



REPUBLIQUE DU BENIN



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
(MESRS)

UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

ECOLE POLYTECHNIQUE D'ABOMEY-CALAVI (EPAC)

CENTRE AUTONOME DE PERFECTIONNEMENT (CAP)



Centre Autonome de Perfectionnement

MEMOIRE DE FIN DE FORMATION POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE
CONCEPTION GRADE MASTER

Option : Bâtiment et Travaux Publics (BTP)

THEME :

ANALYSE DES DEGRADATIONS SUR L'AXE SAVI-OUIDAH ET PROPOSITION D'UNE SOLUTION DE RENFORCEMENT

Rédigé et soutenu par :
Hector Ninminanon LANCOUTIN
Le vendredi 30 janvier 2026

Sous la direction de :
Dr. Kocouvi Agapi HOUANOU
Maître de Conférences des Universités du CAMES,
Génie Civil ; Enseignant-Chercheur à l'EPAC

Encadré par :
Dr. Judicaël Koffi AGBELELE
Maître de Conférences des Universités du CAMES,
Génie Civil ; Enseignant-Chercheur à l'Ecole
Normale Supérieure de l'Enseignement Technique

Président : Dr Valery K. DOKO, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur à l'EPAC/UAC

Membre : Dr Agapi Kocouvi HOUANOU, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Enseignant-chercheur à l'EPAC/UAC

Membre : Dr Judicaël Koffi AGBELELE, Maître de Conférence des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique

Membre : Dr Serge K. DOSSOU, Collaborateur externe de l'EPAC, Chercheur à l'ES-SDI/UAC

8^{ème} Promotion

Année Académique : 2022 – 2023

Sommaire

Sommaire	ii
Listes des figures	vi
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Etat de l'art.....	3
Chapitre 2 : Matériels et méthodes	37
Chapitre 3 : Résultats et discussions	55
Conclusion	68
Références Bibliographiques	70

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mon chère père, Bruno LANCOUTIN, qui nous a quittés le 16 décembre 2016. Père, tu resteras à jamais présente dans le cœur de ton épouse et de nous, tes enfants. Que ton âme repose en paix pour l'éternité.

Remerciements

La rédaction de ce mémoire a été rendue possible grâce au soutien inestimable et à la franche collaboration de nombreuses personnes. Je viens leur exprimer ici mes sincères remerciements et ma profonde gratitude.

Avant tout, je rends grâce à l'Éternel Dieu tout-puissant pour ses œuvres dans ma vie, sa grâce et son amour infinis pour moi et mon entourage.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à mes frères et sœurs pour leur soutien et leur affection tout au long de cette étape de ma vie. Que l'union de Dieu soit notre partage.

Je souhaite adresser mes remerciements particuliers à :

- Dr. Kocouvi Agapi HOUANOU, Maître de Conférences des Universités-CAMES, Enseignant-Chercheur à l'EPAC. Cher Professeur, merci pour votre soutien constant, vos conseils avisés et votre disponibilité. Votre contribution a été essentielle à l'aboutissement de ce mémoire. Que vous soyez béni ;
- Dr. Judicaël Koffi AGBELELE, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Normale Supérieure de l'Enseignement Technique, Maître de Conférences en Génie Civil des Universités du CAMES, pour avoir généreusement partagé son temps et ses connaissances dans le cadre de ce travail. Cher Professeur, merci pour votre soutien constant, vos conseils avisés et votre disponibilité. Votre contribution a été essentielle à l'aboutissement de ce mémoire. Que vous soyez béni ;
- Pr. Fidèle Paul TCHOBO, Directeur du CAP, Enseignant-Chercheur à l'UAC, Professeur titulaire des Universités-CAMES, ainsi qu'à tous les membres de l'Administration, pour le savoir et les connaissances qu'ils nous ont transmis durant notre formation ;
- Dr. Christophe AWANTO, Maître de Conférences des Universités-CAMES, Enseignant-Chercheur à l'EPAC, Chef du Centre Autonome de Perfectionnement de l'EPAC honoraire, ainsi qu'à tous les autres Enseignants-Chercheurs pour leur encadrement et leurs conseils précieux ;
- Dr. Valéry K. DOKO, Maître de Conférences des Universités-CAMES.
- Pr. Emmanuel OLODO, Docteur Ingénieur en Génie Civil, Professeur titulaire des Universités-CAMES ;
- Pr. Mohamed GIBIGAYE, Docteur Ingénieur en Génie Civil, Professeur titulaire des Universités-CAMES ;

- Dr. Victor S. GBAGUIDI, Docteur Ingénieur en Génie Civil, Maître de Conférences des Universités-CAMES ;
- Dr. Yvette KIKI, Docteur en Génie Civil, Maître de Conférences des Universités-CAMES.
- Dr. Adolphe TCHEHOUALI, Maître de Conférences des Universités-CAMES, Enseignant-Chercheur à l'EPAC ;
- Pr. Gérard GBAGUIDI-AÏSSE, Professeur titulaire des Universités-CAMES, Enseignant-Chercheur à l'EPAC ;
- À tous les enseignants qui m'ont encadré durant ce master ainsi qu'au personnel du CAP ;
- À mes Directeurs, Chefs Services et collègues de l'ex Ministère des Infrastructures et des Transports et de l'actuel Ministère du Cadre de Vie et des Transports en Charge du Développement Durable, et à mes amis proches ;
- À ma Mère SOSSA AGBEDE Marguerite Epouse LANCOUTIN ;
- À mon épouse AGOUSOU C. M. Odé femme battante ;
- À mon supérieur en qualité de maman Chérie Léontine Assiba DANWEZOUN épouse MICHAÏ, Ingénieur des STTP et membre du Conseil Administratif de laboratoire LERGC SA ;
- À mon Supérieur HOUNDJE Roch Célestin, Ingénieur des STTP et Secrétaire Général de l'ex Ministère des Infrastructures et des Transports ;
- À mon Supérieur SESSOU Rufin Chef Projet à la Société des Infrastructures Routières et l'Aménagement du Territoire (SIRAT SA) ;
- À mon Supérieur Alain T. AMOUSSOUGBO, Chef Division des Routes en Terre et Ouvrage à la Direction des Transports Terrestres et Arien ;
- À mon Grand Frère Rodrigue K. LANCOUTIN, pour ces précieux conseils ;
- Aux membres du jury pour avoir accepté évaluer ce document et pour le temps qu'ils y ont consacré.

La liste n'est certainement pas exhaustive et j'exprime mes vifs remerciements à tous ceux qui, de

Listes des figures

Figure 1- 1 : Profil en travers type d'une chaussée [2]	4
Figure 1- 2 Les différentes couches de la chaussée [2]	6
Figure 1- 3 Exemples de dégradations structurelles	11
Figure 1- 4 Exemples de dégradations superficielles.....	12
Figure 1- 5 Différentes phase de l'auscultation des chaussées.....	15
Figure 1- 6 Exemple de représentation des dégradations sur un schéma itinéraire. Cas d'une structure semi-rigide ou mixte.....	18
Figure 1- 7 Déflexion et rayon de courbure de la déformée sous une charge roulante	21
Figure 1- 8 Définition des zones homogènes et recalcul des paramètres caractéristiques par zone.....	25
Figure 1- 9 Exemple de sondage de chaussée souple.....	26
Figure 1- 10 Modélisation d'un rechargement	35
Figure 1- 11 Modélisation d'un décaissement partiel dans un matériau traité.....	35
Figure 1- 12 Modélisation d'un décaissement partiel dans un matériau non traité.....	36
Figure 1- 13 Modélisation d'un décaissement total de l'ancienne chaussée	

Figure 2- 1 Carte géographique.....	39
Figure 2- 2 Poutre Benkelman	53
Figure 3- 1 Nid de poule observe au niveau du 0+725.....	56
Figure 3- 2 Faïençage observé au niveau du PK 1+250.....	57
Figure 3- 3 :Fissuration longitudinale au niveau du PK 2	57
Figure 3- 4 Modélisation de la chaussée existante dans ALIZE.....	59
Figure 3- 5 Calcul du renforcement dans ALIZE.....	61
Figure 3- 6 Déformations obtenues	61
Figure 3- 7 Déformations obtenues	62
Figure 3- 8 évolution de la déflexion en fonction du module	62
Figure 3- 9 sollicitations subit par la chaussée.....	63
Figure 3- 10 exécution des travaux de décaissement.....	66
Figure 3- 11 Finalisation des travaux de décaissement	67

Listes des tableaux

Tableau 1- 1 : Différents types de chaussées selon la classification LCPC-SETRA.....	7
Tableau 1- 2 Classes de déflexion.....	20
Tableau 1- 3 classes des rayons de courbure.....	21
Tableau 1- 4 indices qualité.....	28
Tableau 2- 1 Resultats des relevés des dégradations sur l'axe OUIDAH SAVI	40
Tableau 2- 2 Qualité de la chaussée en fonction de la déflexion caractéristique	54
Tableau 2- 3 Grille de décision	54

RESUME

L'axe routier Ouidah–Savi constitue une infrastructure stratégique au Bénin, fortement sollicitée par le trafic, notamment des poids lourds. Il présente des dégradations importantes — nids-de-poule, fissures longitudinales et transversales, faïençage — qui compromettent la sécurité et la durabilité de la chaussée. Dans ce contexte, le présent mémoire vise à proposer une solution technique de renforcement adaptée aux conditions réelles d'exploitation de cet axe.

La méthodologie adoptée s'est articulée en trois phases. Dans un premier temps, une auscultation de surface a permis de caractériser et de classer les dégradations observées sur différents segments du tronçon. Ensuite, le calcul de l'endommagement mécanique des structures a été réalisé au moyen du logiciel ALIZE, afin d'évaluer la capacité portante résiduelle des couches constitutives. Enfin, l'interprétation croisée des données de terrain et des résultats de simulation a permis d'identifier les besoins spécifiques en renforcement.

Les résultats obtenus révèlent une forte dégradation structurelle justifiant un décaissement sur les sections critiques. La solution retenue consiste à retirer la partie supérieure altérée de la chaussée, puis à reconstituer la structure au moyen de matériaux techniquement adaptés (notamment l'usage d'enrobés recyclés pour optimiser les coûts et réduire l'impact environnemental). Cette approche assure une réparation durable, conforme aux contraintes de trafic et aux conditions climatiques locales.

Ce travail démontre que le décaissement constitue une méthode de renforcement efficace pour l'axe Ouidah–Savi. Il met également en évidence la nécessité d'une démarche méthodologique rigoureuse, combinant relevés visuels, investigations mécaniques et outils de modélisation, pour garantir la pérennité des infrastructures routières en zones tropicales.

ABSTRACT

The Ouidah–Savi road axis is a strategic infrastructure in Benin, subject to heavy traffic, particularly heavy goods vehicles. It exhibits significant deterioration—potholes, longitudinal and transverse cracks, and crazing—which compromise the safety and durability of the roadway. In this context, this thesis aims to propose a technical reinforcement solution adapted to the real-world operating conditions of this road.

The methodology adopted was divided into three phases. First, a surface inspection allowed us to characterize and classify the deterioration observed on different segments of the road. Next, the mechanical damage to the structures was calculated using ALIZE software to assess the residual load-bearing capacity of the constituent layers. Finally, a cross-interpretation of field data and simulation results identified specific reinforcement needs.

The results obtained reveal significant structural deterioration, justifying excavation at critical sections. The chosen solution involves removing the damaged upper portion of the roadway and then reconstructing the structure using technically appropriate materials (including the use of recycled asphalt to optimize costs and reduce environmental impact). This approach ensures a sustainable repair, compliant with traffic constraints and local climatic conditions.

This work demonstrates that excavation is an effective reinforcement method for the Ouidah–Savi roadway. It also highlights the need for a rigorous methodological approach, combining visual surveys, mechanical investigations, and modeling tools, to ensure the sustainability of road infrastructure in tropical areas.

Introduction générale

L'axe Ouidah-Savi, artère vitale reliant plusieurs localités au Bénin, joue un rôle stratégique pour le développement économique et social de la région. Cependant, cette route souffre de dégradations importantes dues à l'intensité du trafic, en particulier des poids lourds, ainsi qu'aux variations climatiques. Ces facteurs provoquent des nids-de-poule, des fissures longitudinales et transversales, ainsi que du faïençage, compromettant la durabilité de la chaussée et la sécurité des usagers. Dans ce contexte, une évaluation précise de l'état de la route est essentielle pour élaborer des solutions de renforcement durables et efficaces.

L'inspection visuelle constitue une méthode clé pour identifier les défauts visibles des infrastructures routières, tandis que l'inclusion des données de trafic et climatiques dans les analyses permet d'anticiper l'évolution des dégradations[1]. Cette approche intégrée permet une meilleure compréhension des mécanismes de défaillance et oriente les futures stratégies de réhabilitation.

La problématique actuelle consiste à identifier des solutions de renforcement adaptées à la situation spécifique de l'axe Ouidah-Savi. L'absence d'une analyse systématique des types de dégradations et des comportements des matériaux rend difficile l'optimisation des interventions d'entretien. Plusieurs travaux récents mettent en avant la nécessité d'une auscultation rigoureuse pour mieux orienter les actions de maintenance. Ces recherches montrent que l'évaluation précise des dégradations est indispensable pour proposer des solutions de renforcement durables, tout en évitant des interventions coûteuses et inefficaces.

Ainsi, ce mémoire vise à répondre à cette problématique à travers trois objectifs principaux : premièrement, effectuer une auscultation de surface approfondie sur l'axe Ouidah-Savi afin d'identifier et classer les dégradations visibles, telles que les fissures, les nids-de-poule, et le faïençage ; deuxièmement, analyser et interpréter les différents types de dégradations relevés pour en déterminer les causes et les impacts sur la structure routière ; et enfin, proposer une solution de renforcement optimale tenant compte des conditions de trafic et climatiques spécifiques de la région. Cette approche globale permettra d'améliorer la durabilité de la chaussée et d'assurer une meilleure performance à long terme.

Chapitre 1 : Etat de l'art

Chapitre 1 Etat de l'art

1 Introduction

Cette section examine les recherches préalables dans le domaine de l'auscultation de chaussée. L'objectif est de se familiariser avec le contexte, d'identifier les lacunes existantes et de mettre en lumière les avancées récentes, établissant ainsi une base robuste pour notre propre travail de recherche. Nous entamerons notre exploration par une définition approfondie de la chaussée et de ses différentes couches. Ensuite, nous aborderons les dégradations de chaussée, examinant leurs diverses causes, les modes d'endommagement de la chaussée, ainsi que le processus d'auscultation de celle-ci.

2 Généralité sur les chaussées revêtues

2.1 Définition

La chaussée peut être définie de deux manières : Au sens géométrique, c'est la surface aménagée de la route sur laquelle les véhicules circulent. Au sens structural, elle désigne l'ensemble de couches de matériaux de diverses qualités et quantités superposées les unes sur les autres. Cette superposition a pour objectif de résister aux contraintes exercées par le trafic pendant une période de service minimale (généralement 15 à 20 ans), déterminée dès la phase de conception.

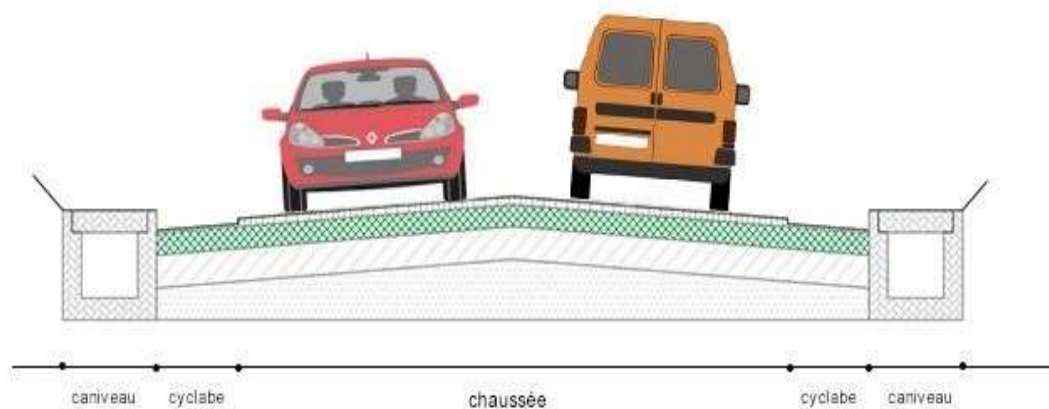


Figure 1- 1 : Profil en travers type d'une chaussée [2]

2.2 Les différentes couches d'une chaussée

2.2.1 Couche de surface : CS

Elle est composée de deux différentes couches :

- ***Couche de roulement (CR)***

La couche de roulement, en contact direct avec les pneumatiques des véhicules, protège la couche de base tout en fournissant rugosité, sécurité et confort aux usagers. Elle supporte les contraintes de cisaillement engendrées par la circulation.

- ***Couche de liaison (CL)***

La couche de liaison joue un rôle transitoire avec les couches inférieures les plus rigides.

2.2.2 Couche de base (CB)

C'est une couche intermédiaire qui permet le passage progressif entre la couche de roulement (CR) et la couche de fondation (CF). Elle reprend les efforts verticaux et repartit les contraintes normales qui en résultent sur les couches sous-jacentes.

2.2.3 Couche de fondation (CF)

Elle substitue en partie le rôle du sol support, en permettant l'homogénéisation des contraintes transmises par le trafic. Elle assure une bonne unité et portance de la chaussée finie, jouant ainsi un rôle similaire à celui de la couche de base.

La couche de base et La couche de fondation forment le « Corps de chaussée »

2.2.4 Couche de forme (CF)

Elle est généralement prévue pour répondre à certains objectifs en fonction de la nature du sol support :

- sur un sol rocheux : elle joue le rôle de nivellement afin d'aplanir la surface.
- sur un sol peu portant (argileux à teneur en eau élevée) : elle assure une portance suffisante à court terme permettant aux engins de chantier de circuler librement.

Eventuellement, une couche drainante ou anti-contaminant peut-être intercalée entre la couche de forme et la couche de fondation qui s'appelle « sous-couche »

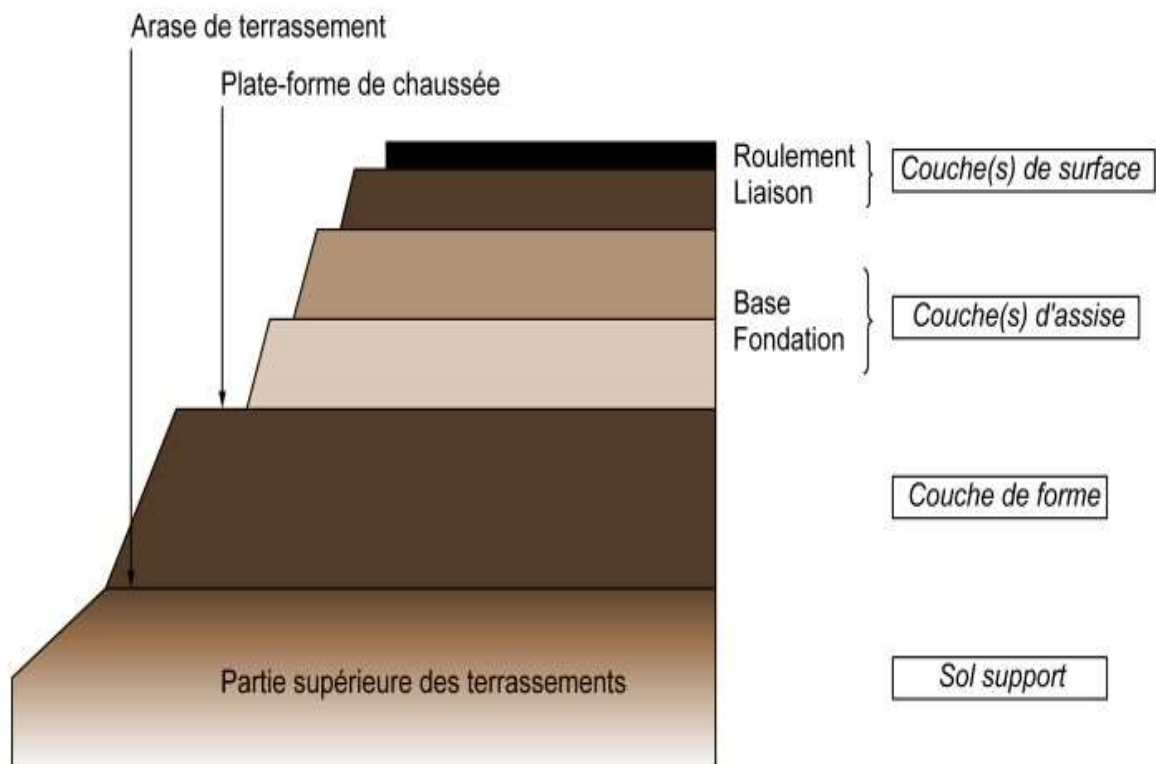


Figure 1- 2 Les différentes couches de la chaussée [2]

2.3 Les différents types de chaussée

Les types de chaussées se différencient principalement par leur structure en couches, notamment le matériau utilisé, l'épaisseur et le nombre de couches. En général, on peut classer les chaussées en deux grandes catégories : les chaussées flexibles et les chaussées rigides. Selon le guide français de dimensionnement des chaussées SETRA & LCPC[2][3], ces familles se subdivisent à leur tour en six types de chaussées ainsi qu'il suit :

Tableau 1- 1 : Différents types de chaussées selon la classification LCPC-SETRA

chaussées	Structures	Couche de surface	Couche de Base	Couche de Fondation
Chaussées Flexibles	Souples	Bitumineuse	Matériaux granulaires	
	Bitumineuses épaisses		Matériaux bitumineux	
	Semi-rigides	Bitumineuse	Matériaux Traités aux Liants Hydrauliques (MTLH)	
	Mixtes	Bitumineuse		MTLH
	Inverses	Bitumineuse	Graves Non Traitées	MTLH
Chaussées rigides	Rigides	Béton de ciment (Avec ou sans dispositif de liaison, les goudjons)		MTLH ou Béton maigre

- **Chaussées souples** : structures comportant une ou plusieurs couches en matériaux bitumineux d'épaisseur totale inférieure ou égale à 0,12 m, reposant sur une ou plusieurs couches de grave non traitée d'épaisseur totale supérieure ou égale à 0,15 m. Les structures comportant des matériaux d'assises constitués de matériaux traités aux liants hydrauliques, bitumineux ou en béton sont exclues de cette définition.
- **Chaussées bitumineuses épaisses** : structures composées d'une couche de surface et d'une couche de base en matériaux bitumineux ; la couche de fondation éventuelle peut être en matériaux bitumineux ou en grave non traitée.
- **Chaussées semi-rigides** : structures composées d'une couche de surface en matériaux bitumineux sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques.
- **Chaussées mixtes** : structures composées d'une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux, à l'exclusion d'enrobés à module élevé, sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. Le rapport K de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est compris entre 0,45 et 0,60.
- **Chaussées inverses** : structures composées de couches bitumineuses, sur une couche en grave non traitée de type B d'épaisseur comprise entre 0,10 m et 0,12 m, reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques.
- **Chaussées rigides** : structures comportant une couche en béton de ciment d'au moins 0,12 m. Elles peuvent être classées en trois catégories : béton de ciment sur matériau bitumineux, béton

de ciment sur matériau hydraulique et béton de ciment sur couche de forme ou couche drainante.

3 Les dégradations de chaussées revêtues

3.1 Définition

D'après les analyses documentaires, une dégradation peut être qualifiée comme une "affliction", une condition pathologique, ou encore une détérioration consécutive à l'exploitation routière, engendrant une dévaluation soudaine ou progressive de l'état d'utilisation et du confort offert aux usagers. Une approche développée par WHOLER et MINER propose une théorie définissant des indicateurs d'état pour évaluer le niveau de détérioration des chaussées. Selon eux, une dégradation est le résultat de l'état de fatigue subi par une structure de chaussée sollicitée par des charges répétées, telles que les charges induites par les essieux des véhicules. Cette conceptualisation met en avant la notion de contraintes récurrentes induisant des altérations graduelles au sein des chaussées, illustrant ainsi la complexité des mécanismes de dégradation dans le contexte des infrastructures routières.

3.2 Causes de dégradations des chaussées

Les dégradations de chaussées résultent de facteurs variés qui influent sur le type de détérioration engendré. Les principaux facteurs de dégradation de chaussées sont :

- le trafic
- les conditions climatiques
- les malfaçons (mise en œuvre)
- la qualité des matériaux
- les accidents de la route

3.2.1 Le trafic

Les dégradations de chaussée résultent sous l'effet du trafic routier ont deux principales causes. Tout d'abord, l'usure de la couche de roulement est due aux forces de cisaillement des pneumatiques des véhicules en mouvement, entraînant une perte de matériau, un polissage des granulats et une diminution de la rugosité. Cette usure est liée au trafic, notamment au passage de poids lourds. Ensuite, la fatigue des couches inférieures provient des charges verticales répétées exercées sur la couche de fondation, provoquant des effets d'attrition, la production de fines particules et une augmentation de la plasticité du matériau. Cela conduit à une déformation irréversible de la couche

de roulement et à sa détérioration progressive. Ces phénomènes de fatigue dépendent du nombre de cycles de charge et de l'intensité des charges par essieu.

3.2.1 Les conditions climatiques

L'eau, en particulier lorsqu'elle gèle, peut devenir un ennemi redoutable pour les routes. Elle pénètre dans la chaussée par le haut, à travers les couches de surface, et par le bas, en provenance des nappes phréatiques. Lorsque cette eau gèle, elle ajoute une masse supplémentaire sous la chaussée, provoquant des contraintes et des gonflements qui entraînent des fissures sur la route et la formation de crevasses, ce qui la rend difficile à parcourir.

3.2.2 Les malfaçons (mise en œuvre)

Les défauts de conception, de construction ou d'entretien des routes peuvent avoir un impact significatif sur leur durabilité. Par exemple, une conception inadéquate en termes d'épaisseur de chaussée ou l'utilisation de matériaux de moindre qualité peuvent affaiblir la résistance de la chaussée aux charges et aux contraintes imposées par le trafic. De tels défauts peuvent entraîner des fissures, des affaissements et d'autres dégradations de la surface de la route.

3.2.3 La qualité des matériaux

La qualité des matériaux utilisés dans la construction routière revêt une importance cruciale, car elle influe directement sur la durabilité et la performance des routes. Les dégradations résultant de la médiocrité des matériaux peuvent découler de plusieurs facteurs, notamment une granulométrie incorrecte, un défaut de portance, un pourcentage élevé de fines particules, ou une dureté insuffisante des granulats, voire la présence de contaminants comme des matières végétales. Ces problèmes de qualité de matériaux peuvent entraîner des dégradations prématurées de la chaussée.

3.2.1 Les accidents de la route

Les accidents de la circulation sont une source majeure de dégradation routière, causant des dommages variés en fonction de leur gravité. Ils peuvent provoquer des fissures, des affaissements, voire des ruptures de chaussée. Les incidents graves, impliquant des poids lourds ou des collisions à haute vitesse, entraînent des dégâts structuraux nécessitant souvent des réparations coûteuses

3.3 Les types de dégradations

Les dégradations routières se divisent principalement en deux catégories : les dégradations structurelles et les dégradations superficielles. Les dégradations structurelles se forment à l'intérieur de la chaussée ou de sa base, mettant en danger la stabilité de la route. En revanche, les dégradations superficielles commencent à la surface de la chaussée et altèrent principalement ses propriétés extérieures.

3.3.1 Les dégradations structurelles (Type A)

Ce sont des dégradations issues d'une insuffisance de capacité structurelle de la chaussée. 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. On y trouve essentiellement : les déformations et les fissurations par fatigue. Les différents types de dégradations font l'objet du catalogue associé à la méthode d'essai 38-2 intitulée "Relevé de dégradations de surface des chaussées"[4]. Selon ce catalogue, nous pouvons distinguer plusieurs types de dégradation dans chaque famille :

➤ Les déformations :

Les déformations sont des dépressions ou ondulations de la route naissant généralement dans le corps de chaussée ou dans le sol support et se manifestant sur la couche de roulement. Elles se différencient suivant leur forme et leur localisation. Dans ce type de dégradations, se distinguent : les affaissements, les flaches, les bourrelets, les ornières et plus rarement les tôles ondulées.

➤ Les fissurations par fatigue :

Les fissurations par fatigue sont des fissures qui se forment dans les matériaux, en particulier dans les couches de chaussée, en raison de contraintes répétées causées par le trafic. Ces fissures résultent généralement de la combinaison de contraintes de traction et de flexion sur le matériau.



Figure 1- 3 Exemples de dégradations structurelles

3.3.2 Les dégradations superficielles (Type B)

Encore appelées dégradations non structurelles, elles 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. Parmi les dégradations de type B, on distingue suivant la forme : les fissurations (hors fatigue), les arrachements, les mouvements de matériaux.

➤ Les fissurations :

Les fissurations sont des fentes de degré plus ou moins important de la route. Elles affectent la couche de roulement et même tout ou une partie du corps de chaussée. On distingue généralement les fissures, les faïençages, les épaufrures, les fissures transversales de retrait, les fissures longitudinales et les deux bandes de chaussées.

➤ Les arrachements :

Ce sont des ruptures d'adhésion entre éléments ou parties de la route suivies généralement de leurs disparitions. Ce type de dégradations n'affecte que la couche de roulement, au début de son apparition mais peut s'aggraver en affectant les couches sous-jacentes. On distingue : le décollement, le désenrobage, le plumage, le peignage, la pelade et le nid-de-poule.

➤ **Les mouvements de terre :**

En dehors des dégradations dues au vieillissement et à la fatigue du corps de chaussée qui affectent le revêtement, il existe aussi l'usure de cette couche de roulement par frottement caractérisée par une perte de matériaux. Dans cette catégorie de dégradations, nous distinguons le glaçage, les têtes de chat, et l'usure de la signalisation horizontale



Figure 1- 4 Exemples de dégradations superficielles

3.4 Mode d'endommagement des chaussées souples

Les efforts verticaux transmis aux matériaux non traités et au sol support sont relativement élevés, ce qui a pour effet de générer le développement de déformations plastiques au sein des couches non liées (sol, couches granulaires) et d'entraîner l'apparition de déformations permanentes en surface (orniérage à grand rayon, flaches et affaissements) ; ces déformations croissent avec le cumul du trafic. Les efforts répétés de traction-flexion à la base de la couverture bitumineuse entraînent une fatigue de celle-ci, qui se traduit en surface par l'apparition de fissuration longitudinale évoluant rapidement vers un faïençage à mailles fines [5]. Le comportement de ces chaussées reposant essentiellement sur la capacité portante des couches non traitées (sol et matériaux granulaires), tout accroissement de la teneur en eau de ces matériaux fragilise la structure. L'eau peut venir de fossés mal entretenus, de bas-côtés perméables, du sol lui-même (remontée de nappe, chaussée en déblai ou en profil mixte) ou de la surface devenue perméable.

La possibilité pour les eaux superficielles de s'infiltrer dans les fissures de la couche de surface (et conséquemment dans l'assise) provoque une accélération des dégradations : épaufures aux lèvres des fissures avec départ de matériaux, augmentation de l'amplitude des déformations, puis apparition de nids-de-poule.

4 Réhabilitation des chaussées

Quel que soit le soin apporté à la conception et à la réalisation d'une route, les chaussées vieillissent sous l'effet du trafic et des conditions climatiques. Ainsi, après une fréquentation importante de la chaussée, on constate une présence (moyenne ou forte selon le cas) des fissures, des faïences et des ornières. La seule solution qui s'impose dans ce cas est la réhabilitation de la chaussée en question. Pour réhabiliter une chaussée, il y a 3 solutions :

- **Le renforcement ;**
- **La reconstruction ;**
- **Le retraitement en place de la chaussée.**

4.1 Le renforcement de la chaussée

La technique de renforcement consiste en l'apport d'une couche épaisse de matériaux sur la chaussée existante, ce qui nécessite de faire appel à une noria de camions pour acheminer sur le chantier des matériaux élaborés en grande quantité. [6]

D'autre part, outre la réduction de sa largeur, l'élévation du niveau de la chaussée entraîne le rehaussement de tous les ouvrages annexes à la route (fossés, trottoirs, ...), ainsi que la réduction du gabarit sous les Ouvrages d'Arts.[7]

4.2 La reconstruction de la chaussée

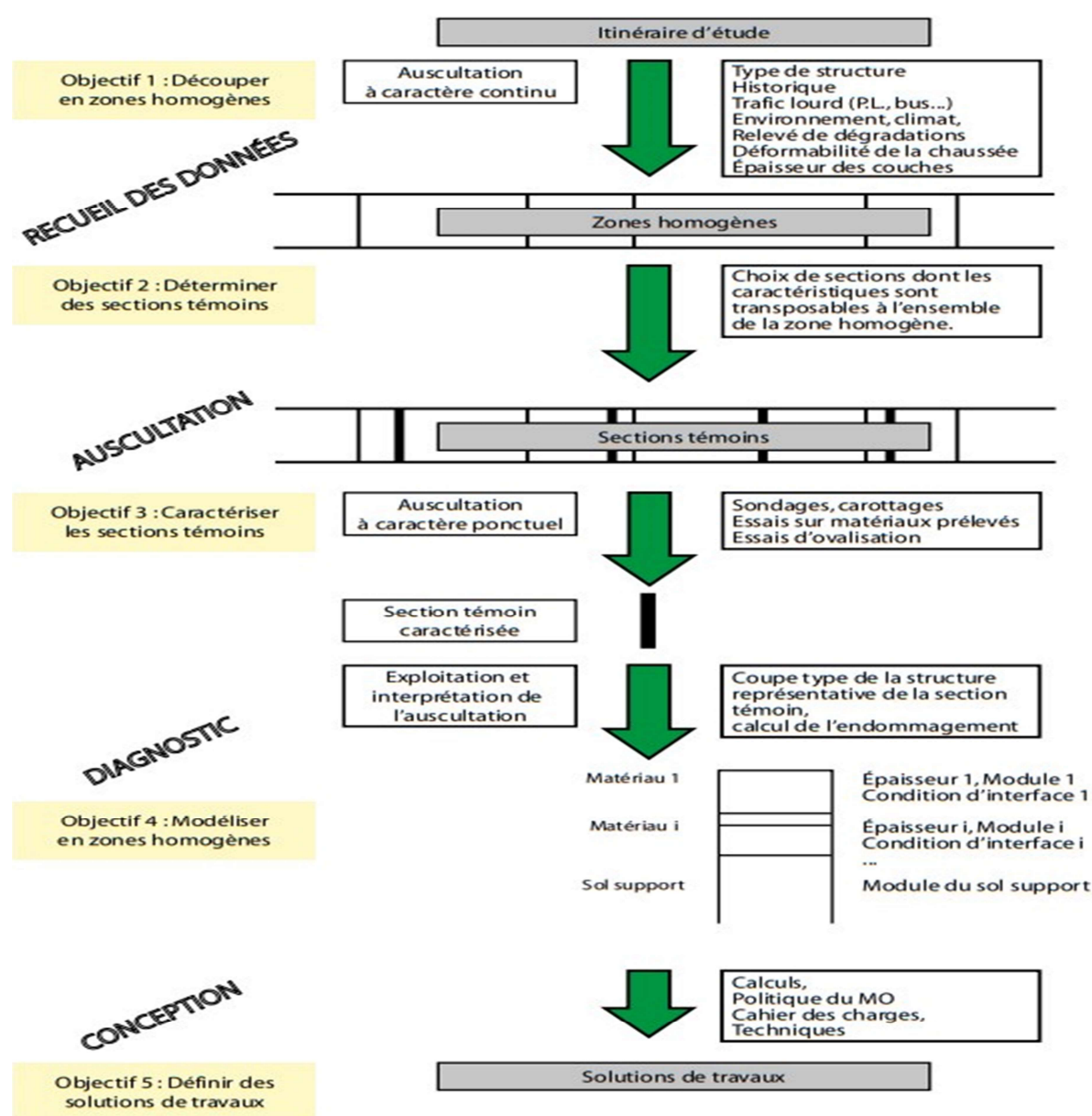
La technique de reconstruction consiste au fraisage et à la mise en décharge de l'ancienne chaussée, puis à l'apport de matériaux élaborés. Cette technique nécessite de faire appel à une noria de camions pour, d'une part, mettre à la décharge les matériaux anciens et, d'autre part, acheminer sur le chantier des granulats en grande quantité.[8]

Or, la raréfaction des ressources en granulats et les nuisances générées par les transports ont incité les décideurs à utiliser les liants hydrauliques pour le retraitement des chaussées en place.[9][10]

4.3 Le retraitement en place de la chaussée

Plus de mise en décharge des matériaux anciens, les matériaux en place sont valorisés par un liant hydraulique et peu ou pas d'apport extérieur de matériaux, éventuellement un correcteur et/ou de l'eau. Cette technique consiste à apporter un liant hydraulique, éventuellement un correcteur granulométrique et de l'eau, de les mélanger intimement sur le site, et de les compacter pour obtenir les performances mécaniques souhaitées. Elle nécessite des études préalables précises.[11]

4.4 Organigramme d'une étude de réhabilitation



Source [12]

5 Méthodologie des études de réhabilitation

Dans le chapitre, nous exposerons la méthodologie des études de réhabilitation, c'est-à-dire, une explication plus détaillée des différents objectifs définis plus haut dans l'organigramme d'une étude de réhabilitation.[13] [14]

5.1 Auscultation des chaussées existantes

L'auscultation de la chaussée existante permet de déterminer des propriétés des couches qui composent cette dernière à partir de mesures. Elle a pour objectif d'apporter des éléments d'information nécessaires aux décisions à prendre en matière d'entretien ou de réhabilitation. L'auscultation se décompose en trois phases :

- Phase 1, on recueille des informations globales ou à caractère continu sur l'itinéraire ;
- Phase 2, on découpe l'itinéraire étudié en zones homogènes ;
- Phase 3, on cherche à préciser le comportement des zones homogènes par des analyses plus fines sur des sections témoins extraites des zones homogènes (selon leur longueur). On applique à ces sections témoins un programme d'investigations complémentaires détaillées, afin de connaître les propriétés et les défauts des couches de la chaussée. Dans un second temps, on vérifie que le résultat de la section témoin est bien transposable à l'ensemble de la section homogène

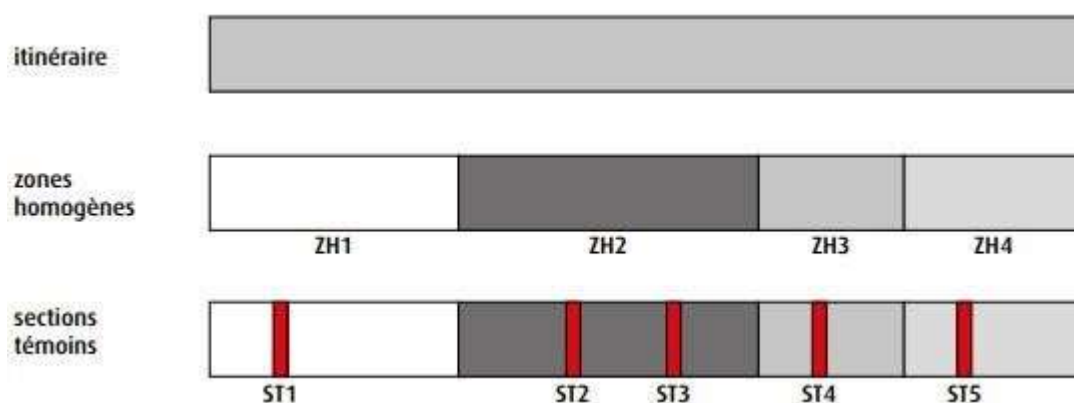


Figure 1- 5 Différentes phase de l'auscultation des chaussées

5.1.1 Phase 1 : Recueil des informations globales sur la chaussée

Dans l'état actuel des procédés d'investigation sur chaussée, on appréhende de manière continue ou quasi continue les types d'informations suivants :[15]

➤ L'historique de la chaussée ;

En ce qui concerne l'historique de la chaussée, on doit faire ressortir :

- La structure et sa réalisation (âge, trafic cumulé, constitution du corps de chaussée, qualité de la plate-forme, épaisseur théorique et de chantier de l'assise, qualité de fabrication et de mise en œuvre des matériaux, etc.), qui constitue un élément essentiel pour l'analyse de l'état résiduel des chaussées en étude ;
- La nature, la fréquence et l'importance des entretiens dans le passé sans omettre la période de renouvellement et les zones particulières ;
- La date du dernier renouvellement de surface (à comparer avec l'état actuel) ;
- Des interventions plus lourdes (renforcement, rechargement, réparation ponctuelle...).[16][17]

Ces renseignements sont normalement disponibles auprès de l'administration chargée de la gestion de ladite section de route.

➤ Le trafic ;

La connaissance du trafic Poids Lourds est indispensable pour :

- Etablir le diagnostic de la chaussée en place expliquer et comprendre l'évolution et la dégradation de la structure de chaussée, évaluer le dommage structurel théorique en fonction du nombre de charges de référence ayant circulé sur la structure ;
- Proposer des solutions de conception de la solution de réhabilitation calculer le nombre de charges de référence pour la durée de dimensionnement retenue, déterminer le type et l'épaisseur de la couche de surface qui sont fortement fonction du trafic poids lourds moyen journalier annuel (TMJA). [18]

Les poids lourds, conformément à la norme NF P 98-082 de janvier 1994, sont les véhicules de plus de 35 kN de poids total autorisé en charge (PTAC). Deux notions sont retenues pour évaluer le trafic supporté par une route :

- Le trafic journalier déterminé à partir du trafic moyen journalier annuel (TMJA) de la voie la plus chargée, exprimé en classe de trafic Ti (confère NF P 98-086) ;

- Le trafic cumulé correspondant au nombre de poids lourds par sens sur la voie la plus chargée pendant la durée de dimensionnement de la chaussée[19].

L'évaluation du trafic cumulé est conforme à la norme NF P 98-082 de janvier 1994 et à NF P 98-086 de mai 2019.

Les valeurs du coefficient d'agressivité moyen sont celles retenues dans la norme « dimensionnement des structures types de chaussées neuves » de 2019 pour les voies du réseau structurant (VRS).

Rappelons que le coefficient d'agressivité moyen du poids lourd intervenant dans la détermination du nombre équivalent $NE = CAM * \text{Trafic Cumulé PL}$ dans le passage l'essieu peut être déterminé à partir de stations de pesage en marche, en fonction du trafic local et de la pente de fatigue des matériaux de structure.[20]

➤ **L'environnement ;**

Les conditions environnementales ont une influence sur l'état de la structure de chaussée. De ce fait, en ce qui concerne les environs de la chaussée, on peut s'intéresser :

- **Au site :** la largeur de la chaussée, le nombre de voies ; la largeur des accotements, leur nature et leur imperméabilité appréciée ; la situation par rapport au terrain naturel (déblai, remblai, profil mixte) ; l'assainissement de surface de la chaussée (collecte et évacuation des eaux de ruissellement) ; la présence ou non, l'état et la profondeur des fossés, points hauts, points bas...
- **Aux Contraintes géométriques ayant une incidence sur la faisabilité et le choix des solutions de conception :** le niveau de surface à respecter (ouvrage d'art – seuils en traverse...) ; les corrections de profil en travers (tracés sinueux) ; la profondeur de décaissement (présence de réseaux enterrés) ; les possibilités de calibrage en largeur ;
- **Drainage – Assainissement.**

➤ **Le climat ;**

Les données ou informations suivantes sont à recueillir :

- Pluviosité au cours des derniers mois (et moyennes mensuelles pluriannuelles) ;
- Températures : historique sur les derniers mois (voire plusieurs années), valeurs des températures maximales et minimales ;

➤ **L'état visuel de surface (dégradations, orniérage) ;**

Le relevé de dégradations de surface est un des indicateurs de base de l'appréciation de l'état des chaussées. Les réparations sont également relevées car elles sont le signe de l'existence de dégradations antérieures.

L'état visuel est relevé sur chacune des voies lentes suivant la méthode d'essai LPC[21]. Les informations enregistrées sont représentées sur un schéma itinéraire Figure 1-6.

Les dégradations sont détaillées dans le « Catalogue des dégradations de surface des chaussées » méthode d'essai LCPC n° 52 (complément à la méthode d'essai n° 38-2).

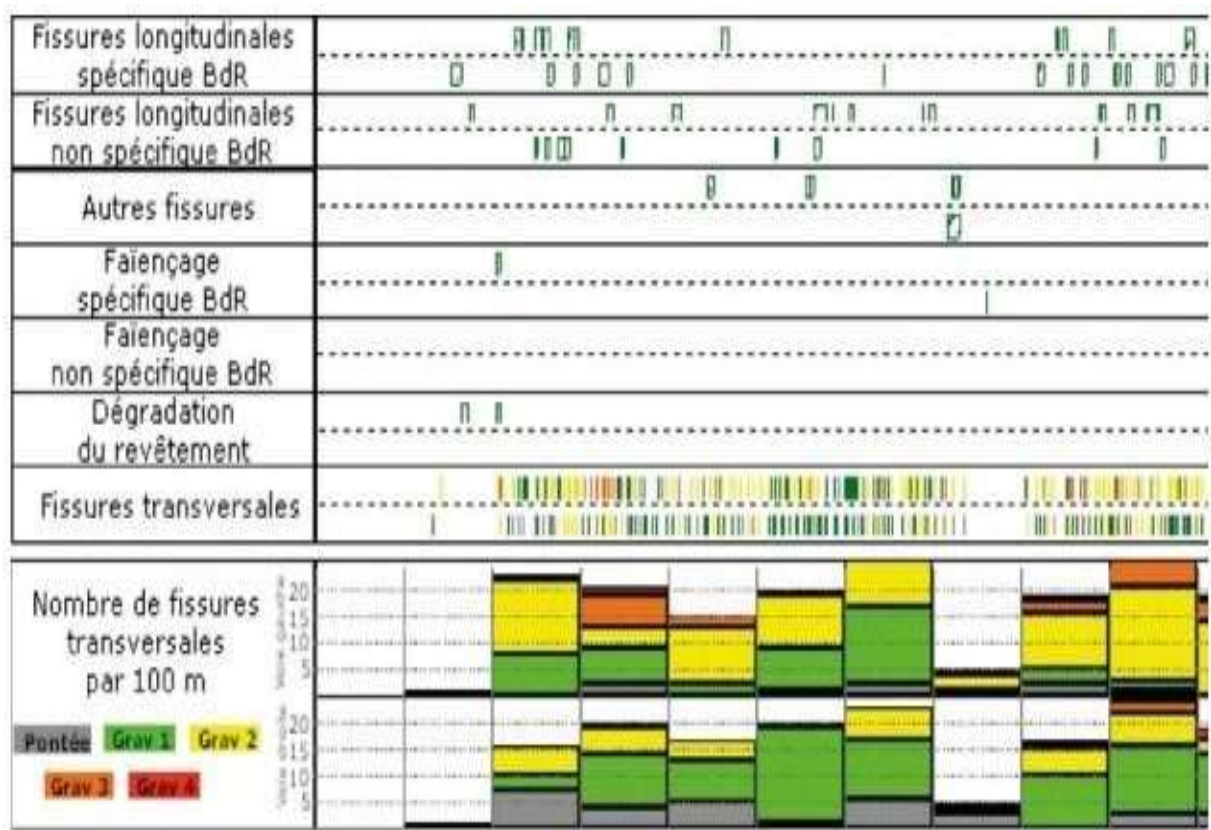


Figure 1- 6 Exemple de représentation des dégradations sur un schéma itinéraire. Cas d'une structure semi-rigide ou mixte

C'est à ce niveau qu'on définit la classe de fissuration/faiencage (**F1 - F5**), d'orniérage ou de déformation (**ORN1 - ORN4**), d'affaissement (**AFF1 - AFF4**) ou la classe de fissure transversale (**FT1 - FT3**), tout ceci selon le type de structure de chaussée en étude donc la nature des matériaux utilisés pour la réalisation des différentes couches composant le corps de chaussée.

➤ **La déformabilité de la chaussée sous charge (déflexion, éventuellement rayon de courbure) :**

Les mesures de la déflexion sont importantes car elles permettent de connaître la portance nécessaire de la chaussée et aussi parce que le seul facteur visuel ne permet pas de conclure sur l'état de la structure de chaussée.

Ces mesures peuvent être réalisées :

- **De préférence de manière continue** selon le mode opératoire D1 de la méthode d'essai LPC n° 39. Le pas de mesure est fixé par le type d'appareil.
 - ✓ Défectographe (NF P 98-200-3 à 5) avec un pas de mesure inférieur à 5m.
 - ✓ Curviamètre (NF P 98-200-7) avec un pas de mesure de 5m.

Le défectographe à châssis court (type 02 ou 03) doit être réservé à des chaussées souples, alors qu'un défectographe à châssis long (type 04 ou Flash) ou un curviamètre convient à tous les types de chaussées, et tout spécialement aux chaussées les plus rigides.

- De manière ponctuelle à l'aide :
 - ✓ De la poutre Benkelman (norme NF P 98-200-2) (Photo 9) sur les chaussées souples traditionnelles, inverses et bitumineuses épaisses,
 - ✓ Du FWD (Falling Weight Deflectometer ou défectomètre à masse tombante) sur tous les types de chaussées.[22]

Dans la plupart des projets routiers, lorsque les mesures de déflexions sont réalisées à l'aide de la poutre de Benkelman, elles sont faites en quinconce (droite, gauche, axe), suivant un pas régulier inférieur ou égal à 50 m. En effet, la déflexion se fait, la plupart du temps, pendant ou après la saison hivernale afin d'intégrer les comportements hydriques des matériaux. Cela permet d'estimer la qualité des matériaux en place et d'en faire une déduction. Ainsi les résultats obtenus lors de ces campagnes peuvent connaître un changement brusque des valeurs trouvées pendant la pluviométrie. Par ailleurs, la température et l'eau sont des facteurs déterminant dans l'interprétation des résultats de déflexion. Dans l'immédiat les valeurs de déflexion sont indispensables dans le dimensionnement de chaussée ; mais il joue un rôle dans la compréhension de la qualité structurale de l'état résiduel de la chaussée et permet d'observer l'évolution de ces mesures sur les dernières années.

Vu que la déflexion est un paramètre variable d'un point de mesure à un autre, le comportement d'une zone donnée homogène en déflexion est caractérisé par :

- La moyenne des déflexions maximales (d_{moy}) ;
- L'écart type des déflexions maximales (σd) ;
- Le seuil caractéristique à 97,5 % des déflexions maximales, appelé « déflexion caractéristique» (d_{car}) [23]

En outre, les valeurs mesurées de déflexion sont fonction de la température dans les matériaux bitumineux, de l'appareil de mesure et de la vitesse d'application de la charge (la vitesse prise ici est inférieure à 20 km/h).

Au terme des mesures de déflexion, on est appelé à caractériser ou classer ses dernières en suivant le tableau suivant :

Tableau 1- 2 Classes de déflexion

Classes de déflexion	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9
Seuils de déflexion Caractéristique en 1/100 mm	De 0 à 19	De 20 à 29	De 30 à 44	De 45 à 74	De 75 à 99	De 100 à 149	De 150 à 199	De 200 à 299	≥ 300

Par ailleurs, lorsqu'on parle de la déformabilité de la chaussée, on peut s'intéresser aujourd'hui tant à la déflexion, qu'au rayon de courbure R de la chaussée sous charge.

Si la déflexion d donne une indication sur la rigidité globale de la chaussée, le produit des deux grandeurs R et d permet de caractériser la rigidité relative du corps de chaussée par rapport au sol de fondation et, de ce fait, peut être utilisé dans l'évaluation de la qualité des chaussées à couche de base traitée.

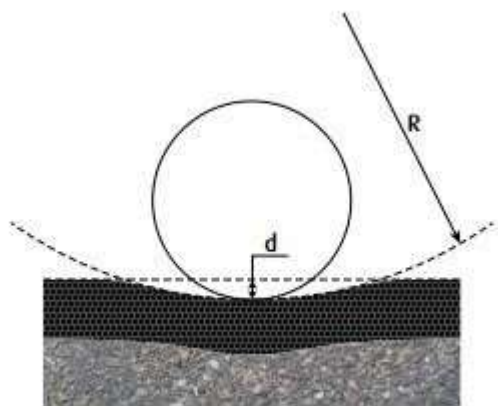


Figure 1- 7 Déflexion et rayon de courbure de la déformée sous une charge roulante

Compte tenu de la distribution des valeurs, le comportement d'une zone donnée homogène en rayon de courbure est caractérisé par la valeur médiane du rayon de courbure $R_{\text{méd}}$, le pourcentage de valeurs de rayons inférieures aux seuils définis par type de structure et le seuil caractéristique à 20 % des rayons (R_{car}), correspondant au 2^e décile).

On peut également classer le rayon de courbure suivant le tableau que voici :

Tableau 1- 3 classes des rayons de courbure

Classes de rayon de courbure	R1	R2	R3	R4	R5	R6
Seuils des rayons Caractéristiques à 20 % (en m)	< 200	De 200 à 399	400 à 799	800 à 1199	1200 à 1599	> 1600

- **Uni longitudinal et transversal**

La surface des chaussées peut présenter des irrégularités géométriques, principalement dues à des défauts de construction ou à des dégradations qui apparaissent en cours de vie de la chaussée sous l'effet du trafic PL.

L'ensemble de ces irrégularités plus ou moins prononcées et répétées constitue l'uni longitudinal et/ou l'uni transversal des chaussées. C'est un indicateur de la qualité d'usage

- **Les épaisseurs des couches.**

Le RADAR permet d'enrichir la connaissance de la structure représentative de la zone : homogénéité longitudinale (si besoin transversale), importance et localisation des hétérogénéités. Ainsi, il fournit les épaisseurs des couches de la structure en continu, et la position des défauts les plus importants.

Les mesures RADAR, sont réalisées selon la méthode d'essai LPC n° 42. Elles doivent être recalées par des carottages pour pouvoir être fiabilisées (ces seuls carottages ne suffisent pas à la caractérisation de la structure). À défaut, les informations recueillies ne sont que qualitatives, voire parfois inutilisable. Le RADAR détecte avec une bonne fiabilité :

- ✓ Les couches de natures différentes (bitumineuses, traitées aux liants hydrauliques, non traitées) et leurs interfaces ;
- ✓ Les variations d'épaisseur de ces couches et leurs épaisseurs globales (supérieures à 0,04 m à $\pm 0,005$ m).
 - o La présence de canalisations dans ou sous la chaussée ;
 - o La présence de cavités dans la chaussée ou dans le support proche sous la chaussée. Le RADAR détecte avec une fiabilité moyenne les interfaces de différentes couches d'un matériau de même nature, en particulier lors de différences de compacité (teneurs en vide ou en eau différentes). [24]

5.1.2 Phase 2 : Découpage de l'itinéraire en zones homogènes et Implantation des sections témoin

Une zone homogène fait référence à des données de situation (agglomération ou rase campagne), d'historique (structure, trafic, date de réalisation) et à des caractéristiques identiques de la chaussée. Le découpage en zones homogènes doit être réalisé à partir de prédécoupages issus :

- Des données de situation et des données d'historique ;
- Des dégradations ;
- Des déflexions éventuellement, des rayons de courbure mesurés,

L'idéal est de reporter l'ensemble des données disponibles sur un même schéma itinéraire, de façon synoptique.

Les cas particuliers suivants sont à noter :

- Pour les chaussées souples traditionnelles, la prise en compte du drainage, de la géométrie et des accotements est importante ;

- Pour les traverses d'agglomération, en raison de la complexité des zones d'études, les mêmes principes peuvent être retenus, mais avec des adaptations spécifiques à chaque cas. [25]

5.1.2.1 Prédécoupage à partir des données de situation et des données d'historique

Les paramètres à prendre en compte pour effectuer ce premier prédécoupage de l'itinéraire sont entre autres, les entrées et sorties d'agglomération, les changements de structure, de date de construction ou d'entretien, de trafic.

5.1.2.2 Prédécoupage à partir des dégradations

Il s'effectue visuellement sur le schéma itinéraire. Celui-ci est découpé en sections élémentaires de longueur constante (généralement 100 m) auxquelles on affecte la classe de dégradation correspondante (Fi, ORNi, AFFi, FTi) sous la forme d'un code graphique ou d'un code couleur en fonction de la gravité.[26]

5.1.2.3 Prédécoupage à partir des déflexions

Deux méthodes sont disponibles pour réaliser ce prédécoupage en sections élémentaires :

- Automatiquement, selon le mode opératoire D1 de la méthode d'essai LPC n° 39 ;
- Visuellement, par rapport aux valeurs caractéristiques du comportement : déflexion caractéristique.

Dans ce second cas, le schéma itinéraire est découpé en sections élémentaires de longueur constante (généralement 100 m) auxquelles on affecte la classe de déflexion (Di) correspondante sous la forme d'un code graphique ou d'un code couleur. Dans le cas particulier des chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, le découpage en zones de comportement différents devra prendre en compte la densité des pics de déflexion, c'est-à-dire le pourcentage de déflexions supérieures à un seuil et la déflexion moyenne.[27]

5.1.2.4 Prédécoupage à partir du rayon de courbure

Le schéma itinéraire est découpé en sections élémentaires de longueur constante (généralement 200 m) auxquelles on affecte la classe de rayon (Ri) correspondante sous la forme d'un code graphique ou d'un code couleur.

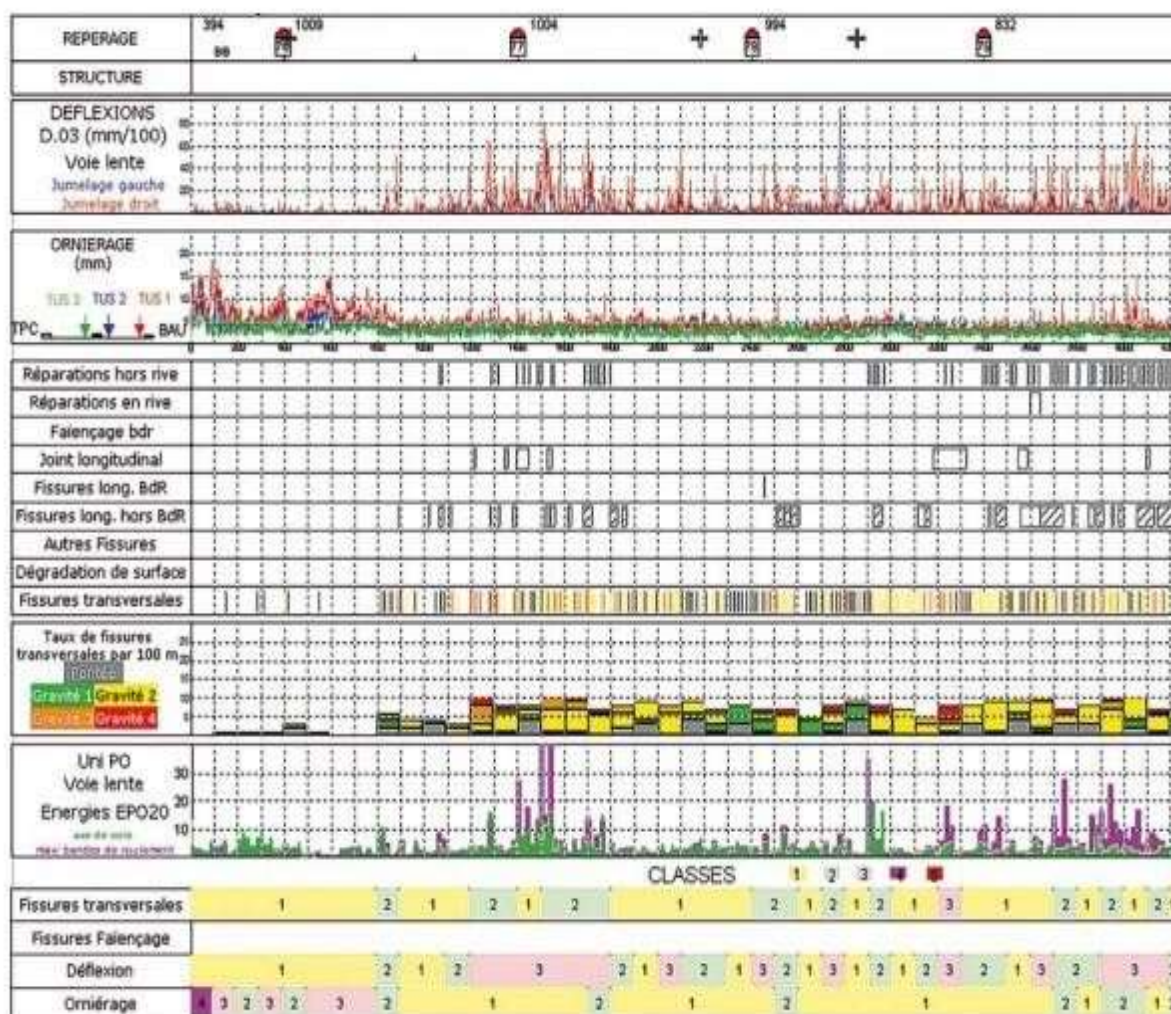
5.1.2.5 Prédécoupage à partir d'autres mesures en continu

Dans le cas où d'autres mesures en continu ont été réalisées sur l'itinéraire (RADAR, APL, TUS...), le schéma itinéraire est découpé en sections élémentaires de longueur constante (généralement 100 m) auxquelles on affecte la classe de données correspondante, sous la forme d'un code graphique ou d'un code couleur.

5.1.2.6 Détermination et caractérisation des zones homogènes

L'analyse synoptique des sections élémentaires en situation et données d'historique, dégradations, déflexions et rayons de courbure permet de définir des zones homogènes. Réalisé de façon fine dans un premier temps, cet exercice d'analyse doit être poursuivi par une étape d'agrégation des sections élémentaires pour disposer d'un nombre raisonnable de zones homogènes décrivant l'itinéraire (typiquement 1 à 4 par étude, de longueur minimale de 200 m, hors purge). Les extrémités de ces zones peuvent être redéfinies plus finement principalement en fonction des dégradations, des déflexions et des rayons de courbure individuels.

Une zone homogène peut suffire à décrire l'ensemble de l'itinéraire. Pour chaque zone homogène ainsi définie, on recalcule les pourcentages de dégradation et valeurs caractéristiques (déflexion et rayon de courbure) pour l'ensemble de la zone.[28]



% Fissures trans- versales	Très grave	0,1	0,5	0,7	0,6
	Grave	0,2	1,9	0,3	0,6
% Fissures Faiççage	0				
Déflexion caractéristique	17	41	77	47	
Orniérage - moyenne	10	6	5	5	

Figure 1- 8 Définition des zones homogènes et recalcul des paramètres caractéristiques par zone.

5.1.2.7 Implantation des sections témoins

Les sections témoins doivent permettre de comprendre les origines des dégradations constatées sur la zone homogène. Elles doivent être choisies pour leur représentativité de l'ensemble de la zone. Une

zone homogène sera ainsi analysée à travers une ou deux sections témoins ; une section témoin peut être l'ensemble de la zone homogène.

Les contraintes de sécurité et d'exploitation de la route sont prioritaires dans le choix de l'implantation de ces sections. L'implantation de section témoin en sommet de côte ou en zone de visibilité faible est à proscrire.

Les sections témoins peuvent être implantées lors de la visite d'observation de l'environnement[29]

5.1.3 Phase 3 : Investigations complémentaires sur les sections témoins

Sur les sections témoins il est prévu certaines investigations complémentaires dont entre autres on a :

- Mesures de rayons de courbure sur zones témoins (si on ne dispose pas de mesure en phase 1 : 10 points de mesures par zone de 200m de points de mesure par zone de 200 m).
- Mesures de déflexion sur fissures transversales selon le mode opératoire D4 de la méthode d'essai LPC n° 39
- Sondages : Des sondages peuvent être réalisés dans le corps des chaussées. Outre les épaisseurs des couches, ceux-ci permettent de prélever la GNT et le sol pour identification en vue de leur classification suivant le GTR la procédure d'exécution des sondages est décrite en annexe 5 du guide (IDRRIM, 2016) [30]



Figure 1- 9 Exemple de sondage de chaussée souple

Carottages : Ils ont pour objet

- De déterminer les caractéristiques générales des couches liées de la section témoin (nature et état des matériaux, épaisseurs, conditions aux interfaces, performances mécaniques) ;
- D'observer l'origine et la propagation des fissures (par le bas ou par le haut) ;
- D'expliquer les défauts des points singuliers. Les carottages sont réalisés suivant la méthode LPC n°43. Le diamètre des carottes doit être supérieur à 140 mm La procédure d'exécution, de prélèvement et d'analyse des carottes est présentée en annexe 6 du guide (IDRRIM, 2016).
Si la vérification de la nature des interfaces est litigieuse, on fait l'essai d'ovalisation sur les chaussées à fort trafic.

5.2 Diagnostic et modélisation

A l'issus du découpage en zone homogène en fonction des dégradations et des déflexions, et la détermination de la section témoin, il faudrait établir un lien de causalité entre les indicateurs d'état tels que la nature des sols d'infrastructure, l'épaisseur totale de la structure de chaussée, la conformité des matériaux aux normes, la perte de portance suite au drainage, la nature et l'étendue des fissurations, orniérage et l'âge du revêtement, ... et le comportement réel de la chaussée. Ainsi, il est effectué des sondages sur la chaussée existante réparties suivant les zones homogènes définies et sur les zones de dégradation spécifique en vue d'obtenir les éventuelles causes des dégradations constatées.

Par suite, on est appelé à effectuer une identification complète de matériau pour le compte de chaque sondage. Il s'agit entre autres des essais :

- Analyse granulométrique ;
- Limites d'Atterberg ;
- Proctor ;
- CBR.

Après l'obtention des résultats d'essais, il a lieu d'effectuer une étude du diagnostic et le calcul de l'endommagement, qui sont propres à chaque chaussée au vu des critères d'obtention des zones homogènes et de la section témoin. [31]

5.2.1 Etude du diagnostic

L'appréciation de la qualité résiduelle de la chaussée est incontournable dans la procédure de renforcement des chaussées. C'est ainsi que selon le manuel du CEBTP – LCPC de 1980 pour le renforcement des chaussées dans les pays tropicaux, cette appréciation se base sur la nature des dégradations ayant trait à la structure de chaussée (fissures et déformations) et leur étendue sur un segment de longueur. En fonction de l'ampleur de la dégradation s'en suit une notation de « l'état apparent » du segment.

Ainsi, conformément au CEBTP, l'étude du diagnostic peut être basée sur la détermination de l'indice de qualité (Q_i) du tronçon étudié. Le croisement de l'état de dégradation et de la valeur de la portance permet d'accéder à l'indicateur de qualité résiduelle de la chaussée Q_i .

L'association des états apparents tirés de relevé visuel de dégradation et des déflexions caractéristiques tous deux calculé au kilomètre permet d'obtenir les indices de qualité pour chaque section. Ces indices de qualité permettent d'orienter le choix des solutions de remise en état de la route. La détermination des indices qualité se fait sur la base du tableau suivant : [32]

Tableau 1- 4 indices qualité

		Déflexion		
		d1 Faible	d2 Elevé	
Etat apparent de la chaussée compte tenu des dégradations	Bon : 1	Q1	Q2	Q3
	Fissuré non déformé : 2 – 3	Q2	Q3	Q4
	Déformé et fissuré : 4 – 7	Q3	Q4	Q5

Avec comme correspondance :

- Q1 et Q2 pour entretien,
- Q3 pour signifier qu'il y a des doutes pour décider du traitement à appliquer
- Q4 pour le renforcement selon les critères du CEBTP.

Par ailleurs, la définition au préalable des zones homogènes constitue un pré diagnostic qui instruit suffisamment sur les actions à mener pour le compte de chaque chaussée.

5.2.2 Calcul de l'endommagement

Le calcul de l'endommagement peut permettre de renforcer une hypothèse sur un type de dégradation donné ou d'en donner une explication probable de l'apparition prématurée de celle-ci. Ce calcul peut donc se faire à base des données concernant l'historique de la chaussée en termes de trafic et des dates et de natures des travaux.

5.2.2.1 Endommagement du sol support et des couches non traitées

La cause majeure des dégradations dans les chaussées (en particulier à structure souple) est la déformation permanente du sol support dû aux effets du passage d'essieux des véhicules lourds. En effet, lorsque le sol support reçoit un nombre de passage supérieur à sa limite, la déformation permanente devient alors trop importante occasionnant ainsi la ruine prématurée de l'ouvrage. Ainsi pour chaque phase de fonctionnement de la chaussée, ce nombre d'essieux admissible noté $NE_{phase\ i}$ s'obtient à partir de la formule suivante :

$$NE_{phase\ i} = (\varepsilon_{z\ phase\ i} / A)^{-\frac{1}{0,222}}$$

Avec :

$A = 12\ 000$ mdéf pour un trafic T supérieur ou égal à T_3 ;

$A = 16\ 000$ mdéf pour un trafic T inférieur à T_3

Avec $\varepsilon_{z\ phase\ i}$ la déformation verticale à la base du sol support ou de la couche granulaire la plus déformable générée par l'essieu standard de 130 kN. Le nombre de poids lourds empruntant la chaussée pendant cette phase i est notée $n_{phase\ i}$. L'endommagement de la structure pendant la phase i , $d_{phase\ i}$, est alors calculée comme suit :

$$d_{phase\ i} = n_{phase\ i} * CAM / NE_{phase\ i}$$

Cette démarche de calcul de l'endommagement du sol support vaut également pour toute autre couche de matériau non traité ; bien que cela soit habituellement le cas, la couche de sol n'est pas nécessairement la couche la plus endommagée.

5.2.2.2 Endommagement des matériaux bitumineux

Dans le cas des matériaux bitumineux, on pourrait aussi assister à la dégradation des couches concernées ayant pour cause la ruine par fatigue de ses dernières, sous le passage répété des essieux de poids lourds. Pour chacune des phases de fonctionnement de la chaussée, le nombre d'essieux de référence admissible par la couche bitumineuse est noté $NE_{MB \text{ phase } i}$. Il est obtenu en calculant la déformation en extension $\varepsilon_t \text{ phase } i$ à la base de la couche de fondation (voire de la couche de base si la fondation est en matériaux granulaires), générée au passage de l'essieu de référence de 130 kN, puis en utilisant la relation :

$$NE_{MB \text{ phase } i} = \left(\frac{\varepsilon_t \text{ phase } i}{\varepsilon_6 * k_s * k_c * k_r} * \sqrt{\frac{E(\theta_{eq})}{E(10^\circ C)}} \right)^{\frac{1}{b}} * 10^6$$

Le nombre de poids lourds ayant réellement emprunté la chaussée pendant cette phase i est noté $n_{\text{phase } i}$. Il est converti en un nombre équivalent de passages de l'essieu de référence, en le multipliant par le coefficient d'agressivité moyen du poids lourd CAM_{MB} pour les couches bitumineuses.

L'endommagement cumulé des couches bitumineuses pendant la phase i , noté $d_{MB \text{ phase } i}$, est alors calculé comme suit :

$$d_{MB \text{ phase } i} = n_{\text{phase } i} * CAM_{MB} / NE_{MB \text{ phase } i}$$

Ce calcul est mené pour chaque couche bitumineuse sollicitée en extension.

5.2.2.3 Endommagement des matériaux traités aux liants hydrauliques

La dégradation dans le cas des Matériaux traités aux liants hydrauliques est généralement générée par la ruine par fatigue des couches traitées aux liants hydrauliques, sous le passage répété des essieux de poids lourds.

Pour chacune des phases de fonctionnement de la chaussée, le nombre d'essieux de référence admissible par la couche hydraulique est noté $NEMTLH \text{ phase } i$. Il est obtenu en calculant la contrainte en traction

$\sigma_{t \text{ phase } i}$ à la base de la couche hydraulique, générée au passage de l'essieu de référence de 130 kN, puis en utilisant la relation :

$$NE_{MB \text{ phase } i} = \left(\frac{\sigma_{t \text{ phase } i}}{\sigma_6 * k_s * k_c * k_r * k_d} \right)^{\frac{1}{b}} * 10^6$$

Le nombre de poids lourds ayant réellement emprunté la chaussée pendant cette phase i est noté $n_{\text{phase } i}$. Il est converti en un nombre équivalent de passages de l'essieu de référence, en le multipliant par le coefficient d'agressivité moyen du poids lourd CAM_{MTLH} pour les couches traitées aux liants hydrauliques.

L'endommagement cumulé des couches hydrauliques pendant la phase i , noté $d_{MTLH \text{ phase } i}$, est alors calculé comme suit :

$$d_{MTLH \text{ phase } i} = n_{\text{phase } i} * CAM_{MTLH} / NE_{MTLH \text{ phase } i}$$

Ce calcul est mené pour chaque couche hydraulique sollicitée en traction.

5.2.3 Cohérence entre l'endommagement calcul et le diagnostic

Une chaussée est considérée comme peu dégradée si l'endommagement de chacune de ses couches est inférieur à 1, et fortement dégradée si l'endommagement d'au moins une de ses couches est supérieur à 1.

Pour chaque zone homogène et en fonction des données de la section témoin, la cohérence entre l'endommagement calculé (si ce calcul est possible) et les dégradations observées doit être vérifiée. En cas de désaccord, on pourra chercher à adapter la modélisation de la structure en ajustant le module du sol support et les conditions d'interface en veillant à conserver un modèle de chaussée réaliste.

5.3 Conception de solution de travaux

5.3.1 Objectifs des travaux

L'objectif de la conception de la solution de travaux est à définir avec le maître d'ouvrage en fonction du diagnostic établi. Deux cas se présentent :

- Soit une réhabilitation ou une remise en état si la chaussée a évolué au-delà des seuils de dégradation admissibles ;

Les dégradations, nombreuses, concernent la structure et ne permettent pas un entretien durable des seules caractéristiques de surface ; l'analyse du dommage structurel de la chaussée valide la ruine de la chaussée. Dans ce cadre, le maître d'ouvrage peut opter pour une conception au choix :

- ✓ Soit avec une stratégie d'investissement lourd, caractérisée par une durée longue (20 à 30 ans), un faible risque de dimensionnement et un entretien ultérieur réduit aux seules caractéristiques de surface ;
- ✓ Soit avec une stratégie d'investissement faible, caractérisée par une durée courte (10 à 15 ans), un risque de dimensionnement élevé et une remise en état des caractéristiques structurelles et de surface à échéance de 10 à 12 ans.
- Soit un entretien des caractéristiques de surface si la chaussée a moyennement évolué.

Les dégradations concernant la structure ici sont encore peu nombreuses, inférieures aux seuils admissibles, mais l'évolution est plus rapide que la normale (en raison par exemple d'un léger sousdimensionnement, d'un trafic augmentant plus rapidement que prévu, de matériaux de moins bonne qualité...).

De plus, le diagnostic résultant de l'auscultation et l'évaluation du dommage valident le maintien des caractéristiques structurelles résiduelles à un niveau suffisant pendant toute la durée de l'entretien envisagé. Dans ce cadre, le maître d'ouvrage peut opter pour une des trois démarches de conception suivantes :

- ✓ Travaux limités à un entretien de surface, suivis d'une remise en état lors de l'échéance d'entretien suivant. Il n'y a pas de dimensionnement mécanique ;
- ✓ Conception du dimensionnement de l'entretien compensant les défauts ou adaptant progressivement la structure à l'objectif initial de durée de service.
- ✓ Conception du dimensionnement de l'entretien prenant en compte une modification des conditions d'exploitation de la chaussée (modification du trafic supporté, prolongation de la durée de service).

5.3.2 Prise de décision pour la réhabilitation

À ce stade, l'étude d'auscultation a permis de poser un diagnostic sur l'état de la chaussée, statuant sur la nécessité de la réhabiliter. Deux cas se présentent :

- L'endommagement de toutes les couches en place est inférieur à 1 : on cherche à valoriser le capital dommage résiduel de la chaussée en calculant le renforcement selon la loi de Miner de cumul des dommages (c'est également le cas si seule la couche de surface est dégradée suite à son décollement ; elle est alors ôtée par fraisage) ;
- L'endommagement d'au moins une des couches en place est supérieur à 1 : le renforcement de la chaussée se calcule comme une chaussée neuve, reposant sur tout ou partie de l'ancienne chaussée.

Deux types de renforcement sont à distinguer, qui conditionnent la conduite du calcul :

- La chaussée peut être rechargée sans contrainte de seuils ou de remise à niveau des équipements : **Renforcement** ;
- La chaussée est soumise à une contrainte de seuils qui nécessite un décaissement (total ou partiel) : **Reconstruction**.

Le **Retraitement** en place de la chaussée existante peut également être envisagé lorsque les matériaux du site s'y prêtent.

5.3.3 Retraitement des chaussées

Comme dit précédemment, lorsque les matériaux du site s'y prêtent, on peut opter pour le retraitement, qui peut s'apparenter aux décaissements partiel ou total. Cette configuration doit être envisagée dans tous les cas, afin d'optimiser le réemploi des matériaux en place chaque fois que cela s'avère possible. Cette technique nécessite une étude de faisabilité, une étude de formulation et un dimensionnement. En effet, les conditions à remplir sont :

- La résistance à la compression R_c doit être supérieure à 2,5 Mpa pour permettre la remise en circulation de la chaussée ;
- Le rapport $\frac{R_{cimmersion}}{R_{C60}} > 0,6$ ou 0,8 selon la valeur du VBS pour garantir l'insensibilité à l'eau ;
- Et les performances mécaniques doivent être au minimum de classe 5.

Alors, pour atteindre ses performances, on se doit au préalable d'effectuer des études de laboratoire sur les matériaux de la chaussée existante afin de définir les dosages nécessaires qui vont avec.

A l'issu des prélèvements, on effectue l'essai d'aptitude selon la norme NE P 94 – 100 pour valider la faisabilité technique en mesurant la résistance mécanique et le gonflement. Ensuite, on passe aux essais d'identification : Analyse granulométrique, Proctor, limites d'Atterberg puis on choisit le liant

hydraulique à utiliser. Enfin, à partir d'une formule empirique de retraitement, on détermine la quantité de liant à épandre sur le m² pour obtenir les performances souhaitées :

$$Q \left(\frac{kg}{m^2} \right) = e(m) * \rho d \left(\frac{t}{m^2} \right) * \frac{1000 * d\%}{100 - d\%}$$

Avec

Q : la quantité de liant épandu ;

ρd : la densité sèche du matériau ;

e : l'épaisseur du matériau traité ;

d : dosage du liant.

Dans la mise en œuvre, le processus de retraitement suit les opérations suivantes :

La scarification ;

L'épandage ;

Le malaxage ;

Le réglage ;

Le compactage ;

Mettre en œuvre un enrobé bitumineux en couche de surface.

Cette méthode de réhabilitation présente des avantages économiques, techniques, sociaux, et surtout environnementaux, s'inscrivant ainsi dans la démarche de développement durable.

5.3.4 Reconstruction des chaussées

Cette méthode de réhabilitation, comme explique précédemment, consiste au décaissement du corps de chaussée existant, et de proposer par suite une nouvelle structure capable de répondre aux besoins de la chaussée à long terme.

Les chaussées dans ce cas sont donc dimensionnées comme des chaussées neuves.

5.3.5 Renforcement des chaussées

Dès lors qu'on opte pour le renforcement de la chaussée trois configurations se présentent :

- Le rechargement (Figure 1-10) ; c'est généralement la configuration qui conduit à un apport de matériaux neufs minimal. Elle est à choisir dès que l'environnement de la chaussée le permet (pas ou peu de passages supérieurs, pas de problème de glissières...) et que le maître d'ouvrage l'autorise ;
- Le décaissement partiel (Figure 1-11 et Figure 1-12) ; c'est la configuration à envisager dès que la structure en place présente des décollements d'interface en partie supérieure (dans les quinze premiers centimètres environ), afin de les supprimer par fraisage et apport de couches neuves et collées. C'est également la solution à retenir en cas de contraintes de seuil fortes ;
- Le décaissement total (Figure 1-13) ; cette configuration répond aux mêmes exigences que le décaissement partiel, poussé à l'extrême en raison d'un abaissement du fil rouge, ou d'une insuffisance structurelle notoire de la chaussée existante ;

Ancienne structure	Structure renforcée	Sollicitations dimensionnantes	Épaisseur ; module ; coef. Poisson	Interface
	Couche de surface		H11 ; E11 ; ν 11	Collée
	Couche d'assise	$S_{T12 \text{ inf}}$	H12 ; E12 ; ν 12	Collée ou semi-collée ou décollée
Couche de surface	Couche de surface	$S_{T1 \text{ inf}}$	h1 ; E1 ; ν 1	Collée ou semi-collée ou décollée
Assise traitée	Assise traitée	$S_{T2 \text{ inf}}$	h2 ; E2 ; ν 2	Collée
Grave non traitée	Grave non traitée	$S_{T3 \text{ sup}}$	h3 ; E3 ; ν 3	Collée
Sol support	Sol support	$S_{Tn \text{ sup}}$	Hn = 6 m ; En ; ν n	Collée
Substratum rigide	Substratum rigide		Infini ; E = 10 000 MPa ; ν = 0,25	

Figure 1- 10 Modélisation d'un rechargement

Ancienne structure	Structure renforcée avec décaissement partiel dans l'assise traitée	Sollicitations dimensionnantes	Épaisseur ; module ; coef. Poisson	Interface
	Couche de surface		H11 ; E11 ; ν 11	Collée
Couche de surface	Couche d'assise	$S_{T12 \text{ inf}}$	H12 ; E12 ; ν 12	Collée ou semi-collée ou décollée
Assise traitée	Assise traitée	$S_{T21 \text{ inf}}$	h21 ; E2 ; ν 2	Collée
Grave non traitée	Grave non traitée	$S_{T3 \text{ sup}}$	h3 ; E3 ; ν 3	Collée
Sol support	Sol support	$S_{Tn \text{ sup}}$	Hn = 6 m ; En ; ν n	Collée
Substratum rigide	Substratum rigide		Infini ; E = 10 000 MPa ; ν = 0,25	

Figure 1- 11 Modélisation d'un décaissement partiel dans un matériau traité

Ancienne structure	Structure renforcée avec décaissement partiel dans la grave non traitée	Sollicitations dimensionnantes	Épaisseur ; module ; coef. Poisson	Interface
	Couche de surface		H11 ; E11 ; ν 11	Collée
Couche de surface	Couche d'assise	$S_{T12 \text{ inf}}$	H12 ; E12 ; ν 12	Collée
Assise traitée				
Grave non traitée	Grave non traitée	$S_{Z3 \text{ sup}}$	h31 ; E31 ; ν 31	Collée
Sol support	Sol support	$S_{Zn \text{ sup}}$	Hn = 6 m ; En ; ν n	Collée
Substratum rigide	Substratum rigide		Infini ; E = 10 000 MPa ; ν = 0,25	

Figure 1- 12 Modélisation d'un décaissement partiel dans un matériau non traité

Ancienne structure	Structure renforcée avec décaissement total	Sollicitations dimensionnantes	Épaisseur ; module ; coef. Poisson	Interface
	Couche de surface		H11 ; E11 ; ν 11	Collée
Couche de surface	Couche d'assise	$S_{T12 \text{ inf}}$	H12 ; E12 ; ν 12	Collée
Assise traitée				
Grave non traitée	Couche de réglage ou couche de forme (à définir selon le cas)	$S_{Zn \text{ sup}}$	Hn = 6 m - X ; En ; ν n	Collée
Sol support				
Substratum rigide	Substratum rigide		Infini ; E = 10 000 MPa ; ν = 0,25	

Figure 1- 13 Modélisation d'un décaissement total de l'ancienne chaussée

Il s'agira dans ce cas aussi de dimensionner la chaussée renforcée comme des chaussées neuves mais en prenant en compte l'activité ou les travaux à mener sur l'ancienne chaussée. Cela conduit donc en fonction des pathologies observées et obtenues au niveau de chaque type de chaussée, à définir un nouveau modèle pour le renforcement et à prendre en compte les paramètres d'entrées puis les conditions de vérification des sollicitations avec celles admissibles.

Chapitre 2 : Matériels et méthodes

1 Présentation du milieu d'étude

Le site expérimental étudié dans le cadre de cette recherche constitue un environnement idéal pour analyser les causes spécifiques des dégradations précoces observées sur les routes de la République du Bénin.

L'objectif global de ce projet est de proposer une solution de renforcement adaptée à la structure de la route **OUIDAH-SAVI**, fortement touchée par ces dégradations prématurées. Pour y parvenir, une étude approfondie sera menée afin de comprendre les mécanismes responsables des dégradations, tout en identifiant les améliorations techniques nécessaires pour garantir une meilleure durabilité et performance de la route.

Notons que cette route est située dans la **commune de OUIDAH**. Cette commune est localisée entre 2° et 2°15' de longitude Est 6°15' et 6°30' de latitude Nord. Elle est située dans le Département de l'Atlantique et s'étend sur une superficie de 364 km². Elle est limitée au Sud par l'Océan Atlantique, à l'Est par la Commune d'Abomey-Calavi, à l'Ouest par la Commune de Grand-Popo et au Nord par les Communes de Kpomassè et ToriBossito.

En revanche, elle est située au sud-ouest du Bénin et jouit d'un climat de type guinéen ou subéquatorial à deux saisons sèches et deux saisons de pluie alternées à durées inégales. La répartition des saisons au cours de l'année se présente comme suit :

- grande saison des pluies d'avril à juillet ;
- petite saison sèche qui a lieu entre août et septembre ;
- petite saison pluvieuse qui dure d'octobre à novembre ;
- grande saison sèche de décembre à mars.

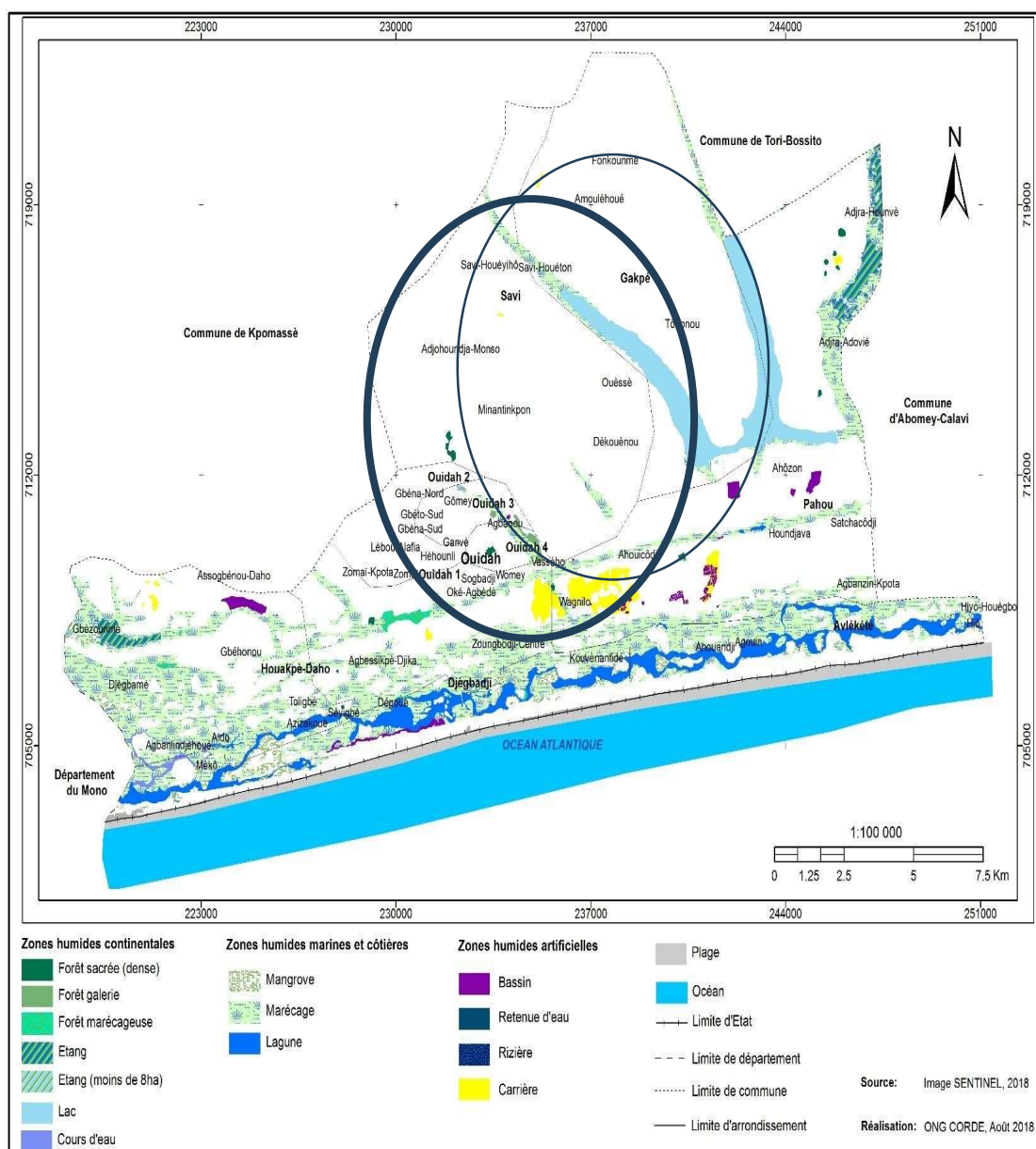


Figure 2- 1 Carte géographique

2 Diagnostic

2.1 Classe des dégradations

On note sur le tronçon **OUIDAH-SAVI**, que l'état global de la route est acceptable et elle est carrossable sur une bonne partie du linéaire malgré son état de fatigue très avancé.

Tableau 2- 1 Resultats des relevés des dégradations sur l'axe OUIDAH SAVI

N°	REPERE D'IDENTIFICATION DES POINTS A TRAITER					DIMENSION EN METRES					TYPE DE PTB		OBSERVATIONS
	PK POINTUEL	PK DEBUT	PK FINAL	POINT IDENTIFICATION DE CHAQUE SECTION DE PTB	NOMBRE D'ELEMENT EN DE SOUS FIGURE PAR SECTION DE PTB	LONGUEUR	LARGEUR	SURFACE PARTIELLE	SURFACE TOTAL	PONCTUEL	GRAND MASSE		TYPE DE FIGURE OU CHEMATISSATION
1	0+015			M/MIT/01/PTB	1	1,80	1,50	2,70		X			Nid de poule
2	0+050			M/MIT/02/PTB	1	3,30	1,20	3,96		X			Nid de poule
3	0+100			M/MIT/03/PTB	1	1,00	0,80	0,80		X			Nid de poule
4	0+320			M/MIT/04/PTB	1	75,00	9,50	712,50			X		Nid de poule y compris faïençage très prononcé

5	0+425			M/MIT/05/PTB	1	17,70	1,30	23,01		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
6		0+500		M/MIT/06/PTB	1	8,40	4,55	38,22		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
7				M/MIT/07/PTB	1	5,45	5,20	28,34		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
8				M/MIT/07.1/PTB	1	1,70	1,20	2,04		X		Nid de poule
9				M/MIT/07.2/PTB	1	1,70	1,50	2,55		X		Nid de poule
10				M/MIT/07.3/PTB	1	1,70	1,20	2,04		X		Nid de poule
11				M/MIT/07.4/PTB	1	1,70	1,20	2,04		X		Nid de poule

12			0+580	M/MIT/08/PTB	1	8,99	1,80	16,18		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
13	0+610			M/MIT/09/PTB	1	20,10	2,00	40,20		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
14		0+620		M/MIT/10/PTB	1	29,00	3,92	113,68		X		Nid de poule y compris faïençage très prononcé
15				M/MIT/11/PTB	1	5,10	3,62	18,46		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
16			0+700	M/MIT/11bis/PTB	1	1,98	0,95	1,88		X		Nid de poule

17	0+725			M/MIT/12/PTB	1	3,35	3,15	10,55		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
18	0+730			M/MIT/12bis/PTB	1	14,00	10,00	140,00		X		Nid de poule y compris faïençage très prononcé
19	0+810			M/MIT/13/PTB	1	10,38	2,98	30,93		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
20	0+830			M/MIT/13.1/PTB	1	1,20	1,20	1,44		X		Nid de poule
21	0+840			M/MIT/13.2/PTB	1	1,70	1,20	2,04		X		Nid de poule
22	1+110			M/MIT/14/PTB	1	4,40	2,00	8,80		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée

23	1+150			M/MIT/15/PTB	1	7,70	1,80	13,86		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
24	1+170			M/MIT/15.1/PTB	1	12,20	2,80	34,16		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
25	1+210			M/MIT/15.2/PTB	1	1,50	1,00	1,50		X		Nid de poule
26	1+250			M/MIT/16/PTB	1	7,20	1,80	12,96		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
27	1+270			M/MIT/17/PTB	1	3,20	3,20	10,24		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée

28	1+300			M/MIT/18/PTB	1	3,65	2,12	7,74		X		Nid de poule
					2	2,71	2,50	6,78		X		Nid de poule
29	1+450			M/MIT/19/PTB	1	22,82	1,80	41,08		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
30	1+525			M/MIT/20/PTB	1	3,65	1,80	6,57		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
					2	1,40	0,95	1,33		X		Nid de poule
31	1+530			M/MIT/21/PTB	1	3,00	2,47	7,41		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
32	1+545			M/MIT/22/PTB	1	2,90	2,10	6,09		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée

					2	6,47	1,60	10,35		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
33	1+560			M/MIT/23/PTB	1	2,20	1,85	4,07		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
					2	4,80	2,36	11,33		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
34	1+585			M/MIT/24/PTB	1	5,20	1,10	5,72		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
					2	2,80	2,10	5,88		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée

					3	2,58	0,90	2,32		X		Nid de poule
35	1+600			M/MIT/25/PTB	1	1,90	1,85	3,52		X		Nid de poule
36	1+615			M/MIT/25bis/PTB	1	3,80	1,20	4,56		X		Nid de poule
37	1+625			M/MIT/26/PTB	1	1,60	1,50	2,40		X		Nid de poule
38	1+650			M/MIT/27/PTB	1	15,30	1,75	26,78		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
39	1+700			M/MIT/28/PTB	1	10,25	1,69	17,32		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
40				M/MIT/29/PTB	2	2,15	2,10	4,52		X		Nid de poule
41				M/MIT/30/PTB	3	6,40	5,62	35,97		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée

42	1+800			M/MIT/31/PTB	1	40,12	1,80	72,22		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
43	1+840			M/MIT/32/PTB	1	1,35	1,30	1,76		X		Nid de poule
44	1+900			M/MIT/33/PTB	1	1,60	1,43	2,29		X		Nid de poule
45				M/MIT/33bis/PTB	2	11,87	1,85	21,96		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
46	2+000			M/MIT/34/PTB	1	35,68	8,75	312,20			X	Nid de poule y compris faïençage très prononcé
47				M/MIT/34bis/PTB	2	2,20	1,40	3,08		X		Nid de poule

48				M/MIT/35/PTB	3	12,40	2,52	31,25		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
49	2+020			M/MIT/35bis/PTB	1	2,42	1,50	3,63		X		Nid de poule
50	2+400			M/MIT/36/PTB	1	3,90	2,32	9,05		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
51	2+600			M/MIT/37/PTB	1	10,02	4,00	40,08		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
52	2+625			M/MIT/38/PTB	1	2,86	2,60	7,44		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée

53	5+525			M/MIT/39/PTB	1	2,87	2,62	7,52		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
54				M/MIT/40/PTB	2	16,60	2,65	43,99		X		Nid de poule y compris fissuration très prononcée
55	5+525			M/MIT/41/PTB	1	1,90	1,70	3,23		X		Nid de poule
									2046,5			

D'après le résultat visuel des dégradations selon l'ETUDE DU TRAFIC OUIDAH SAVI TORI ALLADA on a :

PK	Description	Classe de fissuration transversale	Classe de fissuration longitudinale /faïençage
PK0+000 - PK0+840	Beaucoup de zones dégradées avec par endroits des réparations superficielles assez importantes	FT2/FT3	F3/F4/F5

PK 1+110 - PK 2+625	Zone instable caractérisée par une chaussée entièrement dégradée	FT3	F4/F5
PK 5+525 - PK 5+525	Beaucoup de dégradations	FT2	F4/F5

3 Mesure de la déflexion :

La déflexion est un critère global de portance d'un sol ou d'une chaussée ; c'est la déformation verticale que subit un point de la surface du sol ou de la surface de la chaussée au passage d'une charge, généralement constituée du jumelage simple de l'essieu de référence autorisé dans le pays considéré. Au Bénin, l'essieu de référence utilisé pour les mesures de déflexion est celui de 13 tonnes.

3.1 Principe de l'essai :

La déflexion est fonction de la distance et de la charge au point considéré. Sa mesure consiste à fixer en un point de la chaussée, un capteur destiné à mesurer le déplacement vertical en ce point. On approche progressivement du capteur une charge roulante qui, à un moment donné passe à proximité immédiate de celui-ci, puis s'en éloigne. La charge mobile induit un bassin de déflexion naturel. La surface de cette zone et de sa profondeur sont fonction du type et de l'état de la structure ainsi que de la valeur de la charge.

La mesure statique et ponctuelle de la déformation verticale d'une structure de chaussée, sous la charge d'un essieu de véhicule, est effectuée, généralement, par un système balancier telle que la poutre de BENKELMAN.

3.2 Mesure in situ :

3.2.1 Principe de la poutre Benkelman

La mesure de déflexion avec la poutre BENKELMAN est une opération manuelle. Pour y parvenir, nous devons disposer d'un camion chargé à 13 Tonnes à l'essieu arrière (essieu standard), d'une poutre et d'une équipe de techniciens. La poutre est composée de deux parties :

- le bâti en partie fixe, constitué d'un bras de 1,50 m environ, monté sur un trépied. Le bâti a un châssis sur lequel est monté un comparateur mécanique ou électronique,
- le fléau en partie mobile se compose de deux demi-poutres de forme triangulaire. L'assemblage des deux demi-poutres forme une ferme de 4,00 m environ pouvant osciller autour de l'axe de rotation porté par le bâti.



Figure 2- 2 Poutre Benkelman

3.2.2 Traitement des mesures

Pour des tronçons de grande longueur, on effectue le lissage des valeurs moyennes et caractéristiques. Le lissage permet de mieux appréhender les évolutions de la mesure par grandes zones. Pour des tronçons courts, on calcule :

- une valeur moyenne,
- une valeur caractéristique,
- un histogramme simple et cumulé.

Si le nombre de mesure est supérieur à 20, on peut calculer des valeurs caractéristiques de la déflexion D90, D95 et D98 pour lesquelles la probabilité de dépassement de la déflexion est respectivement de 10%, 5% et 2%.

La valeur caractéristique définie comme suit est celle que nous retenons :

$$D90 = d + 1,3 \sigma$$

Où :

D90 est la déflexion caractéristique

d = déflexion moyenne d'une série statistique donnée

$$d = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} = \frac{\sum_1^n d_i}{n}$$

σ = écart type.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (d_i - d)^2}{n - 1}}$$

L'exploitation statistique donne deux valeurs critiques (seuils de déflexions) :

d1 est la valeur en-dessous de laquelle on considère que la structure se comporte d'une façon satisfaisante.

d2 est la valeur au-dessus de laquelle on considère que la structure se comporte très mal (présente de sérieux défauts de portance).

Compte tenu des valeurs des différents pays de l'Afrique de l'Ouest consignées dans [12] et des observations visuelles sur la route à réhabiliter, nous allons adopter les seuils de déflexions critiques suivants : $d1=60/100\text{mm}$ et $d2 = 85/100 \text{ mm}$.

Cela nous permet de préconiser, par zones, la qualité des structures ci-après pour la chaussée existante :

Tableau 2- 2 Qualité de la chaussée en fonction de la déflexion caractéristique

Déflexion caractéristique dc (1/100 mm)	< 60	Entre 60 et 85	>85
Qualité des structures	Bonne	Douteuse	Mauvaise

La note de qualité de la chaussée découle du croisement de la valeur de l'indice IS et celle de la déflexion. La déflexion est classée en trois (03) catégories déterminées par les seuils d1 et d2. Le tableau suivant définit les notes de qualité.

Tableau 2- 3 Grille de décision

Déflexion	d1 d2		
Indice de dégradation IS de surface	Bonne	Douteuse	Mauvaise
1-2 : Peu ou pas de fissures ou pas de déformation	Q ₁	Q ₂	Q ₃
3-4 : Fissures sans ou avec peu de déformation et déformations sans fissures	Q ₂	Q ₃	Q ₄
5- 6-7 : Fissures et déformation	Q ₃	Q ₄	Q ₅

Chapitre 3 : Résultats et discussions

1 Introduction

Afin d'évaluer l'état de la chaussée sur l'axe routier Ouidah-Savi, une auscultation visuelle a été menée sur plusieurs segments du tronçon. Cette inspection a permis de relever les différentes formes de dégradations présentes, d'identifier leurs localisations exactes et de quantifier leur ampleur. Les résultats obtenus servent de base à une analyse approfondie pour comprendre les causes des dommages et proposer des solutions de renforcement adaptées.



Figure 3- 1 Nid de poule observé au niveau du 0+725



Figure 3- 2 Faiëncage observé au niveau du PK 1+250



Figure 3- 3 : Fissuration longitudinale au niveau du PK 2

2 Modélisation et proposition de la solution de renforcement

2.1 Introduction

Dans cette section, nous proposons une solution de renforcement optimale basée sur les dégradations recensées sur l'axe Ouidah-Savi, ainsi que sur les résultats obtenus à partir de l'analyse mécanique des couches de chaussée. Cette proposition tient compte des conditions de trafic actuelles et futures, des caractéristiques environnementales de la région, ainsi que des conclusions tirées des simulations réalisées avec ALIZE.

2.2 Résumé des dégradations identifiées

Les principales dégradations observées sur l'axe incluent des nids-de-poule, des fissures longitudinales et transversales, ainsi que du faïençage. Ces dégradations témoignent d'une défaillance structurelle des couches de surface et de base, nécessitant une intervention profonde.

2.3 Analyse des besoins en renforcement

L'analyse des résultats des simulations effectuées avec ALIZE indique une perte significative de la portance dans les couches inférieures. Les couches actuelles ne sont plus capables de supporter les charges lourdes répétées, justifiant l'usage de la méthode de décaissement pour retirer les parties endommagées avant de procéder au renforcement.

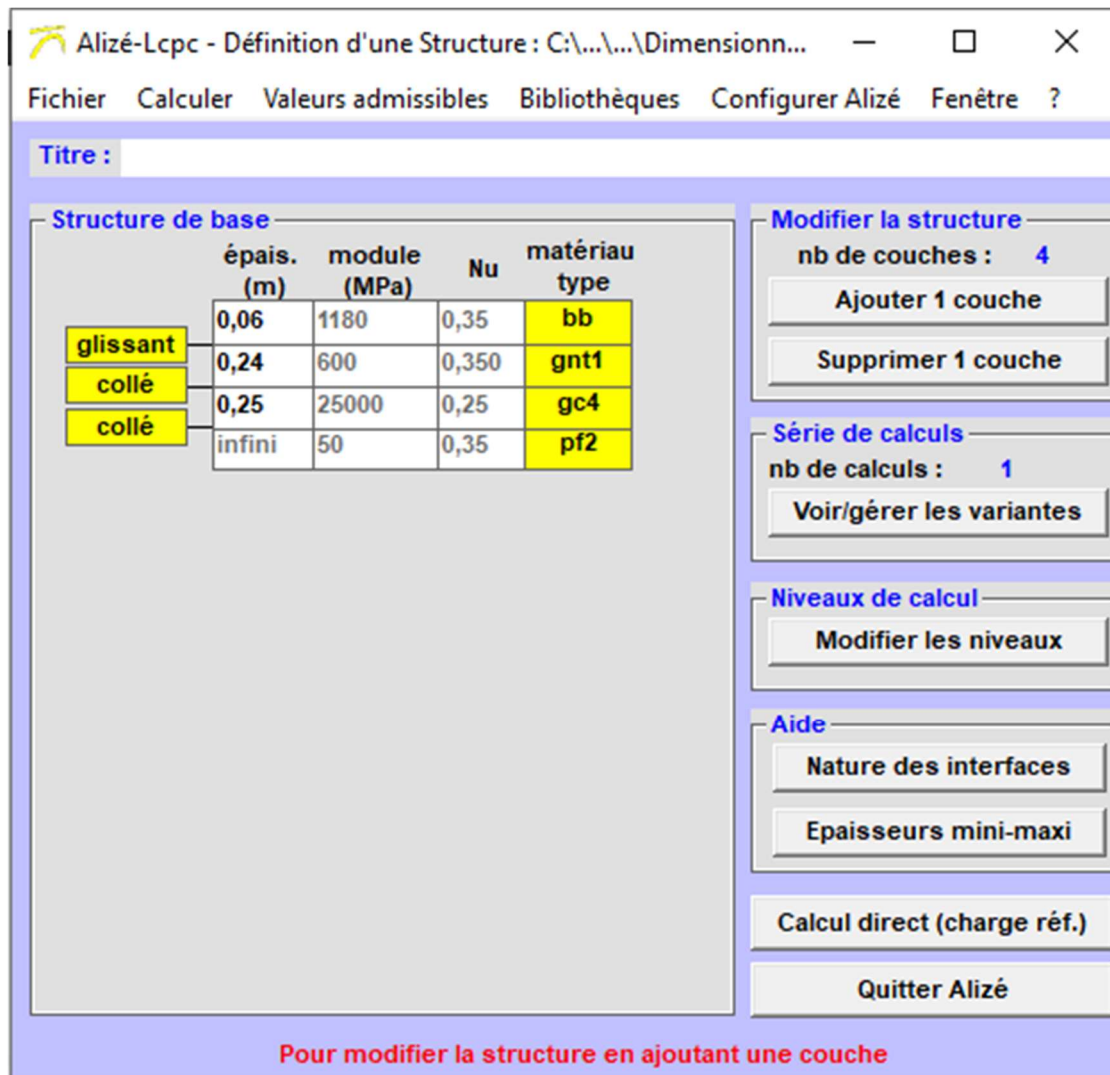


Figure 3- 4 Modélisation de la chaussée existante dans ALIZE

2.4 Solution technique proposée

La solution de renforcement retenue repose sur l'utilisation de la méthode de décaissement, combinée à d'autres techniques pour restaurer la capacité portante de la route :

- Décaissement de la chaussée endommagée : Cette méthode consiste à enlever la partie supérieure des couches de la chaussée jusqu'à une profondeur déterminée, selon l'état des matériaux et l'importance des dégradations.
- Renforcement avec des matériaux recyclés (RAP) : Une fois le décaissement réalisé, nous proposons de réutiliser des enrobés recyclés (RAP) pour la reconstruction des couches inférieures, réduisant les coûts et minimisant l'impact environnemental.

2.5 Dimensionnement du renforcement

2.5.1 Analyse des données

- Trafic PL = 150 PL/j (T3+)
- FL+Faï = 2 avec un niveau grave (F1)
- Dc (corrigé à 34°C) = 50/100e mm (D4)
- Classe d'orniérage : ORN2
- Qualité de l'interface (bon accrochage) : interfaces collées
- Paroi du trou lisse et carotte saine ($E = 600 \text{ MPa}$)

2.5.2 Calcul du module du sol

Afin de déterminer le module du sol par calcul inverse, les modules du MB sont fixés de façon forfaitaire. Le sol est modélisé comme une couche d'épaisseur 6m reposant sur un massif semi-infini rigide de module de rigidité **$E=10000\text{MPa}$** et de coefficient de Poisson **$\nu=0.25$** . **$E_{\text{GNT}} = 400 \text{ MPa}$** (matériau propre et humide) Le module du sol se détermine donc en faisant varier la valeur du module du sol, nous déterminons la déflexion correspondante et traçons une courbe qui nous permet d'estimer le module du sol. Le module de la GNT est obtenu en multipliant par 2 celui du sol. Comme l'a stipulé le guide, le module se détermine en fonction de la qualité du matériau en place et de la vitesse de mesure de la déflexion. **$E = 0,5 E_{\text{ref}}$**

$E_{\text{MB}} = 300 \text{ MPa}$

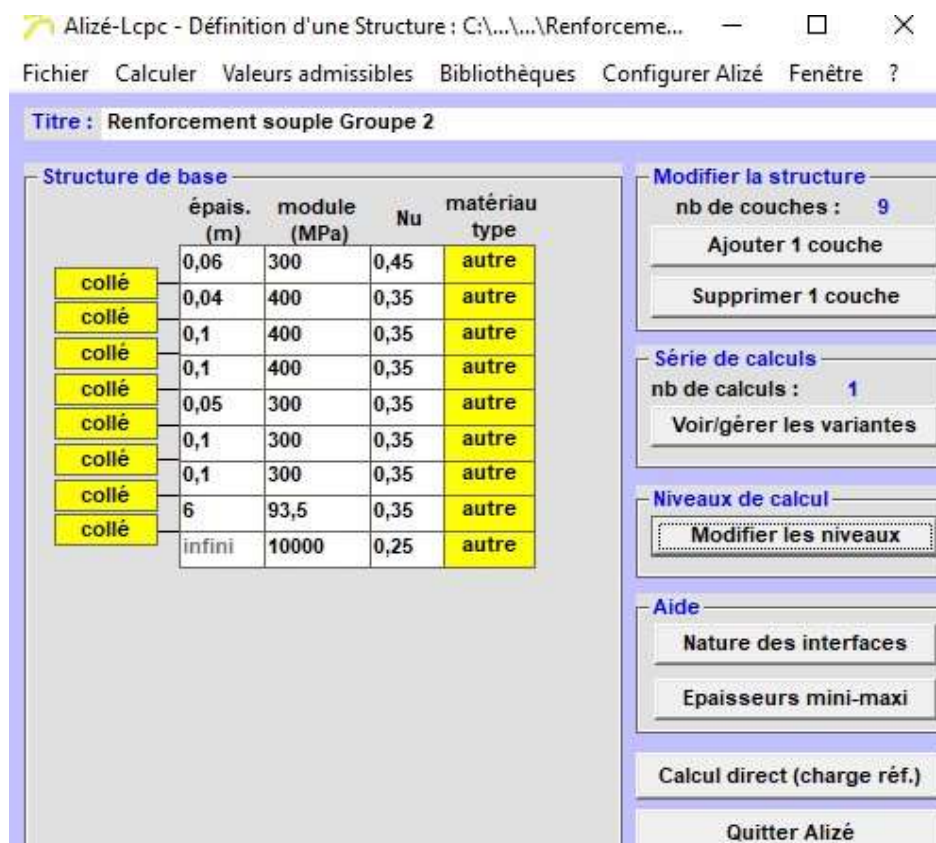


Figure 3- 5 Calcul du renforcement dans ALIZE

Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran - cf. C:\...\Renforcement souple Grou...

Renforcement souple Groupe 2 variante 1 : Durée=00:00sec

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (μdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μdéf)	SigmaZ (MPa)
0,060	300,0	0,450	0,000	147,4	0,125	237,8	0,660
collé			0,060	-167,7	0,119	803,9	0,603
0,040	400,0	0,350	0,060	-167,7	0,091	1120,0	0,603
collé			0,100	-265,9	0,060	1028,8	0,490
0,100	400,0	0,350	0,100	-265,9	0,060	1028,8	0,490
collé			0,200	-222,8	0,004	579,4	0,244
0,100	400,0	0,350	0,200	-222,8	0,004	579,4	0,244
collé			0,300	-214,9	-0,045	375,2	0,127
0,050	300,0	0,350	0,300	-214,9	-0,018	441,4	0,127
collé			0,350	-194,3	-0,026	359,5	0,097
0,100	300,0	0,350	0,350	-194,3	-0,026	359,5	0,097
collé			0,450	-188,0	-0,047	299,1	0,061
0,100	300,0	0,350	0,450	-188,0	-0,047	299,1	0,061
collé			0,550	-247,3	-0,085	319,9	0,041
6,000	70,0	0,350	0,550	-247,3	-0,003	599,3	0,041
collé			6,550	0,0	0,001	8,9	0,001
infini	10000,0	0,250	6,550	0,0	0,000	0,1	0,001

Grandeurs affichées
☒ tableau 1 ☐ tableau 2
☐ tableau 3 ☐ tableau 4
☐ tableau 5 ☐ tableau 6
☐ tableau 7 ☐ tableau 8

Déflexion = 58,3 mm/100
 entre-jumelage
 Rdc = 127,6 m

Imprimer Enregistrer

Voir Chargt. Fermer

Figure 3- 6 Déformations obtenues

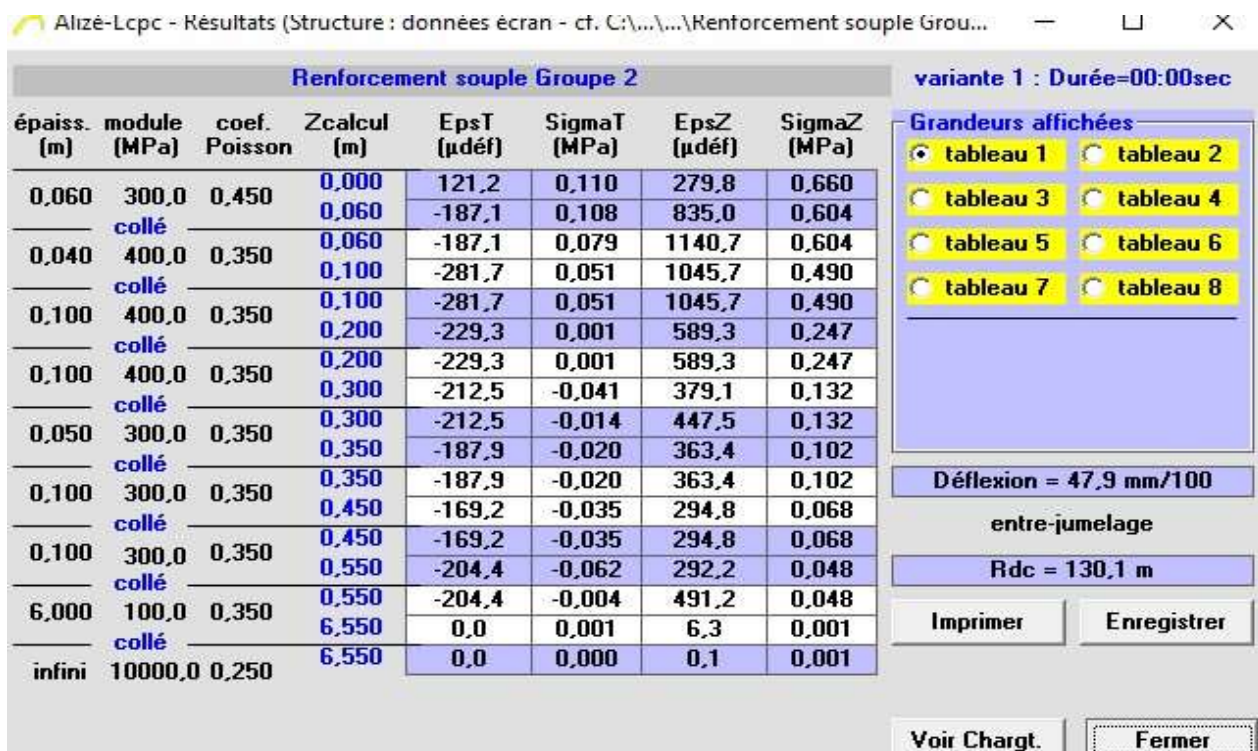


Figure 3- 7 Déformations obtenues

La courbe suivante présente la variation du module du sol en fonction de la déflexion caractéristique.

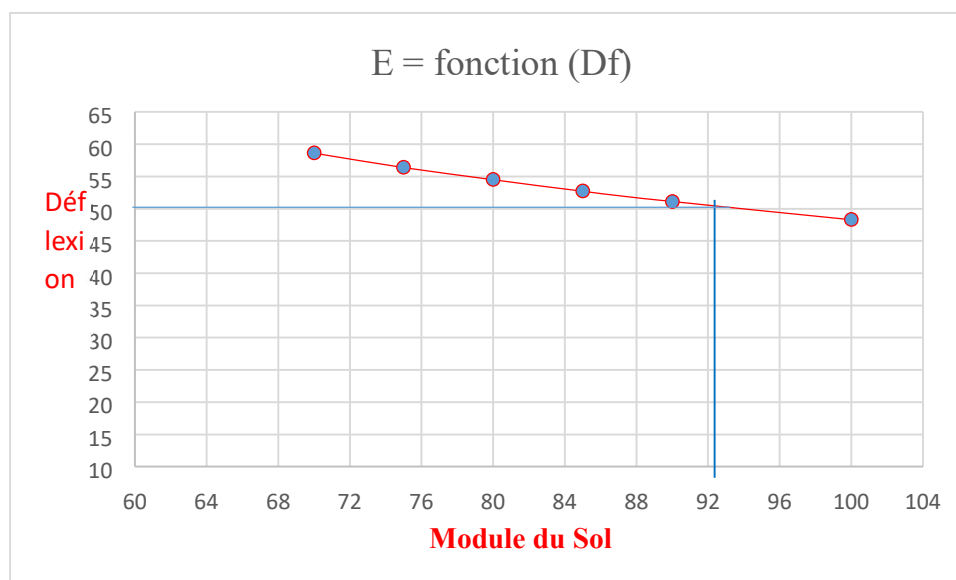


Figure 3- 8 évolution de la déflexion en fonction du module

- Le module du sol est alors : $E = 92,4 \text{ MPa}$
- Déflexion calculée : 50.0/100e mm
- Rayon de courbure calculé : 129,5 m

✚ Ajustement des modules des couches bitumineuses

Couches	Epaisseur	Qualité interface	Module (MPa)	nu
BB	0,06	C	300	0,45
GNT Base	0,24	C	400	0,35
GNT Fondation	0,25	C	184,8	0,35
Sol	6	C	92,4	0,35
Massif rigide	Infini		10 000	0,25

✚ Calcul des sollicitations subies par la chaussée :

Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran - cf. C:\...\...\Renforcement souple Grou...

Renforcement souple Groupe 2 variante 1 : Durée=00:00sec

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,060	300,0	0,450	0,000	121,6	0,123	171,0	0,660
	collé		0,060	-194,9	0,121	841,7	0,601
0,040	369,6	0,350	0,060	-194,9	0,088	1219,4	0,601
	collé		0,100	-298,3	0,052	1117,7	0,485
0,100	369,6	0,350	0,100	-298,3	0,052	1117,7	0,485
	collé		0,200	-266,6	-0,015	635,8	0,235
0,100	369,6	0,350	0,200	-266,6	-0,015	635,8	0,235
	collé		0,300	-319,7	-0,089	464,6	0,121
0,050	184,8	0,350	0,300	-319,7	-0,013	668,2	0,121
	collé		0,350	-274,3	-0,015	548,1	0,098
0,100	184,8	0,350	0,350	-274,3	-0,015	548,1	0,098
	collé		0,450	-225,5	-0,022	436,5	0,069
0,100	184,8	0,350	0,450	-225,5	-0,022	436,5	0,069
	collé		0,550	-235,4	-0,035	393,6	0,051
6,000	92,4	0,350	0,550	-235,4	-0,004	564,8	0,051
	collé		6,550	0,0	0,001	6,8	0,001
infini	10000,0	0,250	6,550	0,0	0,000	0,1	0,001

Grandeurs affichées

☒ tableau 1
 ☐ tableau 2
☐ tableau 3
 ☐ tableau 4
☐ tableau 5
 ☐ tableau 6
☐ tableau 7
 ☐ tableau 8

Déflexion = 56,7 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 111,9 m

Imprimer Enregistrer

Voir Chargt. Fermer

Figure 3- 9 sollicitations subit par la chaussée

Calcul de l'endommagement des couches de chaussées

Pour calculer l'endommagement des couches de chaussée,

- Il faut connaître le trafic qu'a déjà subi la chaussée comme déterminé plus haut
- Il faut déterminer les trafics admissibles en NE que peut supporter la couche en question. Ils sont déterminés par calcul inverse avec ALIZE en utilisant les sollicitations calculées ci-dessus comme étant admissibles.

Nom de la Couche	Sollicitation	NE admissible (Obtenu par calcul inverse)	Endommagement Cumulé
Sol	564,8	952 288	$d_{sol} = 3,1485 \cdot 10^5 \times \frac{1,2}{952288}$ $d_{sol} = 0,395$
BB	194,9	1,571.0 ⁶	$d_{MB} = 3,1485 \cdot 10^5 \times \frac{1,6}{1,57 \cdot 10^6}$ $d_{sol} = 0,321$
GNT Base	1117,7	44 004	$d_{GNT} = 3,1485 \cdot 10^5 \times \frac{1,2}{44004}$ $d_{sol} = 8,586$
GNT Fondation	668,2	446 567	$d_{GNT} = 3,1485 \cdot 10^5 \times \frac{1,2}{446567}$ $d_{sol} = 0,846$

3 Exécution des travaux de décaissement

Dans cette section, nous détaillons les étapes cruciales de l'exécution des travaux de renforcement par décaissement, effectués sur l'axe Ouidah-Savi. Ce projet de réhabilitation a consisté à retirer les couches de chaussée endommagées pour les remplacer par des matériaux de haute performance, en vue d'améliorer la capacité portante de la route. Les photos ci-dessous illustrent le processus complet, depuis les préparatifs initiaux jusqu'à la mise en œuvre finale des nouvelles couches. Les étapes clés incluent le décaissement proprement dit, le compactage des matériaux de fondation, ainsi que la pose de la nouvelle couche de roulement. Chaque phase a été réalisée selon les normes techniques et de sécurité les plus strictes, afin de garantir une infrastructure durable et adaptée aux charges de trafic intensif. Ces images illustrent non seulement le travail minutieux accompli sur le terrain, mais également l'engagement des équipes techniques à respecter le calendrier prévu tout en assurant une qualité optimale des travaux.



Figure 3- 10 exécution des travaux de décaissement

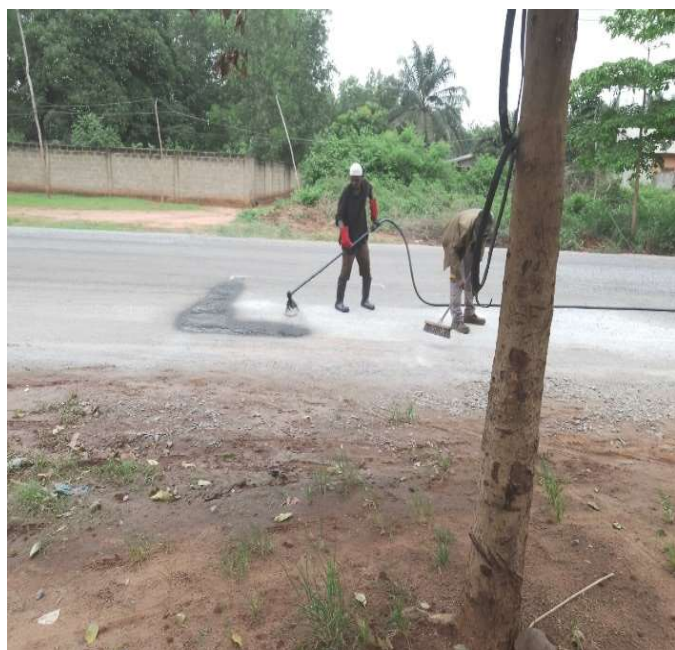


Figure 3- 11 Finalisation des travaux de décaissement

Conclusion

Ce mémoire a abordé la problématique majeure de l'axe routier Ouidah-Savi, un tronçon stratégique au Bénin, qui souffre de dégradations considérables dues à l'intensité du trafic, notamment des poids lourds, ainsi qu'aux conditions climatiques locales. Face à ces dégradations, il est crucial de proposer une solution de renforcement adaptée pour assurer la pérennité de cette infrastructure. La question centrale était donc : comment remédier efficacement à ces détériorations tout en assurant la durabilité de la chaussée dans les conditions spécifiques de cet axe ?

Pour répondre à cette problématique, une méthodologie en trois étapes a été mise en œuvre. Premièrement, une auscultation de surface a été réalisée pour recenser et classifier les types de dégradations, tels que les fissures, nids-de-poule et faïençage. Deuxièmement, nous avons procédé au calcul de l'endommagement mécanique de la chaussée à l'aide du logiciel ALIZE, qui a permis de quantifier les niveaux de détérioration des différentes couches de la structure routière. Enfin, à partir des résultats obtenus, nous avons pu déduire les besoins spécifiques en matière de renforcement.

Les résultats de cette étude ont conduit à la proposition de la méthode de décaissage comme solution optimale de renforcement pour l'axe Ouidah-Savi. Cette méthode consiste à retirer une partie des couches supérieures dégradées avant de les remplacer par des matériaux plus adaptés aux conditions de trafic et environnementales de la région. Par ailleurs, la mise en œuvre de cette méthode sur le terrain inclut une étape précise d'exécution, qui prévoit non seulement le remplacement des sections endommagées, mais également l'adaptation des matériaux et techniques aux exigences locales, garantissant ainsi une réparation durable et efficace de l'axe routier.

Références Bibliographiques

- [1] “Formation sur l’inspection routière (Plan de Maintenance et de Réparation)”.
- [2] SETRA and LCPC, “Conception et dimensionnement des structures de chaussée — guide technique,” p. 93, 1994.
- [3] des R. et des I. pour la M. Institut des Routes, *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme - Fascicule 2 - Annexes techniques*. 2023.
- [4] Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), “Catalogue des dégradations de surface des 1998, chaussées : version,” 1998.
- [5] C. P. YABI, “Cours de pathologie et entretien des chaussées,” p. 64, 2021, doi: 10.13140/RG.2.2.19120.92165.
- [6] J. Abdo, “Entretien structurel des chaussées routières renforcement ou retraitement”.
- [7] “Code de bonne pratique pour la protection des routes”.
- [8] M. D. E. S. Transports, “Régénération des couches de surface de chaussées”.
- [9] D. Bresson, “Utilisation de matériaux recyclés en voirie et réseaux divers . Qualité des ouvrages du point de vue du maître d ’ oeuvre To cite this version : HAL Id : dumas-01717246,” 2018.
- [10] R. Chahna, “Traitement des sols aux liants hydrauliques : ARDIA 600 et CHAUX,” no. Cdl, 2018.
- [11] Infociments, “Le retraitement en place à froid des chaussées au ciment ou aux liants hydrauliques routiers,” *Routes*, no. 96, pp. 7–14, 2006, [Online]. Available: <http://www.infociments.fr/publications/route/routes/r-96>
- [12] D. U. Territoire and D. D. E. S. Routes, “Démocratique et populaire ministère de l’équipement et de l’aménagement du territoire direction des routes”.
- [13] T. Présentée À L’école De Technologie, S. Comme, and E. Partielle À L’obtention, “Modélisation de la performance à la fissuration des chaussées réhabilitées par les techniques de retraitement type I et type II par Amel FERJANI,” 2020.
- [14] R. Tunisienne *et al.*, “Etude de rehabilitation de la route rl804 dans le gouvernorat de kairouan,” 2021.
- [15] I. M. Arsenie, “fatigue,” 2014.
- [16] Y. Oubahdou, “Etude expérimentale et rationnelle de la dégradation des couches de surfaces de chaussées Thèse de doctorat,” *These*, 2022.
- [17] C. Chazallon and S. Mouhoubi, “Evaluation de la durée de vie résiduelle des chaussées Modèles de dégradation des structures,” no. Umr 7357, pp. 1–28, 2021.
- [18] C. Sup *et al.*, “ÉTUDE DE REHABILITATION DE LA ROUTE NATIONALE RNS 13 ÉTUDE DE REHABILITATION DE LA ROUTE NATIONALE RNS 13,” 2023.
- [19] L. Client, “Nf p98-086,” 2017.

- [20] M. Axlasten, "Modélisation des charges d'essieu," 2004.
- [21] C. C. B. Cette *et al.*, "Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar," *Geotech. Test. J.*, vol. 22, no. 22, pp. 0–1, 2011.
- [22] A. Flash, "Déflectographe flash".
- [23] T. D. E. Demain, "Cahier des méthodes et outils de diagnostic de chaussées," pp. 1–24, 2021.
- [24] L. Central, "Ication D'Un Radar Pulsé Monostatique' Auscultation Des Chaussées".
- [25] P. E. N. Travers, "Chapitre IV : PROFIL EN TRAVERS," pp. 47–49.
- [26] I. Des and I. D. E. S. Ponceaux, "Plan d'intervention - Techniques d'auscultation des chaussées et d'inspection des ponceaux," vol. 2, pp. 1–7, 2021.
- [27] V. Le Boursicaud, "déflexion pour caractériser l'état structurel des chaussées," 2018.
- [28] P. G. (GINGER, CEBTP), N. A. (Métropole, and Lyon), "Guide Technique De Conception Et De Dimensionnement Des Structures De Chaussees," 2017.
- [29] D. D. Un and O. D. E. Diagnostic, "Dominic Cammisano, 2007," 2007.
- [30] M. Simonin, "Etudes routières Déformabilité de surfaces des chaussées Exécution et exploitation des mesures," p. 67, 1997.
- [31] A. D. E. S. Chaussées, "Auscultation des chaussées en milieu urbain," 2011.
- [32] P. Rossigny, C. Itm, B. Espieux, and C. Ce, "Auscultation des chaussées État de l'art en France".

Table des matières

Chapitre 1 : Etat de l'art

1	Introduction	4
2	Généralité sur les chaussées revêtues	4
2.1	Définition	4
2.2	Les différentes couches d'une chaussée	5
2.2.1	Couche de surface : CS	5
2.2.2	Couche de base (CB)	5
2.2.3	Couche de fondation (CF)	5
2.2.4	Couche de forme (CF)	5
2.3	Les différents types de chaussée	6
3	Les dégradations de chaussées revêtues	8
3.1	Définition	8
3.2	Causes de dégradations des chaussées	8
3.2.1	Le trafic	8
3.2.2	Les conditions climatiques	9
3.2.3	Les malfaçons (mise en œuvre)	9
3.2.4	La qualité des matériaux	9
3.2.5	Les accidents de la route	9
3.3	Les types de dégradations	10
3.3.1	Les dégradations structurelles (Type A)	10
3.3.2	Les dégradations superficielles (Type B)	11

3.4 Mode d'endommagement des chaussées souples.....	12
4 Réhabilitation des chaussées	13
4.1 Le renforcement de la chaussée	13
4.2 La reconstruction de la chaussée	13
4.3 Le retraitement en place de la chaussée.....	14
4.4 Organigramme d'une étude de réhabilitation	14
5 Méthodologie des études de réhabilitation	15
5.1 Auscultation des chaussées existantes	15
5.1.1 Phase 1 : Recueil des informations globales sur la chaussée.....	16
5.1.2 Phase 2 : Découpage de l'itinéraire en zones homogènes et Implantation des sections témoin.....	22
5.1.3 Phase 3 : Investigations complémentaires sur les sections témoins	26
5.2 Diagnostic et modélisation.....	27
5.2.1 Etude du diagnostic	28
5.2.2 Calcul de l'endommagement.....	29
5.2.3 Cohérence entre l'endommagement calcul et le diagnostic	31
5.3 Conception de solution de travaux.....	31
5.3.1 Objectifs des travaux	31
5.3.2 Prise de décision pour la réhabilitation.....	32
5.3.3 Retraitement des chaussées	33
5.3.4 Reconstruction des chaussées.....	34
5.3.5 Renforcement des chaussées.....	34

Chapitre 2 : Matériels et Méthode

1	Présentation du milieu d'étude	38
2	Diagnostic	39
2.1	Classe des dégradations	39
3	Mesure de la déflexion :.....	52
3.1	Principe de l'essai :.....	52
3.2	Mesure in situ :.....	52
3.2.1	Principe de la poutre Benkelman	52
3.2.2	Traitement des mesures	53

Chapitre 3 : Résultats et discussions

1	Introduction.....	56
2	Modélisation et proposition de la solution de renforcement	58
2.1	Introduction.....	58
2.2	Résumé des dégradations identifiées.....	58
2.3	Analyse des besoins en renforcement	58
2.4	Solution technique proposée	59
2.5	Dimensionnement du renforcement	60
2.5.1	Analyse des données	60
2.5.2	Calcul du module du sol.....	60
3	Exécution des travaux de décaissement	65