is a basic measure of this evaluation.

This work aims at proposing more efficient methods of analysis and comparison of deflection basins carried out at the level of CTTTP of Algiers by the deflectograph at the cross and falling mass deflectometer also taking into account the dispersion of the measurements along a route of the RN 18 of Médea, associating a modeling work of the mechanical response of pavements and statistical processing of the measurements taken.

Then the work carries a modeling based on the inverse calculation of deflection with the ELMOD6 program and an approximate analytical method that adopts a mathematical adaptation technique based on the Boussinesq formula with the consecutive three-layer system of Odemark to estimate the pavement layer modules.

The results of the comparative analysis between measured and calculated deflection show that asphalt layer modules estimated from two techniques are in a minimum average deflection variation of 8.80%. Considering that the average variation of maximum deflection and characteristic deflection on all test sites is respectively 4.23% and 3.57%. So, the results show that they are consistent with the measured deflection.

We are interested in the verification of degraded pavement reinforcement by two methods based on two programs; the first is ELMODE6 which is based on the theory of BOUSSINESQ, and the second is called ALIZEIII which is based on the theory of BURMISTER.

Keywords:

Behavior, Flexible pavement, traffic, Deflection, Back-calculation with ELMOD6, reinforcement.

المخلص

يمكن أن يصل تشوه الأرصفة المرنة إلى مستويات خطيرة للمستخدمين. هذا هو السبب في أننا نحاول تحديد عملية تطور العديد من الظواهر بسبب عدة عوامل مثل حركة المرور والظروف البيئية، بما في ذلك ظروف المياه في طبقات المواد في الرصيف. تقييم الخصائص الهيكلية للأرصفة يجعل من الممكن تحسين صيانتها. مقياس الانحراف هو مقياس أساسي لهذا التقييم.

يهدف هذا العمل إلى اقتراح طرق أكثر فعالية لتحليل ومقارنة أحواض الانحراف التي يتم إجراؤها على مستوى CTTT في الجزائر عن طريق أداة الانحراف على الصليب وانحراف الكتلة المتساقطة أيضاً مع مراعاة تشتت القياسات على طول طريق RN 18 في المدينة ، يربط بين عمل نمذجة للاستجابة الميكانيكية للأرصفة والمعالجة الإحصائية للقياسات التي اتخذت.

ثم يحمل العمل نموذجاً يستند إلى الحساب العكسي للانحراف باستخدام برنامج ELMOD6 وطريقة تحليلية تقريبية تعتمد تقنية تكيفية رياضية تعتمد على صيغة Boussinesq مع نظام Odemark ثلاثي الطبقات المتتالي لتقدير وحدات طبقة الرصيف.

تظهر نتائج التحليل المقارن بين انحراف محسوب ومحسوب أن وحدات طبقة الإسفلت المقدره من تقنيتين هي في الحد الأدنى لمتغير انحراف متوسط قدره 8.80%. بالنظر إلى أن متوسط التباين في أقصى انحراف وانحراف مميز على جميع مواقع الاختبار هو على التوالي 4.23% و 3.57%. لذلك تظهر النتائج أنها تتفق مع الانحراف المقاس.

نحن مهتمون بالتحقق من تقوية الرصيف المتدهور بطريقتين على أساس برنامجين؛ الأول هو ELMODE6 الذي يعتمد على نظرية BOUSSINESQ ، والثاني يسمى ALIZEIII الذي يعتمد على نظرية BURMISTER.

الكلمات المفتاحية

مكون، رصيف مرن ، حركة مرور ، مقياس انحراف ، حساب معكوس باستخدام ELMOD6 ، تعزيز

Abréviations

a	Le rayon d'application de la charge en mm
a_i	Coefficient d'équivalence de chacun des matériaux à utiliser
BB	Béton bitumineux
BAC	Béton Armé Continu
BCMC	Béton de Ciment Mince Collé
BBME	Béton bitumineux à module élevés
CTTP	Control Technique des Travaux Publics
CAM	Coefficient d'Agressivité Moyen
CBR	California Bearing Ratio
C	Facteur de cumul de trafic
d_{im}	Déflexion mesurée au capteur i
d_{ic}	Déflexion calculée au capteur i
d_i	La déflexion mesurée 10 ⁻³ mm
d₀	Modules d'élasticité des couches i
ELMOD6	Evaluation of Layer Modulation and Overlay Design
E_i	Modules d'élasticité des couches i
E₀	Le module d'élasticité équivalent
ES	Enduit superficiel
E_{tot}	Épaisseur Équivalente totale
e_i	Épaisseur réelle de la couche
FWD	Falling Weight Deflectometer
I	Taux de croissance annuel
IRI	International Roughness Index

ICBR	Indices CBR
GB	Grave bitumineux
GC	Grave Concassé
GNT	Grave non traités
LCPC	Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées
MTLH	Matériaux traités au liant hydraulique
NPL	Nombre des Poids Lourds
n	Nombre de capteurs
OPM	L'optimum Proctor
P	La charge d'impact générée par la pression dans le centre de charge en MPa
PL	Poids Lourds
q₀	La pression
r_i	Distance entre le capteur et le centre de gravité en mm
RMSE	Root Mean Squared Error (%)
TJMA	Trafic Journaliers Moyen Annuel
Tms	Trafic de l'année mise en service
Tce	Trafic cumulé écoulé
Tcp	Trafic cumulé provisionnel
TVO	Touvenent d'Oued
σ	Écart type
σ_Z	La contrainte verticale
σ_{adm}	La contrainte admissible du sol
ε_t	La déformation de traction à la base des matériaux traités au bitume
ε_z	La déformation verticale sur le sol support
ν	Le coefficient de poisson

μ Le coefficient de Poisson de chaque couche.

ρ_d La densité sèche du matériaux

Introduction générale

La structure d'une chaussée est en général composée de trois groupes de couches superposées : la plate-forme support, les couches d'assises, et la couche de surface ; elles servent à répartir les chargements mécaniques induits par le trafic exercé sur la couche de surface [28-23-30-45].

La route objet de notre étude est une chaussée souple. Les structures de chaussée dites souples comportent une couverture bitumineuse relativement mince, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités, l'ensemble repose sur un sol support [1-23-18-30-45-5]. Les sollicitations dues au trafic ainsi que les conditions d'environnement [23-30-31-45], notamment les conditions hydriques, sont les principales causes d'endommagement de ces chaussées [1-5], et ont une influence importante sur le comportement des matériaux de chaussées et conduisent à deux modes de dégradation : l'orniérage à grand rayon [31] et la fissuration par fatigue de la couverture bitumineuse [18-45-5].

Le présent travail n'a pas la prétention de fournir une méthode prédictive complète pour le phénomène d'orniérage, qui est un problème complexe, encore mal connu et mal maîtrisé, même si quelques-uns des principaux facteurs générateurs sont connus. Notre objectif est de suivre la dégradation d'une chaussée souple, afin de comprendre et de modéliser les paramètres de déflexion, étape indispensable à l'élaboration d'une méthode de prédiction (travail menu par le CTTTP sur la RN N° 18 d'ELMEDEA).

À présent, on cherche à optimiser la maintenance de notre réseau, en visant souvent à prolonger la durée de vie de l'infrastructure. Cette optimisation peut s'effectuer par l'intermédiaire d'évaluations périodiques de notre réseau, qui peuvent se décomposer en une évaluation des caractéristiques de surface (sécurité, adhérence, confort et bruit) et une évaluation des caractéristiques de structure [45]. Cette thèse s'intéresse plus particulièrement à la structure qui représente la part la plus importante du patrimoine en cas de reconstruction. L'enjeu de ce travail de thèse est de répondre aux besoins actuels des gestionnaires de chaussée en matière d'auscultation routière.

L'évaluation structurelle des chaussées est basée principalement sur trois types d'informations [10] :

- La fissuration observable en surface qui vient de l'endommagement mécanique (le trafic) pour les couches bitumineuses et également de la fissuration thermique et de retrait pour les chaussées à structure en matériaux traités aux liants hydraulique.
- Les déformations permanentes mesurables en surface, liées principalement aux déformations permanentes des couches non traitées sous l'action du trafic pour les structures appelées souples [24] ;
- La mesure de déflexion, déformation sous l'action d'une charge lourde, qui permet d'évaluer la rigidité de la chaussée. La déflexion permet d'estimer (par des méthodes de calcul inverse) et de s'en servir pour estimer la durée de vie résiduelle de la chaussée [45]. La thèse s'intéresse à cette mesure qui permet d'évaluer les caractéristiques mécaniques de la chaussée objet d'étude.

La mesure de déflexion est historiquement une mesure de base de l'évaluation structurelle [45]. Elle donne une image de la rigidité globale de la structure. Actuellement, les mesures de déflexion sont utilisées à l'échelle locale, pour estimer la durée de vie résiduelle d'une chaussée ou à l'échelle d'un itinéraire, pour détecter des zones homogènes ou dégradées. Les appareils d'auscultation tels que le déflectographe lacroix et le FWD permettent de relever un bassin de déflexion complet [28-45]. En s'inspirant de ce qui est fait pour le FWD (calcul inverse des modules, ou calcul de différents indicateurs) [45].

Nous chercherons dans un premier temps à mettre en place une procédure de correction des mesures de déflexion de ces appareils d'auscultation et d'améliorer les résultats de calcul inverse (back-calculation) des bassins de déflexion. Dans un second temps, nous chercherons à exploiter les bassins de déflexion, en vue de faire une comparaison entre la variation des modules de couches de chaussées rétrocalculés et de couche de surface estimée en utilisant la déflexion itérative statique, qui se base sur le programme : ELMOD6.

Ce mémoire de thèse est scindé en deux grandes parties : une première partie essentiellement bibliographique, posant le cadre de notre étude (chapitre 1 et chapitre 2), et une seconde partie axée sur une tentative de caractérisation de dégradation des chaussées souples basée sur des bassins de déflexions mesurées in situ (chapitre 3 et chapitre 4).

Le premier chapitre est entièrement consacré à une étude bibliographique sur les chaussées et par citer leurs caractéristiques (géométrie et les différentes couches qui constitue la chaussée) et leur mode de comportement. En s'attardera ensuite sur l'exposition des différents types de chaussées.

Le second chapitre est consacré à la présentation des connaissances sur les principales causes de dégradations en illustrant leur mécanisme de formation et les facteurs d'influences afin de déduire les différents types de dégradations qui appartiennent dans la couche de surface de la chaussée.

Le troisième chapitre vise à développer une méthode de détection de l'endommagement à partir de la mesure du bassin de déflexion par l'intermédiaire d'indicateurs issus des mesures des appareils : déflectographe et FWD. Ce chapitre s'intéresse tout d'abord à expliquer de façon catégorique les méthodes de rétrocalcul des chaussées souples ainsi que de les comparer et de les contraster en termes de précision de la modélisation, de dépense informatique, de détails de calcul et de besoins des données. Le sujet proposé consiste une comparaison entre la variation des modules de couches de chaussées rétrocalculés de chaque couche estimée en utilisant la déflexion itérative statique, on utilise le programme : ELMOD6. Ces étapes d'optimisation sont menées jusqu'à ce que la différence entre les déflexions calculées et mesurées reste sous un certain critère d'erreur.

Dans le quatrième et le dernier chapitre, on commence par définir les différentes méthodes de dimensionnement appliquées en Algérie, ensuite on présente une série d'applications numériques pour vérifier le choix de dimensionnement de chaussée objet de l'étude. On s'intéresse également à la vérification de renforcement de la chaussée dégradée par deux méthodes basées sur deux programmes ; le premier est ELMODE6 qui se base sur la théorie de BOUSSINESQ, et le deuxième appelé ALIZEIII qui se base sur la théorie de BURMISTER. D'après les résultats des méthodes qui ont été mentionnées précédemment, on remarque bien malgré que la méthode CBR donne le corps de chaussée le plus économique mais la méthode du catalogue nous donne le corps de chaussée adéquat et tout en sachant que cette méthode est la plus utilisée en Algérie dans les routes nationales et les autoroutes.

Enfin, nous clôturons ce travail par des conclusions générales, et nous y rappelons les principaux résultats obtenus, en ouvrant la perspective de nouvelles études qui nous semblent possibles pour le développement futur.

Chapitre I : Généralités sur le comportement des chaussées

I.1. Introduction

Le rôle principal d'une assise de chaussée est la répartition latérale des contraintes dues à des charges roulantes en surface afin de les amener à des niveaux compatibles avec les caractéristiques mécaniques du sol naturel.

La structure d'une chaussée est constituée généralement de trois groupes de couches, superposées du haut vers le bas : la couche de surface, les couches d'assise et la plate-forme support (figure I.1). La couche de surface est constituée d'une couche de roulement en béton bitumineux qui subit directement les actions agressives dues au trafic et au climat. Elle peut éventuellement avoir en sa partie inférieure une couche de liaison qui assure l'adhérence entre la couche de roulement et la couche de base. L'assise de la chaussée est composée généralement d'une couche de base et d'une couche de fondation. Proches de la surface, ces deux couches sont donc réalisées avec des matériaux élaborés leur permettant de résister aux sollicitations mécaniques relativement élevées. La plate-forme support est constituée du sol naturel terrassé (sol support) et d'une couche de forme [1-45]. Cette dernière est une transition entre le corps de la chaussée et le sol support. Son rôle pendant les travaux, est d'assurer un nivellement permettant la circulation des engins et de protéger le sol support contre l'agression de ces derniers. Par rapport au fonctionnement de la chaussée en service, cette couche assure une homogénéisation des caractéristiques mécaniques dans le cas d'une dispersion dans le sol support et/ou le remblai.

Les chaussées routières peuvent être classées en six grandes familles : les chaussées souples, les chaussées bitumineuses épaisses, les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, les chaussées à structures mixtes, les chaussées à structures inverses et enfin les chaussées en béton de ciment [45].

Le travail de cette thèse porte uniquement sur les chaussées souples. Dans ce chapitre, on commence par définir des généralités sur les chaussées et par citer leurs caractéristiques et leur mode de comportement. En s'attardera ensuite sur l'exposition des différents types de chaussées.

I.2. Généralités sur la route

I.2.1. Définition

La route est une voie aménagée pour la circulation des véhicules automobiles ou autres ainsi que des piétons. À l'intérieur des agglomérations, la route prend le nom de rue, avenue, boulevard...etc [10 - 46].

Le premier rôle d'une chaussée est de permettre la circulation tout en assurant la sécurité et le confort des usagers. Dans le but de réduire les coûts, il est nécessaire de trouver une structure capable de supporter et de transmettre au sol les sollicitations mécaniques et thermiques s'exerçant sur la chaussée [1].

I.2.2. Les caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques d'une route sont illustrées par le profil en long, en travers et le tracé en plan [10].

I.2.2.1. Profil en travers

Il illustre essentiellement la largeur de la chaussée et celle des accotements. Il indique aussi les pentes transversales (voir figure I.1), [10 – 2].

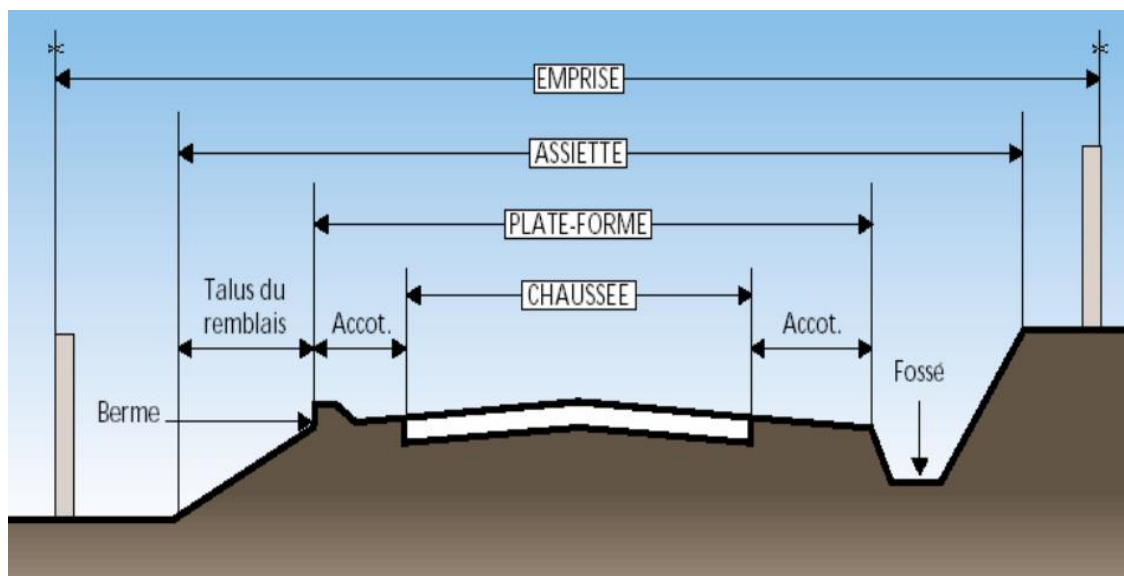


Figure I.1. Profil en travers type d'une route [42].

➤ Terminologie

L'emprise : C'est la surface du terrain naturel affectée à la route et à ses dépendances (Talus, exutoires, etc...) limitée par le domaine public.

L'assiette : surface du terrain réellement occupée par la route.

Plate-forme : C'est l'ensemble de la chaussée et des accotements, elle est située entre les fossés ou les crêtes de talus de remblais.

Chaussée : surface aménagée de la route sur laquelle circulent les véhicules.

Accotement : zones latérales de la *plate-forme* qui bordent extérieurement la chaussée.

Talus : Le talus a une inclinaison qui dépend de la cohésion des sols qui le constitue, cette inclinaison est désignée par une fraction (A/B) tel que :

A : la base du talus.

B : hauteur du talus.

Le fossé : C'est un ouvrage hydraulique destiné à recevoir les eaux de ruissellement.

I.2.2.2. Profil en long

Il indique la valeur des pentes et des rampes, ainsi que les rayons des sommets des côtes et des points bas.

I.2.2.3. Tracé en plan

Il met en évidence les longueurs des sections rectilignes et la valeur des rayons de courbure dans les virages.

I.2.3. Structure des chaussées : différentes couches

Rappelons que le rôle d'une chaussée est de reporter sur le sol support, en les répartissant convenablement, les efforts dus au trafic. La chaussée doit avoir une épaisseur telle que la pression verticale transmise au sol soit suffisamment faible afin que celui-ci puisse la supporter sans dégradation [18].

Comme la pression dans la couche granulaire décroît régulièrement en profondeur, on peut constituer une chaussée par la superposition de couches des caractéristiques mécaniques croissantes. En général, on rencontre les couches suivantes à partir du sol (voir figure I.2), [1 - 10 - 2] :

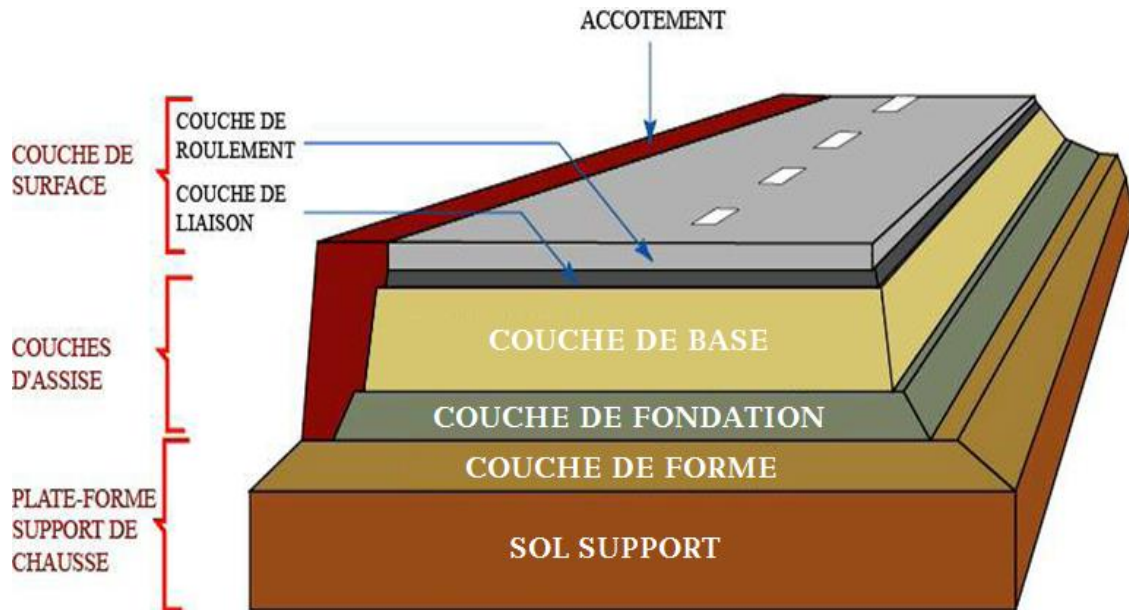


Figure I.2. Les différentes couches qui constituent la structure de la chaussée.

Chaque couche constituant la chaussée doit répondre à une qualité de mise en œuvre qui comprend :

- Le respect des épaisseurs de couches ;
- Le respect de la géométrie de l'ouvrage. (Profils en long et en travers) ;
- Les tolérances de réglage de matériaux ;
- Le respect des objectifs de compactage et de densification des couches ;

Les objectifs de compactage sont illustrés au (figure I.3) :

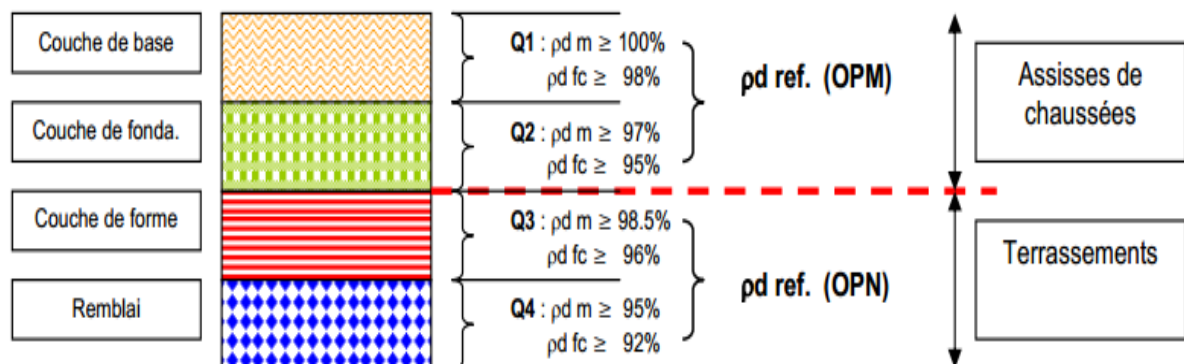


Figure I.3. Principaux objectifs de compactage des couches de chaussée [17]

I.2.3.1. Sol support

Il est généralement surmonté d'une couche de forme pour former un ensemble appelé plateforme support de chaussée. Cette dernière sert, comme son nom l'indique, de support au corps de chaussée.

I.2.3.2. Couche de forme

La couche de forme est un élément de transition qu'on introduit entre le sol support et les couche de fondation afin d'améliorer et d'uniformiser la portance du sol. Cette couche, ne fait pas partie intégrante de la chaussée, elle est constituée soit de matériaux grenus roulés ou concassés, soit de matériaux traités au liant hydrauliques [35 -36]. Elle a plusieurs fonctions :

- Lors des travaux elle protège le sol support, contribue au nivellement et permet la circulation des engins de chantier ;
- Elle permet de rendre plus homogènes les caractéristiques du sol terrassé et de protéger ce dernier du gel, en reprenant les hétérogénéités du sol supports ;

I.2.3.3. Les couches d'assises

L'assise de chaussée se décompose en deux sous-couches : La couche de fondation, surmonté de la couche de base [36].

- **Couche de fondation** : Elle est constituée de gravier concassé 0/40 d'une épaisseur de 20 cm. Elle répartit la pression verticale sur le support, afin de maintenir les déformations.
- **Couche de base** : Elle est constituée de gravier 0/25 et bitume elle est d'une épaisseur de 20 cm, cette couche supporte exactement l'action des véhicules à l'intérieur de laquelle la pression élevée s'atténue avant d'être transmise à la couche de fondation.

I.2.3.4. La couche de surface

À son tour la couche de surface a généralement une structure bicouche, couche de roulement et éventuellement couche de liaison. Constituée de béton bitumineux ou d'enduit, sa fonction est de protéger la structure de toute action environnementale extérieure et du trafic complexe, elle a aussi un rôle de prévention contre la remontée de fissure. De plus, sa place dans la structure en fait la garante de l'uni, l'adhérence... vis-à-vis des utilisateurs. La couche de liaison assure un bon collage entre la couche de roulement et les assises [36].

Le choix de la couche de surface doit résulter de la prise en considération de plusieurs objectifs tels que :

- La sécurité et le confort des usagers, en relation avec les caractéristiques de surface ;
- Le maintien de l'intégrité de la structure, par la protection des couches d'assise vis-à-vis des infiltrations des eaux pluviales et des sels de déverglaçâtes ;
- L'impact sur l'environnement, avec notamment la recherche d'une réduction des bruits de roulement ;
- Les possibilités de régénération des caractéristiques de surface ;

Suivant la description fonctionnelle des couches de chaussée, le guide technique français sur la conception et le dimensionnement des structures de chaussée [LCP 94] propose un panel de matériaux de construction qu'on peut regrouper en deux grandes familles selon qu'ils soient liés ou non liés :

- **Les matériaux granulaires non liés** : ou encore Graves Non Traitées (GNT), utilisés pour la réalisation des chaussées à faibles trafics ;
- **Les matériaux granulaires liés** : utilisés pour la réalisation de structures de chaussées à forts trafics.

Si l'on se réfère à la couleur du liant utilisé pour former le mélange avec les matériaux granulaires, on trouve :

- **Les matériaux noirs** : traités aux liants hydrocarbonés ;
- **Les matériaux blancs** : traités aux liants hydrauliques (MTLH).

I.2.4. Différents types de chaussée

Les structures de chaussées sont classées selon la nature des matériaux, leur localisation dans la structure de chaussée et l'intensité du trafic, en des catégories parfaitement distinctes [40 – 6 – 2 – 42].

I.2.4.1. Chaussées souples

Ce sont les structures dites traditionnelles composées d'une couche bitumineuse (BB) mince (< 15 cm) [36] réduit parfois à un enduit dans le cas de chaussée à très faible trafic. L'assise est réalisée d'une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités (GNT), (voir figure

I.4). L'épaisseur de l'ensemble de la structure est en générale comprise entre 30 et 60 cm [2-42 – 14 - 46].

Leur comportement mécanique

Du fait de l'absence de cohésion dans les couches de l'assise des chaussées souples et de la faible épaisseur de la couche de roulement, celles-ci sont flexibles. Sous l'action d'une charge roulante, la couche de roulement subit à sa base des efforts répétés de traction par flexion ce qui conduit à la dégradation par fatigue de la couverture bitumineuse avec l'apparition des fissures isolées qui pouvant croître en gravité vers un faïençage [32].

La faible rigidité de l'assise conduit à une transmission des efforts verticaux au sol support avec une diffusion latérale relativement faible. Ceci provoque l'apparition des déformations plastiques dont le cumul augmente avec le trafic conduisant ainsi, à l'apparition d'ornières en surface qui détériorent la qualité du profil en long de la chaussée. Selon les travaux réalisés par [26], les déformations irréversibles - cause majeure de l'apparition de l'orniérage - se concentrent principalement dans le sol support et/ou l'assise de la chaussée.

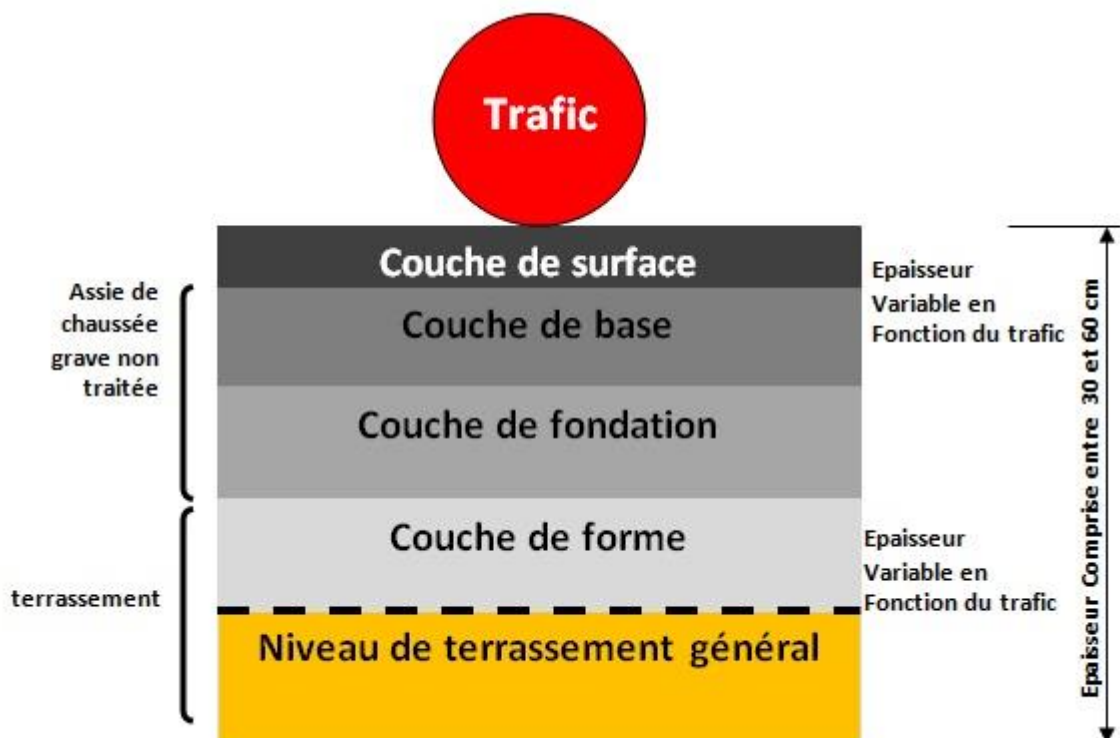


Figure I.4. Structure type d'une chaussée souple

I.2.4.2. Les chaussées bitumineuses épaisses.

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse surmontée un corps de chaussée d'épaisseur comprise entre 15 et 40cm (composé d'une couche de base et une couche de fondation) en grave traitées aux liants hydrocarbonés ou hydrauliques [35-36], (voir figure I.5).

Vue la différence d'épaisseur de la couche d'assise entre la chaussée simple et la chaussée épaisse, leur fonctionnement se diffèrent.

Leur comportement mécanique

La diffusion et l'atténuation des charges du trafic transmises aux sols sont atteints grâce à la rigidité et la résistance en traction.

Le collage des couches a une grande importance pour ce type de chaussée car il permet les allongements maximaux à la base des couches les plus profondes et donc éviter les sollicitations en traction de chaque couche, qui conduisent à la ruine prématurée de la structure.

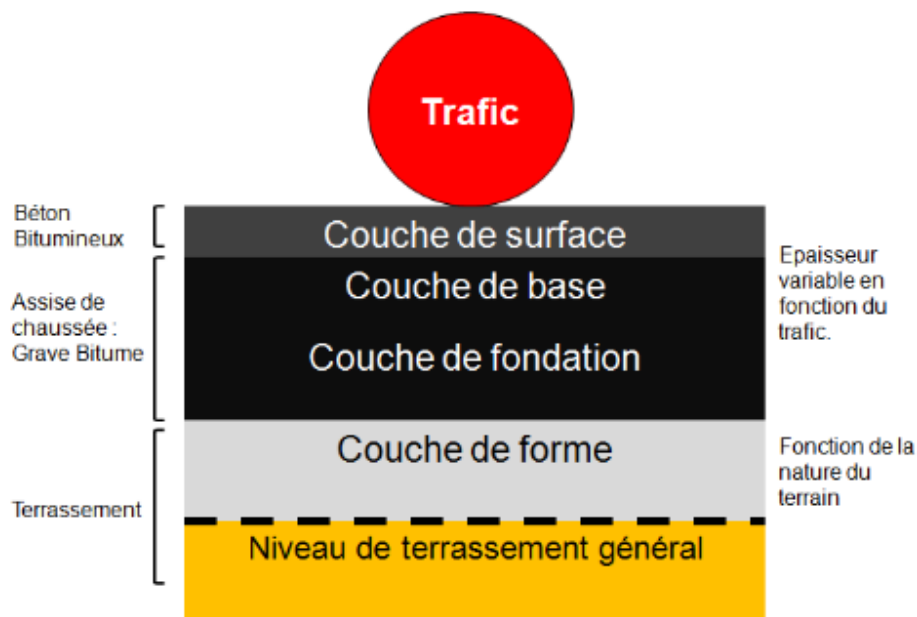


Figure I.5. Structure type d'une chaussée bitumineuse épaisse

I.2.4.3. Les chaussées semi rigides

La couche de roulement est composée d'un revêtement bitumineux [35], elle repose sur une assise traitée aux liants hydrauliques dont l'épaisseur totale est d'environ 20 à 50 cm, (voire figure I.6). Ce type de chaussée présente un fort risque de retrait qui fait apparaître, dans la couche de base, des fissures remontant rapidement dans la couche de surface [13].

Leur comportement mécanique

Ces chaussées sont qualifiées de semi rigide. La grande rigidité des couches d'assise traitée limite les contraintes transmises aux couches de chaussée, elles sont par contre soumises à des contraintes de traction- flexion déterminantes pour leur dimensionnement.

Le manque d'adhérence entre les différentes couches entraîne des contraintes de traction en partie basse de chacune d'entre elles. De plus ces matériaux sont sujets aux retraits thermiques et de prises qui créent des fissures, celle-ci remontent en surface jusqu'à la couche de roulement.

L'interface couche de surface – couche de base est une zone sensible car :

- Elle est soumise à de forte contrainte normale et de cisaillement horizontal ;
- Les centimètres supérieurs de l'assise traitée sont souvent de plus faible résistance.

Le phénomène de retrait est l'un des problèmes qu'on rencontre dans ce type de chaussée, malgré qu'il soit empêché par le frottement entre la couche d'assise et le sol support jusqu'à la couche de roulement, il remonte au travers la couche de roulement.

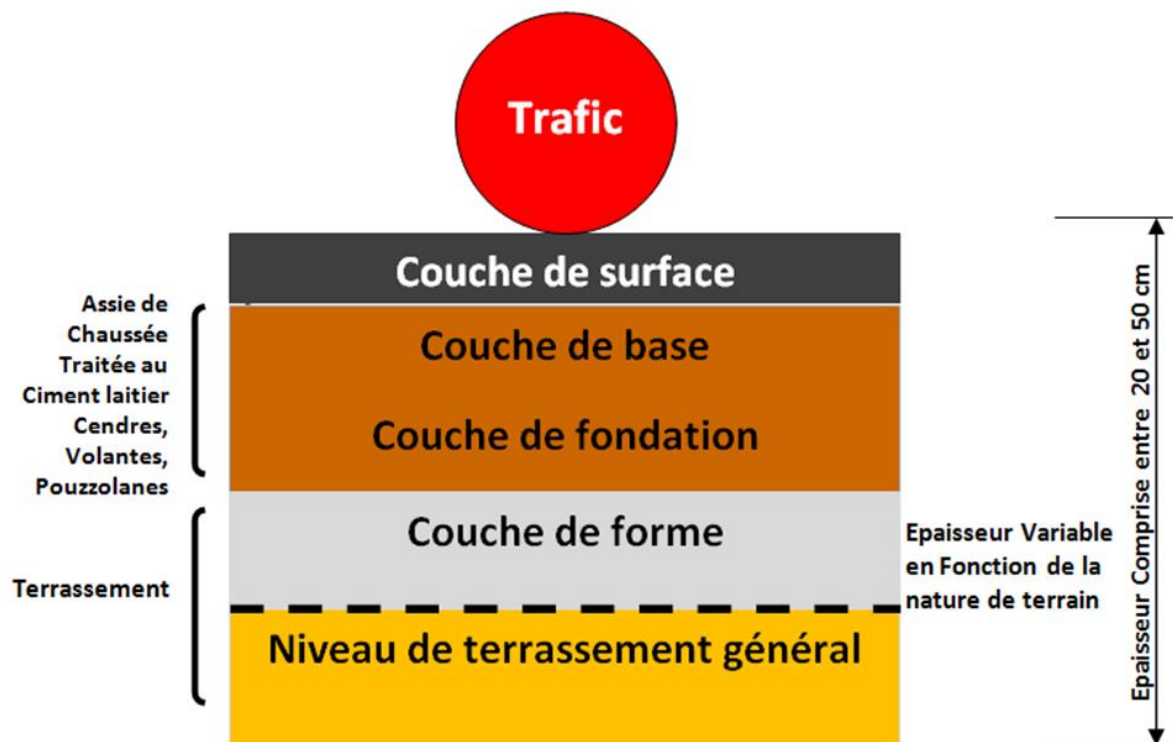


Figure I.6. Structure type d'une chaussée Semi rigide

I.2.4.4. Les chaussées rigides (ou en béton de ciment)

Sont constituées d'une couche de béton de 15 à 40 cm recouverte d'une couche mince en enrobés bitumineux [35-36] (voir la figure I.7).

La couche de béton peut surmonter :

- Une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton de ciment ;
- Une couche drainante en matériaux non traités ;
- Une couche bitumineuse qui repose sur une couche de forme.

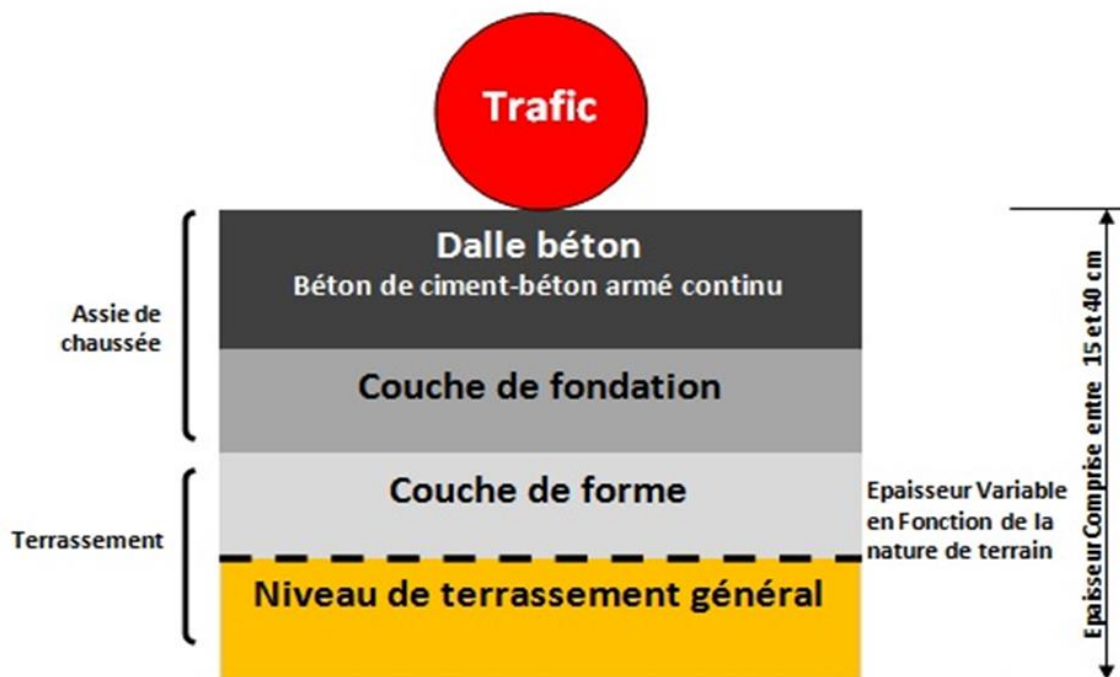


Figure I.7. Structure type d'une chaussée rigides (ou en béton de ciment)

La couche de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu) ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints. Donc on rencontre les 4 modèles illustrés dans les figures I.8 jusqu'à I.12 [10 – 23] :

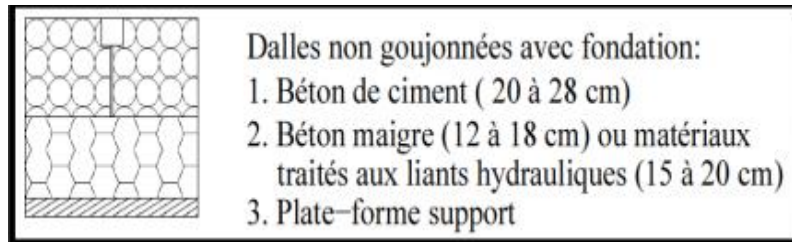


Figure I.8. Dalles non goudonnées avec fondation [10]

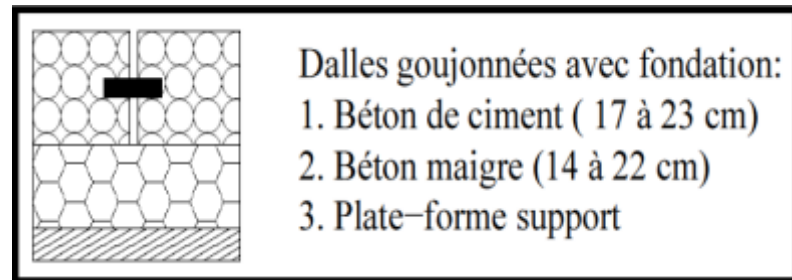


Figure I.9. Dalles goudonnées avec fondation [10]

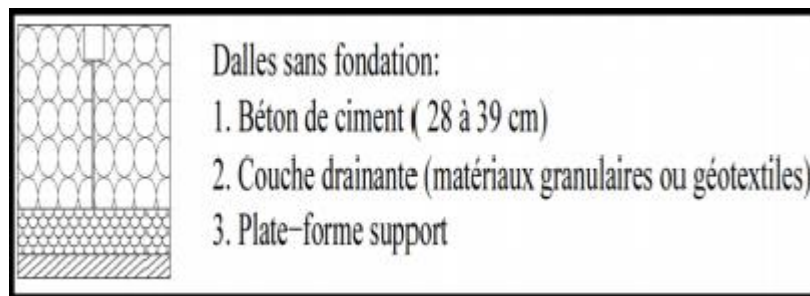


Figure I.10. Dalles sans fondation [10]

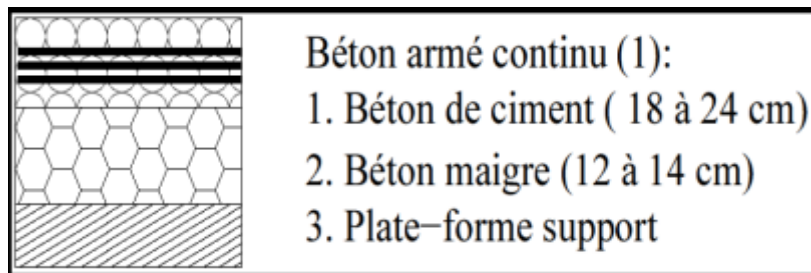


Figure I.11. Béton armé continu1 [10]

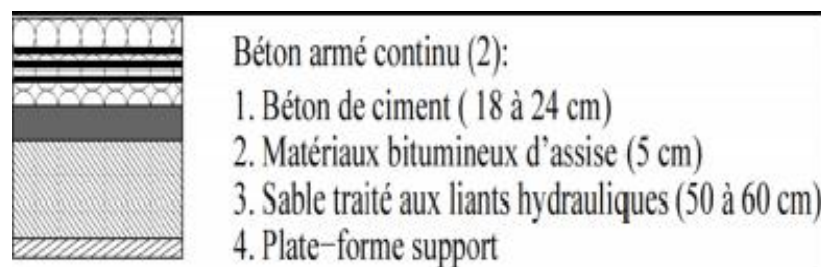


Figure I.12. Béton armé continu 2 [10]

Leur comportement mécanique

Au regard du module d'élasticité élevé du béton armé, les sollicitations déterminantes sont celles de traction par flexion dans la dalle. La mise en œuvre du béton de ciment sur une longueur importante provoque l'apparition des fissures transversales suite au phénomène de retrait empêché. Pour tenir compte de ce phénomène, les derniers types de cette structure introduisent les notions de goujon ou de béton armé continu afin d'assurer une continuité mécanique au franchissement de la fissure [10].

I.2.4.5. Les chaussées à structure mixte

La couche de roulement et la couche de base (10 à 20 cm) sont en matériaux bitumineux [35-26]. La couche de fondation est en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm) [15], (voir figure I.13). L'épaisseur de matériaux bitumineux doit être de la moitié de l'épaisseur totale de la chaussée. Ce type de chaussée empêche la remontée de fissures entre la couche traitée aux liants hydrauliques (retrait) et la couche de grave bitume.

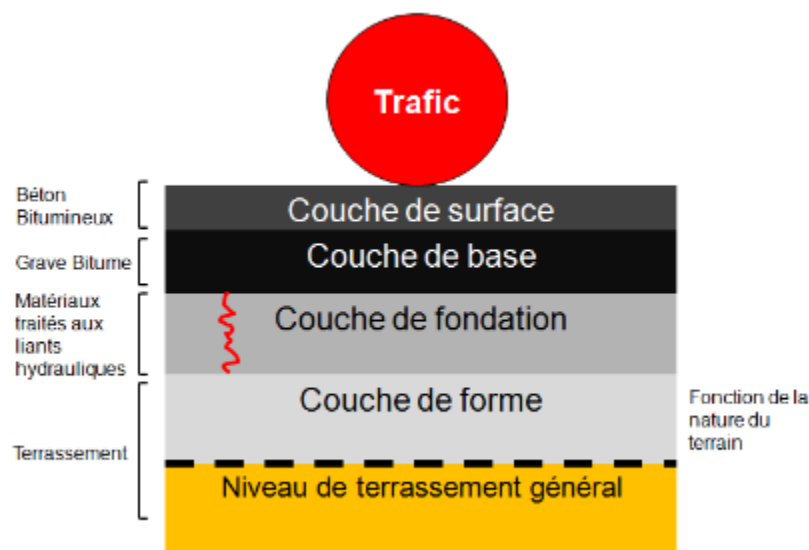


Figure I.13. Chaussée à structure mixte [25]

Leur comportement mécanique

La couche de matériau traité aux liants hydrauliques placée en fondation, diffuse et atténue, du fait de sa raideur élevée, les efforts transmis au sol support. Elle constitue un support de faible déformabilité pour les couches supérieures de matériaux bitumineux. La faiblesse de ces structures tient dans la sensibilité des interfaces aux dilatations différentielles, les couches peuvent alors se décoller et les couches supérieures supporter des contraintes qui produisent leur destruction [10 - 2 - 23].

I.2.4.6. Les chaussées à structures inverses

En les comparant aux structures mixtes, les chaussées inverses comportent une couche supplémentaire de matériaux granulaires non traités d'environ 12cm [23-24]. Cette couche est introduite entre la couche bitumineuse de 15cm d'épaisseur et la couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques, (figure I.14). L'épaisseur totale de la structure est comprise entre 60 et 80cm [15-16].

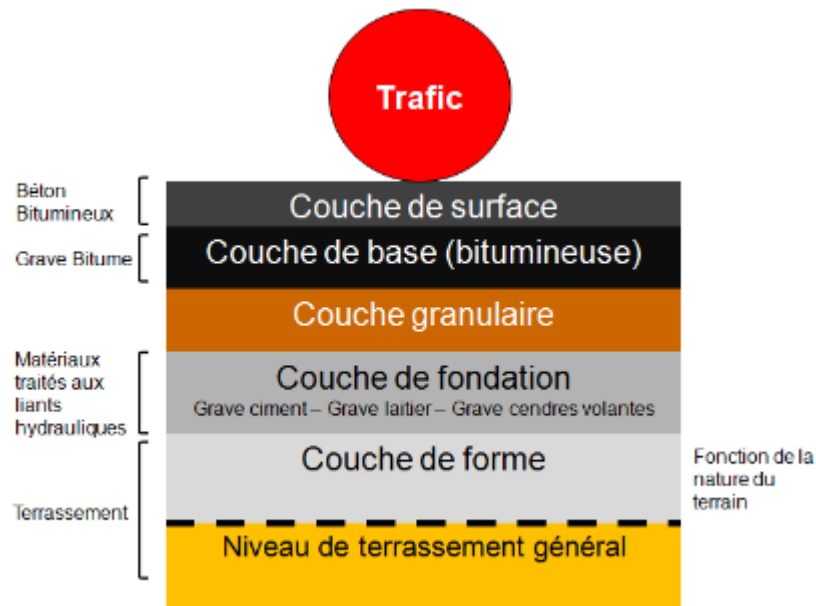


Figure I.14. Chaussée à structure inverse [25]

Leur comportement mécanique

La couche intermédiaire en matériaux granulaires non traités est relativement déformable dans le sens horizontal, elle a pour fonction de limiter les fissures.

La dégradation de ces structures est provoquée par des orniérages limités et des fissures transversales de fatigue. La mise en œuvre est plus sensible aux imperfections que celles pourvues des couches collées, elles sont particulièrement sensibles à l'eau. En effet, la circulation de l'eau dans la couche intermédiaire conduit rapidement à la ruine des couches supérieures [10 -2].

Les trois couches de ce type de structure ont toutes un rôle spécifique. La fondation traitée aux liants hydraulique permet de répartir les contraintes sur le sol et d'assurer un support de qualité pour les couches supérieures. La couche granulaire a pour fonction d'absorber les fissurations de la couche de fondation et ainsi d'empêcher les remontées de fissures jusqu'à la couche de roulement. La couche de roulement assure l'étanchéité et l'uni de l'ensemble.

I.2.4.7. Les chaussées à structures composite

C'est une structure qui a été l'objet d'une étude technico-économique au début des années 1990. Cette étude a pour but d'assembler la qualité de durabilité des bétons de ciment avec les qualités souplesse et capacité d'adaptation des matériaux bitumineux [10]. Deux nouvelles structures ont été développées sont illustrés aux figures I.15 et I.16 :

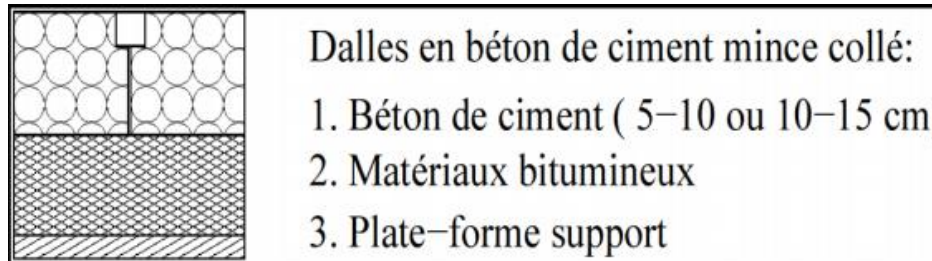


Figure I.15. Chaussée avec une dalle en béton de ciment mince collé (BCMC) [10]

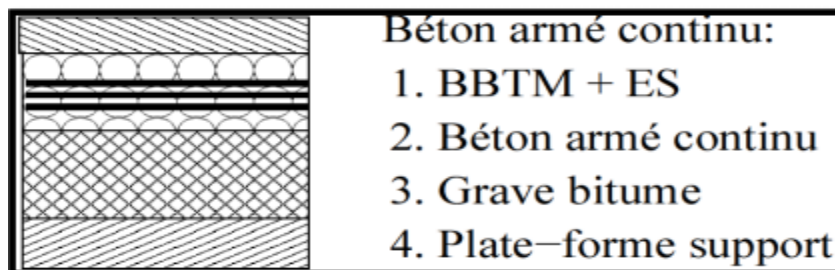


Figure I.16. Chaussée en béton armé continu sur grave bitume (BAC/GB) [10]

➤ Béton de ciment mince collé (BCMC)

Elle est une technique d'entretien superficiel des structures bitumineuses dégradées, apparue aux États Unis. Elle consiste d'abord à raboter et à nettoyer la structure dégradée, puis étaler une couche de béton de ciment non armé (épaisseur 5 à 10cm). L'intérêt de cette technique réside dans l'adhérence de la couche de béton à la structure en matériaux bitumineux.

➤ Béton armé continu sur grave bitume (BAC/GB)

Elle est constituée d'une couche de fondation en grave bitume d'épaisseur 9cm qui surmonte la plate-forme support de chaussées. La GB est grenillée avant la mise en œuvre de la couche de béton armé continu (BAC) dont l'épaisseur varie en fonction du trafic. Le rôle des armatures dans le BAC est principalement de contrôler la fissuration transversale sans participer à la résistance aux sollicitations du trafic.

À partir de ça, on peut déduire une comparaison entre les différents types de chaussée représenté dans le tableau I.1 :

I.2.5. Comparaison des différents types de chaussée

Tableau I.1. Comparaison des différents types de chaussée

Structure type	Nature des couches			Domaine d'utilisation usuel	Condition aux interfaces	Commentaires
	Surface	Base	Fondation			
Souple	Bitumineuse	GNT		Trafic faible à moyen faible	Interfaces collées	Épaisseur totale : 30 à 60cm
Bitumineuse épaisse	Matériaux bitumineux	Matériaux bitumineux (GT)		Tous types saufs : trafic très faible, charge lourde exceptionnelle, contexte spécifique, aéronautiques, tramways.	Toutes les couches sont considérées comme collées	Épaisseur de la couche d'assise : 15 à 40cm
Semi rigide	Bitumineuse	MTLH		Trafics moyens	-collées -semi collées	Épaisseur de la couche d'assise : 20 à 50cm
Rigide	Béton de ciment (15 à 40cm)		-MTLH -GNT -Bitume	Trafics moyens forts a forts trafics spéciaux et charges lourdes : aéroports, plate-forme industrielles et portuaires, tramways,	L'interface entre les couches base-fondation : décollée	-couche de forme en MTLH -dispositions particulières (dalle goujonnée ou non, béton armé continu, etc.) afin d'assurer une continuité mécanique franchissement d'une fissure due au retrait du béton
Mixte	Matériaux bitumineux		MTLH	Trafics forts et très forts	L'interface entre les couches de fondation-base : collée	Rapport de 0.5 entre l'épaisseur de matériaux bitumineux et celle de la structure de chaussée
Inverse	Bitumineuse	GNT	MTLH	Trafics forts et très forts	Bitumineuse-GNT : collé GNT-fondation : décollée	Épaisseur de la GNT (environ 12cm)

I.3. Conclusions

La chaussée est essentiellement un ouvrage de répartition des charges sur le terrain de fondation. Pour que cette fonction soit assurée sûrement sans déformation, la chaussée doit être construite sur un terrain solide avec des matériaux qui répondent à sa fonction.

Le sol de fondation, éventuellement surmonté d'une couche de forme en matériaux sélectionnés ou traités, constitue la plate-forme support laquelle repose la chaussée.

Pour bien remplir son rôle, la couche de forme doit posséder un certain nombre de qualités :

- Elle doit présenter une assise rigide pour le compactage ;
- La rigidité de l'assise doit être résistante aux intempéries ;
- Elle contribue à l'amélioration de la portance de la plate-forme pour optimiser le cout de l'ensemble couche de forme – structure de chaussé ;
- La protection thermique des sols supports gélifs,

Afin de satisfaire ces exigences, on est conduit à apporter une attention particulière au choix du sol de fondation et souvent même à prévoir des épaisseurs de chaussée d'autant plus au moins importante que le sous-sol sera plus ou moins résistant.

Pour cela, il conviendra d'étudier avec la plus grande attention l'aptitude du terrain à porter la chaussée et de ne procéder à la construction de celle-ci qu'après avoir obtenu toutes garanties sur la résistance de celui-là.

Chapitre II : Généralités sur les phénomènes de dégradation des chaussées revêtues

II.1. Introduction

L'évaluation des chaussées repose sur une série de mesures et d'observations visuelles qui permettent d'établir la condition de la structure, de diagnostiquer les causes des dégradations apparentes et de cibler les solutions de réhabilitation les plus appropriées. Lorsqu'il s'agit de mesures telles que les caractéristiques géométriques ou physiques de la chaussée, il est plus facile de fixer des critères qui servent de base à l'évaluation et à la réhabilitation. Lorsqu'il s'agit d'observations visant à caractériser des dégradations de surface et l'état de la chaussée, l'établissement de tels critères devient plus difficile [31].

A la base de toute méthodologie d'auscultation des chaussées et de toute stratégie d'entretien, figurent généralement un relevé des dégradations de surface et une interprétation associée [29].

La dégradation de surface constitue, dans la plupart des cas, un des indicateurs les plus précoces et les plus sensibles de l'évolution des caractéristiques structurelles et de surface de chaussées.

Le climat, le type et l'intensité de trafic, la qualité des sols et les matériaux utilisés ainsi que le système de drainage sont les facteurs essentiels déterminant l'évolution de l'état de la route, ainsi ont en commun des problèmes de fissuration d'origines diverses et dont les formes diffèrent d'autant.

Dès sa mise en service, la route commence à se dégrader. Les dégradations se caractérisent par des désordres divers en particulier l'orniérage qui constitue la principale pathologie des chaussées revêtues et les non revêtues. Ce phénomène peut résulter des déformations dans la couche de surface ou des déformations dans les autres couches de la chaussée.

Dans ce chapitre, nous intéressons à l'étude des différentes dégradations qui appartiennent dans la couche de surface de la chaussée en illustrant les causes, le mécanisme de formation et les facteurs d'influences.

II.2. Dégradations des chaussées revêtues

Les dégradations des chaussées revêtues se répartissent en deux catégories [30-31] :

- Les dégradations de type A ;
- Les dégradations de type B.

II.2.1. Les dégradations de type A

Elles caractérisent un état structurel de la chaussée, soit lié à l'ensemble des couches et du sol, soit seulement lié à la couche de surface. Ces sont des dégradations issues d'une insuffisance de capacité structurelle de la chaussée qui interviennent dans la recherche de la solution en association avec d'autres critères et notamment la portance caractérisée par la déflexion statique. Ces dégradations sont au nombre de trois [46-29-30] :

- La déformation
- La fissuration (de fatigue)
- Le faïençage

II.2.1.1. La déformation

II.2.1.1.1. Orniérage

L'apparition du trafic lourd et sa croissance ont été accompagnées par l'apparition des dégradations prématurées notamment l'orniérage qui est l'un des principaux modes de dégradations des chaussées souples [29].

- Description

C'est une déformation permanente longitudinale de la chaussée fréquente dans les sentiers des roues des véhicules [31].

- Causes probables

Les orniérages proviennent en général de [29-30] :

- Déformation plastique des enrobés (fluage) ;
- Sous dimensionnement des couches inférieures ;
- Tassement de la chaussée sous l'effet du trafic ;
- Défaut de résistance d'une couche inférieure de la chaussée ou de la fondation.

- Quantification

Niveau de gravité

- Gravité faible $h < 2\text{cm}$
- Gravité moyenne $2\text{cm} < h < 4\text{cm}$
- Gravité forte $h > 4\text{cm}$

Étendue

- Étendue 1 : $< 10\%$
- Étendue 2 : $10 - 50\%$
- Étendue 3 : $> 50\%$
- Type d'orniérage

En fonction de leurs tailles (Profondeurs) les ornières sont classées en trois catégories (figure II.1) :

- Petits (6 à 12.5mm) ;
- Moyens (12.5 à 25mm) ;
- Grands ($>25\text{mm}$).



Figure II.1. Différents types d'orniérage en fonction de la taille.

En fonction de leur forme, il existe trois types d'ornières, (figure II.2) :

- **Les ornières d'usure**

Sont dues au départ et à la perte progressive des particules des granulats de la couche de surface, sous l'effet combiné des facteurs d'environnement et de trafic.

- **Les ornières structurelles**

Résultent de la déformation verticale permanente (tassement) dans la structure de la chaussée sous les chargements répétés du trafic.

- **Les ornières d'instabilité :**

Elles résultent du mouvement et de déplacements latéraux des matériaux dans la couche bitumineuse. Elles sont plus fréquentes dans les chaussées souples à mauvaises caractéristiques.

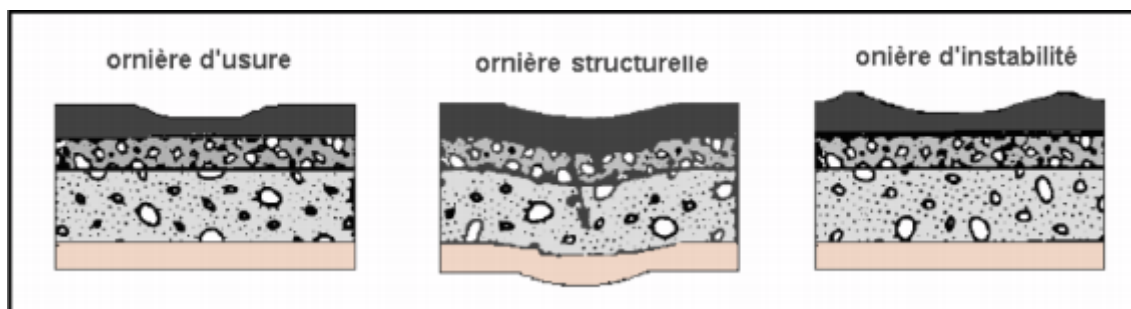


Figure II.2. Différents types d'orniérage en fonction de leur forme [10].

II.2.1.1.2. Affaissement

- Description

Abaissement localisé du niveau du profil de la chaussée, on le rencontre généralement sur les voiries secondaires dont la chaussée est souple, (figure II.3) [29].



Figure II.3. Affaissement [29].

- Aggravation prévisible
- Formation de fissures
- Formation de faïençage puis de nids de poule

- Quantification

Gravité

- Faible : Dénivellation dont la profondeur est inférieure à 20 mm sous la règle de 3 m. À la vitesse maximale permise, la sécurité n'est pas compromise et l'effet sur le confort au roulement est négligeable.
 - Moyen : Dénivellation dont la profondeur se situe entre 20 et 40 mm sous la règle de 3 m. À la vitesse maximale permise, la sécurité est peu compromise et le confort au roulement est modérément diminué.
 - Forte : Dénivellation dont la profondeur est supérieure à 40 mm sous la règle de 3 m. À la vitesse maximale permise, la sécurité est compromise et le conducteur doit ralentir. Le confort au roulement est fortement diminué.
- Causes possibles

Le manque de portance du corps de chaussée provoquée par :

- Sous dimensionnement du corps de chaussée ;
 - Tassement des couches de chaussée (présence de matériaux inadéquats ou mal compactés) ;
 - Présence de l'eau dans le sol (drainage insuffisant, niveau très élevé de la nappe phréatique) ;
 - Mauvais épaulement des rives (accotement non rechargé) ;
 - Zone de déblai argileux ;
 - Affouillement ou assèchement du sol support (milieu urbain) ;
 - Circulation de véhicules dont la charge excède les possibilités de portance de la chaussée.
- Remèdes à apporter
 - Reconstitution de la structure de la chaussée des deux bords en remplaçant les matériaux en place par des granulats de bonne qualité.
 - Réalisation d'un reprofilage à la niveleuse en grave émulsion, puis recouvrir le tout par un enduit superficiel.

II.2.1.2. Les fissurations

On ne prend pas en compte dans cette catégorie les fissures qui sont dues à un défaut de la construction comme le joint axial entre deux bandes de répandage d'enrobés, ou les fissures

liées à un comportement particulier du matériau (fissures transversales et longitudinales de retrait thermique, ou les fissures de retrait d'argile) [29-10].

- Description

La fissure est une ligne de rupture apparaissant à la surface de la chaussée.

- Symptômes précurseurs

Affaissement, flache ou toute déformation abaissant le niveau de la couche de surface.

- Aggravations prévisibles
 - Agrandissement de la fissure ;
 - Formation de faïençage ;
 - Formation de nids de poule.
- Causes possibles

Rupture du revêtement provoquée par une déformation (visible ou non) du corps de chaussée provenant de :

- Tassement du corps de chaussée (retrait ou gonflement des matériaux de la couche de base) ;
- Joint des bandes d'épandage ou des reprises du travail au finisseur (tapis d'enrobés) mal exécuté ;
- Élargissement de chaussée exécutée avec un dimensionnement différent de la chaussée existante ;
- Mauvais accrochage de la couche de surface sur la couche de base ;
- Différence importante entre la portance du corps de chaussée et celle du tapis d'enrobés ;
- Efforts horizontaux importants dus à la circulation (freinage, virage) ;
- Manque de la stabilité de la chaussée sur la rive (accotement non rechargé) ;
- Effet du gel.
- Remèdes à apporter

Fermer la surface avec un enduit d'usure ou de scellement (sur enduit superficiel).

- Différents types de fissure

II.2.1.2.1. Les fissures transversales

Ces fissures sont sensiblement perpendiculaires à la chaussée. Elles peuvent être isolées ou périodiques d'espacement variable, elles peuvent aussi toucher toute la largeur de la chaussée ou une partie, (figure II.4) [31].



Figure II.4. Types de fissures transversales [31]

- Quantification

Niveau de gravité

- Gravité faible : fissures uniques ou bien séparées ;
- Gravité moyenne : fissures continues ramifiées ou franchement ouvertes ;
- Gravité forte : fissures très ramifiées, annonçant un début de faïençage ou fissures très ouvertes.

Étendue

- Étendue 1 : < 2 %
- Étendue 2 : 2-15 %
- Étendue 3 : > 15

II.2.1.2.2. Fissures en pistes des roues

- Description

Rupture du revêtement parallèle à la direction de la route et située dans les pistes des roues, (figure II.5) [31].



Figure II.5. Fissures en pistes des roues [31].

- Causes probables
 - Fatigue du revêtement (trafic lourd) ;
 - Capacité structurale insuffisante de la chaussée ;
 - Mauvais drainage des couches granulaires de la chaussée
- Quantification

Niveau de sévérité

- Faible : fissures simples et intermittentes dont les ouvertures sont inférieures à 5 mm. Les bords sont en général francs et bien définis. Les fissures avec scellement en place en bonne condition sont incluses dans ce niveau de sévérité où elles peuvent aussi être comptabilisées à part selon l'usage que sera fait de l'information.
- Moyen : fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de 5 à 20 mm. Les bords sont parfois érodés et un peu affaissés. Sans être inconfortable, la fissure est perceptible par l'utilisateur.
- Forte : fissures simples ou fissures multiples le long d'une fissure principale, celle-ci étant ouverte de plus de 20 mm. Les bords sont souvent érodés et il y a affaissement ou soulèvement au gel au voisinage de la fissure. On note la présence de fissures en carrelage. Le confort au roulement est diminué par les déformations de surface [29].

II.2.1.2.3. Fissures longitudinales (hors des pistes des roues)

Rupture du revêtement relativement parallèle à la direction de la route, en dehors des pistes des roues (sur les bandes 1- 3 et 5), (figure II.6). Excluant les fissures du gel [31].



Figure II.6. Fissures longitudinales.

II.2.1.2.4. Fissures longitudinales des rives

- Description

Ce sont des fissures qui apparaissent le long de l'accotement ou de la bordure du revêtement sous forme de lignes droites ou en arc de cercle, (figure II.7) [29].



Figure II.7. Fissures longitudinales des rives [25].

- Causes probables
 - De conditions de trafic particulières ;
 - D'assainissement ;
 - D'insuffisance de la portance du sol support ;
 - De fatigue de la chaussée.
- Quantification

Niveau de gravité

- Gravité faible : fissure fine, unique et rectiligne
- Gravité moyenne : fissure ramifiée
- Gravité fort : fissure large et ramifiée avec départ de matériaux

Étendue

- Étendue 1 : < 10 %
- Étendue 2 : 10 - 50 %
- Étendue 3 : > 50 %

II.2.1.2.5. Fissure de gel

Fissures actives sous l'effet du gel, elles peuvent être, (figure II.8) [30] :

- Rectiligne et localisée au centre de la chaussée ;
- D'apparence lézardée sans localisation précise sur la chaussée.



Figure II.8. Fissures du gel [25].

II.2.1.3. Le faïençage

- Description

Ensemble des fissures formants un maillage à petites mailles polygonales dont la dimension moyenne est de l'ordre de 30cm ou moins. Cette dégradation est située surtout sur les bandes 2 et 4 (donc sous le passage des roues), (figure II.9) [10].



Figure II.9. Le faïençage [10].

- Symptômes précurseurs
 - Affaissement ;
 - Flache ;
 - Fissures.
- Aggravations prévisibles
 - Formation de nids de poule.
- Quantification

Niveau de gravité

- Gravité faible : faïençage fin à mailles larges sans départ des matériaux ;
- Gravité moyenne : faïençage à mailles réduites sans départ des matériaux : fissures parfois franchement ouvertes ;
- Gravité forte : faïençage à mailles serrées avec ou sans départ des matériaux.
- Causes possibles
 - Tassement du corps de chaussée (retrait ou gonflement des matériaux de la couche de base) ;
 - Mauvais accrochage de la couche de surface sur la couche de base ;
 - Vieillissement de la chaussée (oxydation et fragilisation du bitume dans l'enrobé) ;
 - Capacité portante insuffisante ;
 - Présence d'eau dans la couche de base (manque de perméabilité ou remontée d'eau) ;
 - Sous dimensionnement de la couche de surface ou du corps de chaussée ;
 - Durcissement et retrait de l'enrobé.
- Remèdes à apporter
 - Mise en œuvre d'un enduit superficiel avec balayage des rejets par aspiratrice ou pontage des fissures et mise en œuvre d'un enduit superficiel avec balayage des rejets par aspiratrice ;
 - Ou reprise de la couche de roulement après rabotage (purge éventuelle de la structure).

II.2.2. Les dégradations de type B

Ces dégradations engendrent des réparations qui généralement ne sont pas liées à la capacité structurelle de la chaussée. Leur origine est soit un défaut de mise en œuvre, soit un défaut de

qualité d'un produit, soit une condition locale particulière que le trafic peut accentuer bien évidemment. Dans les dégradations de type B on distingue [29-30-10] :

- La fissuration, hors fissures de fatigue : c'est les fissures longitudinales de joint, les fissures transversales de retrait thermique ;
- Le nid-de-poule ;
- Les arrachements et de manière générale tous les défauts du revêtement de type ressuage, plumage, etc.... ;
- Le retrait thermique des matériaux bitumineux ;
- Le retrait argileux des couches de chaussées.

II.2.2.1. Flache

- Quantification

C'est une déformation localisée en creux de la surface de la chaussée : c'est une dépression de forme arrondie, (figure II.10) [31].



Figure II.10. Le flache [31].

- Aggravations prévisibles

Formation des fissures, de faïençage puis nids de poule.

- Quantification

Niveau de gravité

- Gravité faible $h < 2\text{cm}$
- Gravité moyenne $2\text{cm} < h < 4\text{cm}$
- Gravité forte $h > 4\text{cm}$

Étendue

- Étendue 1 : < 10 %
- Étendue 2 : 10 - 50 %
- Étendue 3 : > 50 %
- Causes probables

Manque de portance localisée dans le corps de chaussée provoqué par [10] :

- Compactage localement insuffisant des couches (de base ou de surface) ;
- Existence d'une nappe phréatique ou des conditions de drainages et d'assainissement ;
- Dégradations des couches inférieures en un point sensible (présence des matériaux sans consistance...).
- Remèdes à apporter

Pour éliminer les causes qui provoquent ce phénomène il faut :

- Réaliser ou améliorer le drainage ;
- Recharger les accotements ;

Pour apporter un remède aux effets il faut :

- Effectuer la réparation localisée en exécutant un enduit au point à temps ou aux enrobés ;
- Renouveler la couche de surface.

II.2.2.2. Bourrelet longitudinal

- Description

C'est un déplacement du revêtement de la chaussée, créant un renflement allongé dans la direction du trafic, (figure II.11) [29].



Figure II.11. Le bourrelet [29].

- Aggravations prévisibles

Arrachement du revêtement avec le bourrelet par l'effet de circulation.

- Quantification

Niveau de gravité

- Gravité faible : dénivelé de 1 à 5cm
- Gravité moyenne : dénivelé de 5 à 10 cm
- Gravité forte : dénivelé de plus de 5cm

Étendue

- Étendue 1 : < 10%
- Étendue 2 : 10-50%
- Étendue 3 : > 50%
- Causes probables
 - Excès du liant ayant flué sous l'effet de la circulation (dans la zone de freinage, virage, etc..) ;
 - Enrobé plastique (température très élevée lors de la mise en œuvre, ce qui donne un liant mal adapté) ;
 - Manque de liaison entre le revêtement bitumineux et la couche sous-jacente.
- Solutions

Reprofilage de la surface en éliminant le bourrelet (piochage manuel du bourrelet).

II.2.2.3. Nid-de-poule

- Description

Désagrégation localisée du revêtement sur toute son épaisseur formant des trous de forme généralement arrondie, au contour bien défini, de taille et de profondeur variables. Les trous peuvent être comblés par du rapiéçage temporaire, (figure II.12) [30].



Figure II.12. Nids de poule [30].

- Symptômes précurseurs

Le nid de poule est l'aboutissement de la plupart des dégradations qui paraissent sans gravité tels que : affaissement, flache, fissure, faïençage et plumage.

- Aggravation prévisible
 - Développement et agrandissement du nid de poule ;
 - Infiltration d'eau massive dans le corps de chaussée.
- Quantification

Niveau de gravité

- Faible : nid-de-poule de diamètre de moins de 200 mm
- Moyen : nid-de-poule de diamètre de 200 à 300 mm
- Majeur : nid-de-poule de diamètre de plus de 300 mm

Étendue

- Étendue 1 : < 25 %
- Étendue 2 : 5-15 %
- Étendue 3 : > 15 %
- Causes possibles

- Épaisseur insuffisante du revêtement, Age élevé du revêtement ;
- Chaussée fortement sollicitée par le trafic lourd ;
- Défaut localisé de la couche de surface ou base (mauvaise qualité à la fabrication, ou à la mise en œuvre des matériaux) ;
- Évolution d'un autre défaut se traduisant par désintégration, avec arrachement de matériaux provoqués par la circulation sur les points faibles du revêtement.
- Remèdes à apporter
 - Effectuer un emploi partiel aux enrobés si la profondeur des nids de poule n'excède pas 8 à 10cm ;
 - Remanier la couche de base si cette profondeur excède 10cm.

II.2.2.4. Pelade

- Description

Arrachement par plaques plus ou moins grandes de l'enrober de la couche de surface, (figure II.13) [10-29].



Figure II.13. Pelade [10].

- Aggravations prévisibles
 - La perte de l'étanchéité ;
 - La formation de nids de poule.
- Quantification

Niveau de gravité

- Faible : pelade dont la surface d'arrachement est inférieure à 0,5 m carré ;
- Moyen : pelade dont la surface d'arrachement est de 0,5 à 1,0 m carré ;
- Forte : pelade dont la surface d'arrachement est supérieure à 1,0 m carré.

Étendue

- Étendue 1 : < 15 %
- Étendue 2 : 15-30 %
- Étendue 3 : > 30%
- Causes probables
 - La chaussée fortement sollicitée par le trafic ;
 - Une mauvaise adhérence de la couche de surface (exp : manque de liant d'accrochage, incompatibilité chimique, saleté entre les couches) ;
 - Une épaisseur insuffisante de la couche de surface ;
 - Manque de perméabilité de la couche de base.
- Remèdes
 - Renouveaulement de la section endommagée avec découpe verticale ;
 - Rabotage des rives ;
 - Renouveaulement de la couche de surface (enduit d'usure).

II.2.2.5. Dentelle de rive

- Description

C'est une dégradation qui se manifeste par l'érosion de la couche de roulement à partir des bords [10-30].

- Quantification

Niveau de gravité

- Faible : amorce de dentelle
- Moyen : dentelle entaillant la chaussée sur plus de 0.5 m
- Forte : érosion extrême aboutissant à la destruction de la chaussée

Étendue

- Étendue 1 : < 10 %
- Étendue 2 : 10-50 %
- Étendue 3 : > 50%
- Causes probables

Elle est provoquée par les arrêts fréquents sur les accotements.

II.2.2.6. Ressuage

- Description

Remontée en surface de la chaussée du liant recouvrant complètement ou partiellement les granulats. Cette remontée est généralement accentuée dans les pistes des roues, (figure II.14) [29].



Figure II.14. Le Ressuage [29].

- Aggravations prévisibles
 - Altération de l'adhérence ;
 - Plumage ;
 - Danger de dérapage.
- Quantification

Niveau de gravité

- Faible : ressuges ponctuels
- Moyen : ressuges discontinus en nombres importants
- Forte : ressuges généralisés

Étendue

- Étendue 1 : < 5 %
- Étendue 2 : 5-50 %
- Étendue 3 : > 50%
- Causes probables
 - Teneur élevée du liant,
 - Liant trop fluide ;
 - Évaporation intense ;

- Nature d'enrobé inadapté avec les sollicitations ;
- Effet combiné de la température élevée du revêtement et des sollicitations du trafic.
- Remèdes à apporter
- Suppression par jet d'eau haute pression ;
- Grenailage ;
- Effectuer un sablage par temps chaud.

II.2.2.7. Boursoufflure

- Description

Déformation du revêtement, par zone localisées, et formant une aspérité importante, (figure II.15) [30].



Figure II.15. Boursoufflure.

- Symptômes précurseurs

Déformation à peine sensible, rendant la couche de surface sans portance à cet endroit.

- Aggravation prévisible
- Chute de portance ;
- Apparition de diverses déformations résiduelles ;
- Causes possibles

Fondation des chaussées sur des sols argileux ou sur des nappes de sel (zone de chotts ou sebkhas).

- Remèdes à apportés

- Si la dégradation est très localisée, compacter les boursouflures, et effectuer un enduit de scellement ;
- Amélioration de drainage ;
- Remaniement complet de la chaussée afin d'introduire une sous couche drainante entre le terrain naturel de la chaussée existante.

II.2.2.8. Les remontées (d'eau ou d'argile)

- Description

Partie de chaussée humidifiée d'eau claire ou d'eau chargée en fines provenant du corps de chaussée par remontée à travers les pores et les fissures, (figure II.16) [31].



« A »



« B »

Figure II.16. La remontée (A) d'argile, (B) d'eau [25].

- Causes possibles
 - Étanchéité insuffisante de la chaussée ;
 - Mauvais drainage du corps de chaussée ;
 - Libération des fines par le sol support ou par les couches de chaussée et contamination des couches supérieures.
- Aggravations prévisibles
 - Dés enrobage et désagrégation des matériaux du corps de chaussée ;
 - Perte de capacité portante ;
 - Altération de l'adhérence ;
 - Formation de nid de poule.
- Remèdes

Remanier les chaussées complètement pour exécuter entre le terrain naturel et la chaussée existante, une sous couche drainante (sable grossier).

II.2.2.9. Les épaufrures

- Description

Écrasement et effritement du revêtement en bord de chaussée ou du rail, (figure II.17) [30].



Figure II.17. Les épaufrures [25].

- Symptômes précurseurs

Érosion régressive de l'accotement.

- Aggravation à craindre

Agrandissement de la zone épaufrée, réduisant localement la largeur de la chaussée.

- Causes possibles
 - Fluage de l'enrobé lors de sa mise en œuvre ;
 - Écrasement par la circulation des véhicules sur une route étroite ou partiellement obstruée (nid de poule) ;
 - Mauvais épaulement des rives (accotement non rechargé).
- Remèdes
 - Empêcher la circulation des véhicules sur les accotements ;
 - Relever l'accotement ;
 - Réparer les accotements avec un enrobé.

II.2.2.10. Tête de chat

- Description

Pierre ou cailloux durs, de dimensions supérieures au granulat en place, apparaissant à la couche de surface formant saillies. Cette dégradation provient suite à l'usure de la couche de roulement, (figure II.18) [31].



Figure II.18. Tête de chat.

- Aggravation prévisible

Qualité et épaisseur de la couche de roulement inadaptée à la charge du trafic.

- Causes possibles

Usure très avancée du revêtement sur un corps de chaussée dans le cas :

- D'une chaussée constituée de tout venant à granularité discontinue ;
- D'une couche de surface à granularité trop élevée.

- Remèdes

Renouveler l'enduit superficiel ou le remplacer localement par un tapis d'enrobés.

II.2.2.11. Plumage

- Description

Arrachement d'une partie des gravillons du revêtement, ce phénomène est appelé aussi peignage lorsqu'il se produit parallèlement à l'axe de la route, (figure II.19) [10].



Figure II.19. Plumage [10].

- Aggravations prévisibles

Aggravation de nid de poule.

- Causes
 - Teneur en liant insuffisante ;
 - Ségrégation des granulats à la mise en œuvre ;
 - Mauvaise nature des granulats ;
 - Action d'eau et salage des chaussées en hiver.
- Remèdes

Renouvellement de la couche de roulement.

II.2.2.12. Décollement

- Description

Perte d'adhérence entre la couche de surface et la couche de base, (figure II.20).



Figure II.20. Décollement [25].

- Aggravation

Appariation de nid de poule.

- Causes
 - Adhésivité insuffisante du granulat ;
 - Gonflement ou retrait des matériaux de couche de base.
- Remèdes

Faire un enduit général.

II.2.2.13. Dés enrobage

- Description

Disparition du mastic (liant + fines) et des granulats avec perte et départ des gros granulats en surface produisant la détérioration du revêtement, (figure II.21) [10].



Figure II.21. Désenrobage [10].

- Aggravation

Arrachement des granulats et décollement de la partie supérieure du tapis.

- Causes
 - Usure dues à la circulation de la surface ;
 - Sous dosage du bitume ou mauvaise qualité de l'enrobé ;
 - Mauvaise adhésivité des granulats ;
 - Mauvais compactage ;
 - Stagnation d'eau sur la chaussée.
- Remèdes
 - Balayage et nettoyage de la surface ;

- Renouveaulement de couche de roulement.

II.2.2.14. La tôle ondulée

- Description

Ondulation de faible longueur d'ondes, perpendiculaire à l'axe de la chaussée, (figure II.22) [10].



Figure II.22. La tôle ondulée [25].

- Causes possibles
 - Déformation de la couche de base au moment de son profilage ;
 - Actions mécaniques intense dues à la circulation ;
 - Instabilité de l'enrobé.
- Remèdes à apporter

La réparation de cette dégradation ne peut être réalisée efficacement qu'en s'attaquant aux causes. Afin d'éviter ces causes, il est nécessaire de :

- Démolir la chaussée et reconstituer la couche de base ;
- Réparer le tapis d'enrobé.

II.3. Les principales causes de dégradations des chaussées revêtues

Les causes des dégradations sont nombreuses et variées. Elles peuvent être d'ordre [29-7] :

- Quantitatif : le trafic ;
- Qualitatif : type de matériau constituant le corps de chaussée ;
- Aléatoire : conditions climatiques tel que la pluviosité, etc.

Ces facteurs sont simultanément cause et effet, car des dégradations apparues peuvent être la cause d'autres.

Ainsi, quatre critères permettent de faire la classification des dégradations [7] :

II.3.1. Le trafic

L'usure de la couche de roulement est la conséquence directe des efforts de cisaillement qui se manifestent au contact des pneumatiques et dont la résultante équilibre les forces de traction. Elle entraîne essentiellement des pertes des matériaux, le polissage des granulats, la diminution de la rugosité etc. Elle est proportionnelle au trafic, elle est également fonction de la croissance des véhicules et se trouve aggravée par la présence des poids lourds.

La fatigue des couches inférieures au contraire résulte des efforts verticaux de transmission des charges à la couche de fondation. La répétition des contacts inter granulaires entraîne des effets d'attrition, la production de fines, et l'augmentation de la plasticité de la chaussée. Celle-ci devenant moins rigide, les déformations sous charges augmentent, deviennent irréversibles, et il en résulte une destruction plus ou moins rapide de la couche de roulement. Ces phénomènes de fatigue sont fonction non seulement du nombre de répétition des charges, mais aussi et surtout du poids des essieux. La limitation des charges revêt donc, d'une sage exploitation de la route, une importance essentielle.

II.3.2. Les conditions climatiques

Le paramètre le plus nuisible sur le corps de chaussée est la présence de l'eau. L'eau s'infiltré dans le corps de chaussée soit :

- Par infiltration ;
- Par remontées capillaires.

En effet, nous savons que la teneur en eau d'un sol, si elle est trop élevée peut provoquer des désordres importants en modifiant la portance ou en aggravant l'attrition de certains matériaux comme les argiles contenues dans la latérite. Les matériaux traités avec les liants hydrocarbonés sont particulièrement sensibles au phénomène de dés enrobage. En effet l'eau peut s'interposer entre les granulats et le liant lorsque la qualité du collage entre ces corps n'est pas suffisante. Quand les accotements ne sont pas protégés, des ravinements sont très probables par l'effet du ruissellement. Ils se manifestent sur les bords de la chaussée, perpendiculaires à son axe, lorsque la pente traversée est trop forte.

II.3.3. La qualité des matériaux

II.3.3.1. Les granulats

Les granulats traités aux liants hydrocarbonés doivent remplir les qualités suivantes [36] :

- Une bonne résistance mécanique : elle est caractérisée avec les essais de LOS ANGELES (résistance aux chocs) et MICRO DEVAL en présence d'eau (résistance à l'attrition). Les exigences sur résultats sont fonction du trafic de poids lourds.
- Une résistance au polissage : il s'agit d'une contrainte propre aux couches de roulement. Il faut être particulièrement vigilant sur le coefficient de polissage accéléré (CPA) des gravillons qui entrent dans la construction des matériaux.
- L'adhésivité : les matériaux traités avec les liants hydrocarbonés sont particulièrement sensibles aux phénomènes de dés enrobage. En effet l'eau peut s'interposer entre les granulats et le liant lorsque la qualité du collage entre ces corps n'est pas suffisante. Il arrive que certains matériaux présentent avec le bitume une adhésivité très moyenne, parfois médiocre. Le moyen le plus couramment utilisé pour résoudre ce problème consiste à remplacer la fraction sable de ces matériaux par du sable ayant une bonne adhésivité au bitume.

II.3.3.2. Les liants

Le liant comme son nom l'indique, est la colle qui va assurer la continuité du revêtement, sa fixation au support et la liaison entre les gravillons qui doivent solidement accrochées entre eux [36].

Le problème d'emploi du liant hydrocarboné est d'arriver à mettre sur la chaussée un liant suffisamment dur pour qu'il puisse ternir durablement les gravillons [33] ; or il est difficile de mettre en œuvre un liant dur. Ainsi pour convenir à l'usage routier, le liant hydrocarboné doit présenter certaines propriétés et en particulier [34] :

- Résistance aux sollicitations sans se fissurer et sans entraîner la rupture au sein des couches. Le couple liant-granulats doit avoir donc une bonne cohésion et cette propriété dépend étroitement de celle du liant.
- Susceptibilité thermique - Adhésivité : pour pouvoir parler d'adhésivité il faut avant qu'il y soit contact entre le liant et granulat ce qui suppose un bon mouillage ne peut se produire que si la fluidité du liant est suffisante ;

- Vieillissement : Sous l'influence de l'oxygène de l'air en particulier, les caractéristiques d'origine du liant hydrocarboné se modifient plus ou moins au cours du temps. D'une façon générale, ceci se traduit par un durcissement et une diminution de la susceptibilité thermique.

II.3.4. La mise en œuvre

Même si la qualité du liant et des granulats est excellente, le dimensionnement bien fait, une mauvaise réalisation au cours de la mise en œuvre, de la manutention ou de la consolidation pourra se traduire par un ouvrage fini d'une qualité médiocre. Ainsi, une bonne opération de mise en œuvre devra permettre :

- D'assurer une bonne adhérence entre couches ;
- De produire des couches homogènes et compactes ;
- D'offrir une surface régulière et uniforme.

II.4. Conclusions

Les chaussées évoluent et se dégradent essentiellement sous l'effet du trafic lourd et des conditions climatiques. La rapidité de cette évolution et les désordres qui apparaissent sont également liées à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et mise en œuvre.

Les dégradations les plus couramment rencontrées se classent en deux grandes familles : les dégradations structurelles et les dégradations superficielles. Les premières apparaissent au sein de la structure de chaussée ou de son support et mettent en cause le patrimoine. Les secondes prennent naissance dans la couche de surface de la chaussée et affectent d'abord ses qualités superficielles.

La dégradation de surface constitue, dans la plupart des cas, un des indicateurs les plus précoces et les plus sensibles de l'évolution des caractéristiques structurelles et de surface des chaussées. Le relevé des dégradations doit donc être assimilé à une « mesure » et, à ce titre, s'intégrer dans une procédure qui définit clairement les conditions de réalisation de ce relevé, son exploitation et son interprétation.

Pour une telle procédure il est nécessaire :

- D'homogénéiser les relevés des dégradations en les adaptant aux divers contextes routiers ;
- De normaliser la définition des dégradations et leurs niveaux de gravités afin d'en faire un classement cohérent.

Chapitre III : Étude comparative entre les déflexions mesurées et calculées

III.1. Introduction

Des insuffisances peuvent toujours se manifester au niveau d'une route dès sa mise en service et qui se traduisent généralement par l'apparition des dégradations prématurées (Plumage, Pelade, fissuration), et des dégradations à long termes (nids de poule, Peignage affaissement, bourrelet, orniérage...). Les sollicitations dues aux conditions hydriques ainsi que les conditions d'environnement, notamment le trafic, sont les principales causes d'endommagement des chaussées souples et conduisent à plusieurs modes de dégradation.

Le trafic routier est un phénomène complexe d'une part en raison du nombre élevé d'acteurs qui y participent, d'autre part à cause du caractère très maillé du réseau sur lequel il se déroule.

Ce chapitre vise à développer une méthode de détection de l'endommagement à partir de la mesure du bassin de déflexion par un déflectographe et par FWD afin de mettre en place les caractéristiques de la chaussée objet d'étude (étude de trafic, caractéristique physique...) réalisés par le staff technique de CTTP. L'objectif de ce chapitre est de déterminer l'endommagement de la chaussée par l'intermédiaire d'indicateurs issus des mesures des appareils.

Les résultats ont été mesurés sur des planches expérimentales contrôlées, équipées de jauges à fibres optiques situées à divers niveaux dans la structure de chaussée pour mesurer la déformation en traction à la base du revêtement et la déformation verticale au sommet du sol d'infrastructure. Le projet fera intervenir des notions statistiques sur la corrélation et la régression afin de développer les indicateurs de déflexion.

Les déflexions obtenues à partir du FWD sont utilisées pour rétrocalculer les propriétés du matériau de certaine couche, qui sont le module d'élasticité, le coefficient de Poisson et les épaisseurs de couche. Ces réponses in-situ étaient analysées par une technique prédominante connue sous le nom de calcul inverse pour estimer les modules de couches résilients [11]. En outre, ces réponses in situ étaient utilisées pour estimer la durée de vie résiduelle de la chaussée en service et pour définir diverses stratégies de maintenance, telles que le recouvrement, etc.

Des bassins de déflexions complets sont utilisés, avec une procédure de rétrocalcul, pour estimer les modules d'élasticité in situ pour chaque couche de chaussée. Le rétrocalcul est généralement effectuée en utilisant un programme informatique. Plusieurs programmes de rétrocalcul statique et dynamique ont été développés pour évaluer les modules d'élasticité in situ à partir de la déflexion de la surface de chaussée [19 - 16]. La procédure de rétrocalcul est une opération inverse de connaissance des caractéristiques de la chaussée et d'estimation des déflexions dues à une charge appliquée [20 - 19]. Le rétrocalcul des propriétés des couches à partir des mesures de déflexion de surface est d'une importance considérable pour l'évaluation précise et la conception des recouvrements et la gestion des chaussées existantes [21].

L'objectif de cette étude est d'expliquer de façon catégorique les méthodes de rétrocalcul des chaussées souples ainsi que de les comparer et de les contraster en termes de précision de la modélisation, de dépense informatique, de détails de calcul et de besoins des données.

Le sujet proposé consiste une comparaison entre la variation des modules de couches de chaussées rétrocalculés de chaque couche estimée en utilisant la déflexion itérative statique, on utilise un programme : ELMOD6.

Ces étapes d'optimisation sont menées jusqu'à ce que la différence entre les déflexions calculées et mesurées reste sous un certain critère d'erreur.

III.2. Étude de trafic

La route objet d'étude est la nationale N°18 reliant l'agglomération de BERROUAGHIA à celle de BIR GHABALOU. Cette route est un axe stratégique important qui relie les régions de l'est de MEDEA aux régions West de BOUIRA. La section projet qui est d'une longueur totale de 16 km débute du PK 95+000 au PK 111+000 (voir figure III.1).

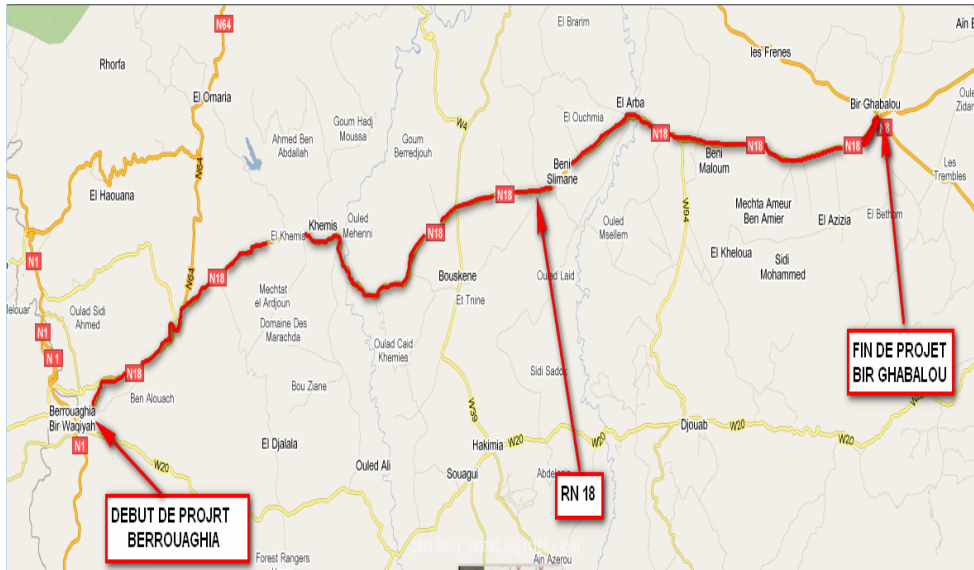


Figure III.1. Présentation du zonage sur la zone d'étude.

Le trafic important avec le taux élevé de poids lourds témoigne l'importance de cet axe. L'étude du trafic est basée sur les trafics journaliers moyens annuels (TJMA) déterminés par la campagne de comptage menée par le CTTTP.

Le trafic notamment le poids lourd est l'un des paramètres prépondérants de dimensionnement des chaussées.

Sur la base des résultats de comptage de trafic réalisé par le CTTTP, le tronçon de la RN18 concerné par l'étude draine un réseau de véhicule avec un trafic moyen journalier (TJMA) de l'ordre de 7000 véh/jour avec un pourcentage de poids lourd qui est de l'ordre de 25% pour la section PK 95+000 - PK 111+000.

III.2.1. Comptage de trafic

Le comptage de trafic se fait par catégorie de véhicule, par classe des poids lourds et par l'ensemble des poids des essieux qui sont représentés dans les figures III.2. « a,b », III.3 et III.4.

III.2.1.1. Par catégorie de véhicule

Ce trafic a été évalué par catégorie de véhicule selon leurs caractéristiques. On distingue six (06) catégories définies comme suit :

- P1 : Véhicules particuliers ;
- P2 : Véhicules utilitaires (camionnettes) ;
- P3 : Cars et Bus ;
- P4 : Camions à deux essieux ;

- P5 : Camions à trois essieux ;
- P6 : Ensembles articulés ;

La répartition de trafic est illustrée dans le tableau III.1:

Remarque : **Aller :** Ain defla vers Médea, **Retour :** Médea vers Ain defla

Tableau III.1. Comptage de trafic par catégorie de véhicule

Localisation PK 95+000 –PK 111+000	Comptage de trafic sens aller-retour par catégorie de véhicule						Somme	Poids Lourds
	P1	P2	P3	P4	P5	P6		
Nombre de poids	824	277	45	178	92	123	1539	393
%	53.49	18.02	2.92	11.63	5.99	7.95	100	25.57%
Trafic cumulé d’après le guide de renforcement SETRA								
Écoulé			Prévisionnel			Global		
2.1x10 ⁶			3.58x10 ⁶			5.68x10 ⁶		

Les résultats sont illustrés dans la figure III.2. « a », III.2. « b », III.2 « a,b » sous forme de diagramme comme suit :

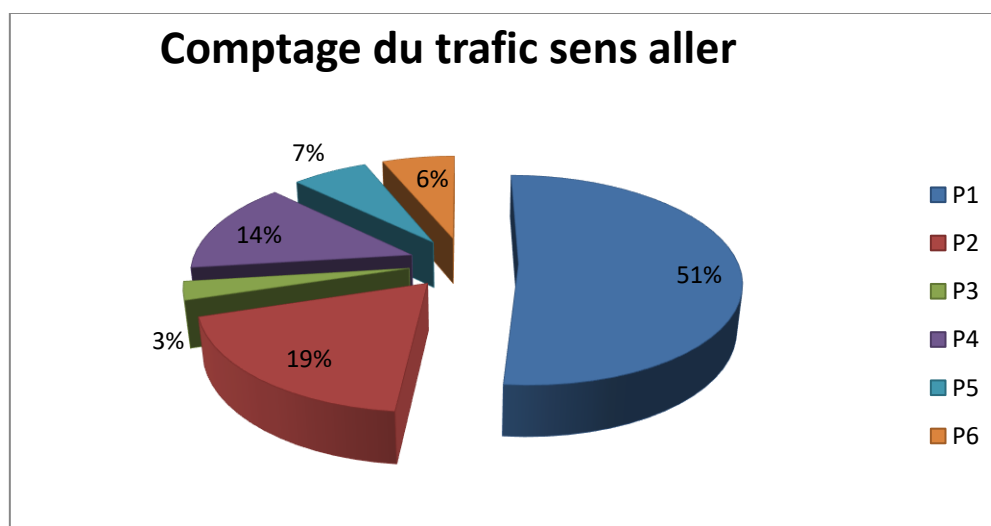


Figure III.2. « a » : Graphique de comptage du trafic sens aller

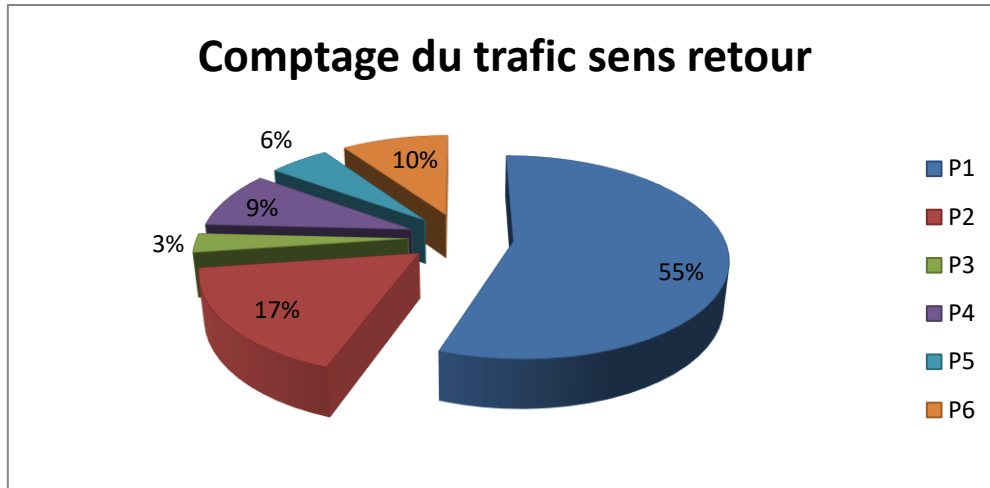


Figure III.2. « b » : Graphique de comptage du trafic sens retour

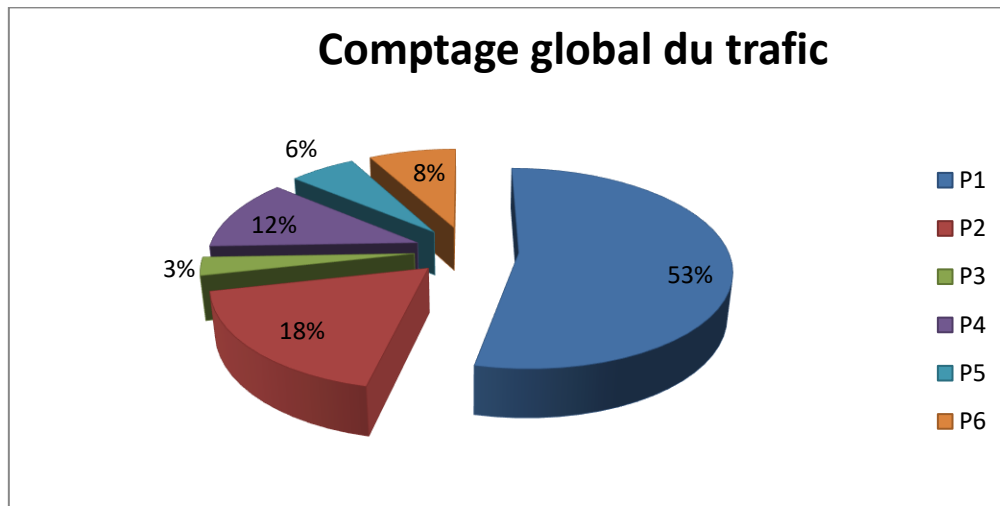


Figure III.2. « a,b » : Graphique de comptage globale du trafic sens aller-retour

Interprétations

D'après ces diagrammes on a conclu que notre réseau classe dans la catégorie P1 « véhicule particulier » avec 53%.

III.2.1.2. Par classe des poids lourds

La répartition de trafic par classe des poids ensemble des camions sont illustrés dans l'annexe « A » sous forme d'un tableau, et représentés sous forme de graphique dans la figure III.3 :

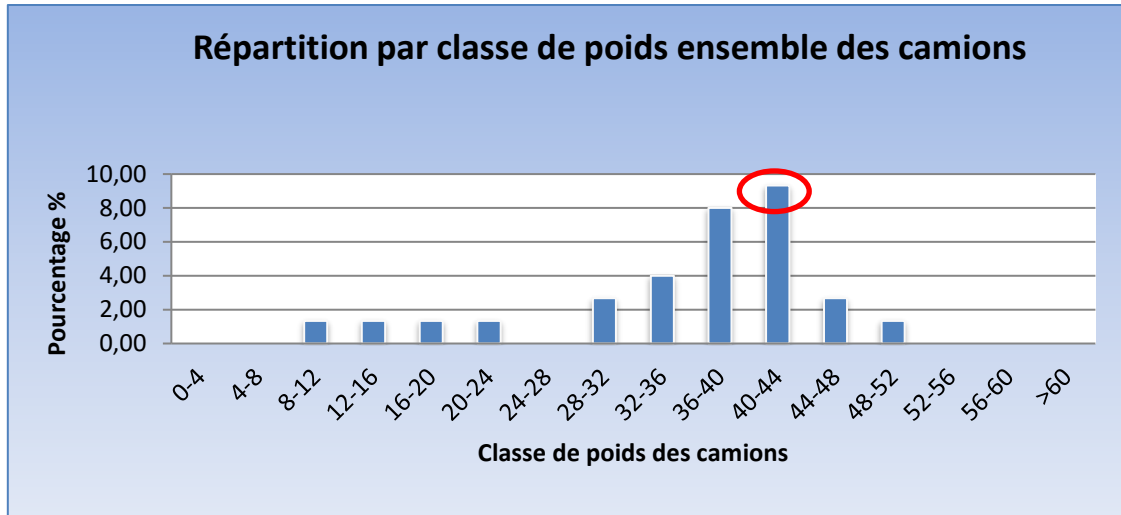


Figure III.3. Comptage de trafic par classe de poids ensemble des camions.

Interprétations

Nous suivrons aussi dans cette partie un graphique qui montre le comptage par classe des poids lourds par un max de pourcentage est égale à 9,33% pour les poids entre 40 et 44 kn suite de 8% de poids entre 30 et 36 kn.

III.2.1.3. Par classe de poids ensemble des essieux

Les résultats des poids des essieux sont illustrés dans un tableau dans l’annexe « A », et ils sont représentés au figure III.4 :

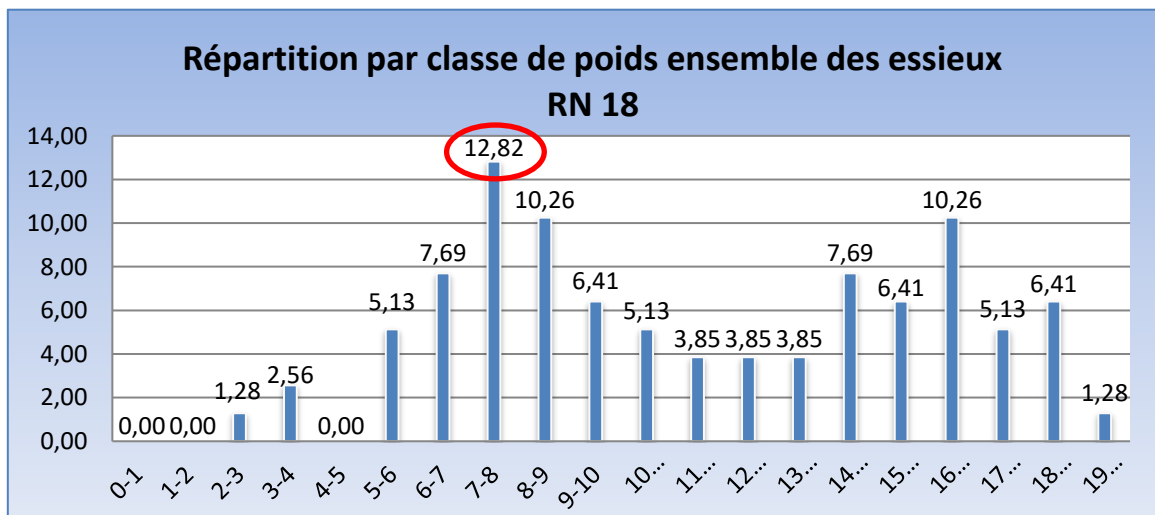


Figure III.4. Comptage de trafic par classe de poids ensemble des essieux

Interprétations

Nous obtenons un grand pourcentage du trafic environ 13 % ce qui concerne la classe des poids des essieux de 7 à 8 Kn.

III.2.2.2. Trafic cumulé prévisionnel [17] :

$$T_{cp} = 365 \times T_{ms} \times C \times \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (\text{III.4})$$

III.2.2.3. Trafic cumulé écoulé [17] :

C'est le nombre de poids lourds de charge utile supérieure à 5 tonnes supporté par l'ancienne chaussée.

$$T_{ce} = 365 \times T_{mse} \times C \times \frac{(1+i)^n - 1}{i} \quad (\text{III.5})$$

n : est l'âge (en années) de la chaussée depuis la construction ou le dernier renforcement qu'a subi jusqu'à l'année de mise en service avant le renforcement.

T_{mse} : trafic à l'année de mise en service après la construction de la chaussée ou après le dernier renforcement dont elle a fait l'objet.

$$T_{mse} = \frac{TJMA \times PL\%}{2(1+i)} \quad (\text{III.6})$$

TJMA : trafic journalier moyen annuel à l'année de mise en service.

III.2.2.4. Trafic global [17] :

C'est le trafic cumulé écoulé rajouté au trafic cumulé prévisionnel pour la durée de vie escomptée (10 ans), qui est utilisé pour déterminer les seuils de déflexions admissibles.

$$TG = T_{cp} + T_{ce} \quad (\text{III.7})$$

III.2.3. Résultats et calculs

Tous ce que nous avons mentionnés précédemment représentés au tableaux III.3 :

III.2.3.2. Calcul de Tci selon le catalogue Algérien

Tableau III.3. Résultats de Tci selon le catalogue Algérien

TJMA aller	6625
TJMA retour	3387
TPL ALL/sens	1787
TPL ret/sens	819
Trafic 2 sens	10012
TPL	1280
TPL plus chargé	1787
i %	5%
Durée de vie	10
TCi	8,20E+06
CAM	2,78
TCEi	2,28E+07
TCEi /AN	2,28E+06

III.3. Sondage sous chaussée

Pour connaître la nature et les caractéristiques des matériaux constituant le corps de chaussée existant ainsi que le sol support, trois sondages sous chaussée ont été réalisés afin de relever d'une part les épaisseurs des couches non traitées constituant la base, la fondation et ceux du sol support, d'autre part déterminer les caractéristiques mécaniques de ces matériaux.

La localisation des points de sondage ainsi que la description de la nature du matériau prélevé sont présentées dans les tableaux III.4, III.5, III.6 :

- Sondage 01 (pk 99+700) : profondeur a 0,63 m

Tableau III.4. La nature de matériaux pour le pk 99+700

Profondeur en (m)	Nature du terrain
0.00 – 0.08	Couche de BB
0.08– 0.13	Couche de ES
0.13– 0.43	TVO
Sol Support	Limon + sable fin

- Sondage 02 (pk 105+000) : profondeur a 0,59 m.

Tableau III.5. La nature de matériaux pour le pk 105+000

Profondeur en (m)	Nature du terrain
0.00 - 0.08	Couche de BB
0.08- 0.20	Couche de GB
0.20- 0.24	ES
0.24-0.39	TVO
Sol Support	Limon + sable fin

- Sondage 03 (pk 108+000) : profondeur a 0,77 m

Tableau III.6. La nature de matériaux pour le pk 108+000

Profondeur en (m)	Nature du terrain
0.00 - 0.08	Couche de BB
0.08- 0.18	Couche de GB
0.18- 0.22	ES
0.22-0.37	GC
0.37-0.57	TVO
0.57-0.77	Limon + sable fin

Interprétations

D'après ces tableaux, on peut dire que notre chaussée objet d'étude est constituée des mêmes matériaux dans les trois sondages tel que : Béton bitumineux suite d'une grave bitumineuse suite d'enduit superficiel suite d'un touvenant d'oued et à la fin on trouve dans le sol support le limon et sable fin, sauf dans le pk 108 on trouve un matériau supplémentaire du grave concassée.

III.4. Auscultation de la chaussée

III.4.1. Auscultation par relever visuel

L'examen visuel de l'état de la chaussée représente l'élément fondamental de l'auscultation, il permet de formuler les premières hypothèses au sujet des causes des dégradations constatées sur la route, dont les principales sont : le trafic routier, les conditions climatiques, les malfaçons, ainsi que la qualité des matériaux mise en œuvre lors de la construction et l'entretien [7]. Le relevé opéré en mai 2011, a permis de déceler une chaussée légèrement dégradée sur certaines sections pour devenir en général moyenne a bonne sur le reste de l'itinéraire. Le constat a fait ressortir une prédominance de fissurations de type faïençage à maille fine, ainsi que des déformations de type affaissement, généralement de faible amplitude qui sont dues probablement à la rupture au tassement des couches inférieures avec des fissures longitudinales

et transversales localisés, ainsi présence d'orniérage à faible rayon de courbure. Le détail du recueil est présenté dans l'annexe A.

Un jugement sur l'état est apporté selon des sections homogènes identifiées avec une appréciation allant de bon, moyen à mauvais, ou cela :

- 85.23 % du linéaire représente un état de dégradation jugé bon ;
- 14.77 % du linéaire représente un état de dégradation jugé Bon à moyen localement ;

Une description détaillée des différentes dégradations relevées est présentée dans les figures représentées dans l'annexe « C ».

III.4.2. Auscultation par mesure de déflexion

Dans ce contexte, Une première étape de revue littéraire vise à développer des indicateurs avancés de condition structurale des chaussées basées sur l'analyse des historiques de déflexion [37]. Parmi les méthodes de mesure de déflexion : le déflectomètre à masse tombante (FWD) et le déflectographe à la croix [32-3]. Au cours des 15-20 dernières années le déflectographe à la croix a été appliqué avec succès dans de nombreux projets dans le monde [9]. Récemment plusieurs laboratoires d'évaluation structurale des chaussées dans le monde utilisent le FWD, car c'est un outil plus précis pour la gestion des chaussées.

III.4.2.1. Description des machines

III.4.2.1.1. Le déflectomètre à masse tombante (FWD)



Figure III.5. Appareillage général de déflectomètre a masse tombante (FWD)

➤ *Descriptif*

Le déflectomètre à masse tombante ou FWD (Falling Weight Deflectometer) est conçu pour mesurer de bassin des déflexions provoqué par une masse tombante appliquée sur une plaque (de diamètre 30 cm) comme illustré dans la figure III.5 [37]. Il se compose :

- d'une remorque tractée de 850 kg environ transportant les éléments de mise en charge et les neufs capteurs de déplacement ;
- d'un système de pilotage automatique, d'acquisition et de traitement de l'information, embarqué dans le véhicule tracteur,

➤ *Principe*

Après la mise en station de la remorque au droit du point de mesure, la masse est libérée d'une hauteur pouvant varier de 2 à 40 cm provoquant une force variable de 7 à 135 kN. La hauteur de chute et la force appliquée sont fixées en fonction de la nature de la structure testée. La transmission de la charge se fait par un ressort dont la constante permet de définir la durée de chargement. Les 9 capteurs (dont un est au centre de la plaque) enregistrent la déformation longitudinale sur 2 mètres environ du point d'application de la charge [28-45].

Pour les structures routières, les caractéristiques de chargement sont réglées de manière à obtenir une impulsion correspondant à la durée de la charge d'un poids lourd circulant à une vitesse d'environ 70 km/h. Au droit de chaque station, 9 déflexions sont enregistrées par les 9 capteurs répartis le long d'une poutre [45]. Le premier capteur est situé au centre de la plaque de chargement, et le dernier à 1,80 m environ dans l'axe longitudinal comme illustré dans la figure III.6.

Donc, le but de FWD étant de mesurer en vraie grandeur les réponses de la chaussée pour laquelle il faut donner un avis pertinent concernant d'une part son état « structurel » actuel et, d'autre part, sa capacité à supporter correctement le trafic futur [45].

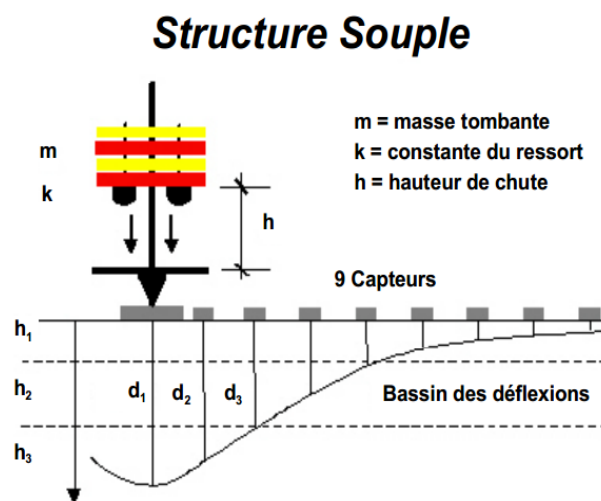


Figure III.6. Principe de mesure de FWD [28-45]

III.4.2.1.2. Défectographe Lacroix

➤ Descriptif

La direction des Ponts et Chaussées perçoit rapidement l'intérêt du défectographe Lacroix pour mesurer la déflexion plus rapidement et avec plus de points de mesure à grande échelle et à grand rendement. Le défectographe Lacroix subit dans les 30 années suivantes plusieurs modifications plus ou moins importantes.



Figure III.7. Le défectographe Lacroix [45]

L'appareil se compose des éléments suivants (figure III.7) :

- Un camion avec deux essieux, d'empattement voisin de 5 m, l'essieu arrière jumelé simple pouvant supporter une charge de 13 Tonnes ;
- Une poutre de référence équipée de deux bras palpeurs ;
- Un système de traction et de guidage de la poutre avec contrôle électronique assurant une sécurité contre l'écrasement des extrémités de la poutre ;
- Un pupitre de commande avec l'équipement électronique de mesure et d'enregistrement.
- Un lest constitué par des gueuses en fonte fixées à l'arrière du camion.

➤ Le principe

Pour réaliser les mesures, un cadre sur lequel sont fixés deux bras palpeurs est positionné entre les traces de roulement (voir figure III.8), dans l'espace situé entre les essieux du véhicule d'auscultation. Le camion roule à une vitesse constante (de 3 à 8 km/h). Le cadre reste fixe sur la chaussée jusqu'à ce que l'essieu arrière dépasse de 10 cm le point de mesure des bras. Le défectographe enregistre un bassin de déflexion de 65 points de mesure pour chaque trace de roue. Le système passe ensuite au prochain point de mesure (4 à 6 m plus loin) en tirant le bâti de mesure avec un treuil (Lacroix classique à 3 km/h) ou en soulevant le bâti (Lacroix Flash à 8km/h) sans arrêt du véhicule [37].

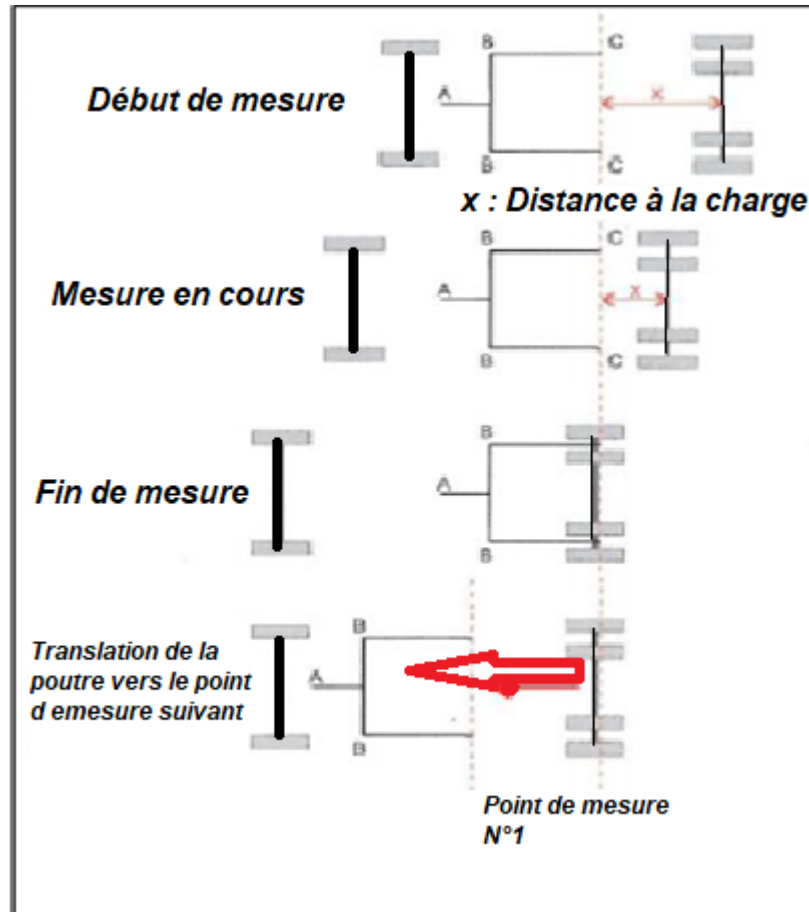


Figure III.8. Principe de Déflectographe lacroix

III.4.2.1.3. Comparaison du FWD avec Déflectographe lacroix

Le choix d'utiliser un de ces appareils plutôt que l'autre dépend des besoins du gestionnaire routier et des problèmes à résoudre. Voici un comparatif de différentes caractéristiques aidant à faire un choix d'appareil judicieux [45].

Mode d'application de la charge : le déflectographe Lacroix applique une charge roulante à la structure de chaussée contrairement au FWD. Ce mode de chargement est plus conforme aux sollicitations du trafic en provoquant la rotation des contraintes principales dans le massif pouvant être schématisé comme un effet de « pétrissage » du matériau.

Vitesse d'application de la charge : la vitesse de sollicitation de la structure est très lente dans le cas du Lacroix. Compte tenu du comportement viscoélastique des matériaux bitumineux, leur rigidité apparente peut diminuer de 30 à 70% par rapport à la même structure sollicitée à une vitesse de trafic courante. Le FWD induit une impulsion de chargement plus courte à même de simuler une réaction des matériaux bitumineux

équivalente à un chargement réel (vitesse de l'ordre de 70 km/h). La réaction des matériaux de surface étant moins rigide avec le Lacroix, les contraintes sont transmises avec un niveau plus élevé vers les couches les plus profondes. Cette particularité permet au Lacroix d'avoir un pouvoir discriminant plus important vis-à-vis des sols et couches de fondation. D'un autre côté, le FWD est plus fiable pour estimer les caractéristiques mécaniques des couches bitumineuses en surface.

Rendement et pas de mesure : le rendement de l'appareil est à l'avantage du Lacroix qui permet de relever la déflexion sur les deux traces de roue (gauche et droite) avec un ratio Vitesse / Intervalle de mesure plus élevé. Le FWD compense son rendement plus faible par une souplesse d'utilisation plus grande. Il est en effet possible de disposer l'appareil longitudinalement ou transversalement au niveau d'un point quelconque sur toute la surface de la voie. Le FWD peut rencontrer une certaine difficulté à réaliser des mesures sur la trace droite dans le cas d'une chaussée étroite, où la proximité de la banquette empêche la mise en station de la remorque.

Résolution des capteurs de mesure : le déflectographe Lacroix sollicite la structure de telle sorte qu'il engendre une amplitude de déflexion plus grande et variant plus lentement que dans le cas du FWD. Ce mode de chargement s'accommode d'un capteur mesurant le déplacement au 1/100 de mm. Le FWD applique une impulsion brève conduisant à une déflexion faible et variante très vite. Cette caractéristique du chargement nécessite un capteur sismique (géophone) permettant une précision de mesure de 1/1000 de mm. Le FWD peut présenter un avantage dans le cas où l'on cherche à mesurer une légère variation dans le temps de la capacité portante d'une structure.

Niveau de chargement appliqué et type de surfaces auscultées : le FWD offre la possibilité de faire varier l'intensité de la charge appliquée en fonction de la rigidité de structure observée. Le déflectographe Lacroix dispose d'une charge unique choisie au début de l'auscultation par un lestage du camion à 10 ou 13 t sur l'essieu de mesure. Les dimensions et le poids du camion Lacroix peuvent le pénaliser sur certaines routes (virages serrés, forte pente, passages à niveau) alors que le FWD y sera plus à l'aise. Ce dernier permet de réaliser des mesures sur tout type de surfaces allant des matériaux granulaires en fondation aux couches de surface bitumineuses ou cimentaires. De plus, avec le FWD, il est possible de déterminer l'état des joints d'un revêtement en béton. De

par sa charge potentiellement très élevée (FWD jusqu'à 24 t et HWD jusqu'à 48 t), le FWD/HWD permet également d'effectuer des mesures de portance sur des pistes aéroportuaires. Le déflectomètre à masse tombante semble être un outil de mesure plus ponctuel mais son exploration de mesure est plus riche.

Voici le tableau III.7 comparatifs résumant ces différents points :

Tableau III.7. Tableau comparatif du déflectographe Lacroix et du FWD

Caractéristique	Déflectographe Lacroix	FWD
Mode d'application de la charge	Charge roulante	Impulsion verticale
Vitesse d'application de la charge	10 km/h (5Hz)	70 km/h (34 Hz)
Rendement (mesures de routine)	2 à 3 km/h (Lacroix classique) 6 à 8 km/h (Lacroix Flash)	0,5 à 3 km/h
Pas de mesure	4 à 6 m (Lacroix classique) 10 à 20 m (Lacroix Flash)	Variable
Résolution du capteur de mesure	1/100 mm	1/1000 mm
Emplacement des mesures	Trace de roue gauche et droite	Trace de roue gauche ou droite
Mesure du bassin de déflexion	Bassin réel pour les chaussées souples/ 65 points	Bassin réel / 9 points
Niveau de chargement appliqué pour une mesure	Unique (50 kN ou 65 kN - essieu 10 t ou 13 t)	Réglable et mesuré (7 à 120 kN - essieu 1,4 à 24 t)
Type de superstructures auscultées	Chaussées souples et semi-rigides (fondation stabilisée)	Chaussées souples, semi-rigides et rigide

III.4.2.2. Exploitation des résultats de déflexion

Les mesures de déflexion font l'objet d'un découpage en section homogènes. Sur chaque section sont fournies moyenne et écart-type des mesures.

La section homogène caractérise par trois éléments :

- ❖ Déflexion
- ❖ Trafic
- ❖ Structure existante

Les valeurs de déflexions obtenues à partir de déflectographe sont illustrés sous forme histogrammes dans les figures III.9, 10, 11

III.4.2.2.1. Sectionnement par Défectographe Lacroix :

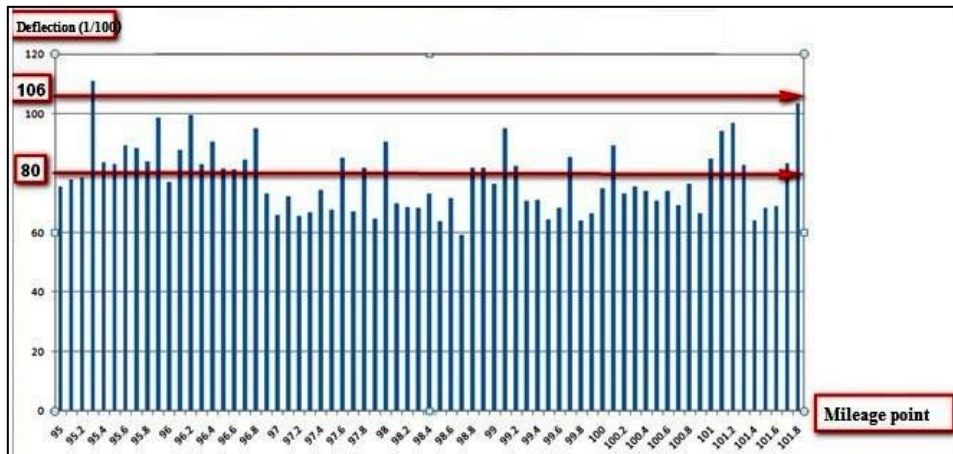


Figure.III.9 : histogramme de déflexions de la 1^{ère} partie mesurée par Défectographe Lacroix

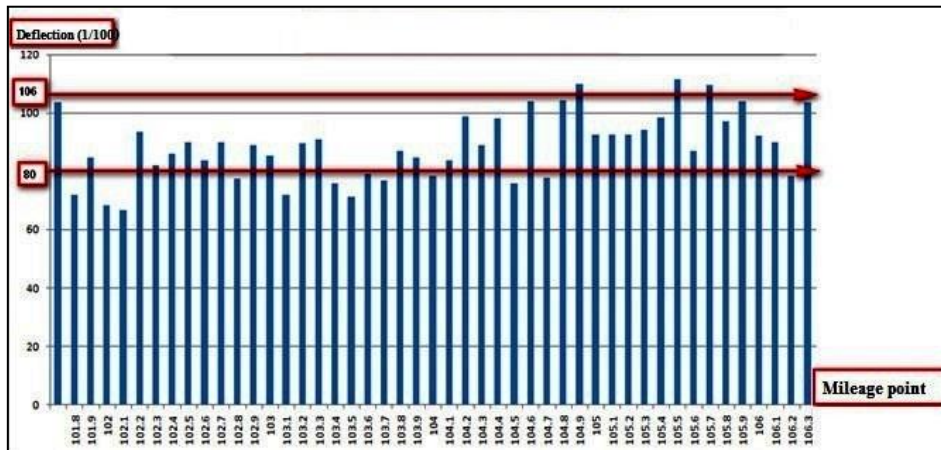


Figure III.10 : histogramme de déflexions de la 2^{ème} partie mesurée par Défectographe Lacroix

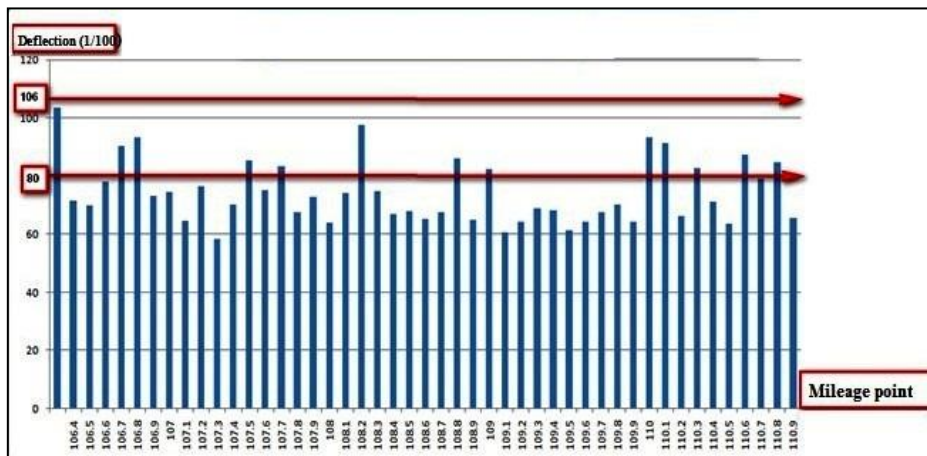


Figure III.11 : histogramme de déflexions de la 3^{ème} partie mesurée par Défectographe Lacroix

Interprétation

Les mesures de déflexion font l’objet d’un découpage en section homogène qui caractérise par 3 éléments : Trafic, Déflexion, Structure existante

À partir d’histogrammes de deflectographe on remarque que les seuils de déflexion caractéristiques appartiennent dans la classe **D5** ou l’intervalle est entre **80** et **106 mm** (d’après le guide Algérien), Sa ce signifie que notre réseau a une portance moyenne.

À partir de là, **la déflexion max** est obtenue sous la plaque (le point d’application de la charge) et les points éloignés du point d’application de la charge sont plus petits. Ceci montré par les pourcentages trouvés dans l’axe et la rive.

III.4.2.2.2. Sectionnement par FWD

Les valeurs de déflexions obtenues dans les figures III.12, 13, 14

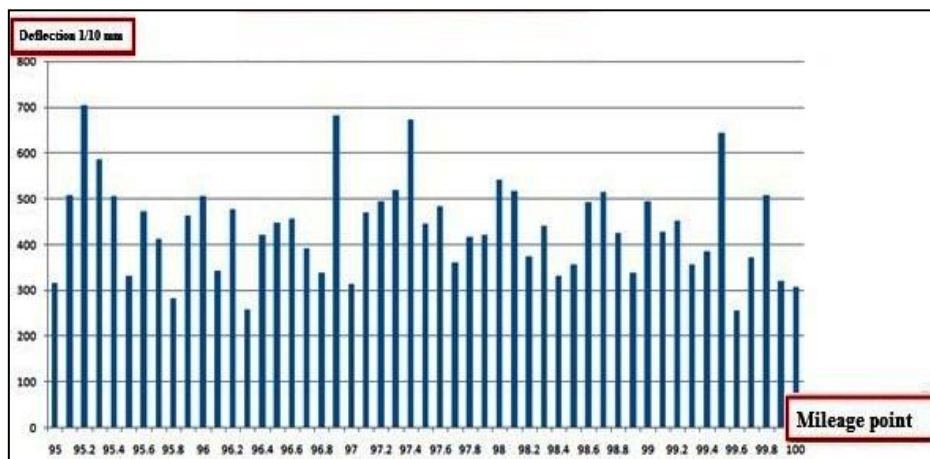


Figure III.12 : histogramme de déflexions de la 1^{ère} partie mesurée par FWD

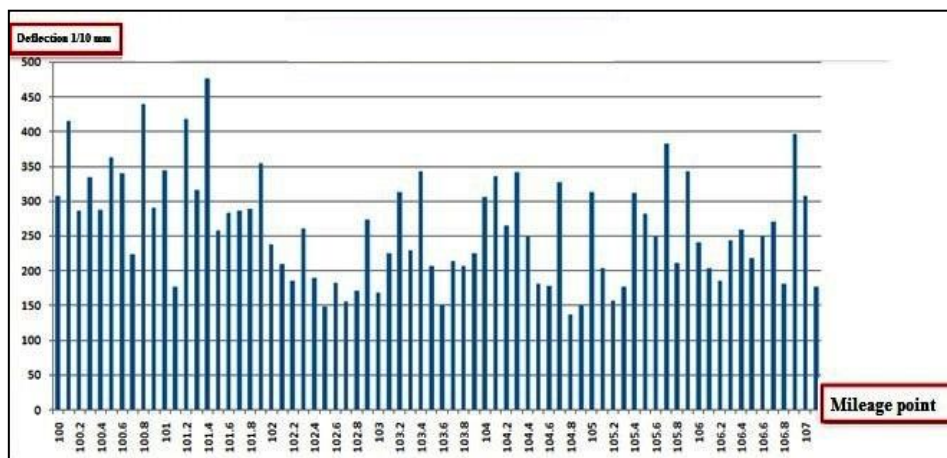


Figure III.13 : histogramme de déflexions de la 2^{ème} partie mesurée par FWD

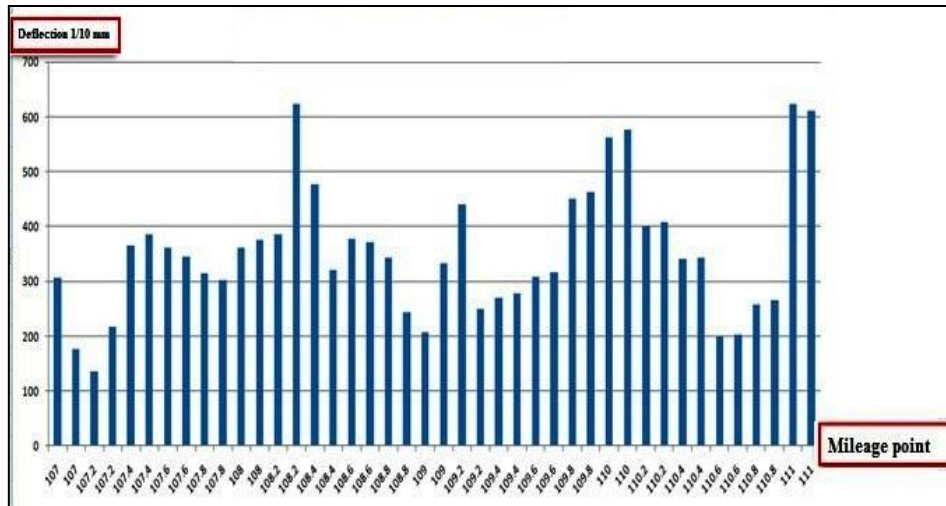


Figure III.14 : Déflexions de la 3^{ème} partie mesurée par FWD

Interprétations

D'après les 'histogrammes de FWD on remarque que les seuils de déflexions ne dépassent pas 600 mm, et 150 mm d'environ pour les déflexions min.

À partir de là, **la déflexion max** est obtenue sous la plaque (le point d'application de la charge) et les points éloignés du point d'application de la charge sont plus petits,

Ce qui se traduit dans le champ par une déformation plus importante sous les roues de véhicule entraînant l'apparition des dégradations structurelle au bord de la route.

III.4.2.2.3. Résultats des déflexions obtenues par FWD et Défectographe Lacroix

On peut résumer les résultats de déflexions obtenues à partir de FWD et Défectographe dans le tableau III.08, et représentées dans les figures III.15 et III.16 :

Tableau III.08. Résultats de déflexion mesurée par FWD et Défectographe Lacroix

Section pk-pk	La déflexion	FWD	Défectographe lacroix
Section 1 95+000-100+000	Déflexion min	136,956522	59,158
	Déflexion max	475,543478	110,951
	Déflexion caractéristique	332,28513	88,573530
Section 2 100+000-107+000	Déflexion min	136,956522	101,8
	Déflexion max	475,543478	106,4
	Déflexion caractéristique	333,046	105,54226
Section 3 107+000-111+000	Déflexion min	136,956522	106,4
	Déflexion max	623,913043	111
	Déflexion caractéristique	497,753993	110,04226

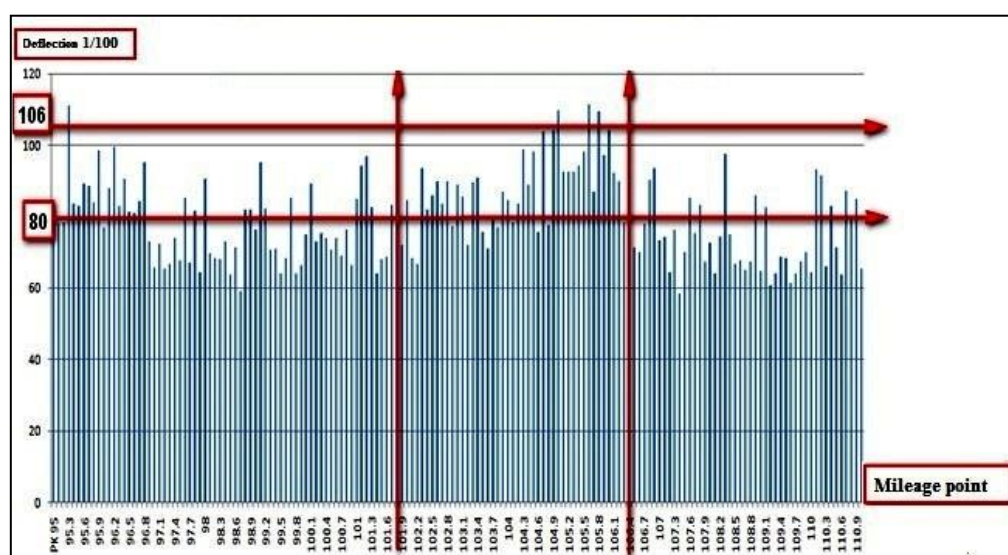


Figure III.15 : Les déflexions mesurées par Défectographe Lacroix pour les trois sections de la route d'ELMEDIA

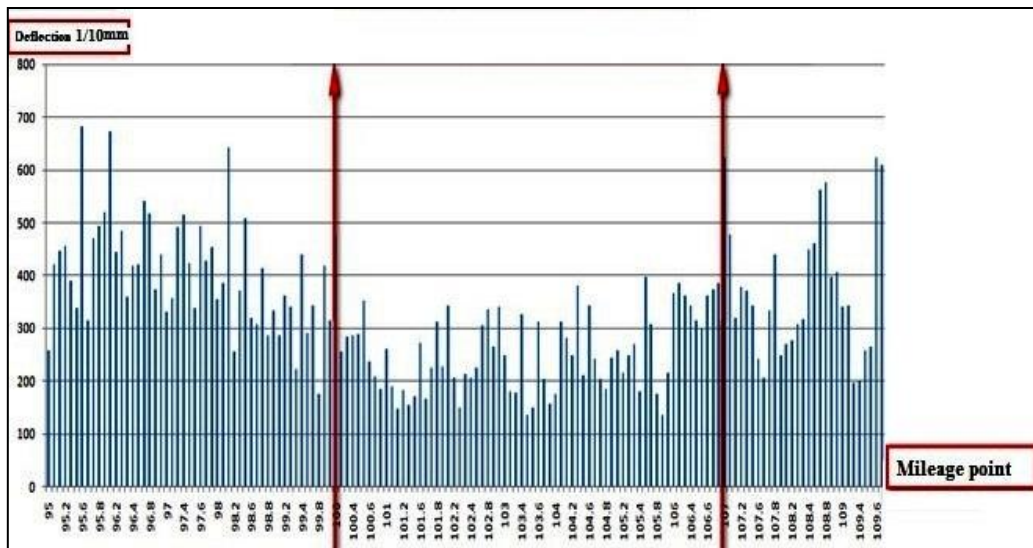


Figure III.16 : Les déflexions mesurées par FWD pour les trois sections de la route d'ELMEDIA

Interprétation

Selon l'auscultation par mesure des déflexions et l'appréciation de différentes sections homogènes, on distingue :

- Déflexion sur l'axe

96,88% du linéaire à une bonne portance ;

1,87% du linéaire à une portance moyenne ;

1,25% de la ligne à une faible portance ;

- Déflexion sur la rive

55% du linéaire à une bonne portance ;

42,5% du linéaire à une portance moyenne ;

2,5% du linéaire à une faible portance

À partir de là, la déflexion maximale est obtenue sous la plaque circulaire (le point d'application de la charge) et les points éloignés du point d'application de la charge circulaire sont plus petits, ce qui se traduit dans le champ par une déformation plus importante sous les roues des véhicules, entraînant l'apparition de dégradations structurelles au bord de la route en relation.

III.4.2.3. Auscultation par mesure d'uni

L'uni est un critère géométrique caractérisant l'ensemble des dénivellations de la surface de la chaussée par rapport à son profil théorique. C'est donc un indicateur d'état de planéité de la surface de la chaussée. Il nous informe, sur les irrégularités du profil en long et des déformations fonctionnelles dues à l'usure en surface et au trafic et sur les déformations structurelles liées à la structure de la chaussée et l'état de dégradation [10-38-39].



Figure III.17 : L'appareil d'Uni [8]

Les mesures d'uni ont été effectués à l'aide d'un appareil de type profilomètre inertiel laser RSP 5051 de marque Dynatest, fixé à l'aide de supports métalliques à derrière le véhicule (voir figure III.17). Cet appareil fournit les données d'uni en IRI (International Roughness Index), Les mesures effectuées au mois de mai 2011 permettent d'obtenir une meilleure appréciation de la planéité de la chaussée ainsi que le découpage en section homogène de 1000m [38 -39].

Un bon uni est l'une des qualités essentielles qu'un réseau routier doit posséder. En effet, l'uni a des incidences néfastes qui intéressent aussi bien l'utilisateur que la structure de chaussée.

- Incidence sur le confort et la sécurité de l'utilisateur,
- Incidence sur le coût d'exploitation des véhicules,
- Incidence sur la dégradation des chaussées.

Les résultats d'Uni sont présentés dans un tableau dans l'Annexe « A ».

Interprétation des résultats d'UNI

L'auscultation effectuée sur le tronçon étudié a donné les résultats suivants :

- 87,5 % du l'itinéraire présente un uni bon.
- 12,5% du l'itinéraire présente un uni bon à moyen.

À la lecture de tous ces résultats, on remarque que l'uni est globalement bon sur la totalité de l'itinéraire concerné par l'étude.

III.5. Rétro calcul par le programme ELMOD6

III.5.1. Définition et principe du programme ELMOD6

Le programme ELMOD6 (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design) permet le traitement des données par la méthode de calcul inverse (back calculation) et fournit tous les résultats conduisant à l'évaluation de la durée de vie. Tout en utilisant les bassins des déflexions mesurées par le système FWD [47]. En raison de la nature dynamique du test FWD, le calcul inverse statique est capable de produire une estimation erronée des modules associés à la négligence des effets dynamiques [22].

III.5.2. Théorie fondamentale

Deux techniques ont été choisies pour estimer les modules de couche de chaussée en raison de leurs similitudes. Les deux techniques peuvent être analysées pour un système physique à trois couches minimums. Une méthode est itérative et l'autre purement analytique [43]. L'objectif fondamental de calcul inverse des programmes itératifs est de déterminer un ensemble de modules de couche de chaussée dans le but de minimiser l'erreur entre les déflexions mesurées et de calculer ou l'erreur RMSE (Root Mean Square erreur) au sens des moindres carrés, cela minimise l'erreur quadratique moyenne (eq.III.8). Les mesures de performance les plus couramment utilisées sont les suivantes :

$$\text{RMSE, (\%)} = 100 * \frac{1}{n} \sqrt{\sum \left(\frac{d_{im} - d_{ic}}{d_{im}} \right)^2} \quad (\text{III,8})$$

Sachant que, RMSE = Root mean squared error (%); n= Nombre de capteurs ; d_i^m =Déflexion mesurée au capteur i ; d_i^c =Déflexion calculée au capteur i.

➤ *Méthode de Radius of curvature par ELMOD6 :*

Cette version d'ELMOD6 utilise divers modules pour analyser les déflexions de surface mesurées, telle que FEM (Finite Element Method), LET (Linear Elastic Theory), MET (Method of Equivalent Thickness), Deflection Basin Fit module et Radius of curvature module. La technique de « Radius of curvature » est basée sur la méthode Odemark-Boussinesq de l'épaisseur équivalente, elle utilise les enregistrements des géophones éloignés du centre de la charge pour estimer le calcul inverse des modules des couches de chaussée [43]. Boussinesq a développé en 1885 des équations qui permettent de déterminer l'état des contraintes imposées par une charge ponctuelle à l'intérieur d'un demi-espace homogène, isotrope et présentant un comportement élastique linéaire. La limitation principale de la méthode de Boussinesq est qu'elle s'applique à un massif de sol homogène infini en profondeur et sur le plan horizontal. Ainsi, la méthode de Boussinesq ne peut s'appliquer que directement à une structure de chaussée multicouche. Étant donné que l'analyse des contraintes par Odemark et Boussinesq est qualifiée comme une analyse de base. Le calcul de l'épaisseur, la déflexion et les différents modules des couches de chaussée ont été estimées selon les équations de transformation suggérées par (Odemark 1949). La forme générale de l'équation d'Odemark pour un système multicouche.

➤ *Méthode approximative de calcul inverse :*

Dans la méthode de calcul approximative, le module de chaque couche est calculé en utilisant la déflexion basée sur la formule de Boussinesq dans la théorie du demi-espace élastique stratifié [43]. Le bassin de déflexion constitué les données des capteurs de FWD est bien adaptées à une telle demande. La déflexion des différentes réponses dans les couches structurelles de la chaussée peut être directement réfléchiée par divers paramètres de déflexion. Ces paramètres correspondent au module de couche de structure, de sorte qu'il peut être directement appliqué pour calculer approximativement les modules de chaussée. Les données du bassin de déflexion sont indiquées dans (figure III.18).

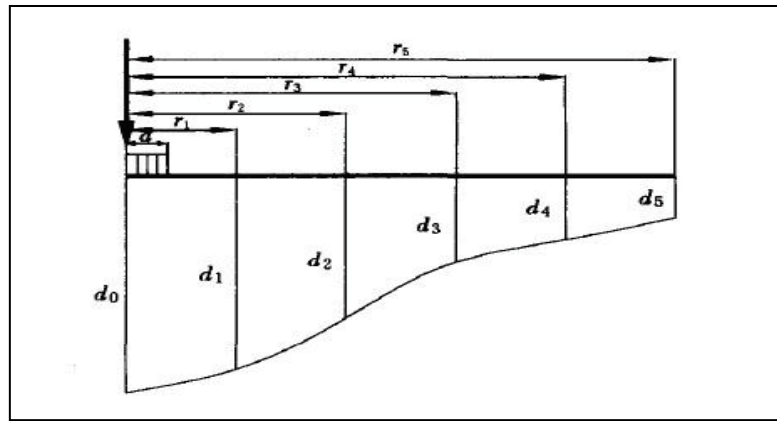


Figure III.18 : schémas du bassin de déflexion

Comme la structure de chaussée multicouche est compliquée, une méthode itérative ou une autre méthode numérique est utilisée dans de nombreuses littératures basé sur une solution approximative est utilisée dans cet article. Selon la formule de Bousinesq, il peut obtenir la déflexion maximale du centre d_0 de la surface de demi-espace élastique et la distance de surface de r_i au centre de déflexion d_i [47-5] :

$$d_0 = \frac{2pa(1-\mu^2)}{E_0} \quad (\text{III},9)$$

Dans la figure III.25, on sait que r_i est beaucoup plus grand qu'un a , donc $(a/r_i)^n$ est très petit, la fonction hypergéométrique ${}_2F_1$ converge rapidement, donc le polynôme pourrait être négligeable alors il est capable de répondre aux exigences de précision, l'équation (2) peut être simplifié à [39]:

$$d_i = \frac{pa^2(1-\mu^2)}{E_i r_i} \quad (\text{III},10)$$

La formule de déflexion du centre de surface d'Odemark du système constitutif à trois couches proposées par [36] est la suivante :

$$d_0 = \frac{2pa(1-\mu_2)}{E_0} F \quad (\text{III},11)$$

Sachant que « a » est le rayon d'application de la charge en mm ; « r_i » distance entre le capteur et le centre de gravité en mm ; d_i est la déflexion mesurée 10^{-3} mm ; « p » est la charge d'impact

générée par la pression dans le centre de charge en MPa ; μ est le coefficient de Poisson de chaque couche.

III.5.3. Résultats de déflexion mesurée par ELMOD6 :

Les déflexions des trois sections calculées par ELMOD6 sont montrées dans les figures III.19, III.20 et III.21,

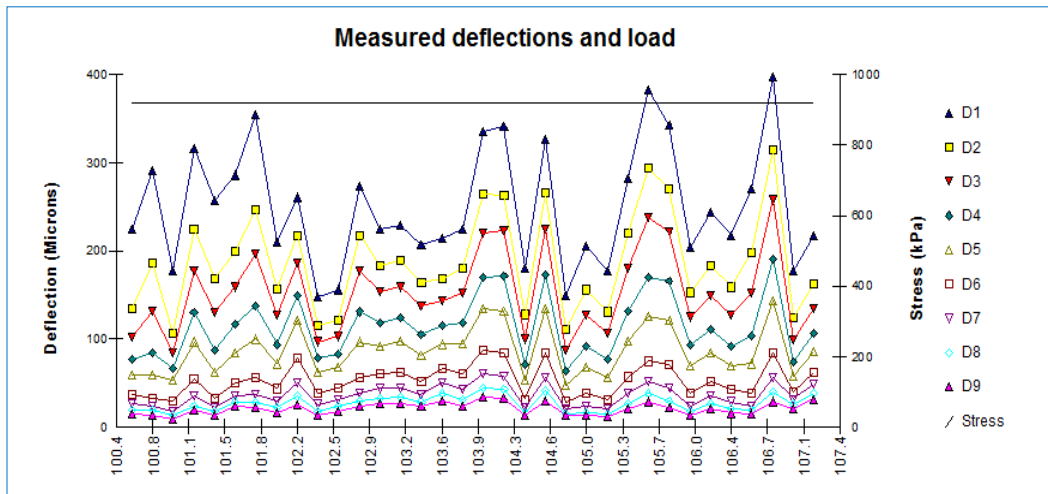


Figure III.19 : Déflexions de la section1 calculées par ELMOD6

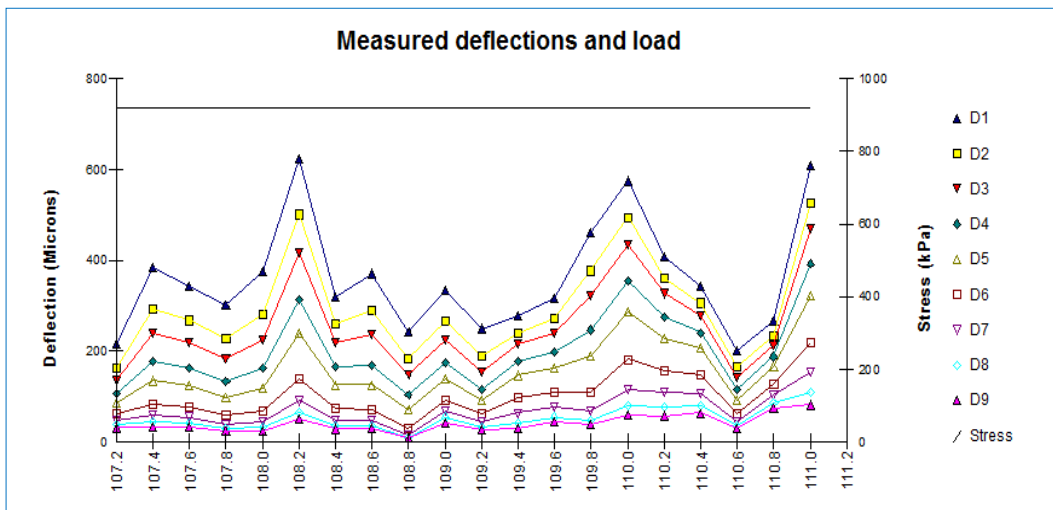


Figure III.20 : Déflexions de la section2 calculées par ELMOD6

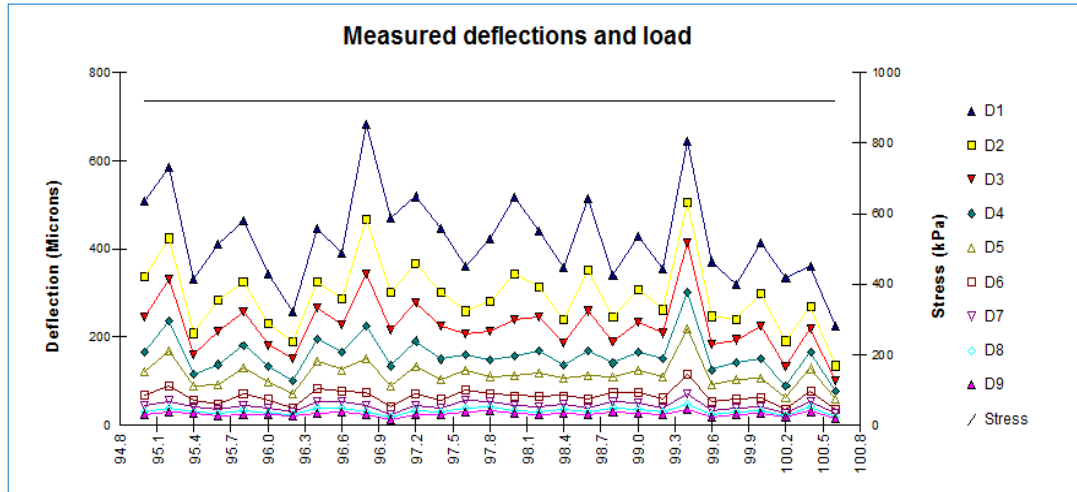


Figure III.21 : Déflexions de la section3 calculées par ELMOD6

Interprétation

D'après les trois déflectographes, on remarque bien que la déflexion max est obtenue sous la plaque circulaire (D1) le point d'application de la charge et les points éloignés du point d'application sont plus petit (D2 jusqu'à D9).

Sachant que les seuils de déflexions obtenues ne dépassent pas 750 mm sauf quelque point dans la section 1. Ce qui se traduit dans le champ par une déformation plus importante sous les roues de véhicule, entraînant l'apparition des dégradations structurales au bord de la route.

À partir de là, on va présenter dans le tableaux III.09 une comparaison entre les déflexions mesurées in situ par FWD et les déflexions calculées par ELMOD6.

III.5.4. Résultats comparatifs de déflexion mesurée et de calculée

Tableau III.09. Valeurs comparatives entre les déflexions mesurées et les déflexions calculées

Section	La déflexion	FWD	ELMOD6	% de variation
Section 1	Déflexion min	136,956522	118.316	12.29
	Déflexion max	475,543478	448.804	7.90
	Déflexion caractéristique	332,28513	324.292	5.16
Section 2	Déflexion min	116,956522	101,8	11.99
	Déflexion max	470,599478	465.6	3.43
	Déflexion caractéristique	333,046	331,326	2.39
Section 3	Déflexion min	135,956522	135,4	2.13
	Déflexion max	623,913043	622.852	1.37
	Déflexion caractéristique	497,753993	497.254	3.16

À partir de tableau III.09 on exprime leurs résultats dans les figures III. 22 et III.23 sous forme de déflectogramme.

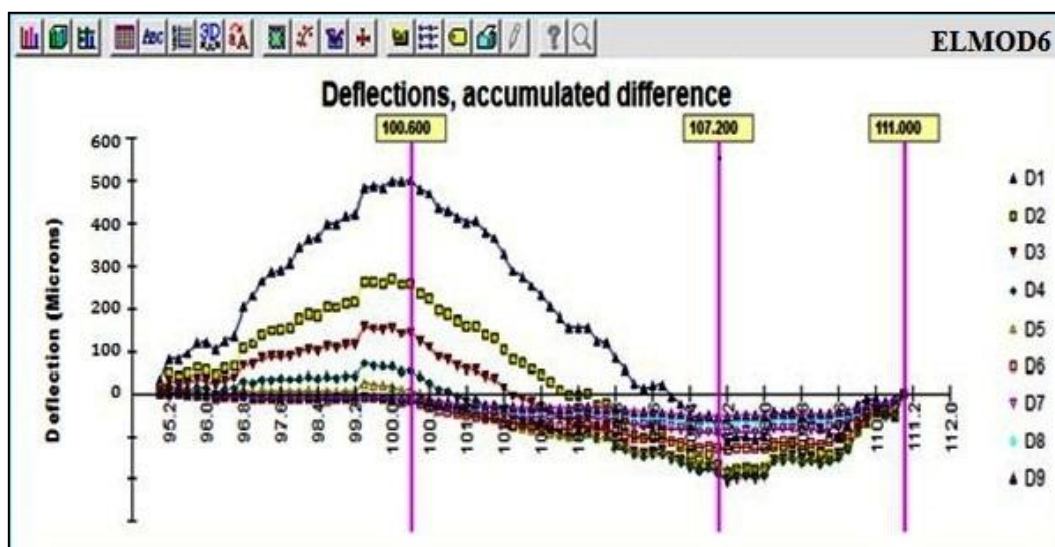


Figure III.22 : Résultats de déflexions retro calculées par ELMOD6

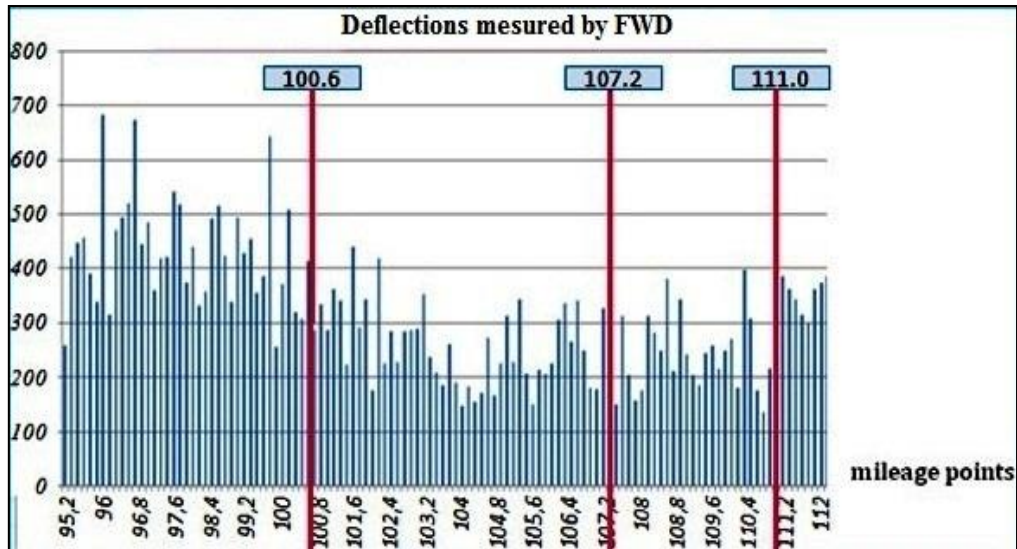


Figure III.23 : Résultats de déflexions mesurées par FWD

Interprétation des résultats

Comme les résultats illustrés au tableau III.09, La valeur de la déflexion théorique est proche de la déflexion mesurée. Puisque la précision des capteurs est la condition préalable importante de la fiabilité de la déflexion mesurée. La moyenne d'erreur entre les deux résultats ne dépasse pas 9% pour la déflexion minimale, et pour la déflexion maximale et déflexion caractéristique sont respectivement de 4.23% et 3.57%.

Par conséquent, la déflexion maximale est obtenue sous la plaque circulaire, et les points qui sont loin du point d'application de la charge circulaire sont plus petits, ce qui se traduit sur le terrain par une déformation sous les roues des véhicules plus grande, entraînant l'apparition des dégradations structurelles à la rive de la route par rapport à son axe.

III.6. Conclusions

Les appareils d'auscultation non destructifs tels que le FWD et le déflectographe sont largement utilisés en Algérie pour l'auscultation des chaussées. Des comparaisons avec des dispositifs de référence (capteur de déplacement ancré placé dans la chaussée, en particulier) ont montré que ces appareils dits à grand rendement tendent à sous-estimer la déflexion de référence. Les principes de fonctionnement de ces appareils ont été analysés, et on les a montrés que leur mode de fonctionnement, et certaines hypothèses utilisées pour le traitement des mesures conduisent à des biais de mesure. Le calcul inverse des modules des couches à partir de ces mesures donne des résultats peu satisfaisants, dus à une sous-estimation de la déflexion maximale et une modification de la forme du bassin. Par conséquent, les mesures de déflexion de ces appareils

ne peuvent être pleinement exploitées et sont généralement utilisés uniquement comme indicateurs « qualitatifs » de l'état structurel de la chaussée.

Afin d'étudier les mécanismes des dommages structuraux, on peut utiliser les méthodes de calcul par ELMOD6, dont les modules de base sont établis par la relation entre la formule Bousinesq-Odemark et les données du bassin de déflexion mesurée par FWD. Cet algorithme peut donner plein jeu à l'avantage de FWD. Comme le module de déflexion à point unique calculé ne peut pas vraiment refléter la structure de la chaussée. Seulement le module superposé est calculé à partir des données multi-capteurs avec la charge FWD mesurée à différentes distances, il peut vraiment refléter les caractéristiques non linéaires de la structure de la chaussée.

Les valeurs estimées par le programme de rétrocalcul automatique sont présentées comme une moyenne de tous les modules de chaussée estimés pour toutes les sections. Cependant, la variation des déflexions mesurée et calculée ne dépasse pas 9% pour la déflexion minimale, et pour la déflexion maximale et déflexion caractéristique sont respectivement de 4.23% et 3.57%. Ainsi, cette étude facilite le chemin de la recherche en étendant de telles études comparatives entre diverses autres techniques en adoptant la technique robuste pour estimer des modules de couche de chaussée fiables.

Chapitre IV : Application au cas d'un renforcement d'une chaussée souple

IV.1. Introduction

Le dimensionnement d'une chaussée consiste à déterminer la nature ainsi que les épaisseurs des différentes couches le constituant. Il doit lui permettre également de préserver durant sa vie de service les qualités d'uni qui offrent aux usagers un niveau de service admissible. Durant leur vie de service, les chaussées sont soumises à diverses sollicitations cycliques. En plus des actions mécaniques répétées dues au trafic, elles sont également soumises à des sollicitations hydriques, thermiques et chimiques.

Devant la complexité des problèmes observés, les méthodes de dimensionnement développées sont basées sur des règles empiriques tirées de l'observation du comportement en service des structures de chaussée ou des sections expérimentales. Ces méthodes présentent des limites qui sont d'autant plus visibles que de nouveaux types de structures et des matériaux plus performants se développent et que le trafic est en constante augmentation. Un développement des méthodes de dimensionnement plus rationnelles apparaît donc nécessaire [28]. Cette nécessité a conduit au développement et à l'application dès les années 1970 de la méthode rationnelle française [LCPC – SETRA] et, plus récemment, le développement, aux États-Unis dans le cadre du programme *SHRP (Strategic Highway Research Program 1988-1993, poursuivi après 1996)*, de la méthode « Superpave », la mise en place du guide de dimensionnement *AASHTO 2002*.

Donc, chaque pays a sa ou ses propres méthodes de dimensionnement des chaussées, selon sa propre condition climatique, les matériaux disponibles, et les stratégies économiques du pays.

Dans ce chapitre, on applique une série d'application numérique par deux méthodes qui se basent sur deux programmes, le premier est ELMOS6 et le deuxième est ALIZEIII, afin de présenter les méthodes de dimensionnement utilisées en Algérie. Puis on choisit l'une de ces méthodes pour un bon renforcement et plus économique.

IV.2. Méthodes de dimensionnement

Les méthodes du dimensionnement de corps de chaussée les plus utilisées en Algérie sont [35] :

- La méthode de C.B.R (California -Bearing - Ratio)

- Méthode de guide des renforcements des chaussées algériens « Méthode du catalogue des structures »
- Méthode des renforcements de la chaussée basée sur le programme ELMODE6
- Méthode des renforcements de la chaussée basée sur le logiciel ALIZE III

IV.2.1. La méthode de C.B.R (California -Bearing - Ratio)

C'est une méthode semi empirique qui se base sur un essai de poinçonnement sur un échantillon du sol support en compactant les éprouvettes de (90 à 100%) de l'optimum Proctor modifié.

Pour que la chaussée tienne, il faut que la contrainte verticale répartie, suivant la théorie de BOUSSINESQ, soit inférieure à une contrainte limite qui est proportionnelle à l'indice CBR [28]. Pour le renforcement de chaussée il faudra calculer la différence entre l'épaisseur équivalente totale et l'épaisseur équivalente de la chaussée existante (CTTP 2001).

IV.2.1.1. L'épaisseur équivalente de la chaussée existante [41-27-42]

$$E_{tot} = \frac{100 + \sqrt{P}(75 + 50 \log_{10} \frac{N}{10})}{I_{CBR} + 5} \quad (IV.1)$$

Avec

E: épaisseur équivalente.

I: indice CBR (sol support).

N: désigne le nombre journalier de camion de plus 1500 kg à vide.

P: charge par roue P = 6.5 t (essieu 13 t).

Log: logarithme décimal.

$$E_{ext} = \sum a_i \times e_i \quad (IV.2)$$

Avec :

a_i : coefficient d'équivalence de chacun des matériaux à utiliser.

e_1 : épaisseur réelle de la couche de roulement.

e_2 : épaisseur réelle de la couche de base.

e_3 : épaisseur réelle de la couche de fondation.

a_1, a_2, a_3 : sont Les coefficients d'équivalence respectivement des matériaux des couches e_1, e_2, e_3 .

IV.2.1.2. Épaisseur équivalent de renforcement :

$$E_r = E_{tot} - E_{ex} \quad (IV.3)$$

Le tableau IV.4 indique les coefficients d'équivalence pour chaque matériau :

Tableau IV.1. Les coefficients d'équivalence pour chaque matériau

Matériaux utilisés	Coefficient d'équivalence
Béton bitumineux ou enrobe dense	2.00
Grave ciment – grave laitier	1.50
Sable ciment	1.00 à 1.20
Grave concassée ou gravier	1.00
Grave roulée – grave sableuse et T.V. O	0.75
Sable Grave bitume GB	1.50
Sable	0.50

IV.2.1.3. Application de la méthode CBR au projet

Les données mises à notre disposition sont :

Trafic de l'année de comptage 2010, TJMA 2010 = 7000 v/j

Le taux de croissance est $i = 5\%$.

Pourcentage du poids lourd est $Pl = 25\%$.

$n = 10$ ans

Calcul le N_{pl}

$$N_{pl} = 7000 \times 0.25 = 1750 \text{ PL/j}$$

Calcule d'épaisseur équivalente

avec

$$P = 6.5t$$

$$I_{CBR} = 7$$

$$E = c_1 \times e_1 + c_2 \times e_2 + c_3 \times e_3 \quad (IV.4)$$

$$e_3 = (35 - (2 \times 6 + 1.4 \times 12)) / 0.9 = 16.88 \text{ cm, on prend } e_3 = 20 \text{ cm}$$

Voilà le tableau IV.2 représente Les coefficients d'équivalence et l'épaisseur de chaque couche :

Tableau IV.2. Les coefficients d'équivalence et l'épaisseur de chaque couche de RN18

Nom de la couche	Matériaux	Coefficient d'équivalence	L'épaisseur de la couche
Roulement	BB	2	6
Base	GB	1,4	12
Fondation	GNT	0,9	20

IV.2.2. Méthode de guide algérien de renforcement des chaussées

Le dimensionnement du nouveau corps de chaussée sur le tronçon de la RN 18 s'effectue en se référant essentiellement au guide des renforcements de 1992 dont la méthodologie de dimensionnement est basée principalement sur l'importance du trafic poids lourd dont la charge utile est supérieure à cinq (05) tonnes et la conjugaison des trois critères d'états de la chaussée associés à la classe du trafic qui sont [35-36-37] :

- Auscultation par relevé visuel
- Auscultation par mesure de déflexion
- Auscultation par mesure d'uni

IV.2.2.1. Auscultation de dégradation par relevé visuel

Après l'analyse des différents paramètres d'auscultation illustrée dans le chapitre 3, il ressort que la chaussée est caractérisée par :

- Une portance suffisante sur la majeure partie de l'itinéraire excepté des sections bien localisées ;
- Un état visuel jugé moyen à mauvais sur l'ensemble du tronçon.

À la base des relevés effectués en s'inspirant des indications du tableau IV.3 :

Tableau IV.3. Relevé de l'état visuel de RN18

État visuel	
Acceptable	Non acceptable
<ul style="list-style-type: none"> - Absence de fissuration et de réparation - Déformations faibles, isolées <p style="text-align: center;">Éventuelle (État bon)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Fissuration et réparations isolées - Déformation faibles isolées / Éventuelle <p style="text-align: center;">(État bon)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fissuration (fissures, faïençage et /ou réparation fréquentes - Fissuration et /ou réparations généralisées - Déformation de moyenne importance localisée <p style="text-align: center;">(État moyen)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Déformation généralisées et/ou importantes (orniérage faible) <p style="text-align: center;">(État mauvais)</p>

IV.2.2.2. Auscultation par mesure de déflexion caractéristique

Dans le souci de rationaliser la détermination du type de renforcement, le guide des renforcements dans son fascicule de méthodologie de dimensionnement propose une grille de décision qui nous permet de procéder à un premier découpage du linéaire en sections homogènes et de déterminer le type de renforcement [10-45].

IV.2.2.2.1. Sectionnement en tronçons homogènes

Le découpage se fera pour chaque section de trafic déterminée précédemment, et nous permet d'établir les concordances entre les valeurs de déflexions, l'état superficiel du revêtement et la structure de la chaussée [10].

Il nous permet également de situer le cas où les discordances peuvent apparaître. Cela peut nous à paganiser une série de travaux de reconnaissance complémentaire pour lever les singularités et localiser les défaillances dues au drainage et à l'assainissement qu'il faut améliorer lors du projet de renforcement.

On considère les zones homogènes comme étant des longueurs de traçons ayant les mêmes caractéristiques du point de vue :

- Déflexions mesurées (même classe)
- État de revêtement
- Conditions de drainage
- Type de l'épaisseur des matériaux constituant le ceps de chaussée

- Nature du sol support
- Nature du profil (déblais, remblai ou profil mixte)
- Uni

IV.2.2.2.2. Exploitation du déflectogramme de la déflexion

Le déflectogramme est la représentation graphique des déflexions mesurées, il permet de découper provisoirement la route en tronçons homogènes (dont la portance est proche, c'est à dire définir le tronçon par une déflexion moyenne avec un écart type maximum à fixer. La (figure IV.1) présente le déflectogramme de la déflexion caractéristique [10-45] :

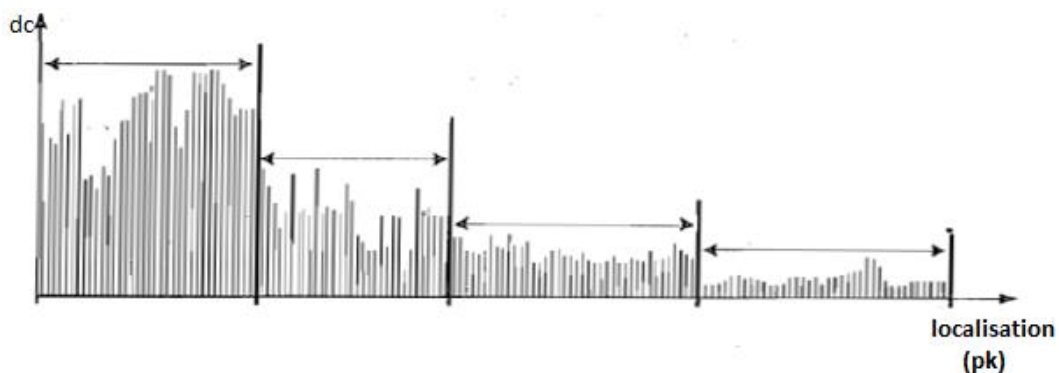


Figure IV.1. Déflectogramme de la déflexion caractéristique

Pour chacun des tronçons homogènes considérés, on déterminera la déflexion caractéristique. On traitera séparément l'ensemble des déflexions correspondant à chacune des rives auscultées ainsi que pour l'axe de la chaussée.

La déflexion caractéristique est définie par l'expression suivante :

$$d_c = m + 2\sigma \quad (\text{IV.5})$$

Avec :

$$m = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{i=n} d_i \quad (\text{IV.6})$$

d_i : la déflexion au point i

σ : écart type

$$\sigma^2 = \frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^{i=n} (m - d_i)^2 \quad (\text{IV.7})$$

Le taux de déflexions est représenté dans le tableau IV.4

Tableau IV.4. Le taux de déflexion de RN18

Déf _{MIN}	136,956522
déf _{MAX}	703,804348
MOY	341,260183
ECART TYPE	134,468822
DEF CARACT	610,197827

IV.2.2.2.3. Seuils admissibles de déflexion

Les seuils de déflexion concernant la chaussée auscultée ont été déterminés à partir des graphes d'évaluation de la portance résiduelle en fonction du trafic global (guide de renforcement) et ont été illustré dans le tableau IV.5 :

Tableau IV.5. Les seuils admissibles de déflexion de la RN18

Localisation pk-pk	Trafic cumulé global	Seuils des déflexions (1/100 mm)		
		Portance suffisante	Portance moyenne	Portance insuffisante
95 +000 - 111+000	5.68×106	$d < 80$	$80 \leq d \leq 106$	$106 < d$

IV.2.2.2.4. La portance résiduelle de la chaussée

Le graphe ci-après permet d'évaluer la portance résiduelle de la chaussée par le critère de déflexion est porté en abscisse, le trafic lourd cumulé de charge utile supérieure est égal à 5 tonnes (sur la voie la plus chargée). Ce dernier concerne aussi bien le trafic prévisionnel pour la durée de vie escomptée. En ordonné et portée la déflexion caractéristique corrigée. Le point représentatif obtenu par la coupe (trafic, déflexion) indiquera donc la portance résiduelle de la chaussée comme la figure IV.2 indique [24].

Zone A : portance résiduelle suffisante (faible déflexions)

Zone B : portance résiduelle moyenne (moyennes déflexions)

Zone C : portance résiduelle insuffisante (fortes déflexions)

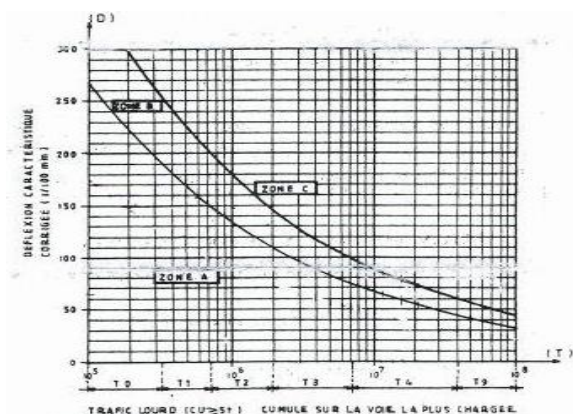


Figure IV.2. Évaluation de la portance résiduelle [24]

IV.2.2.3. Auscultation par mesure d'uni [38-39]

Les mesures d'UNI permettent de connaître les irrégularités du profil en long (état de planéité de la surface). L'évolution de l'uni est caractérisée principalement par trois éléments :

- Déformation structurelle (liée au trafic et à l'indice structurel).
- État de la surface (lié à la fissuration, nids de poules et profondeurs d'ornières).
- Un terme d'UNI (lié à l'âge de la chaussée et l'environnement).

Une grille de décision relative au choix des structures et leurs épaisseurs est appliquée afin de dégager des solutions à adopter et cela selon la méthodologie du guide des renforcements des chaussées. Dans cette étape le choix est en fonction du type de renforcement et la classe du trafic où est considéré le trafic cumulé prévisionnel dans le calcul de dimensionnement du renforcement. La conjugaison des différents paramètres (dégradation, déflexion, uni), d'état et le type de renforcement sont illustrés dans l'annexe B.

Tenant compte des différentes investigations effectuées et les résultats obtenus qui indiquent que la chaussée sujette à *un déficit* structurel sur l'ensemble du tronçon, *une remise en état* est indispensable pour arrêter la remontée des fissures, résister à l'agressivité des essieux et reprendre les sollicitations des poids lourds ainsi assurer un confort à l'utilisateur.

À cet effet, nous avons proposés une structure en **béton bitumineux** et **grave bitumes** suivi d'un traitement en profondeur pour remédier aux insuffisances constatées. Ce traitement est constitué **de purges et fraisages** des sections présentant des dégradations d'ordre structurel avant la mise en place de la structure préconisée.

IV.2.2.4. Choix de dimensionnement

Le dimensionnement final est récapitulé dans le tableau IV.6 :

Tableau IV.6. Le renforcement des couches de la RN 18 d'ELMEDIA

Localisation PK-PK	Linéaire (m)	Structure
95+000-96+800	1800	5BB+12GB
96+800-97+900	1100	6BB
97+900-99+200	1300	5BB+12GB
99+200-101+000	1800	6BB
101+000-107+800	6800	5BB+12GB
107+800-111+000	3200	6BB

IV.2.2.5 Méthode du catalogue des structures

L'utilisation de catalogue de dimensionnement fait appel aux mêmes paramètres utilisés dans les autres méthodes de dimensionnement de chaussées : trafic, matériaux et sol support. Ces paramètres constituent souvent des données d'entrée pour le dimensionnement, en fonction de cela on aboutit au choix d'une structure de chaussée donnée. La méthode du catalogue de dimensionnement des chaussées neuves est une méthode rationnelle qui se base sur deux approches : - Approche théorique. - Approche empirique.

Les données de bases pour le dimensionnement de chaussée sont :

- Le trafic
- La durée de vie.
- Les données climatiques.
- Le sol support de chaussée.
- Le risque de calcul considéré.
- Les caractéristiques des matériaux.

IV.2.2.5.1. Les données climatiques :

Le dimensionnement de corps de chaussée s'effectue avec une température consistante, c'est-à-dire température équivalente θ_{eq} , en tenant compte de cycle de variation de température de chaque année. La température équivalente est généralement déterminée selon le zonage climatique du site. D'après le « **catalogue de dimensionnement des chaussées neuves (2001CTTP)** », le site de projet est classé en zone **II** comme la figure IV.3 montre :

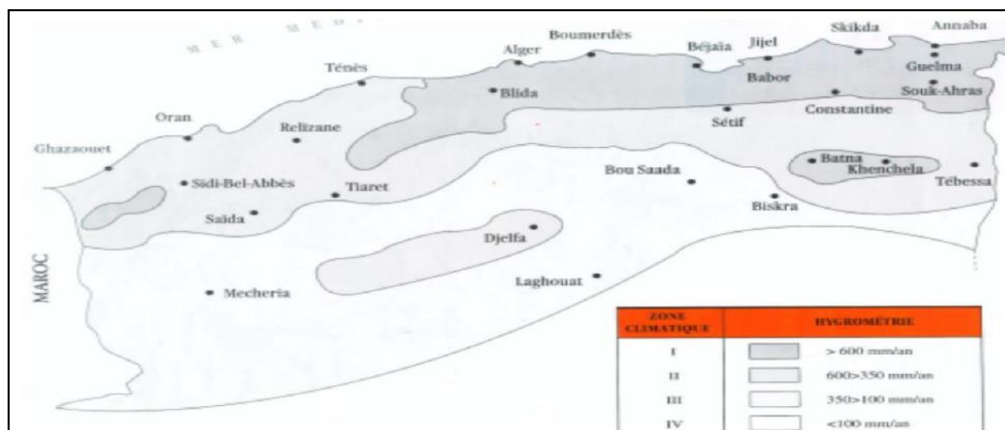


Figure IV.3. Position de projet dans la carte climatique de l'Algérie (fascicule N°1 (2001CTTP)).

Donc on prend une température équivalente égale à **20°C**, comme montré dans le tableau IV.7 :

Tableau IV.7. Choix des températures équivalentes (fascicule N°2(CTTP2001)).

Zone climatique	I et II	III	IV
Température équivalente θ_{eq}	20°C	25°C	30°C

IV.2.2.5.2 Les données du trafic :

➤ *Détermination du type de réseaux principaux :*

D'après le catalogue on a la classification mentionnée dans le tableau IV.8 :

Tableau IV.8. Type de réseau

Réseau principal	Trafic (véhicules/jour)
RP1	>1500
RP2	<1500

TJMA 2010 = 7000 v/j > 1500 V/J => Donc : le réseau principal est **RP1**.

Donc la durée de vie de projet c'est : **10 ans**

➤ *Détermination de la classe du trafic (TPLi) :*

Les classes de trafic (TPLi) adoptées dans les fiches des structures de dimensionnement sont données, pour chaque niveau de réseau principal, en nombre PL par jour et par sens à l'année de mise en service.

$$TJMA\ 2010 = 7000\ v/j$$

$$TJMA\ 2010 = 7000 / 2 = 3500\ v/j/sens.$$

$$TPL = Z \times TJMA = 0.05 \times 3500 = 175\ v/j/sens$$

$$TPL = 175\ v/j/sens$$

➤ *Répartition transversale du trafic :*

Nous avons une chaussée unidirectionnelle à 2 voies. D'après le catalogue algérien du dimensionnement la répartition du poids lourd est de **90%** sur la voie de droite la plus chargée.

$$\text{Donc, } TPL = 175 \times 0.9 = 157.5\ (PL/j/sens/voie\ plus\ chargée).$$

Donc nous sommes dans un réseau principal de classe **C1**, un TPL « entre **150 et 300** »

Donc : La classe de trafic est **TPL0** comme indiqué au tableau IV.09.

Tableau IV.09. Classe du trafic

TPLi	TPL3	TPL4	TPL5	TPL6	TPL7
PL/j/sens	150-300	300-600	600-1500	1500-3000	3000-6000

- *Trafic cumulé équivalent (TCEi) :*

Il correspond au nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 tonnes sur la durée de vie considérée.

$$TCEi = TPLi \times \frac{(1+i)^{-1}}{i} \times 365 \times A \quad (IV.8)$$

Avec :

i : taux de croissance du trafic (0.04)

A : coefficient d'agressivité de poids lourd par rapport à l'essieu de référence de 13 tonnes. En fonction de réseau principal **RPi**.

D'après le tableau de catalogue algérien du dimensionnement des chaussées neuves Le coefficient d'agressivité **A = 0,6** Donc :

$$\begin{aligned} TCEi &= 157.5 \times ((1 + 0.04)^{-1}/0.04) \times 365 \times 0.6 \\ &= 3.44 \times 10^5 \text{ essieux équivalent de 13T} \end{aligned}$$

➤ *Détermination de la portance de sol support de chaussée*

$$E=5 \times CBR=5 \times 7=35 \text{ MPA}$$

Le sol doit être classée selon la valeur de CBR de densité Proctor modifier maximal.

D'après le catalogue et le tableau IV.10 l'ordre de portance de sol est de : **S3**.

Tableau IV.10. L'ordre de portance de sol

Classe de sol	E(MPA)
S1	125-200
S2	50-125
S3	25-50
S4	<25

IV.2.2.5.3 Choix de dimensionnement :

Nous sommes dans le réseau principal (**RP1**), la zone climatique **II**, durée de vie de **10 ans**, taux d'accroissement moyen (**5%**), la portance du sol (**S3**) et une classe de trafic (**TPL3**). Avec toutes ces données, le catalogue Algérien (**fascicule N°3**) propose la structure représentée dans le tableau IV.11 :

Tableau IV.11. Structures proposées par le catalogue Algérien

	Structure1	Structure2
Couche de roulement	6 BB	6 BB
Couche de base	12 GB	11 GB
Couche de fondation	20 GNT	12 GB

IV.2.3. Méthode de vérification de renforcement de la chaussée basée sur le programme ELMODE6

Le programme ELMOD 6 (Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design) permet le traitement des données par la méthode de calcul inverse (back calculation) et fournit tous les résultats conduisant à l'évaluation de la durée de vie de la chaussée. Le traitement de données basées sur les déflexions théoriques mesurées in situ par FWD, dans le but de minimiser l'erreur entre les déflexions mesurées et calculées au sens des moindres carrés. ELMOD6 modifie plusieurs paramètres essentiellement les modules d'élasticité, module de surface et la durée de vie basé sur le modèle de Boussinesk développée par Odemark [47-22].

Une analyse structurelle complète et un calcul de dimensionnement des couches de renforcement à partir des paramètres ayant été préalablement définis et qui sont relatifs :

- Au trafic, et environnement climatique,
- A la chaussée résiduelle (type, structure, et propriétés des matériaux existants),
- Aux charges appliquées et caractéristiques des matériaux destinés à la mise en œuvre.

Les étapes de calcul du logiciel peuvent être résumées comme suit :

- Calcul des modules de différentes couches (y compris le sol support) en évaluant les bassins de déflexions mesurées par le système FWD.
- Évaluation des dégâts causés par les charges, en fonction des modules des matériaux et des conditions climatiques pour ainsi déterminer la durée de vie résiduelle tout en se basant sur les relations liées aux dégâts,
- Calcul de l'épaisseur nécessaire de recouvrement à partir des contraintes et des déformations engendrées au niveau des structures de chaussées par les charges. Tout en définissant un matériau précis et une période de dimensionnement donnée.

➤ **Principe de modèle de Boussinesq**

Dans le cas où le corps de chaussée n'est pas trop différent du sol naturel, on peut considérer que la pression se répartit de la même manière que dans un sol. Ceci amène à considérer la structure de chaussée comme un massif semi-infini et à proposer une méthode simple de dimensionnement. Avec les hypothèses d'isotropie et d'élasticité linéaire. Ce problème a été résolu par Boussinesq en 1885. Pour une charge circulaire de rayon a et de pression q_0 , la contrainte σ_z à l'aplomb du cercle est maximum dont l'allure du diagramme à différentes profondeurs est représentée sur les figures IV.4 [31]. A la profondeur z , elle prend la valeur de σ_z :

La contrainte σ_z est donnée par :

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi} Z^3 (x^2 + z^2)^{-5/2} \quad (\text{IV.7})$$

$$\cos\theta = \frac{z}{(x^2+z^2)^{1/2}} \quad (\text{IV.8})$$

$$\sigma_z = \frac{3Q}{2\pi z^2} \cos^5\theta \quad (\text{IV.9})$$

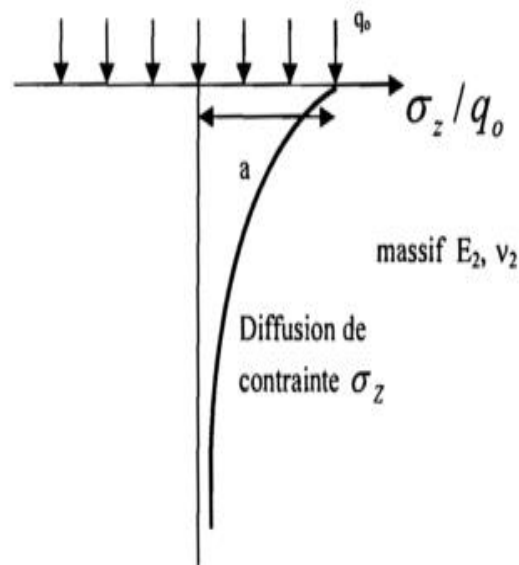


Figure IV.4. Diffusion des pressions dans un massif de Boussinesq [31]

L'étude du problème des chaussées munies des revêtements ne peut pas se faire seulement à l'aide du simple modèle de Boussinesq, du fait que ces revêtements, sous le passage des charges roulantes, contribuent à épanouir les pressions. Cet apport structural n'est pas négligeable. L'utilisation d'un modèle bicouche est nécessaire [44].

Il s'agit donc de déterminer la contrainte admissible σ_{ad} du sol ainsi que la profondeur z (épaisseur h du corps de chaussée) pour laquelle, la contrainte verticale σ_z sur le sol de plateforme reste inférieure à la contrainte admissible du sol σ_{ad} ($\sigma_z < \sigma_{ad}$). On confirme ça avec le programme ALLIZE. Le modèle mentionné dans la figure IV.5 sera adopté pour toutes les étapes des calculs suivantes.

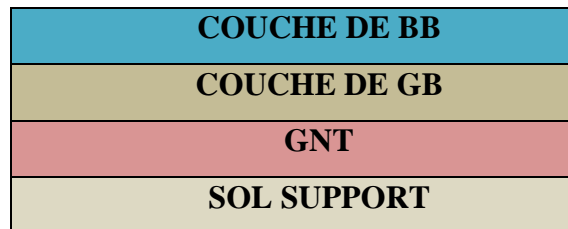


Figure IV.5. Structure type d'un corps de chaussée adopté au calcul avec ELMOD6

IV.2.3.1. Modules d'élasticité

On commence par présenter les modules de rigidité de chaque couche de notre réseau endommagé qui sont représentés dans les tableaux IV.12,13,14 et les figures IV.6,7, 8.

➤ 1^{ère} section : PK « 95+000-100+600 »

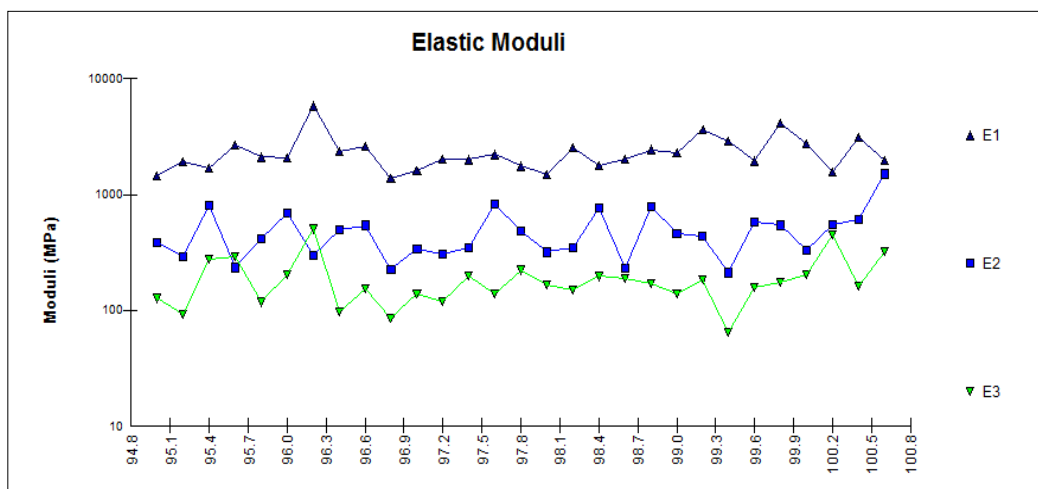


Figure IV.6. Modules d'élasticité de la 1^{ère} section

Tableau IV.12. Résultats des modules d'élasticité de la 1^{ère} section

Modules des couches	Nbre de points mesurés	Moyenne (Mpa)	Ecart type
E1 *	29	2222	1,381
E2 *	29	443	1,596
E3 *	29	170	1,579

➤ 2^{ème} section : PK« 100+600-107+200 »

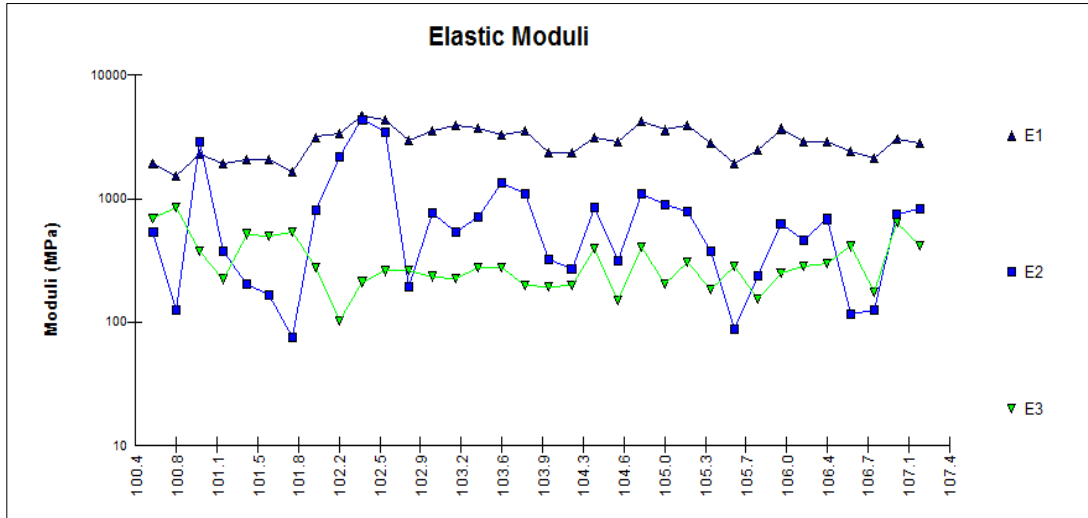


Figure IV.7. Modules d'élasticité de la 2^{ème} section

Tableau IV.13. Résultats des modules d'élasticité de la 2^{ème} section

Modules des couches	Nbre de points mesurés	Moyenne (Mpa)	Ecart type
E1 *	34	2813	1,335
E2 *	34	508	2,798
E3 *	34	288	1,606

➤ 3^{ème} section : PK« 107+200-111+000 »

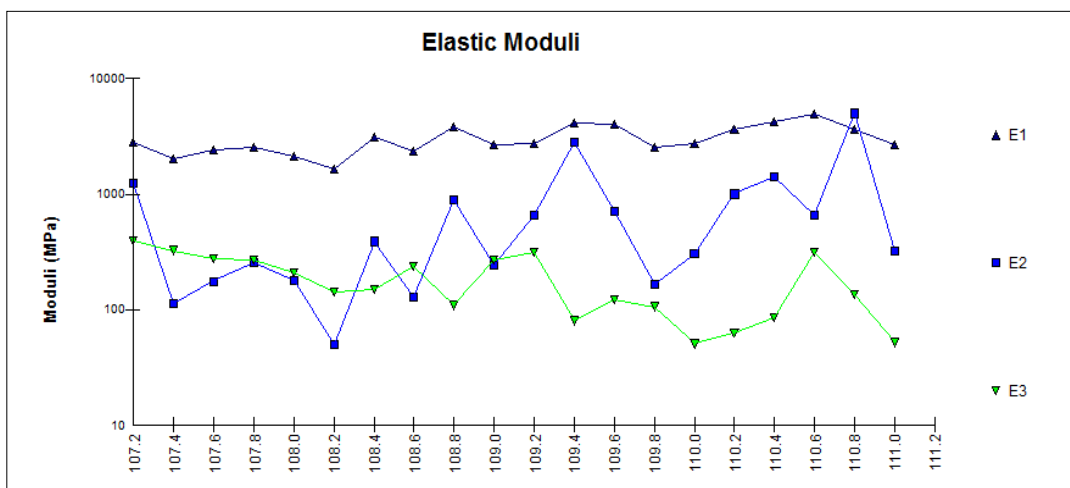


Figure IV.8. Modules d'élasticité de la 3^{ème} section

Tableau IV.14. Résultats des modules d'élasticité de la 3^{ème} section

Modules des couches	Nbre de points mesurés	Moyenne (Mpa)	Ecart type
E1 *	20	2931	1,327
E2 *	20	436	3,159
E3 *	20	154	1,913

Interprétation

Dans les trois sections de la chaussée objet d'étude on obtient une valeur maximale de module d'élasticité dans la couche de roulement en BB, mais il diminue dans la couche de GB et il prend sa valeur minimale dans la couche de sol support qui se compose de GNT,

Nous expliquons que le module d'élasticité retenu pour les matériaux bitumineux dépend de leurs compositions et leurs densités cela est dû à la température. Le guide SETRA et les travaux réalisés par BASEM ALI [34] et LAVOC nous confirmons que le module d'élasticité a une relation inverse avec la température.

IV.2.3.2. Modules de surface :

Le module de surface (surface modules E0) est le module d'une seule couche équivalente qui va donner une déflexion en surface égale à celle enregistrée sur un système multicouche réel. Ce module permet de constater la présence de couches souples ou rigides, il est utilisé aussi pour donner une première estimation des modules d'élasticité de la chaussée. Le module de surface E0 est un outil simple et pratique pour la détection de présence de couche faible, mais le module de ces couches ne peut être déterminé directement à partir d'E0 seulement. C'est pour cela qu'E0 est lié à l'épaisseur équivalente de la couche et non à l'épaisseur actuelle. Cette dernière doit être connue pour pouvoir calculer les modules d'élasticité de chaque couche. Les modules E0 pour chaque profil sont donnés sur les graphes IV.9, 10, 11 et les tableaux IV.15, 16, 17.

Les modules de surface, qui sont considérés comme des données préliminaires permettent d'avoir une idée générale sur la consistance de la chaussée étudiée, par la suite mettre en évidence la présence ou pas de corps très rigides dans le sol tels que blocs rocheux ou couches de béton.

➤ *Exploitation des résultats*

- 1^{ère} section : PK « 95+000-100+600 »

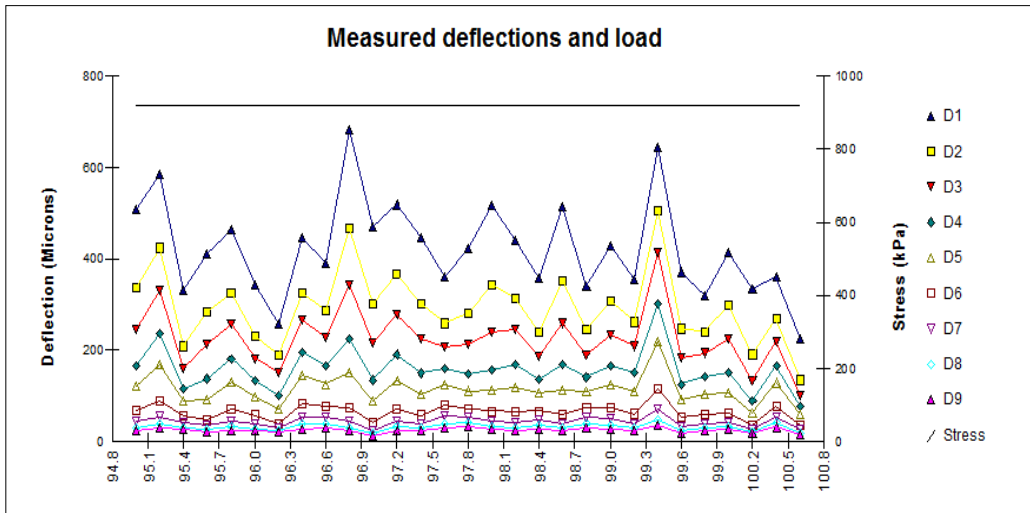


Figure IV.9. Modules de surface « déflexion » de la 1^{ère} section

Tableau IV.15. Résultats des modules de surface « déflexion » de la 1^{ère} section

Position géophone	Nbre de points mesurés	E ₀ (Mpa)	Moyenne	Ecart type
0	29		423	105
200	29		294	80
300	29		226	63
450	29		158	44
600	29		115	32
900	29		66	17
1200	29		44	10
1500	29		32	7
1800	29		25	5

- 2^{ème} section : PK « 100+600-107+200 »

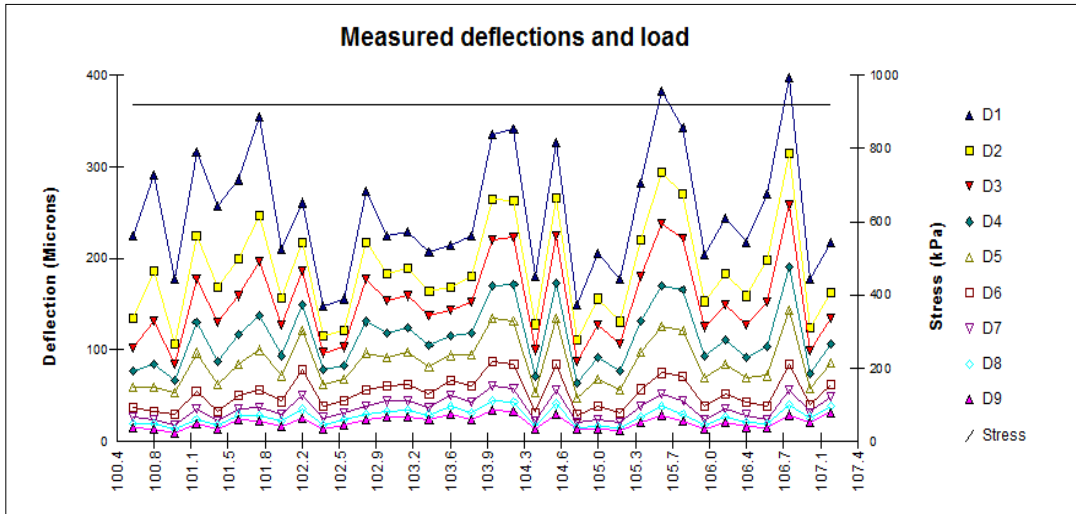


Figure IV.10. Modules de surface « déflexion » de la 2^{ème} section

Tableau IV.16. Résultats des modules de surface « déflexion » de la 2^{ème} section

Position géophone	Nbre de points mesurés	E ₀ Moyenne (Mpa)	Écart type
0	34	250	68
200	34	188	56
300	34	153	47
450	34	114	35
600	34	87	27
900	34	53	18
1200	34	37	12
1500	34	27	9
1800	34	21	7

- 3^{ème} section : PK «107+200-111+000 »

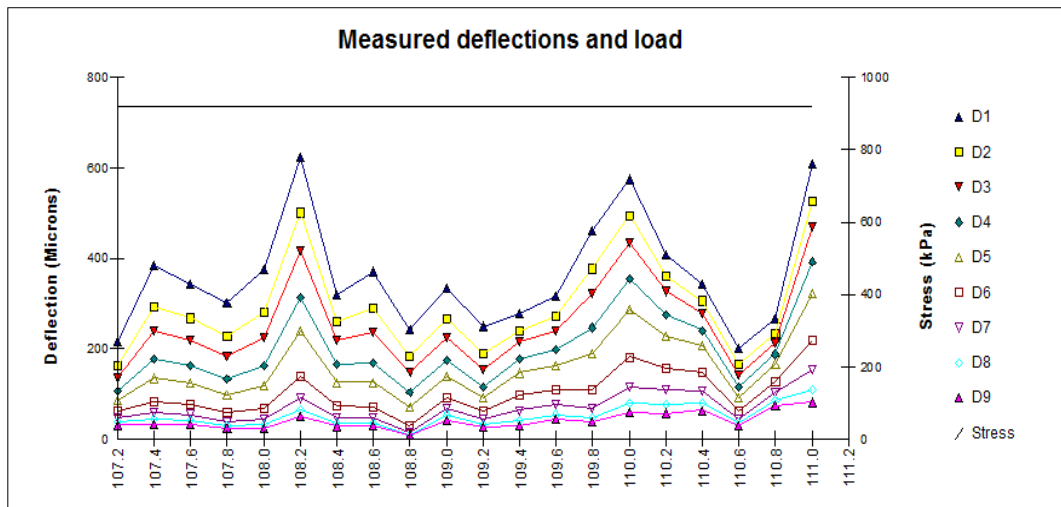


Figure IV.11. Modules de surface « déflexion » de la 3^{ème} section

Tableau IV.17. Résultats des modules de surface « déflexion » de la 3^{ème} section

Position géophone	Nbre de points mesurés	E ₀ Moyenne (Mpa)	Ecart type
0	20	361	123
200	20	295	107
300	20	252	97
450	20	199	82
600	20	158	69
900	20	102	48
1200	20	70	33
1500	20	52	24
1800	20	41	19

➤ *Interprétation des résultats*

Les modules de surface, qui sont considérés comme des données préliminaires permettent d’avoir une idée générale sur la consistance de chaussée étudiée, par la suite mettre en évidence la présence ou non de corps très rigides dans le sol.

Les valeurs moyennes de module de surface des trois sections au niveau du capteur central sont respectivement : 423 Mpa, 250 Mpa et 361 Mpa, c’est une moyenne relativement faible.

- La valeur maximale du module à la surface est égale à 682 Mpa, obtenue au niveau de la station (PK 96+800), tandis que la valeur faible est égale à 224 Mpa obtenue auprès de la station (PK 100+600).
- La valeur maximale du module à la surface est égale à 397 Mpa, obtenue au niveau de la station (PK 106+800), tandis que la valeur faible est égale à 148 Mpa obtenue auprès de la station (PK 102+400).
- La valeur maximale du module à la surface est égale à 624 Mpa, obtenue au niveau de la station (PK 108+200), tandis que la valeur faible est égale à 202 Mpa obtenue auprès de la station (PK 110+600).

Ce vaste intervalle témoigne de l'état d'irrégularité de la chaussée étudiée du point de vue d'homogénéité des déflexions.

IV.2.3.3. Durée de vie et Renforcement (Design Life and Overlay) :

Dans cette étape, on utilise ELMOD6 pour l'évaluation de la durée de vie de notre réseau objet d'étude. Les résultats sont illustrés dans les tableaux IV.18, 19, 20 et les figures IV.12, 13, 14 ;

Exploitation des résultats

- 1^{ère} section : PK « 95+000-100+600 »

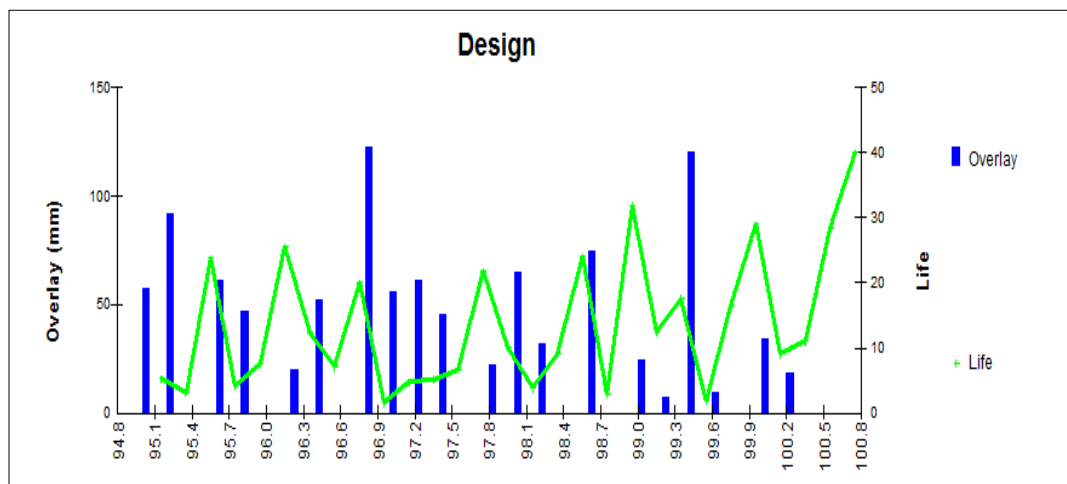


Figure IV.12. Diagramme de la durée de vie et renforcement de la 1^{ère} section

Tableau IV.18. Résultats de la durée de vie et l'épaisseur de renforcement de la 1^{ère} section

PARAMETRE	Nbre de points mesurés	Moyenne	Ecart type
Durée de vie résiduelle (ans)	29	9,8	2,43
Epaisseur de Renforcement (mm) en BBME pour une durée de vie 10ans	29	35,2	36,22

- 2^{ème} section : PK « 100+600-107+200 »

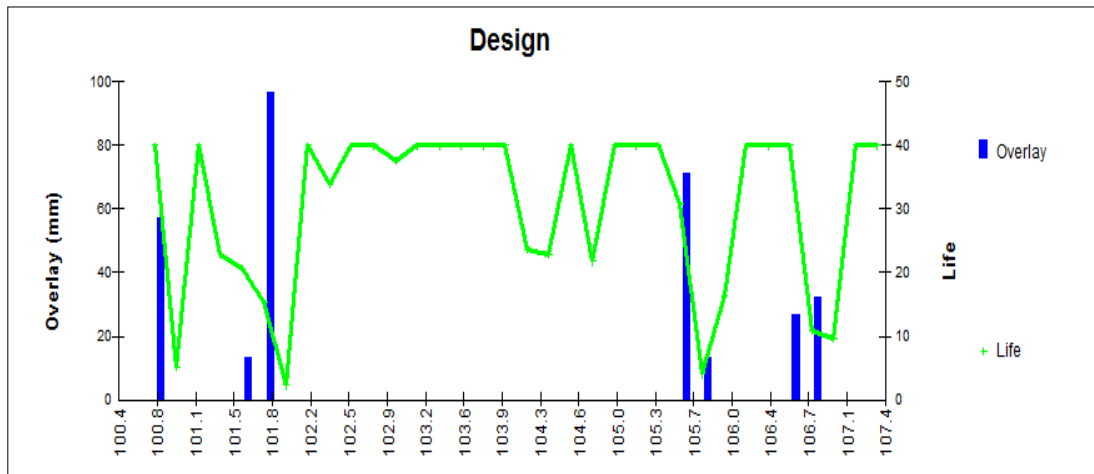


Figure IV.13. Diagramme de la durée de vie et renforcement de la 2^{ème} section

Tableau IV.19. Résultats de la durée de vie et l'épaisseur de renforcement de la 2^{ème} section

PARAMETRE	Nbre de points mesurés	Moyenne	Ecart type
Durée de vie résiduelle (an)	29	9,8	2,43
Epaisseur de Renforcement (mm) en BBME pour une durée de vie 10ans	29	35,2	36,22

➤ 3^{ème} section : PK«107+200-111+000»

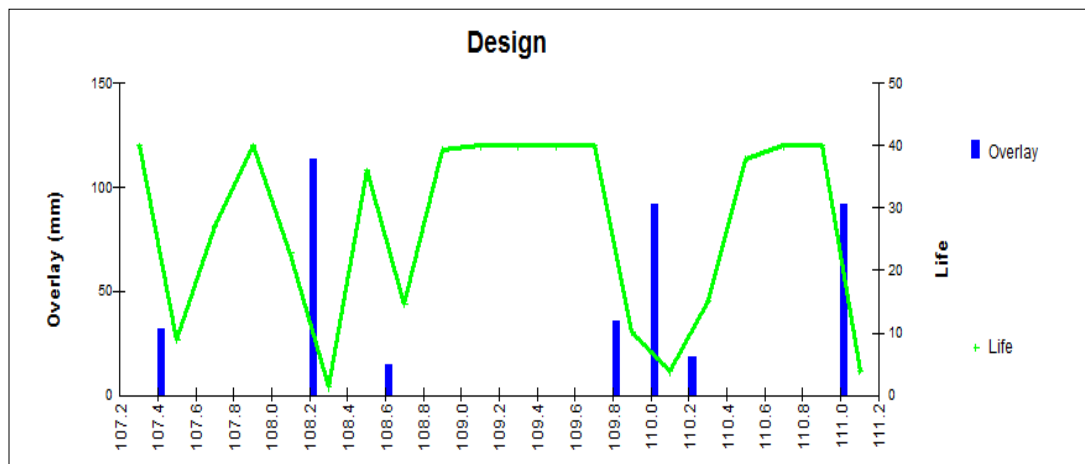


Figure IV.14. Diagramme de la durée de vie et renforcement de la 3^{ème} section

Tableau IV.20. Résultats de la durée de vie et l'épaisseur de renforcement de la 3^{ème} section

PARAMETRE	Nbre de points mesurés	Moyenne	Ecart type
Durée de vie résiduelle (an)	20	19,8	2,74
Épaisseur de Renforcement (mm) en BBME pour une durée de vie 10ans	20	19,9	36,04

➤ *Interprétation des résultats*

D'après les résultats constatés aux diagrammes des trois sections de chaussées, la durée de vie résiduelle donnée est conique et tendue par fois, pour cela on peut considérer que la route pose un problème structurel. De ce fait, la mise en place d'un nouveau corps de chaussée est nécessaire.

On peut dire que le renforcement moyen proposé par ELMOD6 dans les trois sections est égale à **60 mm en Béton Bitumineux modifié à module élevé (BBME)**.

Voilà la structure proposée par ELMOD6 présentée dans la figure IV.15 :

Couche de roulement	6 BBME
Couche de base	11 GB
Couche de fondation	20 GNT

Figure IV.15. Structure proposée par ELMOD6

IV.2.4. Méthode de vérification de renforcement de la chaussée basée sur le Programme ALIZE III

Le logiciel ALIZE-LCPC est le programme de référence, il permet de calculer le dimensionnement des renforcements de chaussée en Algérie. Il est fondé sur le calcul des sollicitations internes causées par le trafic dans les structures de chaussées en se basant sur la solution statique multicouche élastique linéaire isotrope de **Burmister** (1945). Ce logiciel offre de plus une aide complète au dimensionnement, conformément à la méthode rationnelle LCPC-SETRA. Sa mise au point a permis l'élaboration du guide de dimensionnement des chaussées (SETRA-LCPC 1994) et du catalogue de dimensionnement des chaussées (SETRA-LCPC).

Ce logiciel inclut des menus d'aide, modules et sous programmes divers permettant de résoudre aisément et rapidement les expertises et calculs de dimensionnement normalement rencontrés en bureau d'étude. Il automatise la gestion des variantes ainsi que l'exploitation des résultats sous forme graphique. Il intègre aussi le module Gel1d-Routes pour la vérification au gel-dégel des chaussées selon la démarche complète LCPC-SETRA. Il s'applique également à des actions de recherche et d'enseignement.

IV.2.4.1. Principe du programme ALIZEIII :

ALIZE III est un programme mis au point au laboratoire central des ponts et chaussées. Il permet de déterminer à partir d'un modèle multicouche élastique et linéaire fondé sur l'hypothèse de Burmister, les contraintes et les déformations aux différentes interfaces de la structure ayant jusqu'à six (06) couches supposées infinies en plan (comme la figure IV.16 montre).

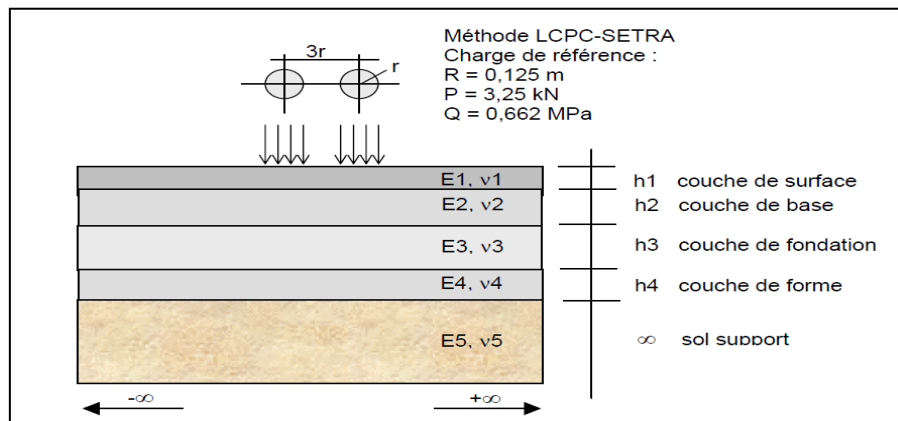


Figure IV.16. Modèle type d'une chaussée traité par ALIZEIII

➤ *Exemple d'application*

Le jumelage de 65 KN (35KN par roue, pression de contact 6,62Mpa) constitue sauf cas particulier, la charge de référence pour le dimensionnement des structures de chaussée des réseaux routiers et autoroutiers algériens. Dans certaines applications de dimensionnement de chaussée souple.

IV.2.4.2. Principe de calcul

Il consiste à modéliser une structure, de manière à calculer les contraintes, ainsi que les déformations provoquées par une charge type.

Les « input » du programme ALIZE III, pour chaque couche sont indiqués dans la figure IV.17:

- L'épaisseur ;
- Le module de rigidité (E) ;
- Le coefficient de poisson (v).

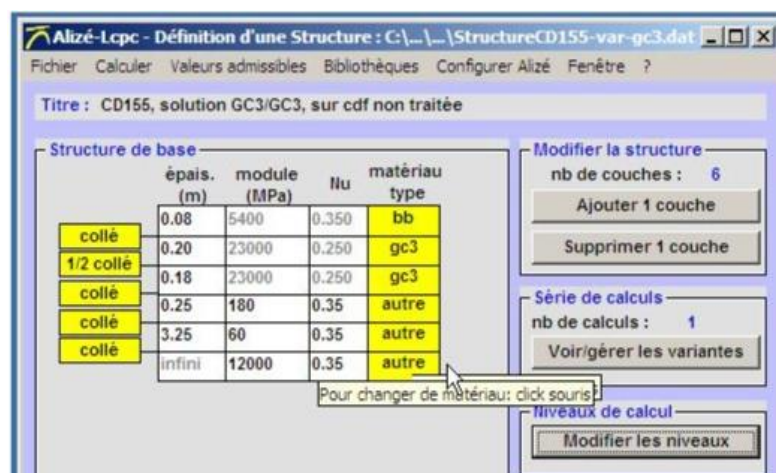


Figure IV.17. Problème traité par ALIZE III

➤ *Principe de modèle de Burmister*

Le modèle précédent de Boussinesq ne reproduit pas la nature multicouche de la chaussée et ne modélise pas correctement le comportement mécanique des couches de chaussées. Partant de ces remarques, Burmister a traité le problème général à n couches infinies dans le plan et reposant sur le sol infini de Boussinesq (Figure IV.18). Pour déterminer ses contraintes, Burmister a utilisé la théorie d'élasticité et l'hypothèse de la symétrie de révolution du chargement [44].

Par rapport au modèle de Boussinesq, le modèle multicouche de Burmister présente plusieurs avantages, puisque :

- Toutes les couches sont traitées comme des solides élastiques
- Les interfaces entre les couches peuvent être collées ou décollées, et une même structure peut comporter des couches collées et des couches décollées,
- Le cas de charges multiples : jumelages, essieux tandem ou tridem peut être traité en additionnant les effets des charges élémentaires.

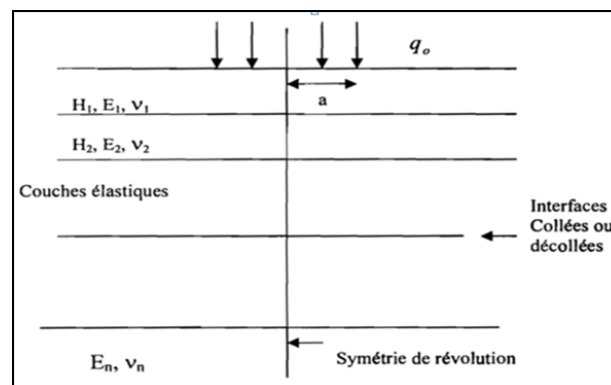


Figure IV.18. Schéma du modèle multicouche de Burmister (BURMISTER, 1943)

IV.2.4.3. Vérification en fatigue des structures et de la déformation du sol support

Il faudra vérifier que ε_t et ε_z calculées à l'aide d'Alize III, sont inférieures aux valeurs admissibles calculées $\varepsilon_{t,adm}$ et $\varepsilon_{z,adm}$.

ε_t : étant la déformation de traction par flexion à la base des matériaux traités au bitume.

ε_z : (sol) étant la déformation verticale sur le sol support.

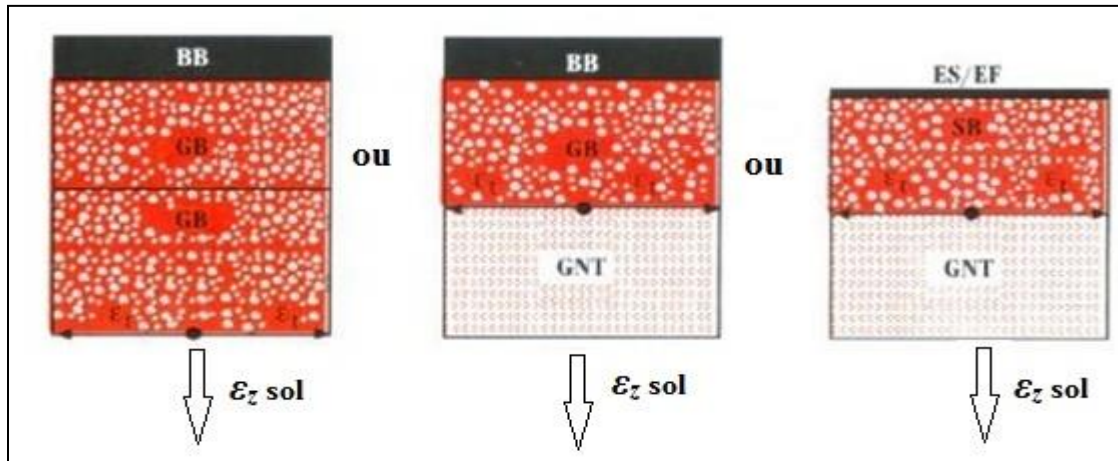


Figure IV.19. Mode de fonctionnement de la structure

IV.2.4.3.1. Modélisation de la structure à renforcer

- Le module de rigidité de l'ancien enrobé est pris égal à 2000 Mpa
- Le module de rigidité de corps granulaire est pris égal à 4 fois le module du sol support.
- Toutes les couches sont considérées comme collée entre elles. Le coefficient de poisson (ν) de tous matériaux est pris égal à 0,35 sauf les matériaux de la couche de fondation est pris égal à 0,25 comme illustré dans la figure IV.20.

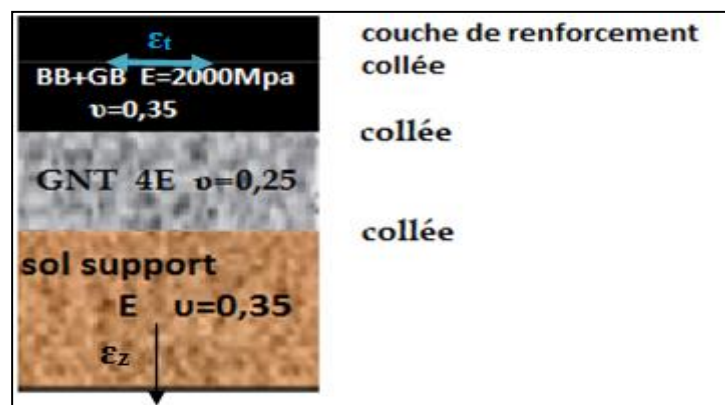


Figure IV.20. Structure type de chaussée à renforcer par ALLIZEIII

IV.2.4.3.2. Calcul la déformation admissible (ϵ_z, adm) de sol support

La valeur admissible est donnée par la relation empirique déduit à partir d'une étude statique de comportement des chaussées algériennes.

$$\epsilon_{z,adm} = 22 \times 10^{-3} \times (TCEi)^{-0.235} \tag{IV.10}$$

$$= 22 \times 10^{-3} \times (8.37 \times 106)^{-0.235}$$

$$\varepsilon_{z, adm} = 5.19 \times 10^{-4} \text{ def}$$

IV.2.4.3.3. Calcul de la déformation admissible de traction ε_t, adm

La valeur admissible de tractions est donnée par la relation suivante :

$$\varepsilon_{t, adm} = \varepsilon_6 (10^\circ\text{C}, 25 \text{ Hz}) \times k_{ne} \times k_{\theta} \times k_r \times k_c \quad (\text{IV.11})$$

Avec

$\varepsilon_6 (10^\circ\text{C}, 25\text{Hz})$: déformation limite détenue au bout de 10^6 cycles avec une probabilité de rupture de 50% à 10°C et 25Hz.

K_{θ} : facteur lié à la température.

K_{ne} : facteur lié au nombre cumulé d'essieux équivalents supporté par la chaussée.

K_r : facteur lié au risque et aux dispersions.

K_c : facteur lié au calage des résultats du modèle de calcul avec le comportement absorbé sur la chaussée.

Sachant que :

$$k_{ne} = (TCEi / 10^6)^b \quad (\text{IV.12})$$

$$k_r = 10^{-tb\delta} \quad (\text{IV.13})$$

$$k_{\theta} = \sqrt{E(10^\circ\text{C})/E(\theta_{eq})} \quad (\text{IV.14})$$

b : pente de la droite de fatigue ($b < 0$).

$E(10^\circ\text{C})$: module complexe du matériau bitumineux à 10°C .

$E(\theta_{eq})$: module complexe du matériau bitumineux à la température équivalente qui est fonction de la zone climatique considérée.

$$\delta : \text{la dispersion} / \delta = \sqrt{SN^2 + \left(\frac{c}{b} Sh\right)^2} \quad (\text{IV.15})$$

SN : dispersion sur la loi de fatigue.

Sh : dispersion sur les épaisseurs.

C : coefficient égal à 0.02.

t : fractile de la loi normale qui est en fonction du risque adopté (r%).

Donc on obtient :

$$\varepsilon_{t, adm} = \varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25 \text{ Hz}) \times (TCEi / 10^6)^b \times \sqrt{E(10^\circ\text{C})/E(\theta_{eq})} \times 10^{-tb\delta} \times kc \quad (\text{IV.16})$$

IV.2.4.3.4. Performances mécaniques des matériaux bitumineux

Les performances mécaniques relatives aux différents types des matériaux sont données dans le tableau IV.21 :

Tableau IV.21. Les performances mécaniques relatives aux différents types de matériaux

Matériaux	E (30°, 10hz) (MPa)	E (25°, 10hz) (MPa)	E (20°, 10hz) (MPa)	E (10°, 10hz) (MPa)	$\varepsilon_6(10^\circ\text{C}, 25\text{hz}) 10^{-6}$
BB	2500	3500	4000	--	--
GB	3500	5500	7000	12500	100
Matériaux	-1/b	SN	S _H (cm)	v	Kc calage
BB	--	--	--	0.35	--
GB	6.84	0.45	3	0.35	1.3

Alors d'après le Catalogue de Dimensionnement des Chaussées Neuves les tableaux ci-dessous résume les paramètres suivants :

θ_{eq} = température équivalent ($\theta_{eq} = 20^\circ\text{C}$) => E (20°, 10HZ)=7000 MPa.

Classe de trafic (TPL5).

Risque adopté pour le réseau RP1 et la classe du trafic TPL5 (r%=10).

C : coefficient égal 0.02

t : fractile de loi normale, en fonction du risque adopté donc(t = - 1.282).

$$\delta = \sqrt{(0.45)^2 + \left(\frac{0.02}{-0.146} \times 3\right)^2} \Rightarrow \delta = 0.609$$

corps de chaussée, dans son rôle d'épandre la quasi-totalité de la contrainte verticale (σ_z) de telle sorte que le sol support ne soit pas soumis à une contrainte supérieure à sa limite admissible au-delà de laquelle celui-ci peut rompre à tout moment.

Mais comme la structure donnée par le catalogue est surdimensionnée et pour des raisons d'économie, on a essayé de chercher une structure de même type avec une réduction d'épaisseur.

IV.2.5. Comparaison des méthodes de dimensionnement

Tableau IV.23. Étude comparative entre les méthodes de dimensionnement

CBR	Guide de renforcement	ELMOD6	ALIZE III(LCPC)
<ul style="list-style-type: none"> - Méthode empirique Basée sur la formule CBR - Les matériaux sont Caractériser par des coefficients d'équivalents empiriques 	<ul style="list-style-type: none"> -méthode basée sur grilles des décisions qui conduise au choix du type de renforcement :(léger, moyen, lourd, très lourd) - détermination du type de renforcement reste une affaire de jugement de l'ingénieur, d'expérience et de connaissance des matériaux et du comportement de la chaussée 	<ul style="list-style-type: none"> - méthode rationnelle base le modèle de Boussinesq -les matériaux sont caractérisés par leur comportement mécanique (module de rigidité E, loi de fatigue, déformation permanent) -la portance résiduelle de la chaussée est estimée à partir de la mesure de déflexion au HWD - le dimensionnement est arrêté de manière à ce que la déformation verticale σ_z sur le sol de plate-forme reste inférieure à la contrainte admissible du sol σ_{ad} ($\sigma_z < \sigma_{ad}$) 	<ul style="list-style-type: none"> - méthode rationnelle basée sur le modèle de Burmister -les matériaux sont caractérisés par leur comportement mécanique (module de rigidité E, loi de fatigue, déformation permanent) - la portance résiduelle de la chaussée est estimée à partir de la mesure de déflexion au deflectographe lacroix -dimensionnement est arrêté de telle sorte que : <ul style="list-style-type: none"> ⊕ La déformation transversale (ϵ_t) à la base de la couche de renforcement est inférieure à la déformation admissible ($\epsilon_{t,adm}$) ⊕ La déformation verticale (ϵ_z) Au niveau de sol support est inférieure à la déformation admissible ($\epsilon_{z,adm}$)

IV.3. Conclusions

Pour un dimensionnement rationnel des chaussées souples, il est nécessaire de prendre en compte les facteurs qui influent significativement sur le comportement d'une chaussée en

service. Hormis le trafic, il est indispensable de prendre en considération les conditions climatiques et la variation de l'état hydrique dans les couches de grave non traitée et le sol support. Une bonne connaissance des propriétés rhéologiques des matériaux de corps de chaussée et le sol support est incontournable.

D'après les résultats des méthodes qui ont été mentionnées précédemment, on remarque bien malgré que la méthode CBR donne le corps de chaussée le plus économique mais la méthode du catalogue nous donne le corps de chaussée adéquat et tout en sachant que cette méthode est la plus utilisée en Algérie dans les routes nationales et les autoroutes, donc on choisit les résultats de la méthode du catalogue, pour les raisons suivantes :

- Elle se base sur les performances des matériaux.
- Elle se base sur les déformations admissibles.
- Elle tient en compte la fatigue des matériaux.
- En plus de ça cette méthode est une méthode algérienne établie et conçu par le CTTTP et valide par le ministère des travaux publics.

Cependant, ce choix reste une proposition de notre part seulement. Le choix final du corps de chaussée à retenir est en fonction des carrières existantes, leur éloignement, le coût du transport et d'exécution.

Conclusions générales et recommandations

Le travail de thèse s'inscrit dans un contexte général de gestion de patrimoine routier et de préservation des chaussées. L'évaluation des chaussées repose sur une série de mesures et d'observations visuelles qui permettent d'établir la condition de la structure, de diagnostiquer les causes des dégradations apparentes et de cibler les solutions de réhabilitation les plus appropriées.

Après répondre à ces attentes, les principaux résultats obtenus dans cette étude peuvent se résumer par l'enchaînement suivant :

- ✓ D'après le sondage effectué, la nature des matériaux prélevés est en générale constitue descendant de haut en bas d'une couche de BB suite d'une couche de GB, couche de ES, TVO, et limon + sable fin dans le sol support.
- ✓ Sur la base des résultats de comptage de trafic réalisé par le CTTP, le tronçon de la RN18 d'ELMEDEA concerné par l'étude se caractérise par :
 - TJMA = 7000 véh/jour,
 - Poids lourd = 25%
- ✓ Le relevé opéré a permis de déceler une chaussée dégradée sur certaines sections pour devenir en général moyenne à bonne sur le reste de l'itinéraire
- ✓ Le constat a fait ressortir une prédominance de fissurations de type faïençage à maille fine, des déformations de type affaissement généralement de faible amplitude, des fissures longitudinales et transversales localisés. Ainsi qu'orniérage a faible rayon.
- ✓ Selon l'auscultation par mesure des déflexions et l'appréciation de différentes sections homogènes, on distingue :
 - La déflexion maximale est obtenue sous la plaque circulaire (le point d'application de la charge) et les points éloignés du point d'application de la charge circulaire sont plus petits, ce qui se traduit dans le champ par une déformation plus importante sous les roues des véhicules, entraînant l'apparition des dégradations structurelles au bord de la route en relation.
- ✓ À la lecture des résultats, on remarque que l'uni est globalement bon sur la totalité de l'itinéraire concerné par l'étude
- ✓ Le rétro-calcul effectué par le programme ELMOD de la déflexion mesurée in situ par FWD montre que la valeur de la déflexion théorique est proche de la déflexion mesurée.

Conclusions générales et recommandations

La moyenne d'erreur entre les deux résultats ne dépasse pas 9% pour la déflexion minimale, et pour la déflexion maximale et déflexion caractéristique sont respectivement de 4.23% et 3.57%.

- ✓ Pour le dimensionnement de renforcement de la chaussée objet d'étude, on applique une série d'application numérique par deux méthodes qui se basent sur deux programmes, le premier est ELMOD6 et le deuxième est ALIZEIII, afin de présenter les méthodes de dimensionnement utilisées en Algérie.
- ✓ La vérification par ELMOD et ALLIZEIII est confirmée, mais comme la structure donnée est surdimensionnée et pour des raisons d'économie, on a essayé de chercher une structure de même type avec une réduction d'épaisseur.
- ✓ Tenant compte des différentes investigations effectuées et les résultats obtenus, une remise en état est indispensable pour :
 - Arrêter la remontée des fissures,
 - Résister à l'agressivité des essieux
 - Reprendre les sollicitations des poids lourds
 - Assurer un confort à l'utilisateur.

À cet effet, nous avons proposés une structure en béton bitumineux et grave bitumes suivi d'un traitement en profondeur pour remédier aux insuffisances constatées. Ce choix reste une proposition de notre part seulement. Le choix final du corps de chaussée à retenir en fonction des carrières existantes, leur éloignement, le coût de transport et d'exécution.

Recommandations et perspectives

L'hors des travaux effectués au sein de CTTP, Il y a des solutions que nous n'avons pas abordées pour renforcer la chaussée endommagée, tel que :

- Le renforcement par l'utilisation de géosynthétique, qui permet l'augmentation de manière significative du facteur de sécurité, l'amélioration de la performance, et la réduction des coûts en comparaison avec une conception conventionnelle et une construction alternative.
- Le traitement des matériaux par l'ajout de ciment ou la chaux pour augmenter leur portance résiduelle, dans ce cas nous obtenons un corps de chaussée semi rigide au lieu de structure souple.

Conclusions générales et recommandations

D'autre part, et à la suite des résultats obtenus, une attention particulière sera donnée :

- Application de l'essai d'**Ovalisation** qui permet l'évaluation des contraintes réelle et les élongations dans les couches de chaussée l'ors de l'application de la charge.
- Incorporer les fibres de palmier à des enrobés, conférait une grande consistance, une augmentation de la viscosité et de la norme du module de cisaillement
- Dans les prochaines études je vais faire la modélisation d'orniérage de cette route avec le logiciel ALLIZE

Annexes A

Comptage de trafic par classe des poids lourds

Classe de poids des camions	Nombre de camions	Pourcentage %
0-4	0	0,00
4-8	0	0,00
8-12	1	1,33
12-16	1	1,33
16-20	1	1,33
20-24	1	1,33
24-28	0	0,00
28-32	2	2,67
32-36	3	4,00
36-40	6	8,00
40-44	7	9,33
44-48	2	2,67
48-52	1	1,33
52-56	0	0,00
56-60	0	0,00
>60	0	0,00
Somme	25	33,33

Comptage de trafic par classe de poids ensemble des essieux

Classe de poids des essieux (tonne)		Nombre des essieux	Pourcentage	Ai	Ai*N
0	1	0	0,00	2,19E-06	0
1	2	0	0,00	1,77E-04	0
2	3	1	1,28	1,37E-03	0,001
3	4	2	2,56	5,25E-03	0,011
4	5	0	0,00	1,44E-02	0,000
5	6	4	5,13	3,20E-02	0,128
6	7	6	7,69	6,25E-02	0,375
7	8	10	12,82	1,11E-01	1,108
8	9	8	10,26	1,83E-01	1,462
9	10	5	6,41	2,85E-01	1,426
10	11	4	5,13	4,26E-01	1,702
11	12	3	3,85	6,12E-01	1,837
12	13	3	3,85	8,55E-01	2,564
13	14	3	3,85	1,16E+00	3,489
14	15	6	7,69	1,55E+00	9,286
15	16	5	6,41	2,02E+00	10,105
16	17	8	10,26	2,60E+00	20,761
17	18	4	5,13	3,28E+00	13,135
18	19	5	6,41	4,10E+00	20,506
19	20	1	1,28	5,06E+00	5,063
Somme		78	100,00	A=	92,96
				NPL=	25,00
				CAM=	3,72
				C de charge	70,00%
				CAM=	0,60
				C de charge	30,00%
				CAM	2,78

Auscultation visuelle de la RN18 d'ELMEDEA

Localisation du pk	Linéaire (m)	État de la chaussée	Dégradation observées
95+000-96+300	1300	Bon	- Chaussée en bonne état.
96+300-96+800	500	Bon a moyen localement	- Affaissements localisés, - Faiençages à mailles fines localisés.
96+800-98+000	1200	Bon	- Chaussée en bonne état.
98+000- 98+400	400	Bon a moyen localement	- Affaissements localisés, - Faiençages à mailles fines localisés.
98+400-100+000	1600	Bon	- Chaussée en bonne état.
100+000-100+200	200	Bon à moyen localement	- Affaissements localisés, - Faiençages à mailles fines localisés.
100+200-103+000	2800	Bon	-Chaussée en bonne état.
103+000-103+500	500	Bon a moyen localement	- Affaissements localisés, - Faiençages à mailles fines localisés.
103+500-105+300	1800	Bon	- Chaussée en bonne état.
105+300-105+500	200	Bon a moyen localement	- Affaissements localisés, - Faiençages à mailles fines localisés.

105+500- 107+100	1500	Bon	- Chaussée en bonne état.
107+100- 107+400	300	Bon a moyen localement	- Affaissements localisées, - Faiençages à mailles fines localisés.
107+400- 109+100	1700	Bon	- Chaussée en bonne état.
109+100- 109+200	100	Bon a moyen localement	- Affaissements localisées, - Faiençages à mailles fines localisés.
109+200- 111+000	1800	Bon	-Chaussée en bonne état.

Résultats d'Uni de la route N°18 d'ELMEDEA

SECTION (PK)	%	%	%	ESTIMATION
	(Uni <2.5)	(6 < uni <2.5)	(Uni > 6)	
	Acceptable	Moyen	Mauvais	
95+000-96+000	33	6	1	bon
96+000-97+000	32	8	0	Bon
97+000-98+000	36	4	0	Bon
98+000-99+000	39	1	0	Bon
99+000-100+000	39	1	0	Bon
100+000-101+000	35	5	0	Bon
101+000-102+000	14	25	1	Bon à moyen
102+000-103+000	19	21	0	Bon à moyen
103+000-104+000	37	3	0	Bon
104+000-105+000	34	6	0	Bon
105+000-106+000	37	3	0	Bon
106+000-107+000	38	2	0	bon
107+000-108+000	39	1	0	Bon
108+000-109+000	34	6	0	bon
109+000-110+000	32	7	1	Bon
110+000-111+000	28	11	1	Bon

Annexes B

Les différents paramètres (dégradation, déflexion, uni) d'état et le type de renforcement de la RN18 d'ELMEDEA

PK-PK	UNI	Déflexion (rive)	État de dégradation	Type de renforcement
PK95+000	BON	BON	Bon	Entretien
	BON	BON	Bon	Entretien
	BON	BON	Bon	Entretien
	Moyen	Mauvais	Moyen	Lourd
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon	leger
96+000	BON	BON	bon	entretien
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon à moyen	moyen
	BON	Moyen	bon à moyen	moyen
	BON	Moyen	bon à moyen	moyen
	BON	Moyen	bon à moyen	moyen
	BON	Moyen	bon à moyen	moyen
	BON	BON	bon	entretien
97+000	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	BON	bon	entretien
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	BON	bon	entretien
98+000	BON	Moyen	bon	leger
	BON	BON	bon à moyen	leger
	BON	BON	bon à moyen	leger
	BON	BON	bon à moyen	leger
	BON	BON	bon à moyen	leger
	BON	BON	bon	entretien

	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon	leger
99+000	BON	BON	bon	entretien
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	Moyen	bon	leger
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
100+000	BON	BON	bon	entretien
	BON	Moyen	bon à moyen	moyen
	BON	BON	bon à moyen	leger
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
	BON	BON	bon	entretien
101+000	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	BON	bon	leger
	bon à moyen	BON	bon	leger
	bon à moyen	BON	bon	leger
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	BON	bon	leger
102+000	bon à moyen	Moyen	bon	moyen

	bon à moyen	BON	bon	leger
	bon à moyen	BON	bon	leger
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	Moyen	bon	moyen
	bon à moyen	BON	bon	leger
103+000	Bon	Moyen	bon	leger
	Bon	Moyen	bon à moyen	moyen
	Bon	BON	bon à moyen	léger
	Bon	Moyen	bon à moyen	moyen
	Bon	Moyen	bon à moyen	moyen
	Bon	BON	bon à moyen	leger
	Bon	BON	bon	entretien
	Bon	BON	bon	entretien
	Bon	BON	bon	entretien
	Bon	Moyen	bon	leger
104+000	Bon	Moyen	bon	leger
	Bon	BON	bon	entretien
	Bon	Moyen	bon	leger
	Bon	Moyen	bon	leger
	Bon	Moyen	bon	leger
	Bon	Moyen	bon	leger
	bon	BON	bon	entretien
	bon	Moyen	bon	leger
	bon	BON	bon	entretien
	bon	Moyen	bon	leger
105+000	moyen	Mauvais	moyen	lourd
	bon	Moyen	bon	leger
	bon	Moyen	bon	leger
	bon	Moyen	bon	leger
	bon	Moyen	bon à moyen	moyen
	bon	Moyen	bon à moyen	moyen
	moyen	Mauvais	moyen	lourd

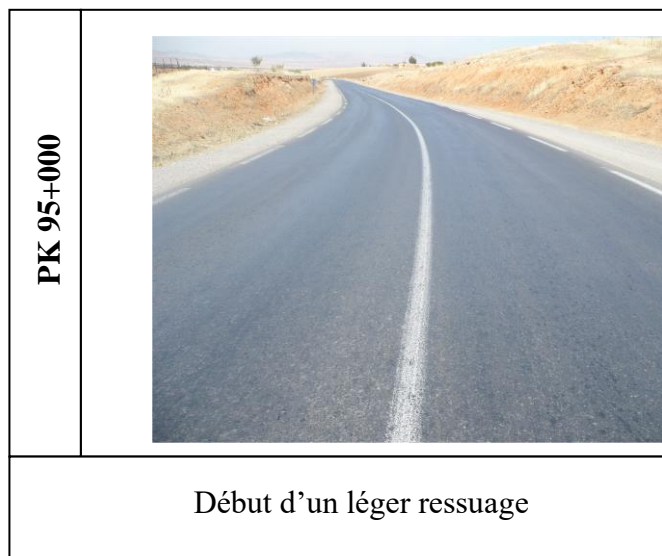
110+000	bon	BON	bon	entretien
	bon	Moyen	bon	leger
	bon	Moyen	bon	leger
	bon	BON	bon	entretien
	bon	Moyen	bon	leger
	bon	BON	bon	entretien
	bon	BON	bon	entretien
	bon	Moyen	bon	leger
	bon	BON	bon	entretien
	bon	Moyen	bon	leger
111+000	bon	BON	bon	entretien

Grille de décision pour le choix du type de renforcement

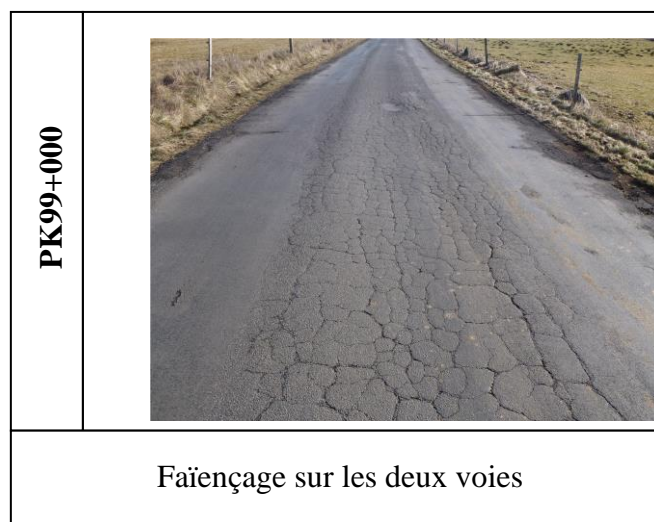
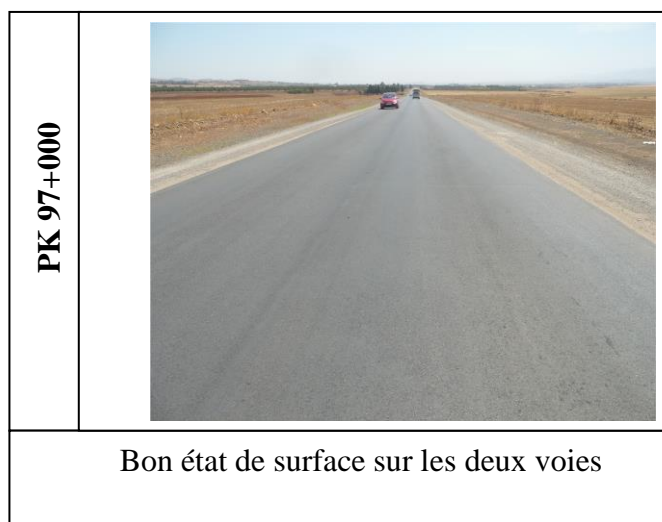
A : BON B : MOYAEN C : MAUVAIS

	Uni			Déflexion			Dégradation		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
Entretien	◇			◇			◇		
Léger	◇			◇				◇	
	◇				◇		◇		
		◇		◇			◇		
Moyenne	◇				◇			◇	
	◇			◇					◇
		◇		◇					◇
		◇			◇		◇		
		◇			◇			◇	
			◇	◇				◇	
			◇		◇		◇		
Lourd	◇				◇				◇
			◇		◇			◇	
		◇			◇				◇
			◇			◇	◇		
		◇				◇		◇	
Très lourd		◇				◇			◇
			◇			◇			◇

Annexe C



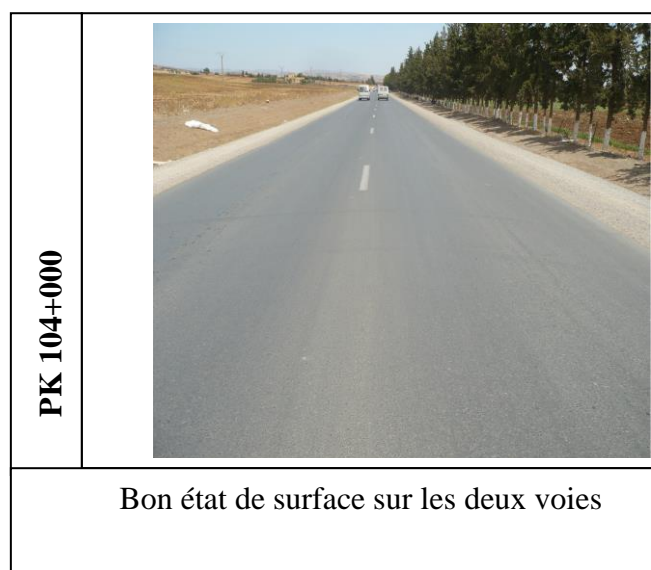
Dégradation apparus dans pk 95+000 et pk 96+000 [45]



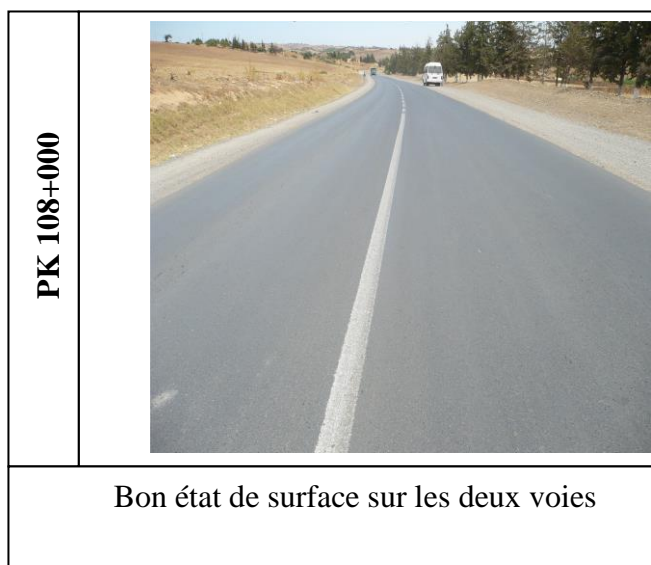
Dégradation apparus dans pk 97+000 et pk 99+000 [45]



Dégradation apparus dans pk 99+700 et pk 101+590[45]





Dégradation apparus dans pk 102+780 et pk 104+000 [45]




Dégradation apparus dans pk 107+000 et pk 108+000 [45]


Dégradation apparus dans le pk109+000 et pk 110+000 [45]

PK 109+000	
Faiencages localisée en rive gauche	

PK 110+000	
Bon état de surface sur les deux voies	

Dégradation apparus dans le pk110+450 et pk 111+000 [45]

PK 110+450 (côté droit)	
Talus de déblai en tête d'ouvrage non conforté,	

PK 111+000(côté droit)	
Fossé en terre en pied de talus en déblai peu profond nécessitant un bétonnage	

Références normatives

1. Alain Béghin, « Apport des mesures rhéologiques et de pelage a l'analyse de rupture de liant bitumineux », l'université de Paris 6, 12 juin 2003.
2. ACHIR Farida et MEDJOU DJ Maliza, « Etude Géotechnique D'un Tronçon De La Pénétrante Autoroutière Reliant Le Port De Bejaia à l'AutoRoute Est-Ouest Au Niveau d'Ahnif De PK35+000 Au PK36+800 », mémoire de Master, Faculté de technologie, département de génie civil, université de Béjaia, 2017.
3. A. El Ayadi, B. Picoux, G. Lefeuvre-Mesgouez, A. Mesgouez, C. Petit, «An improved dynamic model for the study of a flexible pavement». *Advances in Engineering Software* 44, 44–53, 2012.
4. Alejandro Quijano Murillas, « Application de méthodes et d'outils mécaniste-empiriques pour la conception et la réhabilitation des chaussées », Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie civil pour l'obtention du grade de maître en sciences (M.Se.), département de génie civil faculté de sciences et de génie civil, université laval, QUÉBEC, 2010.
5. Absamad EL ABD, « Développement d'une méthode de prédiction des déformations de surface des chaussées à assises non traitées », thèse de doctorat, école doctorale des sciences physiques et de l'ingénieur, laboratoire central des ponts et chaussées, Université de Bordeaux 1, 11 décembre 2006.
6. AASHTO guide for Design of pavement structures, « American Association of State Highway and Transportation Officials », Copyright, 1986-1993 by the American Association of States of America, ISBN 1-56051-055-2, 1993.
7. Bassem Ali, « Modèle numérique pour le comportement mécanique des chaussées : application à l'analyse de l'orniérage », thèse de doctorat à l'université de sciences et technologie de Lile, n° d'ordre : 3851, 2006.
8. CTTP (Organisme Centre Technique des Travaux Publics), direction régionale de l'est, expertise de la RN 18 du PK 95+000 au PK 111+000 wilaya d'ELMEDEA, référence : FO.EL. 50, Révision 3, 2010.
9. Chang, J., Lin, J., Chung, W., & Chen, D, «Evaluating the structural strength of flexible pavements in Taiwan Using the falling weight deflectometer». *The International Journal of Pavement Engineering*, 3(3), 131–141, 2002.
10. Chebrek Dehbia, « Étude de phénomène de l'orniérage des chaussées bitumineuses : Cas d'une route nationale dans la wilaya de Tizi Ouzou », thèse de Magister, université de

Mouloud Mammeri, faculté de génie de la construction, département génie civil, Tizi ouzou, 10/04/2012.

11. Christopher T. Senseney and Michael A. Mooney, «*Characterization of Two-Layer Soil System Using a Lightweight Deflectometer with Radial Sensors* ». Journal of the Transportation Research Board. No. 2186, D.C, pp. 21–28., 2010.
12. DI BENEDETTO H., CORTE J.-F., « *Matériaux routiers bitumineux 2 : constitution et propriétés thermomécaniques des mélanges* », Éditeur Hermès Sciences, Collection traité MIM Série Mécanique et Ingénierie des Matériaux, ISBN 10 : 2746209608, ISBN 13 : 9782746209602, Nombre de pages : 288, date de parution 12/2004.
13. Delphine Laveissière, « *modélisation de la remontée de fissure en fatigue dans les structures routières par endommagement et macro-fissuration* » thèse de doctorat, l'université de limoges faculté des sciences école doctorale STS, Laboratoire 3MSGC I.U.T. Département Génie Civil – Bd Jacques Derche – 19300 EGLETONS, 06 mars 2002.
14. FRED PORTET ET OLIVIER NOËL, enseignants à l'ente d'aix-en-provence, SYLVIE NICAISE, laboratoire du cette méditerranée, CAROLE PORTILLO ET MATHIEU VERMEULEN, école des mines de douai, « *Conditions d'utilisation des matériaux en remblai et en couche de forme* », géotechnique routière, <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/fr/>, 18 juillet 2011.
15. Jean Barillot, Hervé Cabanes et Philippe Carillo, « *la route et ses chaussées* », Manuel de travaux publics, Également aux éditions Eyrolles: Philippe Carillo, Conception d'un projet routier. Guide technique, ISBN : 978-2-212-67546-7 112 p, 2015, www.editions-eyrolles.com.
16. J.P. Mahoney, N.F. Coetzee, R.N. Stubstad, S.W. Lee, «*A performance comparison of selected backcalculation computer programs, Nondestructive Testing of Pavements and Backcalculation of Moduli*», American Society for Testing and Materials (ASTM), STP 1026, 470–486, 1989.
17. [Http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/8Compactage_cours-«_routes_procedes_generaux_de_construction.pdf](http://www.cours-genie-civil.com/wp-content/uploads/8Compactage_cours-«_routes_procedes_generaux_de_construction.pdf), *Principaux objectifs de compactage des couches de chaussée* », date de visite du site : 23/09/2019.
18. HABIBALLAH Taha El Mokhtar, « *modélisation des déformations permanentes des graves non traitées -application au calcul de l'orniérage des chaussées souples* », docteur de l'université de LIMOGES, Faculté des Sciences École Doctorale Science, Technologie et Santé Département du Génie Civil, N° 752003.
19. Hudsadin Sirithemontree, Yasothorn Sapsathiarn. «*Dynamic soil models for backcalculation of material properties from falling weight deflectometer deflection data*». Procedia Engineering 189, 152 – 157, 2017.

20. Hossam F. Hassan, Ragab M. Mousa, M. ASCE and Ahmed Atef Gadallah, «*Comparative Analysis of Using AASHTO and WESDEF Approaches in Back-calculation of Pavement Layer Moduli*». J. Transp. Eng.129:322-329 2003.
21. Harichandran, R. S., Mahmood, T., Raab, A. R., & Baladi, G. Y. «*Modified Newton Algorithm for Backcalculation of Pavement Layer Properties*». TRR, 1384, 15–22, 1993.
22. Hudsadin Sirithemmontree, Yasothorn Sapsathiarn, «*Dynamic soil models for backcalculation of material properties from falling weight deflectometer deflection data*». procedia Engineering 189, 152 – 157, 2017.
23. Isis BRABET, «*Le traitement des sols pour la couche de forme, plateforme de chaussée, Application à des projets de terrassement dans le département de l'Hérault* », Mémoire d'ingénieur CNAM, conservatoire national des arts et métiers, paris, 21 JUIN 2012.
24. HAOUACHE CHELALLI et CHETTOUH ABDELKADER, «*Étude de modernisation et de renforcement de la RN46 sur 15 km (PK 00+000 au PK 15+000)* », Mémoire de Master Académique, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département des Sciences et de la Technologie, UNIVERSITÉ ZIANE ACHOUR – DJELFA, 2016.
25. <https://www.wikip.fr/structure-de-chausseacutees> Date : 27 juillet 2019
26. LARSEN H.J.E., ULLIDTZ P, «*Pavement subgrade performance study in the Danish road-testing machine*», 8th International Conference on Asphalt Pavement, Seattle, Washington, Proceedings vol. I, 10-14, pp. 843-857, 1997.
27. LCPC et SETRA, «*Réalisation des remblais et des couches de forme* », Ministère de l'Équipement du Logement et des Transports guide technique, Fascicule I Principes généraux, 2 -ème Edition, Juillet 2000.
28. Malick Diakhate, «*fatigue et comportement des couches d'accrochage dans les structures de chaussée* », université de limoges école doctorale science – technologie sante faculté des sciences et techniques, Laboratoire Mécanique et Modélisation des Matériaux et Structures du Génie Civil (3MsGC), Thèse N° 2007-061, 29 octobre 2007.
29. Ministère de l'équipement, des transports et du logement, Technique et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), Catalogue des dégradations de surface des chaussées, ISSN 1167-489X, %ars 1998.
30. M. Oumar DIOUF (Mbarassane) et M. Khadim GUEYE, «*étude de comportement et de dégradation des chaussées en béton bitumineux : cas des dentelles de rive* », université cheikh anta diop de dakar école supérieure polytechnique, 2005.
31. Manuel d'identification des dégradations des chaussées souples, ISBN 2-551-21654-0, Québec Canada.

32. Mehmet S., Serdal T., Ecir Ug̃ur K, «*Back calculation of pavement layer moduli and Poisson's ratio using data mining*». Expert Systems with Applications 38, 2600–2608, 2011.
33. NA 5219/NF T 65-000, «*Liants hydrocarbonés-Classifications* », 2003.
34. NA 5226/NF P 98-251-1, «*Essais relatifs aux chaussées-Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés, Essais duriez sur mélanges hydrocarbonés à chaud* », 2002.
35. NA 5268/NF P 98-086, «*Éléments à prendre en compte pour le calcul de dimensionnement* », 1992.
36. NA 5270/NF P 11-300, «*Exécution des terrassements Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières* », 1992.
37. NA 5234/NFP98-200-1, «*Essais relatifs aux chaussées-Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante-Définitions, moyens de mesure, valeurs caractéristiques* », 1991.
38. NA 5273/NFP98-218-1, «*Essais relatifs aux chaussées-Essais liés à l'Uni-Partie 1 : Mesure avec la règle fixe de 3M* », 1992.
39. NA 5274/NFP98-218-2, «*Essais relatifs aux chaussées – Essais liés à l'Uni - Partie 2: Mesure avec la règle roulante de 3M* », 1992.
40. SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes), et LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), «*Catalogue des structures types de chaussées neuves* », Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement », édition Paris, référence D 9828 au prix de 300 F, le 26 octobre 1998.
41. SETRA «*Service d'Études techniques des routes et des autoroutes* », guide technique : les renforcements des chaussées – Diagnostic-, collection «*les outils* » chapitre 1-2, décembre 2009.
42. SETRA, «*ICTAAL. Instruction sur les conditions techniques d'aménagement des Autoroutes de liaison* », Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement Direction des routes, Circulaire n° 2000 – 87, modifiant l'instruction sur les conditions techniques d'aménagement des autoroutes de liaison du 22 octobre 1985, (I.C.T.A.A.L.) NOR : EQUR0010213C publiée au B.O. n° 24 du 10 janvier 2001, 12 décembre 2000.
43. Sunny Deol Guzzarlapudi*, Vinod kumar Adigopula, Rakesh Kumar, «*Comparative study of flexible pavement layers moduli backcalculation using approximate and static approach*». Materials Today: Proceedings 4, 9812–9816, 2017.
44. SALHI Sadok, «*étude de renforcement par géogrilles d'une plate-forme routière,* » MEMOIRE DE MAGISTER Spécialité : GENIE CIVIL, Option : Sols et Structures, Université de Tébessa, 12 Octobre 2015.
45. Vinciane LE BOURSICAUD, «*Nouvelles utilisations des mesures de bassins de déflexion pour caractériser l'état structural des chaussées* », thèse de doctorat de l'Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux (IFSTTAR), Université Bretagne Loire, 08 novembre 2018.

46. Xuan Nam Ho, « *Comportement hydromécanique des matériaux granulaires compactés non saturés* », thèse de doctorat, Université de Strasbourg, ÉCOLE DOCTORALE MSII (ED n°269) INSA de Strasbourg, 5 novembre 2013.
47. Ya-jian,Wang., Zhi,Hong., Jian-lin, Zhang. «*An Approximate Calculation of Highway pavement Modulus Based on FWD Deflection Basin*», IEEE Journal. 978-1-4244-7739-5, 2010.