

N°129



UNIVERSITÉ D'ABOMEY-CALAVI

École Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

Master de Recherche en Géotechnique et Infrastructures Immobilières (G2I)

Rapport de stage

Thème :

**ETAT DE L'ART SUR LES MÉTHODES DE RÉPARATION DES NIDS-
DE-POULE SUR LES CHAUSSÉES SOUPLES**

Soutenu publiquement le 11/11/2022 par Hervé ZETOME

Devant le jury composé de :

Pr GIBIGAYE Mohamed	Professeur titulaire	Président de jury
Pr KIKI TANKPINOU Yvette	Maître de conférences	Superviseure
Pr GBAGUIDI S. Victor	Professeur titulaire	Membre d jury
Dr GODONOU Gildas	Docteur en matériaux et structures	Membre de jury

Sous la direction de :

Dr. Yvette S. TANKPINOU KIKI

*Enseignante - chercheure à l'Université Nationale des Sciences,
Technologies, Ingénierie et Mathématique (UNSTIM) d'Abomey,
Maître de Conférences des Universités CAMES.*

Laboratoire : Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMA)

« La recherche doit avant tout être un Jeu et un plaisir »

Pierre Joliot

*« Chercher n'est pas une chose, trouver une autre, mais le gain de la recherche,
C'est la recherche elle-même ».*

Robert Sabatier

Dédicace

Je dédie ce mémoire :



À mon feu père Pierre ZETOME, pour les sacrifices et les luttes que tu as menés à mon égard
durant ton séjour sur terre. Que la terre te soit légère.

Hervé ZETOME., 2022



Remerciements

Profonde reconnaissance et remerciements chaleureux à l'endroit :

- de ma très chère mère, Christine WENOU, pour toutes ses prières, ses efforts consentis avec dévouement à mon égard durant mon cursus scolaire et universitaire. Que l'Éternel t'accorde la longévité afin que tu puisses bénéficier des moissons de ta semence. Merci Maman ;
- du Professeur GIBIGAYE Mohamed, le Directeur de l'École Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI), Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur à l'EPAC. Merci pour tout ce que vous faites dans le domaine de la recherche et aussi pour les étudiants de l'École Doctorale ;
- du Dr. Yvette S. TANKPINOU KIKI notre superviseure, Maître de Conférences des Universités du CAMES, Enseignante-Chercheuse à l'Université Nationale des Sciences, Technologies, et Mathématiques (UNSTIM) d'Abomey. Vos conseils et orientations ont enrichi et éclairé ce travail. Vous nous avez toujours soutenu et encouragé chaque fois que nous avons la déprime et le moral à zéro. Veuillez recevoir notre profonde reconnaissance et nos sincères remerciements ;
- du professeur Victor S. GBAGUIDI, Directeur-Ajoint de l'École Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI), Professeur Titulaire des Universités du CAMES, Enseignant-Chercheur à l'EPAC. Merci à vous pour votre disponibilité et vos apports qui constituent l'ossature de ce travail ;
- du professeur ADJOVI C. Edmond, Professeur Titulaire des Universités du CAMES ;
- du Dr. Valery DOKO, Maître de conférences des Universités du CAMES ;
- du Dr-Ing. AHLINHAN F. Marx, Maître de conférences des Universités du CAMES ;
- du Dr. HOUANOU Agapi, Maître-Assistant des Universités du CAMES ;
- de Madame PANTET Anne, Professeure en Génie civil ;
- du Dr. YABI Crespin Prudence, Docteur Ingénieur en matériaux et structures ;
- à l'endroit de tous les professeurs de l'EPAC en général et en particulier, ceux de l'École Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI).
- Une pensée particulière à l'endroit de :
- AFOUTOU Jérôme pour ses soutiens et ses pensées positives qui nous ont fait gravir des marches de la vie ;

- KOTTIN Jules, pour ses soutiens indéfectibles ;
- mes frères et sœurs pour leurs soutiens inconditionnels ;

Conscient que cette liste n'est pas exhaustive, nous exprimons nos vifs et sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Hervé ZETOME, 2022 



Sommaire

Dédicace	iii
Remerciements	iv
Sommaire	vi
Liste des figures.....	viii
Liste des photos.....	ix
Liste des tableaux	x
Liste des graphes	xi
Liste des acronymes	xii
Liste des annexes.....	xv
Abstract	xvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1. Généralités sur les chaussées.....	3
1.2. Dégradation des chaussées à revêtement bitumineux	10
1.3. Les enrobés bitumineux.....	22
1.4. Les granulats	37
CHAPITRE 2 : ÉTAT DES LIEUX DES NIDS-DE-POULE ET PRÉSENTATION DES MÉTHODES DE RÉPARATIONS USUELLES AU BENIN	39
2.1. Méthode d'évaluation des chaussées à revêtement bitumineux au BENIN [22].....	39
2.2. Présentation d du réseau routier au Bénin	49
2.3. Matériaux disponibles pour une utilisation en revêtement bitumineux au Bénin	50
2.4. Evaluation de la route mairie lokossa-INSTI lokossa-RN2 bis.....	51
2.5. Analyse de l'évolution des dégradations de 2020-2022.....	61
2.6. Méthodes usuelles de réparation des nids-de-poule au Bénin.....	65
CHAPITRE 3 : PROPOSITION DE TECHNIQUES AMÉLIORÉES DE RÉPARATION DES NIDS-DE-POULE	68
3.1. Méthode 1 : méthode proposée au Sénégal	68
3.2. Méthode 2 : méthodes améliorées utilisées au Québec et en Amérique du Nord	70
3.3. Méthode 3 : Réparation <i>des nids de poule par utilisation de nouveaux produits</i>	74
3.4. Méthode 4 : Réparation des nids de poule avec de l'enrobé à chaud ou à froid	79
3.5. Méthode 5 : Réparation des nids-de-poule avec colbifibre	82
3.6. Étude comparative des différentes techniques de réparation des nids-de-poule et proposition de nouvelles techniques de réparation des nids-de-poule au Bénin	85
3.7. Recommandations	85
CONCLUSION GÉNÉRALE	87

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	88
ANNEXES	91
TABLES DES MATIÈRES	96

Liste des figures

Figure 1 : Différentes couches d'une chaussée revêtue [4].....	4
Figure 2 : Structure type d'une chaussée souple[4],.....	5
figure 3 : structure type d'une chaussée semi-rigide [4]	6
Figure 4 : Structure type d'une chaussée rigide [4].....	6
Figure 5 : Structure type d'une chaussée inverse [4].....	7
Figure 6 : Structure type d'une chaussée mixte [4].....	7
Figure 7 : Structure type d'une chaussée bitumineuse épaisse [4]	7
Figure 8 : Structure de chaussée classique [5].....	8
Figure 9 : Fonctionnement d'une chaussée souple [6]	9
Figure 10 : Fonctionnement des structure semi-rigides [5].....	9
Figure 11 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic [4].....	11
Figure 12 : Sollicitations induite par la température [8].....	12
Figure 13 : Les composantes du mélange bitumineux [10].....	22
Figure 14 : Illustration de la relation entre les différents composants d'un enrobé bitumineux [12]....	28
Figure 15 : Bitume effectif-bitume total-bitume absorbé [12]	29
Figure 16 : Les types d'enrobé bitumineux [13]	30
Figure 17 : Diagramme VIZIR [22]	44
Figure 18 : Mise en exergue de la qualité apparente de la chaussée [23].....	48
Figure 20 : Carte du réseau routier de la commune de Lokossa (source : IGN, 2019)	53
Figure 21 : Situation du tronçon d'étude (source : IGN, 2022).....	54
Figure 22 : Coupe transversale sur la chaussée	56
Figure 23 : Excavation du matériau de la zone dégradée [28]	69
Figure 24 : Surface du trou taillée et Application du liant [28].....	69
Figure 25 : Bouchage du trou et compactage [28].....	69
Figure 26 : Étapes de réparation d'un nid-de-poule [31].....	81

Liste des photos

Photo 1 : Ornière [11].....	25
Photo 2 : Ressuage de liant [11].....	25
Photo 3 : Fissurations [11].....	26
Photo 4 : Fissures thermiques [11].....	26
Photo 5 : Désenrobage [11].....	27
Photo 6 : Vieillessement de la chaussée [11].....	27
Photo 7 : Arrachement [11].....	27
Photo 8 : Répandage gravillon faisant suite à un répandage de liant [12].....	31
Photo 9 : Route Mairie de Lokossa-INSTI Lokossa-RN2 bis.....	52
Photo 10 : Dégradations relevées lors de l'auscultation visuelle du tronçon.....	59
Photo 11 : Réparation urgente des nids-de-poule [28].....	71
Photo 12 : Les étapes de réparation permanente.....	73
Photo 13 : ChipFill [29].....	75
Photo 14 : Mise en œuvre d'AggreFill [29].....	76
Photo 15 : Réparation des nids-de-poule avec ChipFill [29].....	77
Photo 16 : Les produits utilisés pour la réparation des nids-de-poule par la méthode de patching [30].....	78
Photo 18 : Mise en œuvre du colbifibre [32].....	84

Liste des tableaux

Tableau 1 : Différents sous-groupes de la famille des déformations.....	17
Tableau 2 : Différents sous-groupes de la famille des fissurations	18
Tableau 3 : Différents sous-groupes de la famille des arrachements	19
Tableau 4 : Différents sous-groupes de la famille des remontées de matériaux [9].....	20
Tableau 5 : Différents sous-groupes de la famille des usures de la couche de roulement.....	21
Tableau 6 : Les différents essais sur l'enrobé et les paramètres déterminés	36
Tableau 7 : Essais mécaniques sur les granulats	38
Tableau 8 : Niveau de gravité des dégradations de type A	41
Tableau 9 : Niveau de gravité des dégradations de type B.....	42
Tableau 10 : Seuils de déflexions pratiqués en Afrique	45
Tableau 11 : Note de qualité Qi.....	45
Tableau 12 : Qualité apparente de la chaussée (CEBTP).....	47
Tableau 13 : Calage des résultats selon la méthode du CEBTP-LCPC.....	48
Tableau 14 : Degré de gravité des dégradations.....	57
Tableau 15 : Relevé des dégradations de chaussée du PK0+000 au PK2+000, sens Mairie de Lokossa- INSTI Lokossa (côté droit).....	60
Tableau 16 : Relevé des dégradations en 2020 et en 2022.....	61
Tableau 17 : Caractéristiques du liant bitumineux et des granulats	67
Tableau 18 : Caractéristiques des matériaux utilisés.....	69
Tableau 19 : Choix de l'enrobé	73
Tableau 20 : Critère de sélection des techniques de réparation des Nids-de-poule.....	80
Tableau 21 : Tableau synodique des dégradations des chaussées revêtues.....	92

Liste des graphes

Graphe 1 : Évolution linéaire des chaussées revêtues de 2015 à 2020 [24]	49
Graphe 2 : État du réseau routier en 2020 [24]	50
Graphe 3 : Evolution de la pluviométrie sur les cinq (05) dernières années dans la commune de Lokossa (Source : ASECNA, 2016) [25]	55
Graphe 4 : Évolution des dégradations de 2020 à 2022	63

Liste des acronymes

A	
AASHO	American Association of State Highway Official
ABPF	Association Béninoise pour la Promotion de la Famille
B	
BB	Béton Bitumineux
BBSG	Béton Bitumineux Semi-Grenu
BBME	Béton Bitumineux à Module Élevé
BBS	Béton Bitumineux Souple
BBM	Béton Bitumineux Mince
BBTM	Béton Bitumineux Très Mince
BBUM	Béton Bitumineux Ultra-Mince
BBDr	Béton Bitumineux Drainant
C	
CEBTP	Centre Expérimental de recherches et d'études du Bâtiment et des Travaux Publics
CEG	Collège d'Enseignement Général
cm	Centimètre
CRR	Centre de Recherches Routières
2	
DDIT	Direction Départementale des Infrastructures et du Transport
DGSI	Direction de la Gestion et de Suivi des Infrastructures
E	
ED-SDI	École Doctorale des Sciences de l'Ingénieur
ECF	Enrobé Coulé à Froid
G	
GB	Grave-bitume
I	
INSTI	Institut National Supérieur de Technologie Industrielle
K	
km	Kilomètre
L	

LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
M	
MIT	Ministère des Infrastructures et du Transport
MTLH	Matériau Traité au Liant Hydraulique
MSG	Monocouche Simple Gravillonnage
MDG	Monocouche Double Gravillonnage
MPG	Monocouche Pré-gravillonné
M_g	Masse de bitume dans le mélange
M_{mb}	Masse totale du mélange
M_{be}	Masse de bitume absorbé
O	
OPM	Optimum Proctor Modifié
P	
PCG	Presse au Cisaillement Giratoire
PK	Point Kilométrique
PL	Poids Lourds
S	
SETRA	Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes
U	
UAC	Université d'Abomey-Calavi
UNSTIM	Université Nationale des Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques
V	
V_{mb}	Volume brute du mélange compacté
V_{gb}	Volume apparent des granulats (pores compris)
V_{AM}	Volume occupé par l'espace entre les granulats dans un enrobé compacté
V_{ba}	Volume de bitume absorbé
V_{ge}	Volume de bitume effectif des granulats
V_{bf}	Volume de bitume effectif
V_{ba}	Volume de bitume absorbé

Glossaire

Expression	Définition
Béton bitumineux	Enrobé bitumineux de haute qualité utilisé, en couche mince comme couche de roulement
Émulsion de bitume	Fine dispersion de bitume dans l'eau, grâce à l'utilisation d'un émulsifiant et d'une énergie mécanique
Enduit superficiel (ES)	Couche superficielle de chaussée obtenue par applications successives de couches de liants et de gravillons.
Gravillons	Petits morceaux de pierres, propres, résistants et durables produits par concassage et calibrés par passage sur des tamis.
Liant hydrocarboné	Produit essentiellement constitué de carbone et d'hydrogène. Provient du pétrole (bitume) ou de la houille (goudron).
Répannage ou épandage	Apport sur la chaussée d'une couche de liant ou de gravillons.
Réparations localisées	Réparations effectuées à quelques endroits précis sur une chaussée ou sur les accotements
Scarification	Décohésion de la partie supérieure de la chaussée ou des accotements par des moyens manuels ou mécaniques
Lance	Appareil permettant de répandre à la main un liant bitumineux, au dosage requis
Rampe de répannage	Dispositif muni de gicleur permettant de pulvériser le liant
Répandeuse (Bouille)	Camion muni d'un réservoir à liant calorifugé avec un système de réchauffement et d'une rampe de répannage à l'arrière.

Liste des annexes

Annexe 1 : Tableau synodique des dégradations des chaussées revêtues	92
Annexe 2 : photos des dégradations du tronçon d'étude.....	94

Résumé

Les réseaux routiers constituent les infrastructures de base pour assurer le développement économique au sein des États. Ils permettent les échanges entre les zones de productions et les marchés.

En Afrique de l'Ouest, surtout dans notre pays le Bénin, les chaussées se dégradent plus vite et n'arrivent pas à tenir pendant la durée de service pour laquelle elles ont été dimensionnées. Les dégradations observées sur les chaussées sont majoritairement des nids-de-poule qui rendent parfois les voies impraticables. Face à ce problème, les méthodes de réparations adoptées (le Point à Temps) ne durent pas dans le temps. Il est constaté qu'après quelques temps, le matériau de réparation (l'enrobé chaud ou froid) part complètement et crée une nouvelle dégradation de plus grandes dimensions. Il y a donc un problème d'adhérence entre le nouveau matériau utilisé pour les réparations et corps de chaussée. Il est donc très important de trouver de nouvelles méthodes ou de nouveaux matériaux pour une réparation efficace des nids-de-poule.

Dans le cadre de notre étude, quelques recherches menées sur l'état actuel du réseau routier montrent que beaucoup de routes revêtues sont dans des états défectueux. L'auscultation visuelle de la route *Mairie Lokossa- INSTI Lokossa-RN2 Bis*, nous a permis de relever les pathologies auxquelles la chaussée est exposée. Les dégradations relevées sont essentiellement des nids-de-poule, des plumages, des pelades, des épaufrures et des ornières. Les dégradations les plus prononcées sont les nids-de-poule. Une étude comparative des dégradations relevées en 2020 et celles de 2022, a montré que plusieurs points réparés en 2020 ont connu de nouvelles dégradations. On peut conclure que les méthodes de réparations sont donc inefficaces.

Un bilan des nouvelles techniques de réparation des nids-de-poule dans le monde actuel a été fait. L'analyse des différentes techniques nous révèle que les matériaux de réparation varient d'une technique à une autre. Le choix du matériau doit être en fonction du trafic actuel, des conditions climatiques et du niveau de service de la route. La dégradation précoce des réparations au Bénin est beaucoup plus liée au choix des matériaux et la faible adhérence entre le nouveau matériau et le corps de chaussée. L'une des techniques qui répond à ces problèmes dans le monde actuel est la technique de réparation par utilisation de ChipFill, un produit très performant avec une bonne adhérence. Cette technique est mieux placée pour être expérimentée sur nos routes au Bénin.

Mots clés : dégradation, nid-de-poule, réparation, ChipFill

Abstract

Road networks are the basic infrastructure to ensure economic development within states. They allow exchanges between production areas and markets.

In West Africa, especially in our country Benin, pavements deteriorate faster and still fail to hold up throughout the service life for which they were designed. The degradations observed on the roads are mainly potholes which sometimes make the roads impassable. Faced with this problem, the repair methods adopted (Point in Time) do not last over time. It is noted that after some time, the repair material (hot or cold asphalt) leaves completely and creates a new degradation of larger dimensions. There is therefore a problem of adhesion between the new material used for the repairs and the old road surface. It is therefore very important to find new methods or new materials for efficient repair of potholes.

As part of our study, some research conducted on the current state of the road network shows that many paved roads are in poor condition. The visual auscultation of the road Mairie Lokossa-INSTI Lokossa-RN2 Bis, allowed us to identify the pathologies to which the roadway is exposed. The degradations noted are essentially potholes, plumage, alopecia, spalls and ruts. The most pronounced damage is potholes. A comparative study of the damage noted in 2020 and that of 2022 showed that several points repaired in 2020 experienced further damage. It can be concluded that repair methods are therefore ineffective.

A review of new pothole repair techniques in today's world has been made. The analysis of the different techniques reveals to us that the repair materials do not have the same characteristics. The choice of material must take into account current traffic, climatic conditions and the level of service of the road. The early deterioration of repairs in Benin is much more related to the choice of materials and the poor adhesion between the new material and the road surface. One of the techniques that solves these problems in today's world is the repair technique using ChipFill, a high performance product with good adhesion.

Keywords : dégradation, pothole, repair, ChipFill

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De par le monde, la route est l'infrastructure de transport la plus empruntée. Par sa fonction de transport, elle assure la circulation des personnes et des biens, et par sa fonction d'outil d'intégration humaine, la route assure le brassage culturel entre les peuples. Lorsque les investissements dans le domaine sont bien planifiés et structurés, ils participent à un aménagement intégré du territoire, réduisant la pauvreté en favorisant un accès aux services sociaux de base. En d'autres termes, le réseau routier contribue pour une large part au relèvement du Produit Intérieur Brut et permet la mise en place facile des programmes d'investissement au niveau des secteurs primaire, secondaire et tertiaire. Ainsi, la route est un patrimoine qu'il faut préserver puisqu'elle est à la fois un investissement, un capital accumulé et un outil de travail collectif dont il convient de suivre et d'évaluer périodiquement le comportement une fois qu'elle est mise en service [1].

Au regard de ses différentes fonctions, la route est appelée à supporter des sollicitations provenant de plusieurs facteurs (le trafic, les conditions climatiques...) compte tenu de son exploitation. La répétition des sollicitations crée au niveau du corps de chaussée des déformations permanentes qui se traduisent par des dégradations qui apparaissent à la surface de la chaussée. Les dégradations dues aux déformations résiduelles dans le corps de chaussée sont très souvent des ornières dont l'évolution donne des nids-de-poule. Un nid-de-poule est une cavité dans la chaussée aux bords découpés qui se crée lorsque le revêtement routier s'effrite et que les matériaux constitutifs du revêtement (enrobés bitumineux) se dispersent. Le traitement des nids-de-poule constitue aujourd'hui un problème majeur auquel plusieurs pays sont confrontés. Chaque année, la ville de *Montréal répare près de 200 000 nids-de-poule*, soit l'équivalent de 50 par kilomètre [2]. La réparation permanente des nids-de-poule nécessite des interventions au moyen de techniques viables et éprouvées. Il existe en effet plusieurs techniques de réparation des nids-de-poule. Cependant, il se pose en général un problème de mise en œuvre et de durabilité de ces techniques.

En Afrique de l'Ouest, surtout dans notre pays le Bénin, Beaucoup de routes sont dans les états défectueux, avec parfois avec des nids de poules qui les rendent impraticables. L'état du réseau routier au cours de ces dernières années, montre que plusieurs routes revêtues sont affectées par des pathologies. Face à ce problème, les méthodes de réparations adoptées ne

répondent pas dans le temps. Il est constaté qu'après quelques temps le matériau de réparation part complètement et crée à nouveau une nouvelle dégradation de dimensions supérieures. L'adhérence du nouveau matériau de réparation au corps de chaussée et le choix des matériaux de réparation sont autant des facteurs principaux parmi tant d'autres qui sont à l'origine de ce problème. Il est donc très important de trouver de nouvelles méthodes ou de nouveaux matériaux pour une réparation efficace de nids-de-poule d'où le thème de cette étude qui s'intitule : « **Réparation des nids-de-poule sur les chaussées souples** ».

L'objectif général de cette recherche est de réparer efficacement les nids-de-poule sur les chaussées souples.

Les **objectifs spécifiques** se déclinent comme suit :

- Maîtriser les causes des dégradations des chaussées souples, les différents types de dégradations des chaussées et les caractéristiques de l'enrobé bitumineux ;
- Présenter l'état des réparations des nids-de-poule sur les chaussées et les techniques actuelles de réparation des nids-de-poule au Bénin ;
- Faire un bilan des nouvelles techniques améliorées de réparation des nids-de-poule utilisées dans le monde actuel et proposer les méthodes applicables pour la réparation des nids-de-poule sur les chaussées souples au Bénin.

À cet effet, le présent document est organisé comme suit en 3 chapitres :

Le chapitre 1 est une synthèse bibliographique consacrée aux généralités sur les chaussées, les causes des dégradations des chaussées revêtues, les enrobés bitumineux, ...

Le chapitre 2 décrit l'état des lieux des nids-de-poule et les méthodes usuelles de réparations au Bénin ;

Le Chapitre 3 fait le bilan des techniques améliorées de réparation des nids-de-poule dans le monde actuel.

CHAPITRE 1

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Avec la diminution des ressources naturelles, les structures de chaussées ont fait de recherche d'optimisation dans leur conception. L'approche française utilisée depuis les années 1990 pour la conception des chaussées neuves a été développée par le LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), jusqu'à la publication de la norme NFP 98-086, révisée en Mai 2019, et l'utilisation généralisée du logiciel de calcul ALIZE [3].

Cette approche de conception pas à pas a également permis de systématiser les méthodes de diagnostic dans le cas des désordres des chaussées. Toute structure de chaussée va se dégrader sous l'action de plusieurs facteurs [3]. Pour pouvoir mener un diagnostic efficace, il est important de connaître :

- ✦ les différentes structures de chaussée ;
- ✦ le mode de fonctionnement et le processus de dégradation des chaussées souples ;
- ✦ les principales causes des dégradations des chaussées souples ;
- ✦ les différents types d'enrobés bitumineux et les propriétés mécaniques essentielles de ces derniers.
- ✦ Les différents types de dégradations seront aussi présentés leurs causes et leurs remèdes.

1.1. Généralités sur les chaussées

1.1.1. Structure d'une chaussée

La structure d'une chaussée est un ensemble de couches de matériaux de qualité variable, empilées les unes sur les autres pour résister aux sollicitations du trafic. En effet, les sols ne peuvent supporter sans dommages les pressions induites par les pneumatiques de véhicules. Pour les sols non résistants, les pneumatiques compriment le sol et il se forme une ornière. En revanche lorsque le sol est résistant, il se déforme sous le pneu et remonte au fur et à mesure de l'éloignement des pneumatiques. Toutefois des tassements résiduels subsistent ; ce qui induit aussi après plusieurs passages des ornières. Il est donc nécessaire d'interposer entre le sol et les

pneumatiques, un écran capable de reprendre la charge du trafic et de la transmettre au sol support dans les limites déformables. Cet écran est appelé structure de chaussée.

Le rôle d'une chaussée est de reporter convenablement sur le sol support, les efforts provenant du trafic. La chaussée doit donc avoir une épaisseur avec des caractéristiques telle que la pression verticale transmise au sol support soit suffisamment faible. En fonction du sol support et du trafic, la chaussée est une superposition de plusieurs couches de caractéristiques mécaniques croissantes (*Figure 1*). En général, on distingue à partir du sol en place :

- une couche de forme ;
- une couche de fondation ;
- une couche de base ;
- une couche de surface.

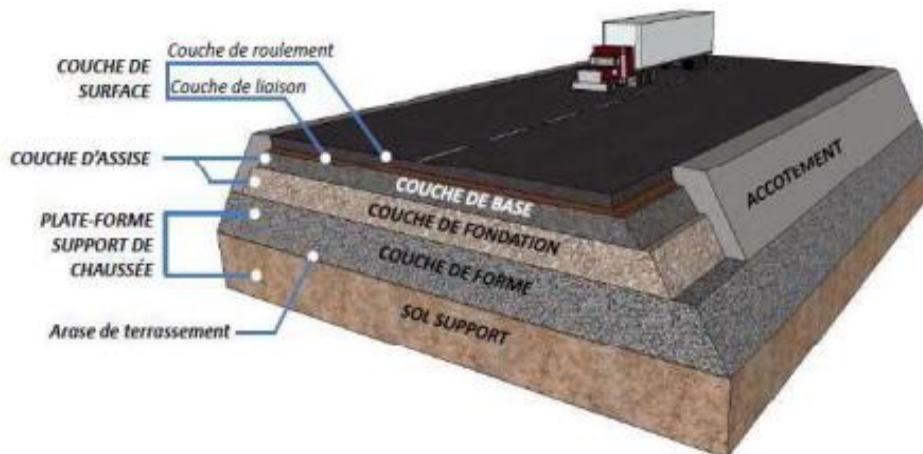


Figure 1 : Différentes couches d'une chaussée revêtue [4]

L'ensemble sol-support et couche de forme représente la plate-forme support de la chaussée. La couche de forme a une double fonction. Pendant les travaux, elle assure d'une part la protection du sol-support contre les intempéries ; d'autre part, elle permet la qualité du nivellement ainsi que la circulation des engins. En service, elle permet d'améliorer la portance à long terme.

La couche de base et la couche de fondation forment la couche d'assise ou corps de chaussée. Cette couche a pour rôle la réception et la répartition des charges produites par le trafic sur la plate-forme support afin de maintenir les déformations à un niveau admissible. La couche de base, plus proche de la surface de la chaussée, subit des contraintes et des déformations notables ; il est donc nécessaire qu'elle présente des caractéristiques mécaniques plus élevées que celles de la couche de fondation.

La couche de surface ou revêtement de la chaussée permet d'adoucir la surface de roulement, d'assurer la distribution des charges transmises dans la chaussée et dans le sol et de protéger la couche d'assise contre l'action du trafic et des intempéries. La couche de surface est constituée de :

- la **couche de roulement** qui est la couche supérieure de la chaussée directement en contact avec les actions du trafic et du climat.
- la **couche de liaison** qui assure (au besoin) la liaison entre la couche de roulement et la couche d'assise.

Avant d'aborder la notion de dégradation ou de pathologie des chaussées, il est important de connaître les différents types de structures de chaussée.

Selon la formation des différentes couches et leur disposition dans la structure de la chaussée, on classe en plusieurs types les structures de chaussée. Le guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussée du Laboratoire Central des Ponts et Chaussée (LCPC) distingue les structures suivantes : **souples, semi-rigides, rigides, inverses, mixtes, et bitumineuses épaisses**.

● *Les chaussées souples* [4]

Les chaussées souples ont une couverture bitumineuse relativement mince, parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités (Figure 2). Ces dernières, en l'absence de cohésion au sein des matériaux qui les constituent sont très flexibles. L'épaisseur globale de la chaussée est comprise entre 30 et 60 cm.

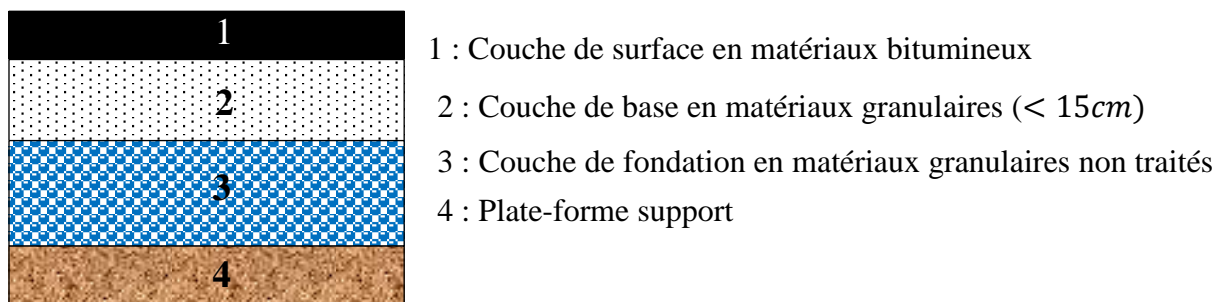


Figure 2 : *Structure type d'une chaussée souple*[4],

● *Les chaussées semi-rigides* [4]

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH) ; l'assise peut être disposée en une couche (base) ou deux couches (base et fondation) (figure 3).

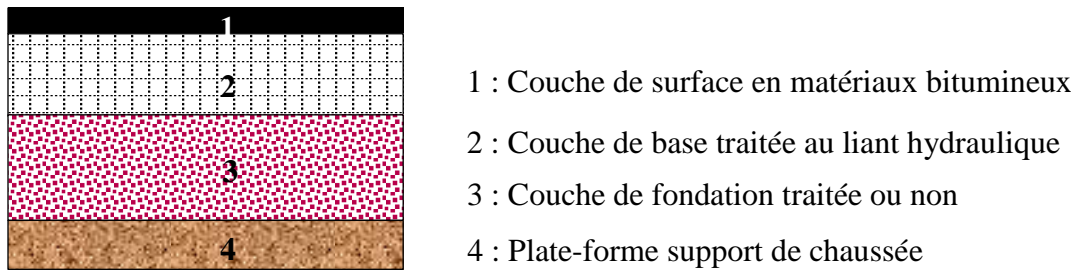


figure 3 : structure type d'une chaussée semi-rigide [4]

● Les chaussées rigides [4]

Les chaussées rigides sont les chaussées pour lesquelles la couche de base est en dalle de béton de ciment ou en béton compacté de 15 à 40 cm d'épaisseur. Dans ce type de chaussée, la couche de roulement constitue à elle seule la couche de base et la couche de surface d'une structure souple ou semi-rigide (Figure 4). La dalle de béton repose soit sur une couche de fondation (en matériaux traités aux liants hydrauliques ou en béton maigre) lorsque le sol support est peu résistant, soit sur une couche drainante en grave non traitée, soit sur une couche d'enrobé reposant elle-même sur une couche de forme traitée aux liants hydrauliques. Contrairement aux structures précédentes, les charges transmises connaissent une grande diffusion dans le plan horizontal à cause de la rigidité de la dalle en béton. La conséquence de cet état de chose, est que les contraintes verticales se trouvent considérablement réduites dans les couches sous-jacentes.

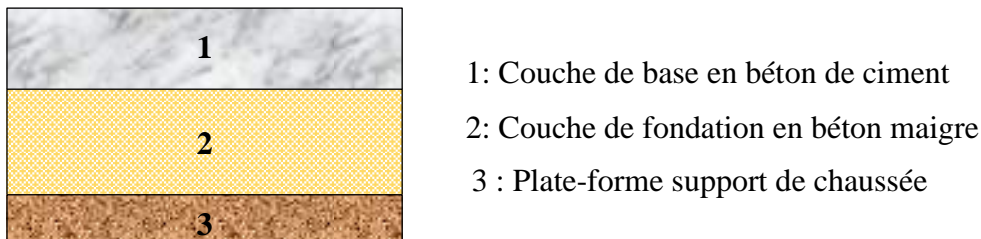


Figure 4 : Structure type d'une chaussée rigide [4]

Par contre, l'amortissement très élevé des contraintes verticales dues aux charges est compensé par l'apparition, au sein de la couche traitée, de contraintes de compression et surtout de traction à la partie inférieure. Dans ce cas de chaussée, la couche de surface et la couche de base sont confondues.

● Les chaussées inverses [4]

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche en grave non traitée (d'environ 12 cm) reposant elle-même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques et une couche

supplémentaire en matériaux granulaires ayant pour fonction d'éviter la remontée des fissures de la couche de fondation (Figure 5).

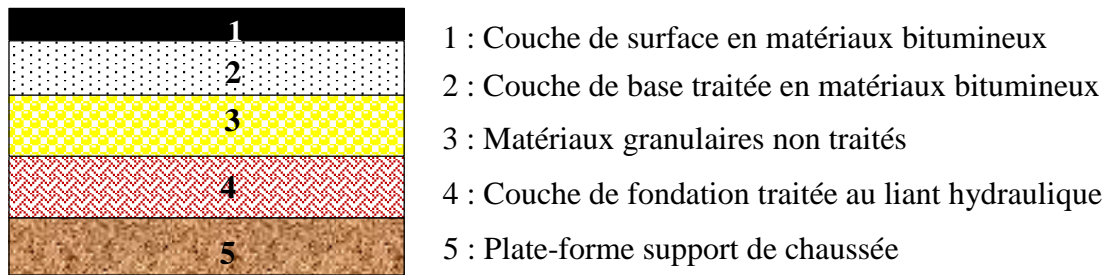


Figure 5 : Structure type d'une chaussée inverse [4]

● **Les structures mixtes** [4]

Elles comportent une couche de surface et une couche de base en matériaux bitumineux sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (figure 6). De plus, le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée est de 0,5.

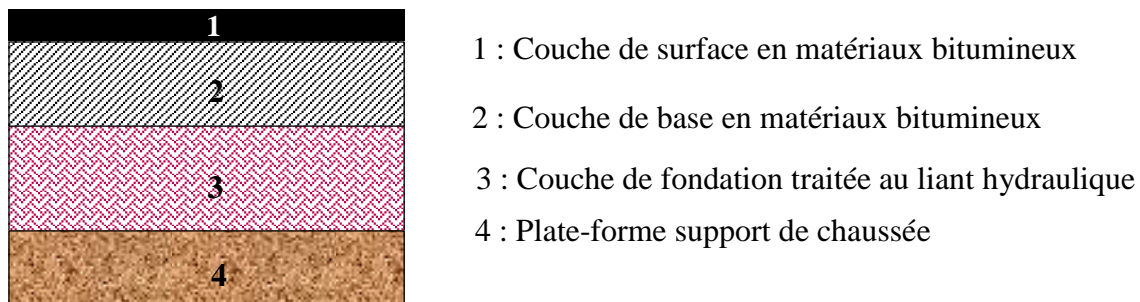


Figure 6 : Structure type d'une chaussée mixte [4]

● **Les chaussées bitumineuses épaisses** [4]

Ces structures se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm. Le fonctionnement des chaussées épaisses est d'autant plus différent de celui des chaussées souples que l'assise soit épaisse (Figure 7). La souplesse et la résistance en traction des couches d'assise en matériaux bitumineux permettent de diffuser en les atténuant fortement les contraintes verticales transmises au sol.

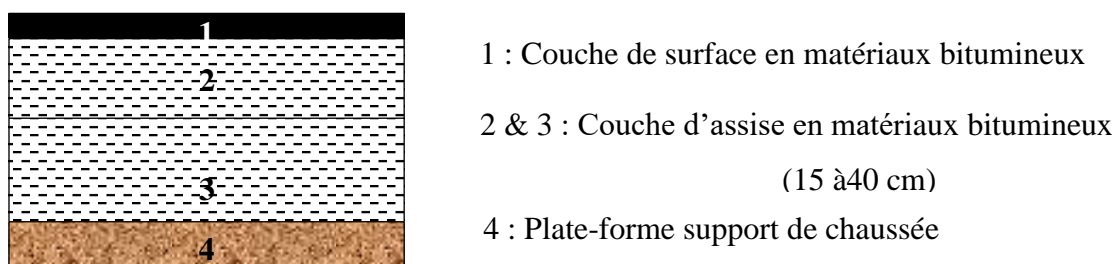
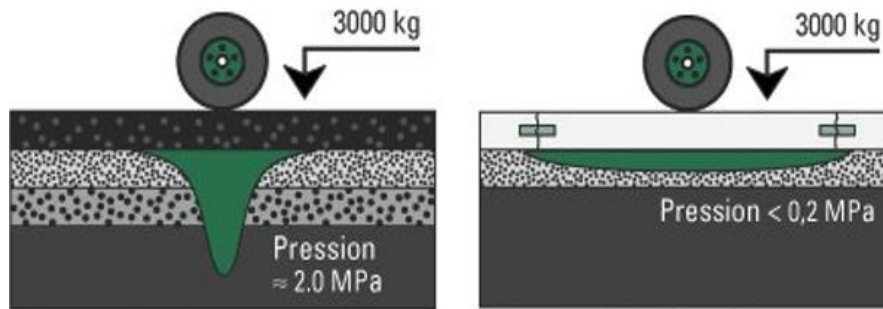


Figure 7 : Structure type d'une chaussée bitumineuse épaisse [4]

1.1.2. Mode de fonctionnement des structures de chaussées [5]

Du point de vue de la diffusion des pressions, il existe deux modes de fonctionnement mécanique des chaussées à savoir les chaussées souples et les chaussées rigidifiées (rigides et semi-rigides). Les chaussées souples sont constituées par un empilage de matériaux pierreux recouverts de revêtement plus ou moins épais à base de bitume ou de goudron (8-a). Les chaussées rigidifiées sont constituées par des dalles de béton de ciment (8-b).



a) Chaussée souple en asphalte

b) Chaussée rigide en béton de ciment

Figure 8 : Structure de chaussée classique [5]

1.1.2.1. Les chaussées souples [5]

Dans le cas des chaussées souples, la charge exercée sur la couche de surface est entièrement transmise au sol support de façon non uniforme. Étant donné que la couverture bitumineuse est relativement mince, les efforts verticaux dus au trafic sont transmis au support avec une faible diffusion latérale. La sollicitation exercée est la compression simple.

Les chaussées souples ne pouvant mobiliser que de faibles efforts assimilables à une flexion, l'étalement des efforts verticaux sur le sol support est modéré. Elles distribuent les efforts de surface à travers les couches sous-jacentes de manière à ce que l'effort sur la plate-forme soit compatible avec la résistance de l'infrastructure et du sol. Le critère principal de dimensionnement d'une chaussée souple réside donc dans la limitation de la sollicitation du sol support de manière à éviter sa plastification qui se traduirait en surface par d'importantes déformations de la chaussée.

Le principe de distribution des contraintes dans les chaussées souples est représenté ci-dessous (figure 9).

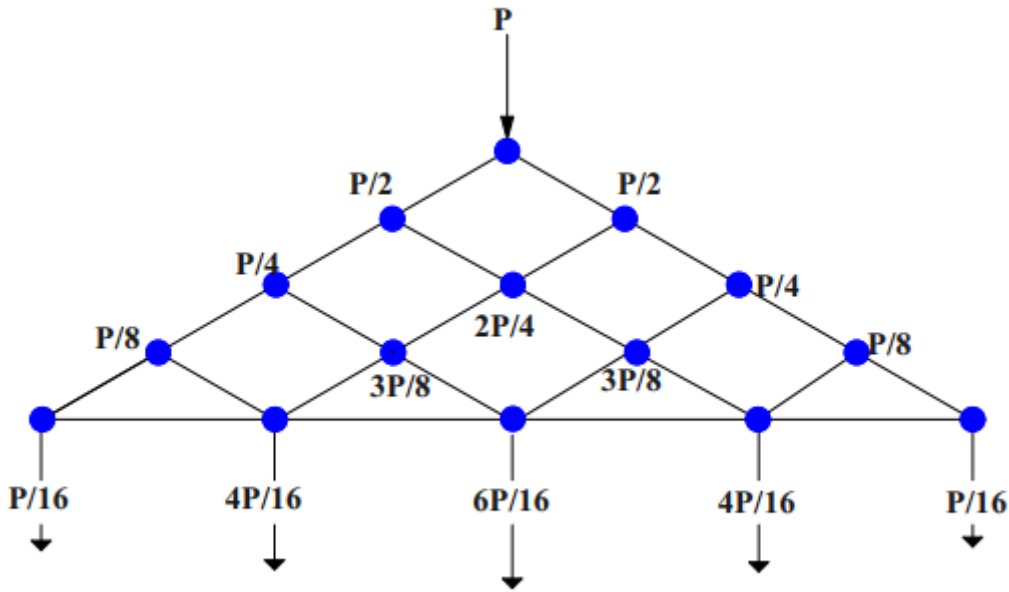


Figure 9 : Fonctionnement d'une chaussée souple [6]

1.1.2.2. Les chaussées rigidifiées [5]

Contrairement aux chaussées souples, dans les chaussées rigidifiées, la charge exercée en surface est faiblement transmise au sol support de façon uniforme. Ceci s'explique par le fait qu'une grande partie de l'effort exercé sur la couche de surface, est dissipée à l'intérieur de la dalle de béton ou des graves traités. Ces matériaux présentant une forte rigidité, peuvent mobiliser des efforts notables de traction par flexion. On observe donc un important étalement, une diffusion homogène des efforts au niveau du sol support ; ce dernier n'étant que peu sollicité. L'effort préjudiciable dans ce type de chaussée est l'effort de traction par flexion. C'est pourquoi, le principal critère de dimensionnement d'une chaussée rigidifiée réside dans la limitation des efforts de traction par flexion des matériaux sous l'effet de la répétition des charges. La figure suivante explique la distribution des charges dans ce genre de structure (figure 10).

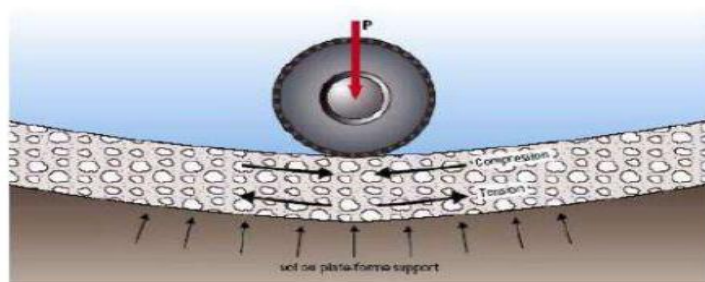


Figure 10 : Fonctionnement des structure semi-rigides [5]

1.2. Dégradation des chaussées à revêtement bitumineux

Une dégradation peut être définie comme :

- ✦ une dépréciation brutale ou progressive de l'état de praticabilité de la route et du confort offert aux usagers ;
- ✦ un processus d'usure par lequel la capacité fonctionnelle et structurale d'une chaussée diminue ;
- ✦ un passage progressif de l'état acceptable de la route à un état plus mauvais sous les effets du trafic, du climat et de l'environnement ;
- ✦ un désordre visible à la surface d'une chaussée.

Qu'elle soit revêtue ou non, toute structure routière se dégrade graduellement dès sa mise en service. Ces dégradations varient beaucoup dans leur forme et leur ampleur avec le climat, les sols, la circulation et les caractéristiques géométriques de la route.

1.2.1. Principales causes des dégradations

Les chaussées évoluent et se dégradent sous l'effet de divers facteurs. La rapidité de cette évolution et les désordres qui apparaissent sont notamment fonction du trafic poids lourds, du dimensionnement de la structure de chaussée, des conditions climatiques, de la nature des matériaux et des conditions de mise en œuvre. Ces différents facteurs peuvent être classés en trois catégories :

- les facteurs extérieurs à la chaussée (le trafic, les conditions climatiques, les conditions thermiques) ;
- les facteurs liés à la structure elle-même, à ses défauts de conception et de réalisation ;
- les facteurs liés aux matériaux constitutifs.

Certains désordres consécutifs à l'instabilité du support de la chaussée (remblais ou terrain naturel) peuvent apparaître indépendamment du trafic et du climat.

1.2.1.1. Trafic [7]

Aux termes du Code de la Route, la charge maximum autorisée sur un jumelage isolé est de 6,5 tonnes, soit un essieu standard de 13 tonnes. Cette charge est quelque fois dépassée pour raison de surcharge. La chaussée doit donc prendre en compte cette contrainte et répartir suffisamment les efforts pour qu'il n'y ait pas de déformations permanentes dans le sol support. Lors du passage des véhicules automobiles, la charge est transmise au sol sous forme de pression aux droites des pneumatiques (voir figure 11).

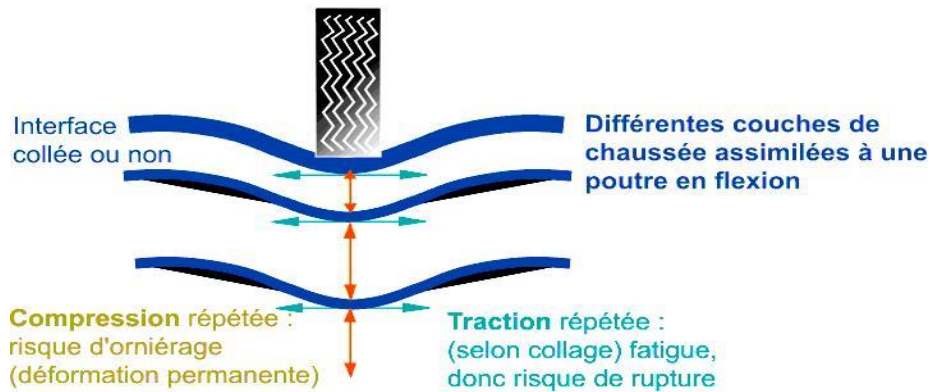


Figure 11 : Schématisation des sollicitations induites par le trafic [4]

Les matériaux granulaires constituant l'assise de ces chaussées souples ont une faible rigidité. Comme la couverture bitumineuse est mince, les efforts verticaux dus au trafic sont transmis au support avec une faible diffusion.

Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques qui se répercutent en déformations permanentes à la surface de la chaussée.

La couverture bitumineuse subit à sa base des efforts répétés de traction-flexion.

L'évolution la plus fréquentent des chaussées souples se manifeste d'abord par l'apparition de déformations permanentes du type orniérage à grand rayon, flaches et affaissements qui détériorent la qualité des profils en travers et en long. Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse engendrent une dégradation par fatigue, sous la forme des fissures d'abord isolées puis évoluant peu à peu vers un faïençage.

1.2.1.2. Conditions climatiques [7]

✦ *Pluviométrie*

La pluviométrie influe sur la teneur en eau des sols supports et sur leur portance, sur la rigidité des matériaux non traités et sur la dégradation des discontinuités de la structure (fissures, interfaces). Ceci est amplifié par le profil de la route (remblai, déblai), la nature et la largeur des accotements, l'état du dispositif de drainage et l'état de surface de la chaussée (déjà dégradé ou intact).

L'un des paramètres préjudiciables à la tenue de la chaussée est la présence de l'eau dans la structure de chaussée. L'eau peut pénétrer dans le corps de chaussée par infiltration gravitaire ou par remontée capillaire. La teneur en eau trop élevée d'un sol, provoque des désordres importants en modifiant la portance ou en favorisant l'attrition de certains granulats comme les latérites. La conséquence immédiate est l'affaissement du corps de chaussée (sous le passage des véhicules), qui se traduit en surface par des déformations principalement des affaissements

et des ornières. Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés sont particulièrement sensibles au phénomène de désenrobage. En effet, l'eau peut s'interposer entre les granulats et les liants lorsque la qualité de l'adhérence entre ces corps n'est pas suffisante. Aussi, quand les accotements ne sont pas protégés, des ravinements sont très probables. Ils se manifestent sur les bords de la chaussée, perpendiculairement à son axe, lorsque la pente transversale est trop forte.

✦ *Température*

Les variations de température (surtout lorsqu'elles sont brusques) peuvent engendrer dans les solides élastiques des champs de contrainte. Dans le domaine des chaussées, ce phénomène a des conséquences qui intéressent surtout les assises traitées aux liants hydrauliques et en particulier les chaussées en béton. Comme autres sollicitations d'origine thermique, il y a les effets de l'ensoleillement, sur la déformation des mélanges bitumineux, et sur le vieillissement du bitume (figure 12).

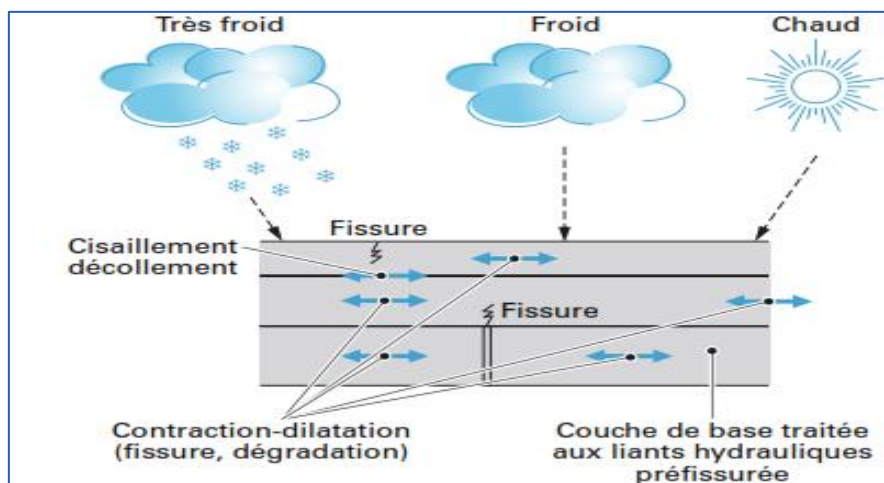


Figure 12 : Sollicitations induite par la température [8]

Pour les chaussées traitées aux liants hydrauliques (structures semi-rigides), la couche traitée est sujette au retrait thermique, de prise et de dessiccation. Ce retrait est empêché par le frottement à l'interface et peut provoquer une fissure dans la couche supérieure.

Cette fissure évolue avec les cycles thermiques : c'est le phénomène de remontée de fissure.

À basse température, la rigidité élevée des enrobés bitumineux peut entraîner la fissuration thermique de la chaussée, de même à forte température, la rigidité du bitume devient faible et il va se ramollir. Ainsi, suite au passage des véhicules, on note l'apparition des ornières sur la chaussée. C'est pourquoi, il n'est pas bon de brûler les pneus sur les chaussées.

On conclut alors que la variation saisonnière de la température a beaucoup d'effet sur la structure de chaussée.

✦ ***Ensoleillement et l'exposition aux intempéries***

L'ensoleillement et l'exposition aux intempéries provoquent un vieillissement des matériaux, qui se traduit par un durcissement des liants bitumineux et une fragilisation des liaisons granulats/liants [7].

✦ ***Sécheresse***

La dessiccation des sols (surtout ceux présentant des indices de plasticité élevés) et l'apparition des fissures de retrait en surface des chaussées.

1.2.1.3. Qualité des matériaux [7]

La qualité des matériaux est l'un des facteurs à prendre lors du choix et du dimensionnement de la structure de chaussée. Elle est d'une importance capitale car il est difficile de faire une route de qualité à partir de matériaux aux caractéristiques médiocres.

Les dégradations liées à la mauvaise qualité des matériaux peuvent être causées par :

- une granulométrie incorrecte (mauvais compactage) : risque de nids de poule
- un pourcentage élevé d'éléments inférieurs à 80µm en couche de base : risque d'orniérage
- un bitume trop mou en pays chaud : risque d'affaissement et de bourrelet
- un polissage rapide des granulats (spécialement pour les enrobés) : usure prématurée de la couche de roulement
- la présence de matières végétales dans les matériaux : risque de fissures
- la présence de matières argileuses dans des matériaux non stabilisés : risque accru de fissures.

1.2.1.4. Les défauts liés à la structure [7]

☞ ***Phase de conception***

Le dimensionnement permet de connaître l'épaisseur totale du corps de chaussée qui pourra reprendre les sollicitations du trafic dans les limites admissibles. Quand la structure est sous-dimensionnée, après la mise en service, on note des excès de sollicitations dans les zones sous dimensionnées, ce qui conduit à l'apparition prématurée des fissures ou des faïençages.

☞ ***Phase de mise en œuvre***

La phase de la réalisation de tout projet est l'une des étapes qui nécessite plus de la technique, et de rigueur. La mauvaise exécution des travaux lors de la réalisation du projet a une lourde conséquence sur la durée de vie de l'ouvrage et aussi sur la sécurité et le confort des usagers, même si le dimensionnement a été fait dans les règles de l'art avec l'utilisation des matériaux de meilleures qualités.

Ainsi, nous avons entre autres les défauts de mise en œuvre pouvant conduire à des dégradations des structures :

- défaut de compacité de l'assise et de la plateforme : conséquence, tassements différentiels conduisant à des ornières, des nids de poule ou des pelades ;
- poches de points faibles en couche de base : cassure du revêtement et une formation de nids de poule ou de flaches ;
- mauvaise mise en œuvre des bandes de revêtement : risque de fissure longitudinale de joint ;
- mauvais accrochage du revêtement sur la couche de base : risque de décollement ; risque de faïençage précoce de la chaussée et ou de pelade du revêtement.

Les conditions à l'interface des chaussées bitumineuses sont également déterminantes vis-à-vis de la durabilité des structures. Les hypothèses de collage représentatives des conditions habituellement rencontrées : par exemple, les couches bitumineuses sont supposées collées sur leur support ; défaut d'accrochage peut résulter de l'absence ou d'un mauvais dosage de la couche d'accrochage, de conditions météorologiques défavorables lors de la mise en œuvre ou de la présence d'une pollution sur la couche sous-jacente avant mise en œuvre.

1.2.2. Les différents types de dégradations

Suivant les littératures, une dégradation est soit une « maladie », une pathologie, soit une usure résultant de l'exploitation de la route ou encore une dépréciation brutale ou progressive de l'état de praticabilité et du confort offert aux usagers.

WHOLER et MINER ont développé une théorie en définissant les indices d'état pour mesurer le niveau d'endommagements des chaussées. Ils définissent une dégradation comme le résultat de l'état de fatigue qu'accuse une structure de chaussée sollicitée par une répétition de charges à l'instar des essieux des véhicules [9].

Une dégradation est souvent causée par :

- l'état de fatigue des matériaux des couches de chaussées sous charges statiques ou répétées ;
- un défaut de portance du sol support ;
- un défaut d'assainissement et de drainage des eaux ou de mise en œuvre ;
- une politique d'exploitation inappropriée ;
- du vieillissement des matériaux ;
- des accidents et infractions des usagers de la routes : surcharges et autres.

Selon que leur cause soit liée à la structure ou non on peut classer les dégradations en deux (02) types :

✦ **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 (voir tableau 1) [9].*

✦ **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, et*
- *l'usure de la couche de roulement [9].*

✦ **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 (voir tableau 1).

✦ **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 *épaufures*, les *fissures transversales de retrait*, les *fissures longitudinales* et les *deux bandes de chaussées* (voir tableau 2).

✦ Les arrachements

Les arrachements 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. Dans la catégorie des arrachements, nous pouvons noter : *le décollement*, *le désenrobage*, *le plumage*, *le peignage*, *la pelade* et *le nid-de-poule* (voir tableau 3).

✦ Les remontées de matériaux

Les remontées de matériaux sont l'apparition de matériaux à la surface du revêtement en affectant ce dernier ; ce phénomène peut soit provenir des couches inférieures, soit se manifester à partir même de la couche de roulement (cas du ressuage). Nous citons au nombre de ces dégradations, *les remontées d'eau ou de boue*, *le ressuage* et *les boursouflures* (voir tableau 4) [9].

✦ Usures de la couche de roulement

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 5) [9].

Tableau 1 : Différents sous-groupes de la famille des déformations

<i>Types de Désordres</i>	<i>Définitions</i>	<i>Causes principales</i>	<i>Évolution</i>	<i>Remèdes</i>
<i>Tôles ondulées</i>	Suite d'ondulations de faible longueur d'onde et perpendiculaires à l'axe de la chaussée.	Défaut de profilage de la couche de base ; Manque de stabilité des enrobés ; Action mécanique due au trafic.	Fissures ; faïençage ; arrachements	Réalisation d'un enduit superficiel ou d'un tapis en enrobés.
<i>Affaissements</i>	Dépressions très prononcées et souvent assez étendues localisées soit en rive ou en pleine largeur de la chaussée ; elles peuvent être soit Transversaux soit longitudinaux.	Sous dimensionnement du corps de chaussée ; tassements différentiels ; construction défectueuses ; drainage insuffisant ; chaussée non butée en rive.	-Formation de bourrelets, de fissures et faïençage. -Rupture de la chaussée en saison des pluies.	-Réalisation d'un tapis en enrobés ou d'un enduit superficiel ; -Réfection localisée ; -Drainage de la chaussée.
<i>Flaches (**)</i>	Dépressions localisées, de forme arrondie de la chaussée.	-Insuffisance en un point du corps de chaussée ou du sol support. -Stabilité insuffisante du Revêtement (enrobés, enduits superficiels).	Idem à la cellule du haut.	Déflachage ou réfection localisée suivant la profondeur de l'affaissement
<i>Ornières</i>	Affaissement localisé apparaissant sous le passage des véhicules et pouvant affecter soit la couche de roulement soit la couche de chaussée.	-Sous dimensionnement du corps de chaussée. Compactage insuffisant. -Perte de portance des couches sous-jacentes du revêtement et Stabilité insuffisante du revêtement.	Idem à la cellule du haut.	Déflachage ou réfection localisée en fonction de la profondeur.
<i>Bourrelets</i>	Renflement de la surface de chaussée, généralement accompagné d'ornière.	Idem à la cellule du haut	Idem à la cellule du haut	Idem à la cellule du haut

(**) Dégradations dues à la nature du sol

Source : [9]

Tableau 2 : Différents sous-groupes de la famille des fissurations

<i>Types de désordres</i>	<i>Définitions</i>	<i>Causes principales</i>	<i>Évolution</i>	<i>Remèdes</i>
<i>Fissures (**)</i>	Petite cassure du revêtement avec ou sans rupture du corps de chaussée ; elles apparaissent soit longitudinalement ou transversalement à l'axe de la chaussée.	Retrait ; vieillissement du revêtement ; mauvaise mise en œuvre ; mauvaise qualité des matériaux ; épaisseur insuffisante de la chaussée.	Faïençage ou destruction localisée généralisée de la chaussée.	-Colmatage des fissures en surface et réparation localisée si le corps de chaussée est atteint. -Tapis en enrobé ou enduit superficiel.
<i>Faïençage</i>	Maille de fissure plus ou moins large au niveau de la surface de roulement.	Fatigue du revêtement ; sous dimensionnement ; mauvaise mise en œuvre.	-Arrachement ; -Destruction localisée ou générale de la chaussée.	Réfection localisée ou réalisation d'un enduit superficiel ou d'un tapis enrobé.
<i>Les fissures transversales de retrait</i>	Ce sont des fissures transversales périodiques d'espacement variable intéressant l'ensemble ou une partie de la largeur de la chaussée.	Retrait des couches traitées aux liants hydrauliques	Ramification ; épaufrage des lèvres ; faïençages	-Imperméabilisation localisée du revêtement ou colmatage des fissures. -Réfection localisée du corps de chaussée.
<i>Les fissures longitudinales d'épaulement</i>	Ce sont des fissures rectilignes apparaissant en rive au niveau de la jonction de l'épaulement (ou de l'élargissement) avec l'ancienne chaussée.	-Compactage insuffisant de l'épaulement ; -Rigidités différentes des matériaux constitutifs de l'épaulement et de ceux de l'ancienne chaussée.	dégradation des bords	Idem à la cellule du haut

(**) Dégradations dues à la nature du sol

Source : [9]

Tableau 3 : Différents sous-groupes de la famille des arrachements

<i>Types de désordres</i>	<i>Définitions</i>	<i>Causes principales</i>	<i>Évolution</i>	<i>Remèdes</i>
<i>Décollement</i>	Rupture d'adhésion entre le revêtement et la couche de base	Mauvaise mise en œuvre de la couche d'accrochage ; désenrobage ; phénomène de retrait et de gonflement des matériaux de la couche de base.	Arrachement des couches sous-jacentes au revêtement ; destruction locale de la chaussée.	Tapis en enrobé ou enduit superficiel ; réparation localisée.
<i>Désenrobage</i>	Disparition du lien enveloppant les granulats du revêtement.	Mauvaise qualité des enrobés ; mauvaise adhésivité liant –granulat ; mise en œuvre par conditions atmosphériques défavorables.	Arrachement des gravillons et ruine du revêtement.	Idem à la cellule du haut
<i>Plumage</i>	Arrachement des gravillons du revêtement.	Conditions d'exécution défectueuses ; ouverture précoce à la circulation du chantier et insuffisance du liant.	Arrachement et ruine du revêtement	Idem à la cellule du haut
<i>Peignage</i>	Arrachement des gravillons du revêtement suivant des lignes parallèles à l'axe de la chaussée.	Idem à la cellule du haut	Idem à la cellule du haut	Idem à la cellule du haut
<i>Pelade</i>	Décollement du revêtement par plaques plus ou moins grandes.	Mauvaise mise en œuvre de la couche d'accrochage.	Dégradation des bords	Idem à la cellule du haut
<i>Nids de poule (**)</i>	Cavités arrondies à bords francs apparaissant sur le revêtement par arrachement de matériaux.	Défaut localisé de la couche de surface ou de base et défaut de portance ; évaluation finale des fissurations et des déformations.	Idem à la cellule du haut	Réparation locale
<i>Épaufrure</i>	Cassure des bords de la chaussée.	Érosion et mauvais drainage de l'eau. compactage insuffisant des rives ; largeur insuffisante.	Idem à la cellule du haut.	Déblanchage ou réparation localisée suivant la profondeur de l'affaissement

(**) Dégradations dues à la nature du sol

Source : [9]

Tableau 4 : Différents sous-groupes de la famille des remontées de matériaux [9]

<i>Types de désordres</i>	<i>Définitions</i>	<i>Causes principales</i>	<i>Évolution</i>	<i>Remèdes</i>
<i>Remontées d'eau, de fine ou de boue (**)</i>	Apparition à la surface du revêtement de venues d'eau ou de fine ou de boue sous l'effet du trafic à travers les défauts s du revêtement.	Mauvais drainage ; fondation en sol argileux.	Pollution complète du corps de chaussée par l'argile ; désenrobage et destruction de la chaussée par l'eau.	Drainage de la chaussée
<i>Ressuage</i>	Remontée du liant à la surface de la couche de roulement.	Mauvaise formulation du liant ; granulat ; mauvaise mise en œuvre ; température ambiante trop élevée pour la viscosité du liant.	Déformation diverse ; arrachement.	Sablage ou réfection localisée
<i>Boursoufflure (**)</i>	Surhaussement du revêtement avec fissures et décollement de la couche de surface.	Fondation en argile gonflante ou de nappes salines qui se gonflent lorsque la teneur en eau est élevée.	Déformations et arrachements.	Drainage de la chaussée Réfection localisée

(**) Dégradations dues à la nature du sol

Source : [9]

Tableau 5 : Différents sous-groupes de la famille des usures de la couche de roulement

<i>Types de désordres</i>	<i>Définitions</i>	<i>Causes principales</i>	<i>Évolution</i>	<i>Remèdes</i>
<i>Glaçage</i>	Usure du revêtement par arasement progressif des gravillons sans arrachement de ces derniers	Défaut de profilage de la couche de base ; manque de stabilité des enrobés ; action mécanique due au trafic.	Fissures ; faïençage ; arrachements.	Réalisation d'un enduit superficiel ou d'un tapis en enrobés.
<i>Tête de chat</i>	Usure partielle des matériaux du revêtement sans arrachement	Revêtement sur corps constitué de tout venant à granulométrie discontinue et granularité élevée.	Arrachement des gravillons et ruine du revêtement.	Réfection localisée Tapis en enrobé ou enduit superficiel.
<i>Disparition de la signalisation Horizontale quand elle existe</i>	Effacement partiel ou total du marquage de la chaussée.	Effet du trafic ; intempéries ; mauvaise qualité des peintures ; mauvaise mise en œuvre.	Disparition totale du marquage de la chaussée.	Idem à la cellule du haut

Source : [9]

1.2.3. Processus de dégradation des chaussées souples

Étant donné le mode de fonctionnement des chaussées souples, la répétition des contraintes dues au trafic entraîne une déformation plastique de l'assise granulaire et/ou du sol se traduisant par des déformations permanentes en surface. La couverture bitumineuse reposant sur un support peu rigide, est sollicitée à sa base par des efforts de traction par flexion dont la répétition peut conduire à sa rupture[7]. Ainsi, le processus de dégradation de ces types de chaussées comportera donc :

- ✓ l'apparition de déformations permanentes (flaches, affaissements de rive et ornières) qui croissent en gravité et en étendue ;
- ✓ l'apparition d'une fissuration longitudinale dans les bandes de roulement, qui se ramifie, se dédouble et évolue vers un faïençage [7].

La fissuration favorise les infiltrations d'eau qui amplifient la réduction de portance du support en période pluvieuse, donc aggravent les déformations permanentes ; ces infiltrations d'eau accélèrent également l'évolution de la fissuration en provoquant la cassure des bords de fissure qui conduit à des arrachements puis à des nids de poule [7].

1.3. Les enrobés bitumineux

Un enrobé bitumineux est un mélange de liant bitumineux (5 à 7 % en masse), de granulats de type 0/D, de fines (passant à 80µm), les fines étant également appelées « fillers » (calcaire broyé par exemple) et d'éventuels ajouts (polyéthylène, résine, etc.). Les propriétés des liants utilisés s'avèrent très importantes car ils assurent l'adhésion entre les granulats et ils doivent présenter une consistance variable avec la température afin de faciliter la fabrication et la mise en œuvre. En outre, le liant bitumineux transmet son comportement viscoélastique à l'enrobé [10].

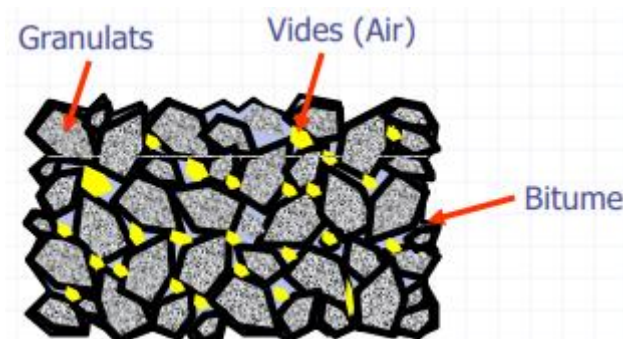


Figure 13 : Les composantes du mélange bitumineux [10]

Il existe plusieurs types d'enrobés qui diffèrent par la granularité des constituants, les classes de bitume ; les proportions granulats / bitume, ...

1.3.1. Classification des bitumes routiers

La classification est susceptible d'évolution, pour prendre en compte notamment le vieillissement que provoque l'élévation de température que subit le bitume au cours de l'enrobage. L'effet de cette élévation de température peut être simulé par l'essai RTFOT, Rolling Thin-Film Oven Test (norme ASTM D 2872) qui consiste à soumettre un échantillon de bitume à la température de 163 °C en étuve ventilée pendant 75 min. On mesure ensuite la température bille et anneau et la pénétration du bitume. Une évolution importante de ces deux grandeurs après RTFOT traduit une sensibilité excessive au vieillissement, l'essai est illustré sur la figure.

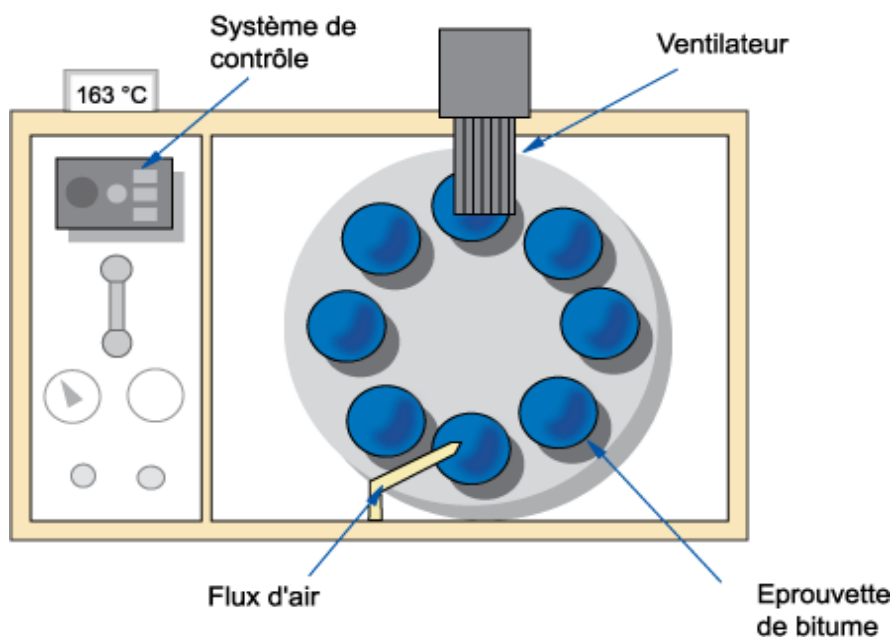


Fig.1.10 : Essai RTFOT.

- ❑ Les bitumes 160-220 sont essentiellement utilisés pour la fabrication des émulsions et la réalisation d'enrobés fins mis en œuvre en couches minces ;
- ❑ Les bitumes 70-100, 400-70 et 35-50, s'ils sont également utilisés pour la fabrication des émulsions, sont surtout destinés à la confection des enrobés denses, des bétons bitumineux et des grave-bitumes ;
- ❑ Les bitumes 20-30 sont principalement utilisés pour la confection des couches d'assise en sable-bitume. Dans le cas de sables de concassage, on peut également employer le bitume 40-50. Sous des climats plus chauds, on peut utiliser des bitumes de dureté supérieure [10].

1.3.2. Propriétés essentielles des enrobés

Les enrobés doivent subir l'accroissement de l'intensité du trafic tout en résistant aux assauts des intempéries (froid, chaleur, pluie, pollution diverse, etc.) et des déformations des fondations de la chaussée causée par divers facteurs. Les enrobés doivent donc :

- ✓ supporter les charges dues au trafic ;
- ✓ être confortables et sécuritaires ;
- ✓ protéger les diverses couches de la fondation contre les charges et les agents atmosphériques.

Les propriétés mécaniques essentielles des enrobés seront alors :

- a. Maniabilité ;
- b. Résistance à l'orniérage ;
- c. Résistance au ressuage ;
- d. Résistance à la fissuration par fatigue ;
- e. Résistance à la fissuration par retrait thermique ;
- f. Résistance à l'eau (désenrobage) ;
- g. Résistance au vieillissement (oxydation) ;
- h. Résistance à la perte de granulats (arrachement) ;
- i. Posséder une surface adhérente (macrorugosité et microrugosité) [11].

a) *Maniabilité*

La capacité à être placé et compacté avec un effort raisonnable et sans ségrégation des gros granulats. Trop de bitume rend l'enrobé trop maniable. Peu de bitume rend difficile le compactage de l'enrobé. Trop de sable naturel peut aussi rendre mélange trop maniable parce que le sable naturel a des grains ronds et lisses [11].

b) *Résistance à l'orniérage (Stabilité)*

L'orniérage correspond à l'apparition de déformations permanentes au niveau des couches supérieures de la chaussée. Il provient souvent de déformations irréversibles au sein des couches bitumineuses supérieures. Des situations de trafic lourd intense et lent ainsi que des températures élevées favorisent ce type de dégradation. Pour obtenir une bonne stabilité, une granulométrie dense favorise une bonne stabilité, des granulats angulaires, juste assez de bitume pour enrober les particules. Du bitume en excès lubrifie les granulats et leur permettant de glisser les uns sur les autres plus facilement (ce qui réduit la stabilité). Par contre un film de bitume trop élevé permet de mieux résister à la fissuration, ce qui est souhaitable [11].



Photo 1 : Ornière [11]

c) Résistance au ressuage

La migration du bitume sur la surface de la chaussée sous l'effet des charges, en particulier à des températures élevées. Pour prévenir le ressuage, il faut incorporer suffisamment de vides dans l'enrobé lui permettant d'être compressé en réduisant les vides plutôt que déplacer le bitume entre les particules vers la surface du revêtement [11].



Photo 2 : Ressuage de liant [11]

d) Résistance à la fissuration par fatigue

Apparition de microfissures sur les faces supérieure et inférieure de la couche de revêtement, qui se propagent et se rejoignent pour former des macrofissures sous l'effet des contraintes de charge imposées par la circulation.

Pour minimiser la fissuration par fatigue, utiliser la bonne classe de bitume et s'assurer d'avoir un film de bitume élevé qui rend le revêtement moins sensible aux effets de la déformation. Par contre, la stabilité sera amoindrie [11].



Photo 3 : Fissurations [11]

e) Résistance à la fissuration par retrait thermique

Mécanismes de fissuration par le haut des chaussées attribuable à une chute marquée de température ou à la fatigue engendrée par de multiples cycles de variation de température au cours desquels le seuil de résistance à la tension de l'enrobé est dépassé.

Pour minimiser la fissuration par fatigue, utiliser la bonne classe de bitume et s'assurer d'avoir un film de bitume élevé qui rend le revêtement moins sensible aux effets de la déformation. Par contre, la stabilité sera amoindrie [11].



Photo 4 : Fissures thermiques [11]

f) Résistance à l'eau

Le désenrobage se produit lorsque le lien physique entre le bitume et le granulat s'affaiblit, généralement en conséquence d'une mauvaise tenue à l'eau (adhésivité passive déficiente). Pour réduire le désenrobage, utiliser des granulats propres rugueux, hydrophobe et incorporer suffisamment de bitume pour obtenir un film de bitume élevé. Cela améliore la durabilité, mais diminue la stabilité [11].



Photo 5 : Désenrobage [11]

g) Résistance au vieillissement ou durabilité

La capacité à résister à la dégradation en raison du mouillage et du séchage, congélation et décongélation, ou des forces inter partielles excessives et à l'oxydation du bitume.

Pour obtenir une bonne durabilité, utiliser des granulats non friables, durs, non poreux et suffisamment de bitume pour recouvrir complètement toutes les particules (pour les garder au sec) et de remplir tous les vides entre les particules (pour ralentir l'oxydation du bitume). Mais peut réduire la stabilité [11].



Photo 6 : Vieillesse de la chaussée [11]

h) Résistance à la perte de granulats (Arrachement)

C'est la désintégration progressive d'une couche de revêtement bitumineux à partir de la surface vers le bas à la suite du délogement des granulats [11].



Photo 7 : Arrachement [11]

i) Posséder une surface d'adhérence

Propriété de la surface d'un revêtement qui assure le contact pneu-chaussée. Elle est liée à la qualité des granulats et est conditionnée par deux paramètres du revêtement. La macrotexture et la microtexture.

Des granulats résistants au polissage et des textures ouvertes améliorent l'adhérence. Les enrobés grenus et ceux à granulométries discontinues comme les SMA sont particulièrement efficace pour l'obtention d'une bonne adhérence.

Ces propriétés essentielles des enrobés sont parfois incompatibles et de plus, elles ne doivent pas avoir d'incidences négatives sur la maniabilité à la mise en œuvre ; Plus spécifiquement, les enrobés doivent avoir un bon rapport qualité/prix et des qualités de granulats et de bitume qui permettent de fabriquer un enrobé ayant :

- ☞ suffisamment de bitume pour assurer une bonne durabilité du revêtement ;
- ☞ suffisamment de stabilité pour résister à la déformation causée par les charges lourdes.
- ☞ suffisamment de vides pour que l'enrobé lorsque compacté par les charges lourdes, puisse absorber l'expansion du bitume due aux variations de la température tout en résistant au fluage, ressuage et perte de stabilité ;
- ☞ une limite maximale de vides pour être imperméable et empêcher la rétention d'eau dans le revêtement ;
- ☞ suffisamment de maniabilité pour faciliter la mise en œuvre sans ségrégation et sans sacrifier la stabilité et la performance ;
- ☞ pour les enrobés de surface, des propriétés du squelette granulaire (granularité et caractéristiques des granulats) assurant une surface sécuritaire sous toutes les températures [11].

La qualité d'un enrobé est fortement dépendant des proportions volumiques de ses constituants.

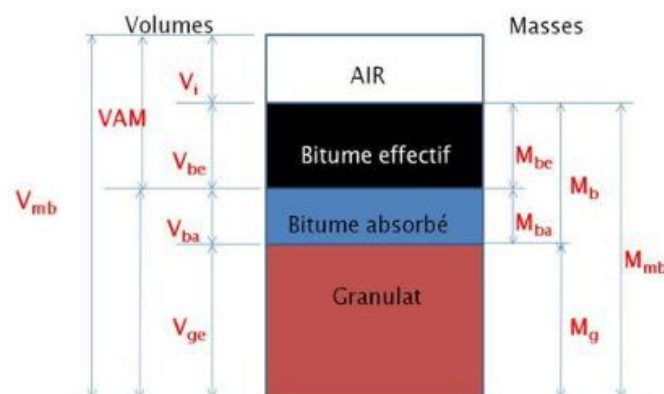


Figure 14 : Illustration de la relation entre les différents composants d'un enrobé bitumineux [12]

- M_{mb} = masse totale du mélange
 M_g = masse des granulats dans le mélange
 M_b = masse totale de bitume dans le mélange
 M_{be} = masse de bitume effectif
 M_{ba} = masse de bitume absorbé
 V_{mb} = volume brute du mélange compacté
 V_{gb} = volume apparent des granulats (pores compris)
 V_{AM} = volume occupé par l'espace entre les granulats dans un enrobé compacté
 en incluant es vides interstitiels dans l'enrobé (V_i) et le volume de bitume effectif (V_{be})
 exprimée pourcentage par rapport au volume brut de l'enrobé compacté (V_{mb}) (voir figure)
 V_{ge} = volume effectif des granulats (volume solide)
 V_{ba} = volume de bitume absorbé
 V_{bf} = volume de bitume effectif
 V_i = volume total occupé par l'aire emprisonné entre les granulats enrobés
 dans un enrobé compacté en pourcentage du volume brut de l'enrobé compacté (V_{mb})
 (voir figure 15)

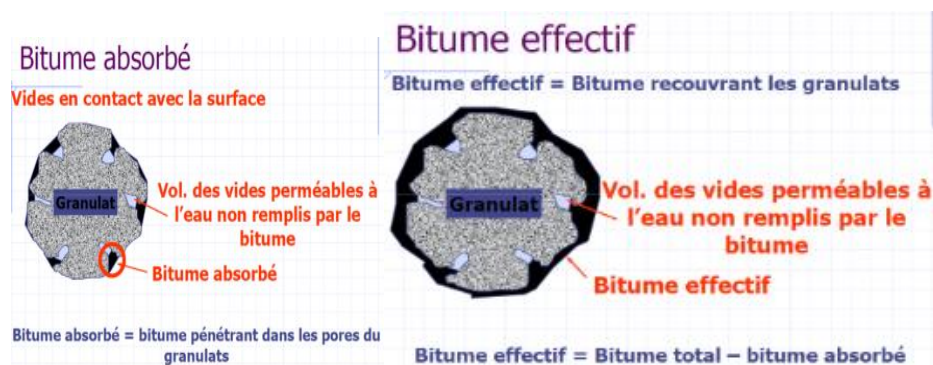


Figure 15 : Bitume effectif-bitume total-bitume absorbé [12]

La résistance à l'orniérage sera plus élevée si :

- l'angularité des granulats est forte (usage de sable concassé, gros granulats concassés) ;
- la fraction sable (<5 mm) est faible ;
- les vides interstitiels (V_i) dans l'enrobé sont élevés et les vides comblés par le bitume (VCB) sont faibles ;
- le liant possède une consistance élevée et une susceptibilité thermique faible [12].

La résistance à la fissuration par fatigue sera plus élevée si :

- le volume de bitume effectif (V_{be}) est élevé ;
- le bitume possède une susceptibilité thermique faible ;
- les vides comblés par le bitume (VCB) sont élevés ;
- la teneur en vides interstitiels (V_i) dans l'enrobé est faible [12].

La résistance à la fissuration thermique sera élevée plus :

- le volume de bitume effectif (V_{be}) est élevé ;
- le bitume possède une consistance faible et une susceptibilité thermique faible ;
- les vides comblés par le bitume (VCB) sont élevés ;
- la teneur en vides interstitiels (V_i) dans l'enrobé est faible [12].

La résistance au désenrobage et à l'arrachement seront plus élevées si :

- le volume de bitume effectif (V_{be}) est élevé ;
- le bitume possède une susceptibilité thermique faible ;
- les vides comblés par le bitume sont élevés ;
- la teneur en vides interstitiels (V_i) dans l'enrobé est faible [12].

L'équilibre entre la résistance à l'orniérage et la résistance à la fissuration des enrobés est difficile à obtenir. Les quatre paramètres suivants régissent la performance globale des enrobés :

1. la quantité de pierre dans l'enrobé (retenu au tamis 5 mm) ;
2. la susceptibilité thermique du bitume ;
3. la teneur en vides interstitiels (V_i) dans l'enrobé et la teneur en vides comblés par le bitume (VCB) ;
4. l'angularité des granulats [12].

1.3.3. Différents types d'enrobés

Il existe plusieurs types d'enrobés bitumineux, chaque type ayant un usage spécifique. On distingue par exemple les graves-bitume ; les enrobés de liaison ; les enrobés de surface [13].

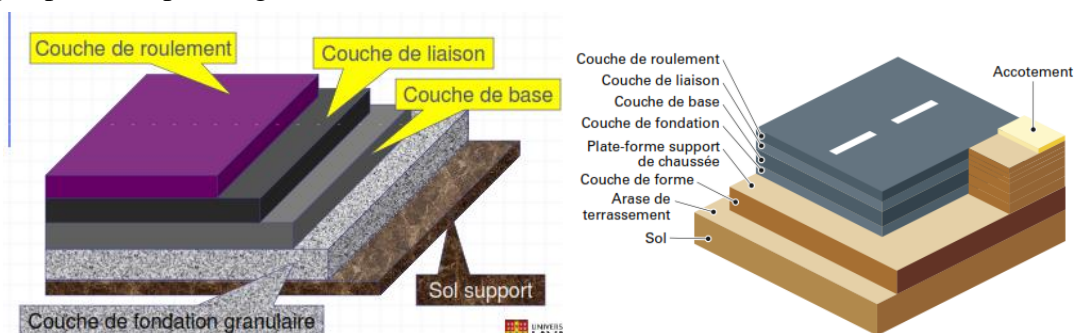


Figure 16 : Les types d'enrobé bitumineux [13]

1.3.2.1. Enduits superficiels

L'enduit superficiel est « une couche de roulement réalisée en place et constituée de couches de liant et de granulats répandues successivement », leur structure étant définie par « le nombre et l'arrangement des couches de liant et de granulats d'une part, la (ou les) classe(s) granulaire(s) des couches de granulats, d'autre part... » [14].



Photo 8 : Répandage gravillon faisant suite à un répandage de liant [12]

La technique des enduits superficiels est la technique la plus utilisée pour l'entretien de surface des réseaux à faible et moyen trafic. Les enduits superficiels permettent, pour un faible coût, de régénérer les caractéristiques de surface d'une chaussée usée et d'en améliorer l'étanchéité. Plusieurs formules d'enduits superficiels sont utilisées, chacune comportant ses avantages et ses inconvénients, le coût tant, bien entendu croissant avec le nombre de couches. Les principales d'entre elles sont les suivantes :

- structure monocouche simple gravillonnage (MSG), composé d'une couche de liant suivie d'une couche de gravillons, est la plus utilisée sur les réseaux de trafic faible et moyen ;
- structure monocouche double gravillonnage (MDG), composé d'une couche de liant suivie de 2 couches de gravillon, la deuxième ayant une granulométrie inférieure est utilisée sur tous types de réseaux ;
- structure bicouche (BIC), composé d'une couche de liant, puis d'une couche de gros gravillons suivie par une couche de liant, puis une couche de gravillons plus petites, est la structure à utiliser sur les supports hétérogènes peu étanches ;
- structure monocouche pré-gravillonnée (MPG), composé d'une couche de gros gravillons, suivie par une couche de liant, puis d'une couche de gravillons plus petits, est utilisée sur des supports hétérogènes et ressuant [14].

1.3.2.2. Enrobés bitumineux à chaud

Ce sont des mélanges de granulats et de bitume pur ou modifié, réalisés à chaud en centrale de fabrication et mis en place par un matériel spécifique appelé « finisseur ». Tant que la température est supérieure à 140°C environ, le bitume garde ses propriétés newtoniennes (sa loi contrainte – vitesse de déformation est linéaire : la constante de proportionnalité est appelée viscosité). Il s'écoule facilement et facilite l'enrobage des granulats. Le malaxage des granulats et du bitume se fait généralement pendant une durée de 30 à 60 secondes. Le durcissement apparaît lors du refroidissement. Afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage des granulats par un film mince, il faut définir une teneur en liant optimale, tout en évitant les effets défavorables, tels que l'orniérage (accumulation de déformations permanentes) des routes.

Les granulats pour enrobés sont directement au contact des pneumatiques et doivent résister à l'usure et au polissage. Ils sont, de plus, soumis à des mécanismes d'interaction entre grains et doivent donc répondre à la fois à des exigences de stabilité du mélange et de résistance à l'attrition, qui imposent des conditions très strictes relatives à la courbe granulométrique du mélange ; l'angularité des grains ; leur forme ; leur résistance à la fragmentation.

La propreté est une qualité tout à fait essentielle des granulats pour enrobés, la présence de fines pouvant en effet gêner l'adhérence du liant sur les gravillons. Comme pour les granulats pour enduits, elle est évaluée, selon la norme européenne, par la teneur en fines et par leur nocivité. Il existe plusieurs types bitumineux à chaud [15].

1.2.2.2.1. Enrobés épais pour couche de surface

Ils ont une épaisseur moyenne de mise en œuvre comprise entre 5 et 10 cm. Les textes en distinguent 3 catégories : les bétons bitumineux semi-grenus (BBSG) ; les bétons bitumineux à module élevé (BBME) ; les bétons bitumineux souples (BBS).

☞ **Bétons bitumineux semi-grenus** : Selon l'épaisseur de mise en œuvre, de 5 à 7 cm ou de 6 à 9 cm, ils sont de granularité 0/10 ou 0/14. Les 0/10 présentent un léger avantage du point de vue de la ségrégation. À l'inverse, les 0/14 offrent un niveau de macrostructure un peu plus élevé, contribuant à une adhérence supérieure à celle des enrobés 0/10, la même observation pouvant être faite pour les BBME [16].

☞ **Bétons bitumineux à module élevé** : Les BBME constituent une évolution des enrobés épais permettant de mieux répondre aux attentes en matière de résistance à l'orniérage et de comportement mécanique face à l'accroissement des sollicitations lourdes, l'augmentation des performances étant obtenue par l'emploi de bitume de grade plus

dur (souvent 20/30 au lieu de 35/50 ou 50/70 pour les BBSG), d'ajouts de polymères, d'additifs spéciaux, tels que poudre d'asphalte ou fibres [17].

☞ **Bétons bitumineux souples** : Ils conviennent aux chaussées souples à faible trafic et à faible niveau d'exigence en matière d'adhérence. Les catégories les plus réalisées sont le BBS1 (0/10 en 4 à 5 cm d'épaisseur) et le BBS2 (0/10 en 4 à 6 cm d'épaisseur). Constitués le plus souvent pour la partie minérale à partir de sable roulé et de granulats alluvionnaires semi-concassés, et pour le liant d'un bitume 70/100, ou plus rarement 50/70, au dosage élevé, ils sont « déformables » et adaptables au support, mais en contrepartie peu résistants à l'orniérage [18].

Les principales différences entre BBSG et BBME concernent les performances en matière de résistance à la fatigue et de module de rigidité, supérieurs pour les BBME à 9 000 MPa (et même 12 000 pour la classe supérieure), contre 6 000 à 8 000 MPa pour les BBSG.

1.2.2.2.2. Enrobés minces pour couches de surface

La recherche d'économie sur les travaux de construction a conduit à rechercher des solutions innovantes. Le développement de bitumes modifiés par des polymères et de l'emploi d'additifs est intimement lié à la mise au point de nouvelles formules d'enrobés bitumineux de couches de surface en faible épaisseur, offrant de meilleures performances sur le plan de la qualité d'usage et de la durabilité.

Les enrobés « minces » sont aujourd'hui largement utilisés pour la réalisation de couches de roulement sur chaussée neuve ou en entretien de chaussées.

Ils n'ont pas d'effet structurel, leur rôle étant essentiellement d'apporter, ou de restaurer, les caractéristiques de surface de la chaussée. Compte tenu de leur faible épaisseur, les formulations ont dû être adaptées pour obtenir une maniabilité suffisante lors de la mise en œuvre, essentiellement par l'introduction d'une discontinuité dans la courbe granulométrique. Ainsi les 0/10, formulation la plus utilisée, présentent une discontinuité de type 2/6, et les 0/6 une discontinuité de type 2/4.

Ces formulations discontinues conduisent à des enrobés à texture ouverte nécessitant la réalisation d'une couche d'accrochage légèrement surdosée pour assurer l'imperméabilisation de la couche de roulement.

La famille des enrobés minces se décline en trois catégories.

Bétons bitumineux minces (**3 à 4 cm**) : Les bitumes modifiés ont permis l'utilisation des bétons bitumineux minces (BBM) sur des supports dégradés et déformables, ce qui n'était pas réalisable durablement avec un bitume pur.

Bétons bitumineux très minces (BBTM) (**2 à 3 cm**) : sont utilisés pour l'entretien de surface en couche la plus mince possible sur des chaussées neuves ou déjà renforcées et en bon état structurel, et adaptées à des trafics poids lourds élevés.

Bétons bitumineux ultra-minces (**inférieure à 2 cm**). Ils sont les derniers-nés de la famille des enrobés à chaud ; ils dérivent à la fois de la technique des BBTM pour la composition de l'enrobé et des enduits superficiels par la faible épaisseur mise en œuvre. Les fonctions de collage et d'imperméabilisation sont assurées simultanément par le répandage d'une couche de liant au dosage élevé de 500 g/m^2 , ajusté suivant l'état du support, ce qui a conduit à la mise au point de matériels spécifiques pour l'application simultanée de la couche d'accrochage et de la couche de BBUM. Les domaines d'emploi privilégiés sont pour les BBUM 0/6 celui des revêtements urbains, et pour les BBUM 0/10 l'entretien des routes secondaires [19].

1.2.2.2.3. Bétons bitumineux drainants

Les « enrobés drainants » se caractérisent par un pourcentage élevé de vides communicants, obtenu par une granularité adaptée du squelette minéral, la teneur en sable 0/2 étant réduite à 10 ou 14 %, et la teneur en fines à 3 ou 4 %. Du fait de ce pourcentage élevé de vides, un revêtement en BBDr présente la particularité d'être perméable à l'eau, qui traverse le revêtement et s'écoule à la base de la couche pour ressortir sur le côté de la chaussée. Cette perméabilité lui confère des qualités exceptionnelles d'adhérence à grande vitesse ; réduit considérablement les projections d'eau (la chaussée paraît sèche) ; réduit de façon sensible le bruit de roulement [20].

On distingue 2 types de BBDr en fonction de leur granularité, le BBDr 0/6 et le BBDr 0/10, et 2 classes de performances suivant le pourcentage de vide obtenu par compactage à la presse à cisaillement giratoire : classe 1 : de 20 à 25 % de vides ; classe 2 : de 25 à 30 % de vides.

Le liant est un bitume pur, sous trafic modéré, ou fortement modifié par des polymères, à raison de 4,4 à 4,8 % de liant, voire 5,2 % (avec un liant fortement modifié et ajout de fibres) pour les chaussées fortement circulées et autoroutières.

Les épaisseurs habituelles sont de 3 à 4 cm pour les BBDr 0/6 et de 4 à 5 cm pour les BBDr 0/10 [20].

1.3.2.3. Enrobés à froid

L'intérêt pour les techniques à froid s'est accru dans les années 1990 pour des raisons d'économie d'énergie et de protection de l'environnement. Sous le vocable « enrobés à froid », sont rassemblés plusieurs types de mélanges bitumineux dont le point commun est d'être constitué de granulats et d'émulsion de bitume.

1.2.2.3.1. Enrobés coulés à froid

Les enrobés coulés à froid, sont capables d'assurer, à la fois imperméabilité et rugosité. Appliqués en couche d'épaisseur comprise entre 0,6 et 1,5 cm avec un matériel spécifique, les enrobés coulés à froid sont formulés pour combiner une montée en cohésion rapide autorisant une ouverture au trafic dans un délai bref ; une rugosité convenable ; une durabilité suffisante et une bonne imperméabilité.

Le liant est une émulsion cationique de bitume pur ou modifié, des additifs solides (de type chaux ou ciment) étant souvent ajoutés au cours du malaxage pour ajuster la vitesse de rupture de l'émulsion et la vitesse de montée en cohésion après application.

Le domaine d'emploi des ECF recoupe en partie celui des enduits superficiels et celui des BBTM. En adaptant leur formulation, ils peuvent être appliqués sur tout type de réseau.

En voirie urbaine, ils sont de plus en plus préférés aux enduits, en raison notamment de leur extrême minceur et de l'absence de rejets [21].

1.2.2.3.2. Bétons bitumineux à froid

Pour des raisons de protection de l'environnement, et grâce aux progrès importants réalisés dans leur formulation, ils suscitent maintenant de plus en plus d'intérêt. Les courbes granulaires sont des 0/6 ou 0/10, plus rarement des 0/14, le plus souvent continues. Selon les techniques développées par les entreprises, le liant résiduel peut être soit du bitume pur (50/70 ou 70/100) apporté par une seule émulsion, soit un mélange de deux bitumes purs apportés par 2 émulsions différentes.

Les épaisseurs de mise en œuvre vont généralement de 2 à 5 cm, plus rarement davantage. Une couche d'accrochage de 300 à 400 g/ m² précède l'application de l'enrobé. La mise en circulation est possible dès la fin du compactage. Le domaine d'emploi est plutôt celui du réseau secondaire, pour assurer le renouvellement de la couche de roulement tout en assurant un léger reprofilage [21].

1.2.2.3.3. Enrobés à froid stockables

Ce sont des enrobés hydrocarbonés à froid, pouvant être stockés pendant plusieurs semaines ou plusieurs mois, destinés à l'entretien courant des chaussées : réparations localisées, déflachage, etc. Les enrobés stockables traditionnels sont des matériaux monogranulaires 2/4, 4/6 ou 6/10 enrobés à l'émulsion d'un bitume fluxé ou fluidifié.

Les enrobés denses, obtenus par enrobage d'un squelette minéral 0/6 ou 0/10 à granularité continue, sont une nouvelle génération d'enrobés stockables apparue plus récemment. Leur domaine d'emploi privilégié est le reprofilage de chaussées bombées ou déformées avant application d'un enduit ou autre revêtement de surface [21].

1.3.4. Caractérisation de la performance des enrobés

Le liant bitumineux transmet son comportement viscoélastique à l'enrobé. Il faut donc une teneur en liant optimale afin d'assurer la cohésion du mélange et le bon enrobage de tous les grains du mélange par un film mince de bitume, et ce, tout en évitant des problèmes de fluage et d'orniérage trop prononcés à haute température (dans le cas d'une trop forte teneur en bitume).

La connaissance des propriétés mécaniques des matériaux routiers permet d'apprécier les rapports qui existent entre la contrainte et la déformation élastique et la relation entre les niveaux de contrainte, ou de la déformation élastique et la rupture.

Il existe plusieurs types d'essais pour la détermination des propriétés mécaniques : Essai Duriez ou essai de compression simple - Essai Marshall - Essai à la presse à cisaillement giratoire (PCG) - Essai d'orniérage - Essai de module complexe - Essai de fatigue [10].

Tableau 6 : Les différents essais sur l'enrobé et les paramètres déterminés

Essais		Normes
Essai duriez	<ul style="list-style-type: none"> ○ Tenue à l'eau de l'enrobé (résistance au désenrobage) ○ Masse volumique de l'enrobé ○ Rc (résistance à la compression simple) ○ R'c ○ Rc/R'c ○ Compacité ○ % de vides 	EN 12697-12
Essai Marshall	<ul style="list-style-type: none"> ● Teneur en vides des enrobés ; ● Masse volumique apparente de l'enrobé ; ● Stabilité S (force maximale appliquée) ; ● Valeur de fluage (valeur de déformation en 1/10 mm correspondant à la stabilité) ; 	EN 12697-30

	• Compacité	
Essai PCG	Susceptibilité à l'orniéage Maniabilité	NF EN 12697-31
Essai d'orniéage LCPC	Orniéage (trafic élevé)	NF P 98-253-1
Essai de fatigue	Fissuration	NF EN 12697-24

Source : [10]

1.4. Les granulats

Les granulats utilisés dans les techniques routières peuvent être naturels ou artificiels. Ils sont dits naturels lorsqu'ils sont issus de roches meubles ou massives, extraites in situ, et qu'ils ne subissent aucun traitement autre que mécanique. On les qualifie d'artificiels lorsqu'ils proviennent soit de la transformation thermique de roches, minerais et déchets, soit de la démolition d'ouvrages divers.

Le rôle des granulats est d'abord mécanique. Ils sont choisis pour leur résistance aux usages, leur taille, leur origine et leur répartition afin de supporter au mieux les usages attendus. Les matériaux granulaires constituent environ 95% de la masse de l'enrobé (80-85% du volume)

Classification des granulats routiers

La granularité est la distribution dimensionnelle des grains d'un granulat. Elle traduit la distribution pondérale des granulats élémentaires dans les matériaux étudiés. En portant en abscisse les ouvertures de mailles de tamis et en ordonnée les pourcentages de tamis cumulés, on obtient ainsi une courbe dite courbe granulométrique.

En construction routières les granulats se classent d'abord selon leur granularité, il existe six classe granulaires principales caractérisées par les dimensions extrêmes d et D des granulats rencontrés (norme XP P 18-540, octobre 1997) :

- Les fillers 0/D avec $D < 2$ mm et au moins 70% de passant à 0.063 mm.
- Les sablons 0/D avec $D \leq 1$ mm et au moins 70% de passant à 0.063 mm.
- Les sables 0/D avec $1 < D \leq 6.3$ mm.
- Les graves 0/D avec $D \geq 6.3$ mm.
- Les gravillons d/D avec $d \geq 1$ mm et $D \leq 125$ mm.
- Les ballasts d/D avec $d \geq 25$ mm et $D \leq 50$ mm.

La teneur en fines d'un granulat est définie par le passant à 0.063 mm [10].

Les principaux essais mécaniques sur les granulats sont résumés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Essais mécaniques sur les granulats

Essais	Paramètres déterminés	Normes
Essais mécaniques		
Micro-Deval humide	La résistance à l'usure et à l'attrition	P18572
Essai de polissage	La résistance au polissage	P18-575
Los Angeles	La résistance à la fragmentation	P18-573

Source : [10]

CHAPITRE 2 :

ÉTAT DES LIEUX DES NIDS-DE-POULE ET PRÉSENTATION DES MÉTHODES DE RÉPARATIONS USUELLES AU BENIN

Dans notre pays le Bénin, pour une bonne politique de gestion des infrastructures routières, il a été mis en place une campagne de recueils des données routières organisée par la direction générale des Infrastructures et du Transport (MIT) tous les trois ans (03 ans). Ces campagnes nous permettent d'avoir une vue globale de l'état du réseau routier national et d'avoir une idée de l'état des lieux des réparations faites dans les années antérieures. Nous parlerons dans ce chapitre des différentes méthodes d'évaluation des routes revêtues au Bénin et de l'état des réparations des chaussées souples puis les méthodes usuelles de réparations des dégradations des routes revêtues.

2.1. Méthode d'évaluation des chaussées à revêtement bitumineux au BENIN [22]

Pour permettre à la route de servir dans un bon état de praticabilité, il est plus que nécessaire de l'entretenir durant sa période de service et de faire des études diagnostiques sur ses moindres pathologies afin d'y remédier le plus tôt possible. Les différentes formes d'entretien viennent après une évaluation de la route. L'évaluation consiste en l'auscultation visuelle et l'auscultation de la structure de la route en vue d'établir un diagnostic précis pour sa remise en état. C'est elle qui révèle les différents (es) désordres ou pathologies de cette dernière en indiquant de ce fait leur nature, leur origine, leur gravité et impacts possibles.

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation des routes revêtues : entre autres, nous avons la méthode VIZIR, la méthode CEBTP-LCPC, de AASHO, du Centre de Recherches Routières (CRR) de Bruxelles et la loi de MINER.

Ces trois (03) méthodes mettent en évidence l'indice de qualité de service de la chaussée. De plus, les deux dernières méthodes mettent en exergue l'état de fatigue des matériaux et permettent de déterminer la durée de service ou la portance résiduelle de toute structure mise en service. La méthode du VIZIR et celle du CEBTP-LCPC sont les plus utilisées au Bénin et aussi dans certains pays tropicaux de l'Afrique. Ces dernières sont donc les méthodes sur lesquelles nous nous attarderons dans ce développement.

2.1.1. La méthode VIZIR

VIZIR est une méthode d'évaluation des structures de route par système informatisé. Elle est issue de l'expérience des services techniques français SETRA-LCPC en matière de diagnostic de chaussées et d'évaluation de réseaux. Elle est également basée sur des recherches internationales du LCPC, principalement sur les continents africain (Niger en 1980, à Madagascar en 1982, au Cameroun en 1983, au Gabon en 1985, au Bénin en 2003) et asiatique (en Corée en 1987 et 1989, en Chine en 1989) [22].

Dans son évolution, la méthode VIZIR est passée de la saisie manuelle des dégradations des chaussées adoptées jusqu'en 1988, à un enregistrement des informations par ordinateur grâce au matériel DESY du LCPC qui dispose d'un logiciel de calcul.

VIZIR va plus loin qu'un simple répertoire de dégradations par référence à leur étendue et leur gravité, d'autant plus que son objectif final est l'évaluation de la qualité des réseaux routiers. Sa méthodologie d'évaluation s'appuie sur les paramètres classiques de l'auscultation et permet de calculer manuellement ou à l'aide du logiciel, l'Indice de surface IS qui varie de 1 pour les meilleures chaussées à 7 pour les plus mauvaises. La méthode VIZIR est scindée en trois (03) volets :

- ® la classification et la quantification des dégradations ;
- ® le relevé et la notation des dégradations ;
- ® la détermination des besoins en entretien [22].

2.1.1.1. Classification et quantification des dégradations

Ce premier volet de la méthode VIZIR intervient dans le cadre d'études générales de gestion de l'entretien des réseaux routiers ou d'études particulières d'entretien d'un itinéraire. Son but est de fournir l'image de l'état de surface d'une route à un instant donné et d'identifier des zones d'équi-qualité classées en trois niveaux de dégradation [22].

Ces trois niveaux de dégradation sont utilisés pour déterminer la nature et le type de travaux requis. Dans le cas des dégradations superficielles, l'identification de la dégradation suffit pour définir la solution et dans des dégradations structurelles, elle n'est qu'un élément d'un diagnostic plus complexe qui fait intervenir d'autres critères [22].

Les dégradations répertoriées dans la méthode VIZIR concernent essentiellement les chaussées souples à revêtement bitumineux. Elles sont classées en deux (02) catégories comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent :

- ✦ les dégradations de type A ;
- ✦ les dégradations de type B [22].

2.1.1.2. Relevé et notation des dégradations

Le relevé des dégradations est effectué par un opérateur qui parcourt l'itinéraire et qui note :




- le type de dégradation ;
- le degré de gravité de cette dégradation ;
- son étendue, c'est-à-dire la longueur de la route ou la surface affectée.

VIZIR fournit à l'opérateur une typologie des dégradations, et pour chacune d'entre elles, trois niveaux de gravité. Le relevé peut se faire manuellement, en parcourant la route à pied ou dans une voiture.

L'opérateur reporte alors ses observations (identification de la dégradation et estimation de sa gravité) sur un schéma d'itinéraire, c'est-à-dire un document représentant le linéaire de la route, dont l'échelle et la précision sont appropriés au type d'étude. Le relevé peut aussi se faire à l'aide du matériel DESY 2000 du LCPC.

Pour aider l'opérateur dans son travail, la méthode VIZIR lui propose un catalogue de dégradations et une méthode de représentation graphique, synthétisés dans les tableaux 8 et 9. Dans ces tableaux, les niveaux de gravité sont des valeurs moyennes qui conviennent à de nombreux réseaux routiers ; cependant, elles peuvent être modifiées en fonction des objectifs d'entretien que l'on se fixe ainsi que du niveau de service attendu [22].

Tableau 8 : Niveau de gravité des dégradations de type A

Gravité			
Dégradations			
Déformation	Sensible à l'utilisateur mais peu important $f < 2\text{ cm}$	Graves déformations, affaissements localisés ou orniérage $2 \leq f \leq 4\text{ cm}$	Déformation affectant gravement la sécurité ou le temps de parcours $f > 4\text{ cm}$
Orniérage			
Fissuration	Fissures fines dans les traces de roues ou dans l'axe	Fissures franchement ouvertes et /ou souvent remaniées	Fissures très ramifiées et/ou très ouvertes ; lèvres parfois dégradées
Faièçage	Faièçage fin sans départ de matériaux maillage large ($> 50\text{ cm}$)	Faièçage plus serré ($< 50\text{ cm}$) avec parfois départ de matériaux, arrachements et nids de poules en formation	Faièçage très ouvert, découpage en pavés ($< 20\text{ cm}$) avec parfois départ de matériaux,

Réparation	Soit réfection de tout ou partie du corps de chaussée Soit intervention de surface liée à des défauts de types B	Intervention de surface liée à des défauts de types A, tenue satisfaisante de la réparation.	Intervention de surface liée à des défauts de types A, dégradation apparaissant sur la réparation elle-même
-------------------	---	--	---

Source : [22]

Tableau 9 : Niveau de gravité des dégradations de type B

Gravité / Dégradations	1	2	3
Fissures longitudinales de joint	Fine et unique	Large (1 cm au plus) sans arrachement Fine ramifiée	Large avec épaufrures des lèvres ou large ramifiée
Nids de poules pour 100 m de chaussée	Quantité < 5 Taille max Ø30	Quantité 5 à 10 et taille max Ø30 ou Quantité < 5 et taille max Ø100	Quantité > 10 et taille max Ø30 ou Quantité 5 à 10 et taille max Ø100
Arrachements : désenrobage ; plumage ; pelage et mouvement de matériaux	Ponctuels sans apparition de la couche de base	Continus ou ponctuels avec apparition de la couche de base	Continus avec apparition de la couche de base
	Ponctuels	Continus sur une bande de roulement	Continus sur une bande de roulement et très remarquables

Source : [22]

2.1.1.3. Utilisation des quantificateurs de dégradation pour la détermination des besoins en entretien

VIZIR quantifie des dégradations pour estimer la qualité des chaussées qui sont étudiées soit dans le cadre d'une étude de gestion de l'entretien routier (réseau), soit dans le cadre d'un projet de réalisation de travaux (itinéraire). Il faut dans chacun de ces cas, même si c'est à un niveau différent de précision, déterminer les solutions de travaux de remise en état.

- Dans le cas des dégradations de type A, la solution va dépendre de plusieurs facteurs et le diagnostic associera dégradation, portance, trafic, ... Il faut donc

établir une note globale de l'état visuel tout comme il existe des notes ou des classes de notation pour les autres paramètres ;

- En ce qui concerne les dégradations de type B, la solution d'entretien découle de la reconnaissance de la dégradation seule et il n'est pas nécessaire de faire appel à d'autres paramètres pour faire le diagnostic [22].

2.1.1.4. Indice de dégradation

L'indice de dégradation est l'indice visuel global qui détermine l'état de la chaussée. Il se détermine sur une longueur de route à partir de trois groupes de dégradations :

- fissuration et faïençage ;
- déformation et orniérage ;
- réparations.

Pour obtenir cet indice, une démarche en quatre étapes est menée.

- On détermine d'abord l'**indice de fissuration I_f** qui dépend de la gravité et de l'étendue de la fissuration ou du faïençage sur la longueur de route considérée. Lorsqu'il y a à la fois fissuration et faïençage, on prend la plus forte des deux valeurs.
- On calcule ensuite l'**indice de déformation I_d** qui dépend de la gravité et de l'étendue de la déformation et de l'orniérage.
- La combinaison de l' I_f et de l' I_d donnera un premier indice qui représente une note de dégradation permettant de qualifier la chaussée.
- On procède enfin à une correction du premier indice de dégradation. Ceci se fera en fonction de la gravité et de l'étendue de certaines réparations ; certaines réparations masquent en effet une déficience de la chaussée et étaient donc utilisées comme facteur aggravant dans l'estimation de la qualité de surface.

Après cette correction, on aboutit à un indice global de dégradation I_s qui qualifie la chaussée sur la longueur choisie pour le calcul. Il varie de 1 à 7 et se détermine comme suit :

- les notes 1 et 2 : correspondent à de bons états de surface ne nécessitant pas (ou à la limite de faire) de travaux ;
- les notes 3 et 4 : correspondent à des états de surfaces assez moyens, suffisamment mauvais pour déclencher les opérations d'entretien ;
- les notes 5, 6 et 7 : correspondent à de très mauvais états de surface nécessitant de gros travaux d'entretien ou de renforcement.

Le diagramme de VIZIR met en exergue le principe de la détermination de la note d'état de surface et la détermination de l'indice de dégradation (figure 17) [22].

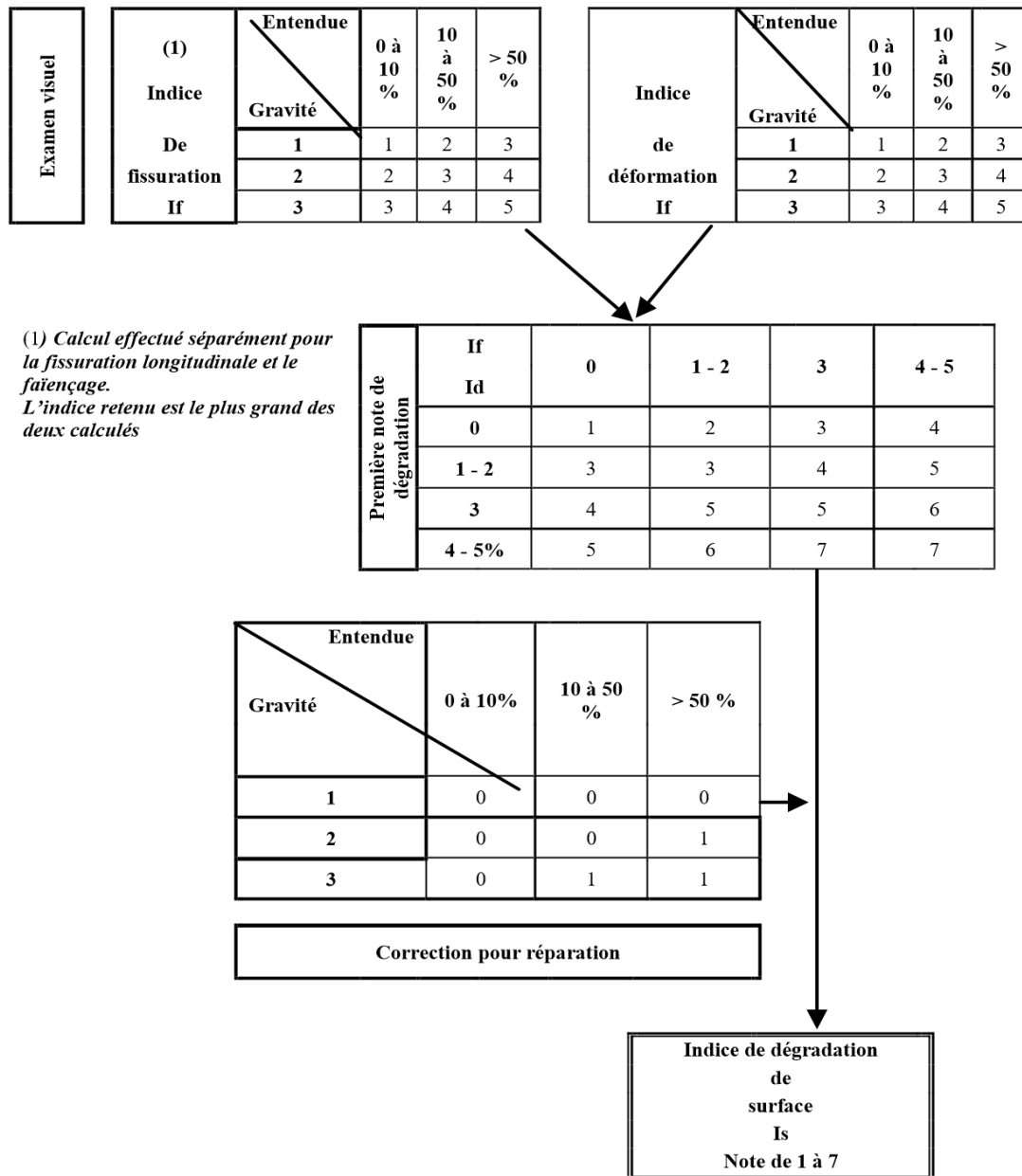


Figure 17 : Diagramme VIZIR [22]

2.1.1.5. Note de qualité de la chaussée

La note de qualité résulte du croisement de la valeur de l'indice I_s qualifiant la surface de la chaussée et de celle de la déflexion qualifiant la portance globale de la chaussée et du sol support. La déflexion est classée en trois (03) catégories déterminées par deux seuils d_1 et d_2 tels que :

- d_1 : valeur de la déflexion en-dessous de laquelle les chaussées se comportent généralement bien ;
- d_2 : valeur de la déflexion au-dessus de laquelle les chaussées se comportent mal ;
- $d_1 - d_2$: zone d'indétermination.

Voici à titre indicatif les valeurs pratiquées dans les pays tropicaux de la sous-région (voir **tableau 10**).

Tableau 10 : Seuils de déflexions pratiqués en Afrique

² Seuils	Niger	Mali	Cote d'ivoire	Cameroun	Gabon
D1 (1/100 mm)	40	60-70	50-75	50-60	80
D2 (1/100 mm)	60	80-100	100-150	80	100

Source : [22]

Le croisement de l'indice de dégradation et des valeurs de déflexion permet de déterminer les notes de qualité Q_i de la chaussée selon le tableau 11.

La grille de la note de qualité Q_i qui varie de 1 à 9 peut s'interpréter comme suit :

$Q_1 - Q_3$: comme intervention, on a des travaux d'entretien ;

$Q_4 - Q_6$: zone d'indétermination due à l'inadéquation entre la portance et l'état visuel ;

$Q_7 - Q_9$: la chaussée doit subir des travaux de renforcement.

Tableau 11 : Note de qualité Q_i

Déflexion	d_1		d_2
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Indice de dégradation IS de surface			
1-2 : peu ou pas de fissure ou pas de déformation	Q_1	Q_3	Q_6
3-4 : Fissures sans ou avec peu de déformation	Q_2	Q_5	Q_8
5-6-7 : Fissures et déformations	Q_4	Q_7	Q_9

Source : [22]

2.1.1.6. Détermination de la solution

La détermination de la solution déborde du cadre du VIZIR qui est une méthode pour déterminer la qualité d'un réseau routier et les travaux nécessaires à sa remise en état et non une méthode de calcul de renforcement de chaussées. La solution est déterminée par le biais d'un croisement entre la classe de trafic et la note de qualité de la chaussée.

Pour un matériau de renforcement donné, compte tenu du niveau de risque associé à chaque classe de trafic, on dispose d'un tableau à deux entrées où figurent les épaisseurs pré-calculées. Le calcul de cette épaisseur peut s'effectuer en appliquant :

- ® **soit la méthode de la réduction de la déflexion qui consiste à appliquer une formule du type :**

$$e = \frac{c}{\sqrt{d_0}} \log \frac{d_0}{d_1}$$

e : épaisseur de renforcement ;

d0 : déflexion avant renforcement ;

d1 : déflexion après renforcement ;

c : constante du matériau qui dépend de l'épaisseur du matériau et de la valeur d0 de la déflexion.

cette formule n'est utilisable que si l'allongement vertical ε_z est représentatif du mode de rupture de la chaussée et de sa dégradation, c'est-à-dire seulement dans le cas de chaussées souples à faible épaisseur d'enrobé qui restent souples après renforcement.

soit la méthode rationnelle ALIZE III du LCPC qui consiste à calculer les contraintes de traction et les allongements dans les matériaux de chaussée et à les comparer aux contraintes et aux allongements admissibles de ces mêmes matériaux pour un trafic donné. Il s'en suit que les matériaux utilisés en renforcement doivent être parfaitement connus et donc avoir fait l'objet d'essais de laboratoire : évaluation du module E, de l'allongement admissible ε_z , de la contrainte admissible σ_z en particulier [22].

2.1.2. La méthode du CEBTP-LCPC

Cette méthode d'auscultation des chaussées s'applique aussi bien aux études de réseau qu'aux études d'itinéraires.

Les études de réseau consistent en une évaluation statistique de la qualité des structures et en une détermination des travaux d'entretien et de remise en état. Elles prennent en compte les données économiques locales, le niveau du trafic et sa probabilité d'évolution

Les études d'itinéraires quant à elles consistent en l'évaluation des caractéristiques des structures et des solutions applicables par tronçons homogènes. Ainsi, les solutions de remise en état vont de la réparation ponctuelle au renforcement en continu sur de grandes longueurs de chaussées en passant par l'amélioration des caractéristiques géométriques et du confort [23].

□ Méthodologie

Les auscultations dans les deux cas (études de réseaux et d'itinéraires) sont semblables et s'articulent autour des points ci-après :

- ☞ l'historique de la chaussée ;
- ☞ le relevé des dégradations ;
- ☞ les mesures de déflexions

Ces trois points sont traités dans les mêmes conditions que la méthode VIZIR. Pour quantifier la qualité apparente des chaussées, on adopte une notation qui compare en pourcentage le linéaire d'itinéraire atteint par les dégradations à la longueur de la section unitaire prise en compte (par exemple 500 m ou 1000 m). Cette notation est définie comme suit :

- ☞ pour moins de 10 % de dégradations ;
- ☞ pour 10 à 50 % de dégradations ;
- ☞ pour plus de 50 % de dégradations.

En combinant ensuite les deux types de dégradations (fissures/déformations), on obtient la grille ci-dessous qui chiffre la qualité apparente d'une section de chaussée (**tableau 12**) [23].

Tableau 12 : Qualité apparente de la chaussée (CEBTP)

Fissures	1	2	3
Déformations	1	2	3
1	1	2	3
2	3	4	5
3	5	6	7

Source : [23]

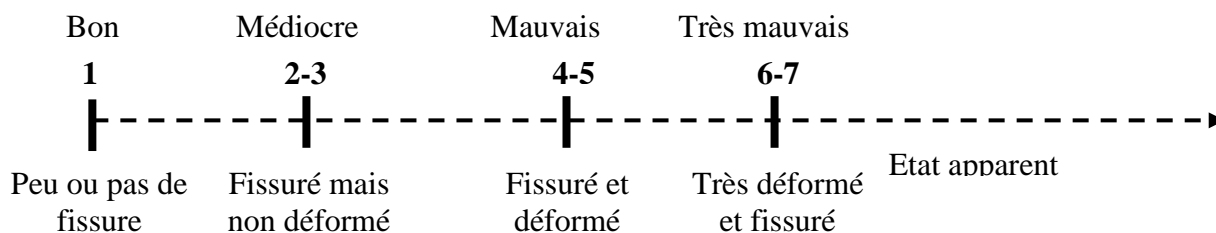


Figure 18 : Mise en exergue de la qualité apparente de la chaussée [23]

□ **Calage des résultats**

Le calage des résultats est une démarche qui vise, à partir des seuils de déflexion caractéristiques propres à l’itinéraire ou au réseau, à comparer les paramètres d’état apparent et de déflexion en vue de déboucher sur une grille de décision et de choix de solutions comme dans le tableau 13.

Tableau 13 : Calage des résultats selon la méthode du CEBTP-LCPC

Déflexion		Etat apparent	
		Faible	Elevé
		d1	d2
Bon	1	Q1	Q2
Fissuré non déformée	2-3	Q2	Q3
Déformé et fissuré	4-7	Q3	Q4
			Q5

Entretien (yellow diagonal label from Q1 to Q3)

Renforcement (yellow diagonal label from Q3 to Q5)

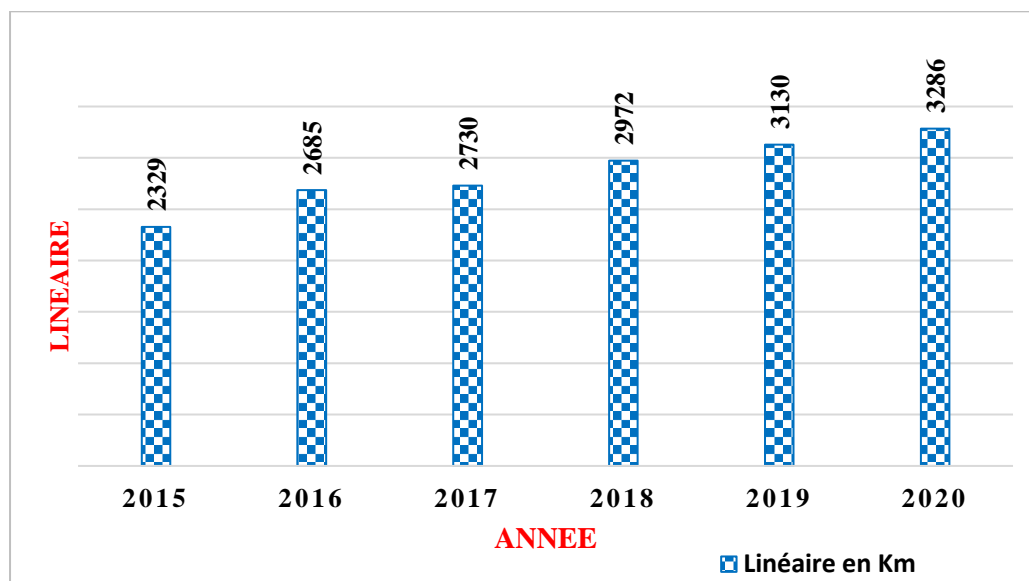
Source : [23]

Conclusion

Les deux méthodes d’évaluation de la chaussée exposées ci-dessus permettent d’avoir une appréciation globale de l’état de la chaussée et de définir la méthode de traitement des pathologies observées sur les chaussées lors des auscultations. La plus méthode utilisée par la Direction de la Gestion et de Suivi des Infrastructures (DGSE) au Bénin, est la méthode VIZIR. Pour une dégradation d’ordre structurelle, cette méthode nous permet de déterminer l’indice de dégradation de la chaussée, afin d’identifier les solutions de réparation. En ce qui concerne les dégradations superficielles, la solution de réparation est déterminée à partir de l’auscultation visuelle de la chaussée. Mais les données du relevé de dégradations sont insuffisantes pour définir une méthode de réparation des nids-de-poule. Il est nécessaire de trouver alors d’autres techniques plus appropriées.

2.2. Présentation d du réseau routier au Bénin

Dans le souci d'assurer l'entretien du réseau routier au Bénin, la Direction de la Gestion et de Suivi des infrastructures a mis sur pieds une campagne de recueil des données routières (relevés des dégradations des chaussées et le comptage manuel du trafic), qui s'effectue chaque trois an. Les résultats issus de ces campagnes ont permis d'apprécier l'évolution des routes revêtues au Bénin de 2015 à 2020 (voir graphe 1) [24].



Graphe 1 : Évolution linéaire des chaussées revêtues de 2015 à 2020 [24]

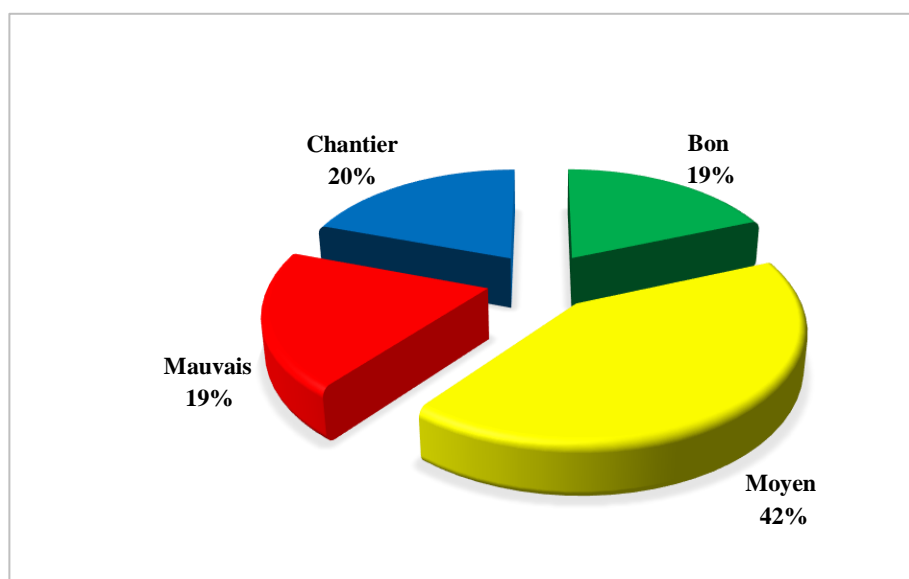
Ce graphe nous montre que le nombre de chaussées revêtues réalisées de 2015 à 2020 augmente d'une année à l'autre de façon linéaire. Ce qui justifie la construction de nouvelles routes chaque année. Il est très important de trouver une politique d'entretien des routes revêtues au Benin.

La dernière campagne de recueil des données routières a eu lieu en 2020.

Cette campagne de recueil des données routières effectuée du décembre 2019 au janvier 2020, nous a permis d'avoir les chiffres suivants :

- ✦ Le linéaire du réseau inspecté est de 4 618 km soit un taux de couverture de 78%. Le reste du réseau est en chantier (1 167 km soit 20% du réseau classé) et inaccessible (158 km soit 2%) (voir **graphe 2**).
- ✦ Les routes revêtues totalisent un linéaire de 3 286 km contre 3 131 km en 2019 et 2972 km en 2018 en raison des travaux d'aménagement entrepris dans le cadre du PAG [24].

Le bilan des résultats obtenus est reporté sur le graphe suivant.



Graphique 2 : État du réseau routier en 2020 [24]

Les routes revêtues par contre n'ont pas connu d'entretien courant et d'importantes dégradations ont été relevées au cours de l'inspection sur la RINIE2 (Bohicon-Dassa et Béroubouay - Kandi - Malanville), la RN6 (Djougou-N'dali) et la RNIE3 (Djougou-Natitingou-Tanguiéta-Porga (**Figure 19**).

Au vu des résultats de la campagne de recueil des données routière en 2020, nous pouvons conclure qu'il est nécessaire de trouver des méthodes de réparation efficace des routes en mauvais et moyen état et faire un bon suivi de celles en chantier et en bon état.

2.3. Matériaux disponibles pour une utilisation en revêtement bitumineux au Bénin

2.3.1. Les enduits superficiels (ES)

Les enduits superficiels peuvent être en monocouche ou bicouche à simple ou double gravillonnage constitués de granulats, de liants hydrocarbonés et éventuellement d'une dope d'adhésivité. La granularité utilisée doit permettre de former une mosaïque de telle sorte que les granulats de petites dimensions remplissent les vides entre les gros granulats.

Le liant doit être choisi de façon à adhérer convenablement à la surface sur laquelle il est appliqué. Son dosage doit être tel que le granulat puisse s'y accrocher sans donner lieu à du ressuage. De plus il doit, après épandage, présenter une viscosité suffisamment élevée pour empêcher que le trafic n'arrache les granulats, provoquant ainsi la pelade du revêtement.

L'utilisation d'une dope d'adhésivité permet d'assurer le mouillage du granulat par le liant et s'opposent ultérieurement à la rupture de cette liaison.

La structure de l'enduit (monocouche ou bicouche) dépend du trafic et de l'état du support. Les structures monocouches sont composées d'une couche de granulat (3/8 et 8/16) et d'une couche de granulats (6/10 et 10/14) pour les trafics faibles T_1 , T_2 et T_3 . Pour les structures bicouches nous avons deux couches de granulats (2/4 et 6/10) et deux couches de granulats (4/6 et 10/14). La rapidité d'exécution et le coût peu élevé des enduits superficiels font qu'ils sont plus utilisés. Cependant ils sont limités au trafic faible.

2.3.2. Les enrobés denses

Ce sont des mélanges de liant (bitume) et de granulats en centrale posés à chaud et qui doivent être répandus et compactés pendant qu'ils soient à une température élevée. La température minimale de pose est de 120°C. Elles assurent les rôles de rugosité, d'étanchéité et d'uni de la couche de roulement.

Au Bénin, les bitumes couramment utilisés pour la confection des enrobés denses sont : les bitumes purs, les bitumes fluidifiés ou Cut-back, les bitumes fluxés et les émulsions de bitumes.

2.4. Evaluation de la route mairie lokossa-INSTI lokossa-RN2 bis

Pour mieux apprécier l'état d'une route, il est conseillé dans le fascicule 1 du code de bonne pratique pour la reconnaissance des sols, de procéder :

- ☞ à la collecte des données et informations sur la route ;
- ☞ à l'inspection visuelle du tronçon en étude et au relevé des dégradations ;
- ☞ au croisement des résultats de l'auscultation visuelle et ceux des mesures de déflexion afin d'apprécier l'ampleur des dégradations dans la zone d'étude ;
- ☞ aux campagnes de carottage et de sondage afin d'identifier la nature des matériaux de la plateforme et la structure du corps de chaussée.

Ce chapitre parlera donc de l'historique de la route « **Mairie Lokossa-INSTI-Lokossa –RN2 bis** », la description des conditions climatiques de la zone ; et l'auscultation visuelle dudit tronçon.

2.4.1. Historique de la route d'étude

Avant 2009, la route « Mairie de Lokossa-INSTI LOKOSSA-RN2 bis » était construite en pavé. Mais en 2009, elle a été reconstruite par l'entreprise ADEOTI dans le cadre des fêtes tournantes de l'indépendance.

Elle a été construite et aménagée en 2x2 voies. La largeur de chaque voie est de sept (07) mètre, gravillonnée en monocouche et séparée par un terre-plein central de deux mètres (2m). Un entretien courant a été fait jusqu'à la rupture du fond routier en 2020. Depuis 2020, il n'y a plus d'intervention par rapport à la réparation des dégradations de la chaussée. Pour intervenir sur des sections de la Route Nationale RN2 Bis, toute la circulation était déviée sur le tronçon d'étude. Ce qui a fait que l'état de la chaussée a été endommagé à cause des surcharges du trafic.



a)



b)

Photo 9 : Route Mairie de Lokossa-INSTI Lokossa-RN2 bis

(Source : Hervé ZETOME)

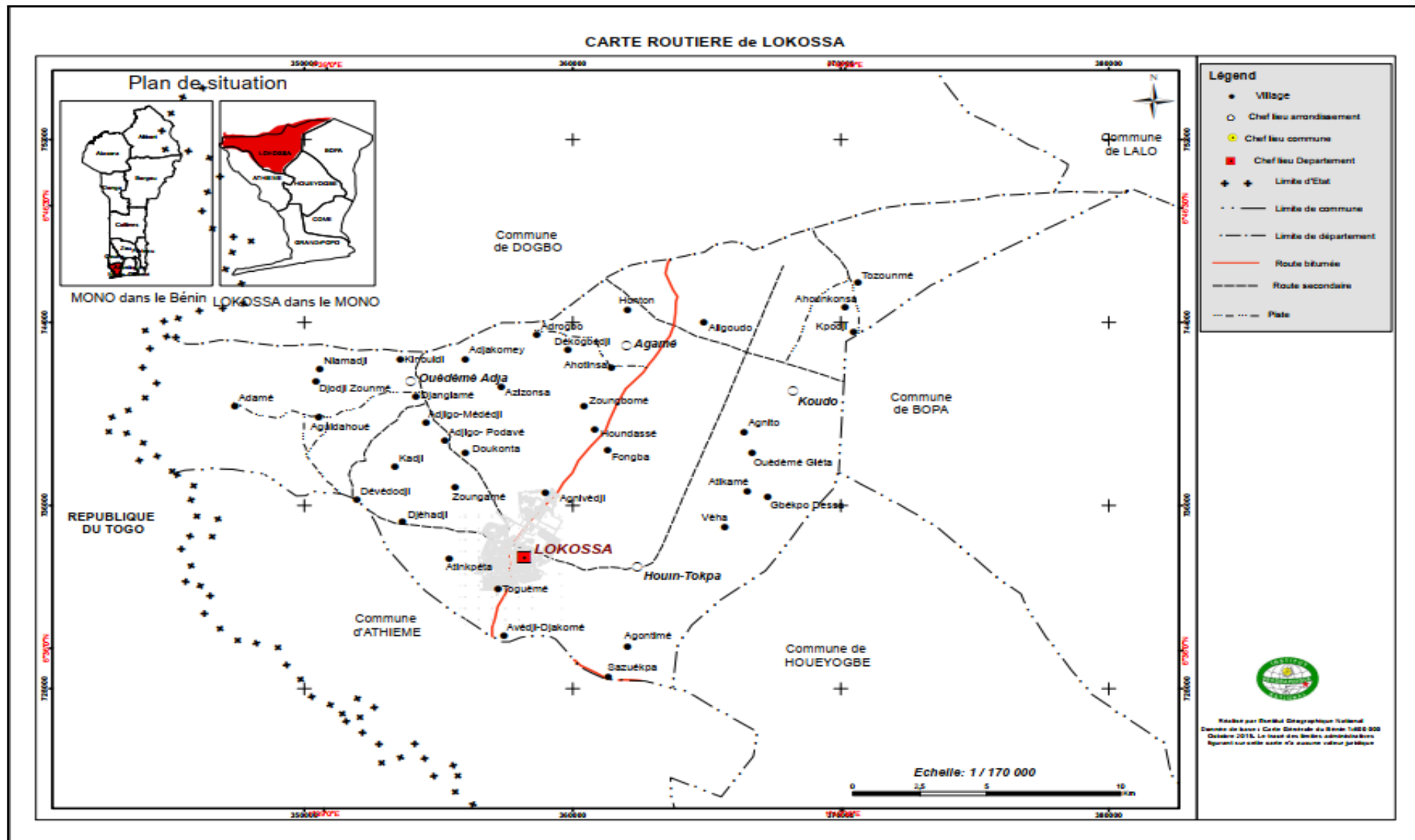


Figure 19 : Carte du réseau routier de la commune de Lokossa (source : IGN, 2019)

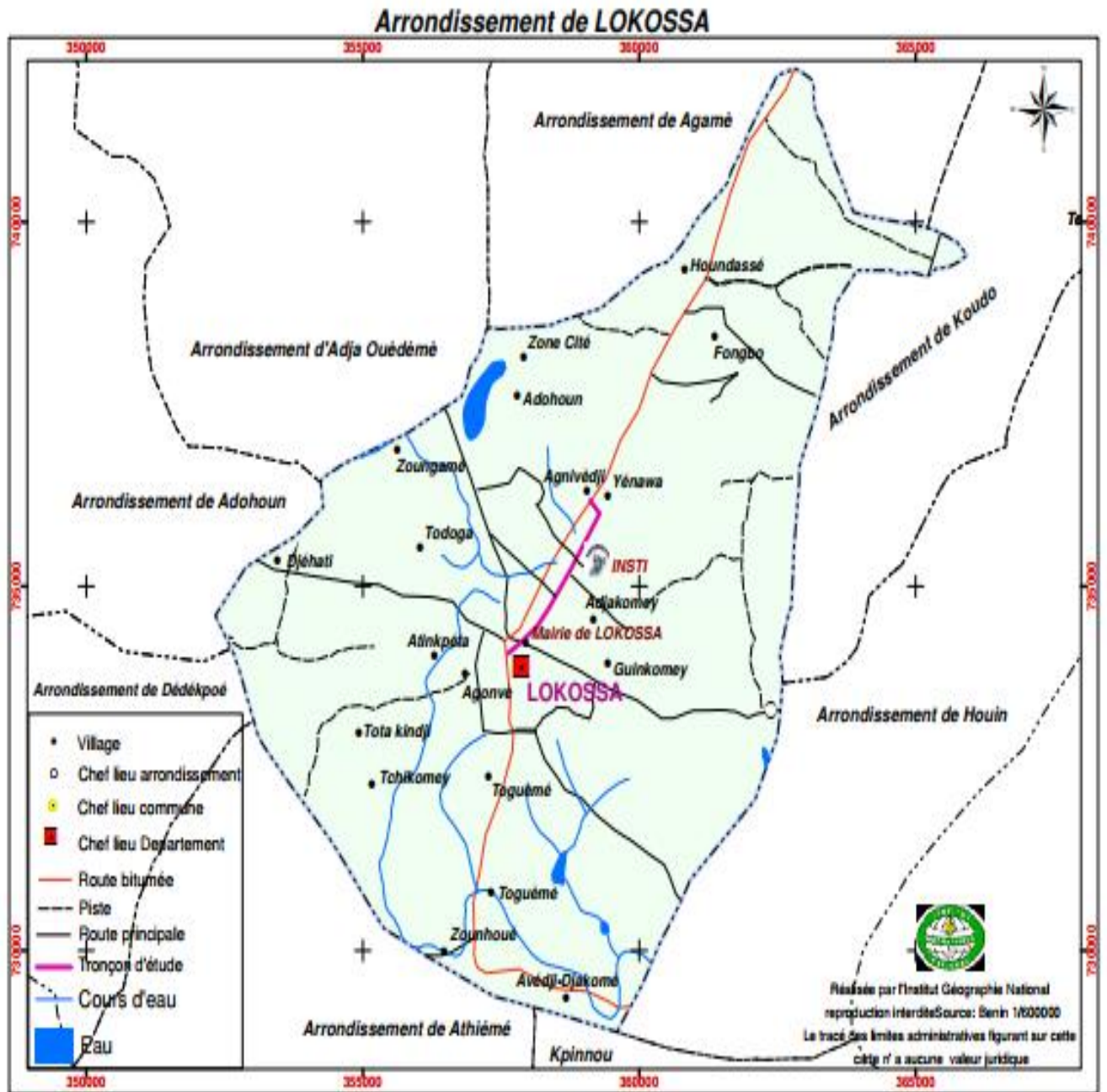


Figure 20 : Situation du tronçon d'étude (source : IGN, 2022)

Les figures 21 et 22 montrent le milieu d'étude et le tronçon d'étude. Notre tronçon d'étude est celui en couleur violet.

2.4.2. Le trafic sur le tronçon d'étude

Après sondage et les informations reçues auprès de la Direction Départementale des Infrastructures et des Transport (DDIT), le tronçon d'étude est une voie à faible trafic (t_6-t_{3+}).

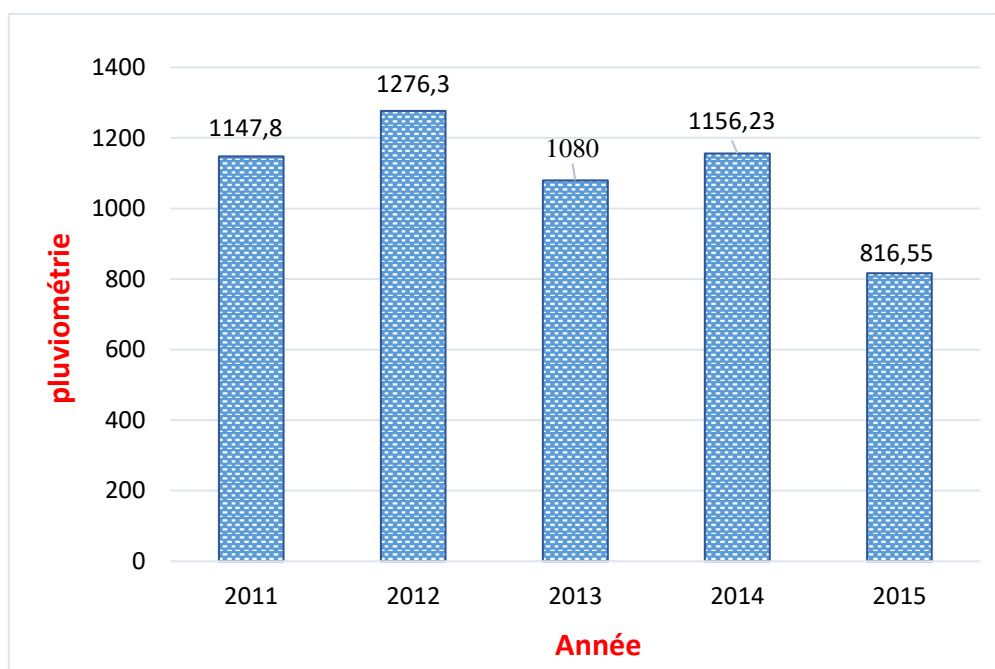
2.4.3. L'environnement d'étude

☞ Le relief et le climat

La commune de Lokossa, comme les départements du Mono et du Couffo, est caractérisé par un climat subéquatorial marqué par une pluviométrie moyenne variant entre 800 mm et 1200 mm, avec une humidité relative variant entre 55% et 95% et quatre (04) saisons étalées de façon alternée sur toute l'année :

- Une grande saison sèche de novembre à mars ;
- Une grande saison pluvieuse de mars à juillet ;
- Une petite saison sèche entre juillet et août ;
- Une petite saison pluvieuse d'août à novembre ;
- La température peut atteindre 27,9° C avec une insolation annuelle moyenne de 2024h/an.

Ce type de climat est appelé « climat semi-aride et favorise le gonflement des sols argileux.



Graph 3 : Evolution de la pluviométrie sur les cinq (05) dernières années dans la commune de Lokossa (Source : ASECNA, 2016) [25]

La commune de Lokossa est une région de plateaux argileux, de terre de barre dont l'altitude maximale dépasse rarement 200 m. Elle est caractérisée par de basse vallée et de formations alluviales avec des dépressions plus au moins prononcées, ce qui donne à l'ensemble du relief un aspect bosselé.

☞ Le sol

De façon générale, dans la commune de Lokossa, on rencontre deux types de sols : les sols ferrallitiques et les sols hydromorphes.

L'arrondissement de Lokossa est caractérisé par les sols alluviaux, les vertisols, les sols hydromorphes de type alluvial et colluvial des vallées des fleuves et lacs assez riches en matières organiques, très fertiles mais inondés de façon saisonnière par les crues du fleuve Mono.

2.4.4. La lithologie du tronçon d'étude

La route Mairie de Lokossa-INSTI Lokossa-RN2 bis, réalisée dans le cadre des fêtes tournantes de l'indépendance en 2009, est composée sur le plan structural :

- ☞ d'une couche de fondation en graveleux latéritique d'épaisseur 20 cm ;
- ☞ d'une couche de base en grave non traités d'épaisseur 30 cm ;
- ☞ d'un revêtement réalisé en enduit superficiel monocouche (**figure 23**).

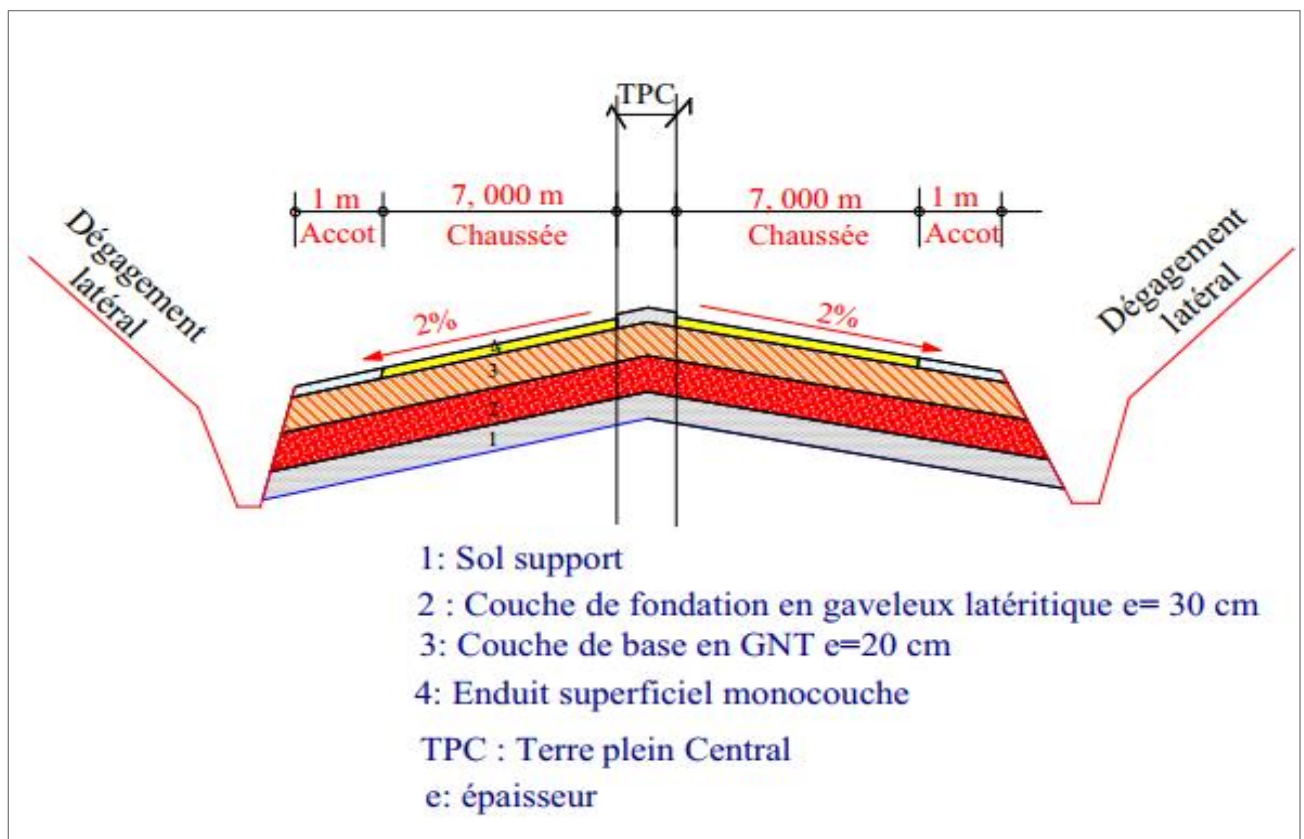


Figure 21 : Coupe transversale sur la chaussée (source :DDIT Lokossa)

Accot= accotement

2.4.5. Inspection visuelle du tronçon « Mairie de Lokossa-INSTI LOKOSSA »

L'auscultation visuelle d'une chaussée est incontestablement l'un des éléments importants à prendre en compte pour établir le diagnostic et choisir la technique d'entretien à mettre en œuvre. On est amené à recenser et à décrire avec soin les défauts apparents dans le souci d'une classification adéquate et d'une meilleure appréciation des causes permettant de proposer des remèdes les plus appropriées. L'analyse de l'état de dégradation doit être faite sur la base d'une inspection visuelle détaillée qui doit porter sur un relevé systématique, le type de chaque dégradation, leur étendue et leur gravité. La longueur de section de relevé dépendra d'une manière générale de l'homogénéité de l'itinéraire à ausculter.

Les différentes pathologies enregistrées lors de l'inspection visuelle peuvent être classées en quatre familles :

- ✦ **Les déformations (ornières) ;**
- ✦ **Les arrachements (pelade, plumage, nids de poules, épaufrures).**

Les niveaux de gravité des dégradations sont donnés dans le tableau 13 ;

tableau 14 : Degré de gravité des dégradations

Dégradations	Niveau de gravité
Nids de poule	Gravité 1 : nombre de nids-de-poule inférieur à 5 et d'un diamètre inférieur à 30 cm. Gravité 2 : nombre de nids-de-poule variant de 5 à 10 et d'un diamètre inférieur à 30 cm ou d'un nombre inférieur à 5 et d'un diamètre supérieur à 30 cm. Gravité 3 : nombre de nids-de-poule supérieur à 10 et d'un diamètre inférieur à 30 cm ou d'un nombre variant de 5 à 10 et d'un diamètre supérieur à 30 cm
Déformations	Gravité 1 : déformations sensibles à l'usager, mais peu importantes. La flèche est inférieure à 2 cm sous la règle de 1,50 mètre. Gravité 2 : graves déformations, affaissements localisés ou orniérage. La flèche varie de 2 à 4 cm sous la règle de 1,50 mètre. Gravité 3 : déformations affectant la sécurité et/ou la vitesse. La flèche est supérieure à 4 cm sous la règle de 1,50 mètre.
Epaufrures	Gravité 1 : amorce d'épaufrure ; Gravité 2 : épaufrure entaillant la chaussée sur plus de 30 cm ; Gravité 3 : épaufrure entaillant la chaussée sur plus de 50 cm.

Source : [22]

Les niveaux de gravité des autres dégradations se trouvent en annexe 1

Observations générales

Au cours de l'inspection visuelle du tronçon Mairie de Lokossa-INSTI Lokossa-RN2 Bis, qui fait environ 2km, les remarques suivantes ont été faites :

- la chaussée est très affectée par les pathologies tels que : les nids de poules, les pelades, les plumages et les ornières ; les dégradations les plus prononcées sont les nids-de-poule ;
- les différentes pathologies sont remarquées sur la quasi-totalité du tronçon ;
- les pathologies sont plus prononcées du côté droit, dans le sens Mairie-INSTI Lokossa que du côté gauche ;
- certains points réparés en 2020 par la Direction Départementale des Infrastructures et du Transport ont connu de nouvelles dégradations ;
- sur le tronçon, des nids-de-poule de gravité 3 (largeur 1,1 m et de longueur 1,5m avec une profondeur de 7 cm au début de la clôture ABPF) ont été relevés. Les nids-de-poule de niveau élevé sont aussi plus remarqués du PK0+000 au PK0+200 (début de la clôture du CEG1 au feu tricolore). La même remarque est faite devant l'École primaire de la Gendarmerie du côté droit ;
- épaufrure et des nids-de-poule enregistrés au niveau du carrefour du marché côté gauche ;
- pelades et plumages enregistrés devant la clôture de la SONEB et devant celle de la SBEE ;
- la chaussée a subi une déformation (ornière) devant le portail de l'entrée principale de l'INSET (**photo 10**).



a) Nids-de-poule au PK0+150 côté droit (à côté de la clôture du CEG 1 Lokossa)



c) Pelade au PK0+200 Côté gauche



d) Ornière au PK1+730 côté gauche, sens Mairie-INSTI Lokossa



e) Plumage devant le complexe scolaire de la Gendarmerie/ABC



b) Épaufiture et nids-de-poule au PK0+060

Photo 10 : Dégradations relevées lors de l'auscultation visuelle du tronçon

Source : Hervé ZETOME

Les dégradations les plus prononcées sur le tronçon d'étude, sont les nids-de-poule (voir tableau 15).

Tableau 15 : Relevé des dégradations de chaussée du PK0+000 au PK2+000, sens Mairie de Lokossa-INSTI Lokossa (côté droit)

PK		0+000	0+100	0+200	0+300	0+400	0+500	0+600	0+700	0+800	0+900	1+000	1+100	1+200	1+300	1+400	1+500	1+600	1+700	1+800	1+900	2+000	
Type A	Déformations																						
	Fissures																						
	Faiencages																						
Type B	Nids-de-poule		↔						↔			↔		↔		↔				↔			
	Arrachements																						
	Pelade						↔						↔					↔					
	Ressuages																						
	Épaufrures		↔													↔							
	Plumages													↔									

Source : Hervé ZETOME

LÉGENDE



Dégradation de niveau de gravité 1



Dégradation de niveau de gravité 2



Dégradation de niveau de gravité 3

2.5. Analyse de l'évolution des dégradations de 2020-2022

Une comparaison des relevés de dégradations de 2020-2022 est nécessaire afin de mieux apprécier l'évolution des dégradations (tableau 16).

Tableau 16 : Relevé des dégradations en 2020 et en 2022.

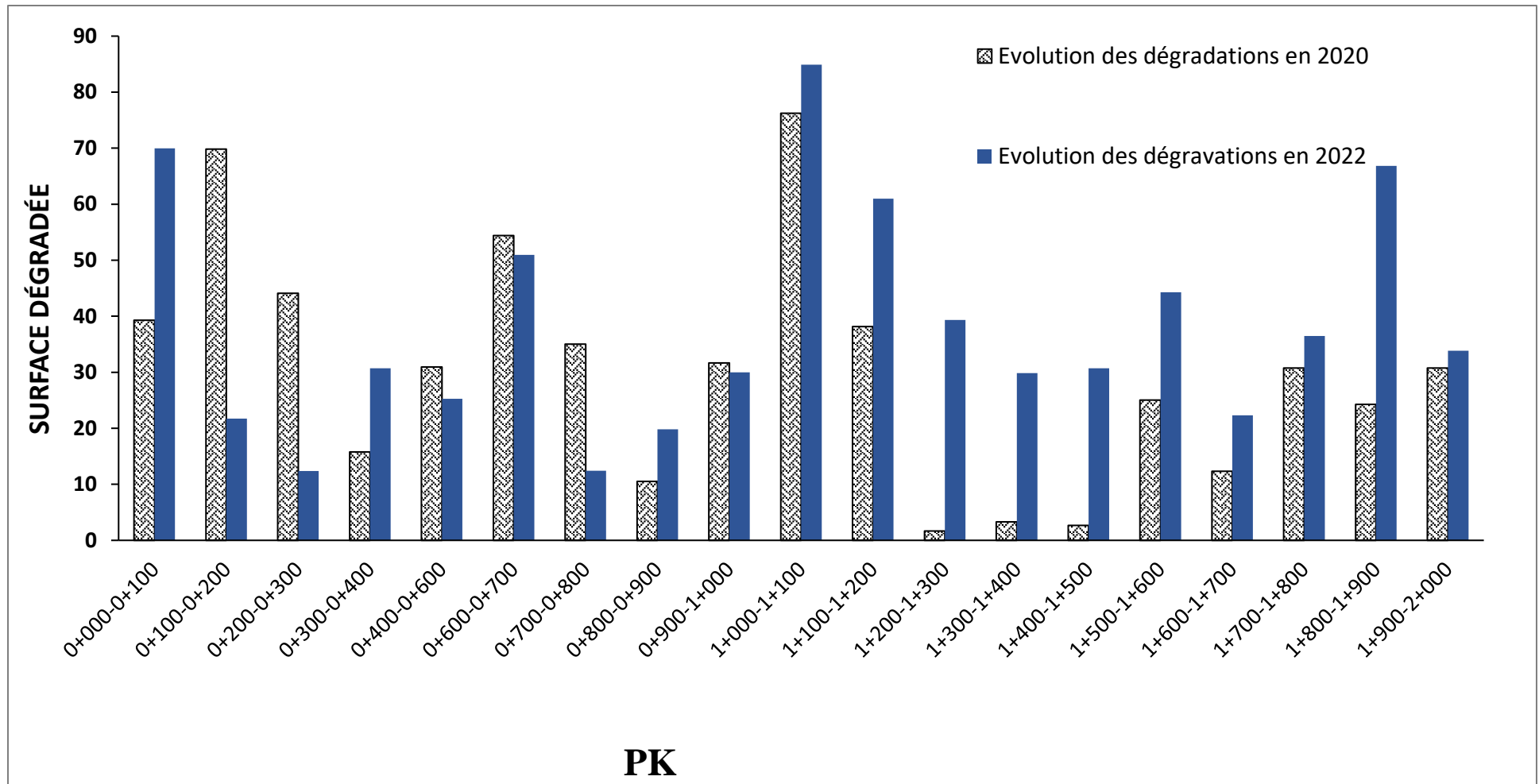
FICHE DE RELEVÉ MANUEL DES SURFACES DÉGRADÉES		
Axe : Mairie Lokossa-INSTI Lokossa-RN2 Bis		
Année : Mai 2022		Auteur : Hervé ZETOME
PK	Surface dégradée	Repère
0+000-0+100	69,99	Début clôture CEG1 au feu tricolore
0+100-0+200	21,71	Feu tricolore-fin clôture maison du peuple
0+200-0+300	12,36	Fin clôture maison du peuple-portail CAEB
0+300-0+400	30,72	Portail CAEB-Fin clôture CLCAM
0+400-0+600	25,26	Fin clôture CLCAM- résidence DD/PN
0+600-0+700	50,94	Résidence DD/PN-Carrefour Motel
0+700-0+800	12,41	Carrefour Motel-début clôture SITEX
0+800-0+900	19,82	Début clôture SITEX-fin clôture SITEX
0+900-1+000	29,98	Fin clôture SITEX-direction de l'alphabétisation
1+000-1+100	84,89	Direction de l'alphabétisation-début clôture CARDER
1+100-1+200	60,99	Début clôture CARDER-fin clôture CARDER
1+200-1+300	39,34	Fin clôture CARDER-SBEE
1+300-1+400	29,85	SBEE-début clôture INSTI-Lokossa
1+400-1+500	30,72	Début clôture INSTI-Lokossa-portail INSTI
1+500-1+600	44,29	Portail INSTI-Portail-INSET
1+600-1+700	22,321	Portail-INSET-Fin clôture INSET
1+700-1+800	36,46	Fin clôture INSET-devant BAOBAB
1+800-1+900	66,83	Devant BAOBAB-Scierie
1+900-2+000	33,83	Scierie-RN2 Bis

Source : Hervé ZETOME

FICHE DE RELEVÉ MANUEL DES SURFACES DÉGRADÉES		
Axe : Mairie Lokossa-INSTI Lokossa-RN2 Bis		
Année : Mai 2020		Auteur : DDIT
PK	Surface dégradée	Repère
0+000-0+100	39,3	Début clôture CEG1 au feu tricolore
0+100-0+200	69,82	Feu tricolore-fin clôture maison du peuple
0+200-0+300	44,1	Fin clôture maison du peuple-portail CAEB
0+300-0+400	15,77	Portail CAEB-Fin clôture CLCAM
0+400-0+600	30,95	Fin clôture CLCAM- résidence DD/PN
0+600-0+700	54,4	Résidence DD/PN-Carrefour Motel
0+700-0+800	35,03	Carrefour Motel-début clôture SITEX
0+800-0+900	10,51	Début clôture SITEX-fin clôture SITEX
0+900-1+000	25,66	fin clôture SITEX-direction de l'alphabétisation
1+000-1+100	76,25	Direction de l'alphabétisation-début clôture CARDER
1+100-1+200	38,16	Début clôture CARDER-fin clôture CARDER
1+200-1+300	1,66	Fin clôture CARDER-SBEE
1+300-1+400	3,31	SBEE-début clôture INSTI-Lokossa
1+400-1+500	2,68	Début clôture INSTI-Lokossa-portail INSTI
1+500-1+600	25,04	Portail INSTI-Portail-INSET
1+600-1+700	12,33	Portail-INSET-Fin clôture INSET
1+700-1+800	30,74	Fin clôture INSET-devant BAOBAB
1+800-1+900	24,27	Devant BAOBAB-Scierie
1+900-2+000	30,74	Scierie-RN2 Bis

Source : DDIT-Lokossa

Le graphe 4 montre l'évolution des dégradations en 2020 et 2022.



Graphe 4 : Évolution des dégradations de 2020 à 2022

Source : Hervé ZETOME

L'analyse du graphe 4 nous montre que :

- du PK0+000 au PK0+100, les dégradations relevées en 2022 sont plus importantes que celles de 2020. Ce qui justifie le fait que dans la zone, on note de nouvelles dégradations en plus de la dégradation de certains points réparés en 2020. Nous pouvons alors conclure que la méthode de réparation adoptée (le point à temps) n'est pas la méthode la mieux adaptée aux dégradations de cette zone ;
- du PK0+100 au PK0+300, les dégradations enregistrées en 2020 sont largement supérieure à celles relevées en 2022. Nous constatons que dans cette zone, on note seulement quelques apparitions de nids-de-poule de gravité moyenne. Cette zone n'est pas fortement dégradée ;
- du PK0+300 au PK2+000, nous constatons que les dégradations notées en 2022 sont plus prononcées que les celles relevées en 2020. Cela se justifie par l'apparition de nouvelles dégradations de grandes longueurs (environ 1,8 m de longueur de nids-de-poule) à certains endroits. Nous notons aussi que plusieurs points réparés en 2020, ont connu encore des dégradations.

Il est alors à noter que le point à temps Bitume (PTB) utilisé pour la réparation des dégradations n'est une méthode appropriée à tous les types de dégradations. Le véritable problème est l'adhérence du nouveau matériau au corps de la chaussée. Il est alors très nécessaire trouver des solutions plus fiables et durables pour la réparation des nids-de-poule surtout afin d'assurer la pérennité des routes à revêtement bitumineux au BENIN.

2.4.6. Causes probables des dégradations observées

Les résultats d'inspection visuelle montrent que la majorité des dégradations observées sont de la famille des arrachements.

Les dégradations par arrachement à la surface de chaussée sont des défauts de la qualité de la couche de surface et cause des problèmes d'adhérence et d'uni des chaussées. C'est un phénomène dû soit à l'usure de la couche de surface, l'arrachement des gravillons de la surface, le départ du liant autour des granulats dans la couche de surface, ou encore la fatigue précoce de la couche mince de surface.

Les nids-de-poule proviennent généralement de l'évolution des pelages ; plumages et des faïençages. La cause principale de ces dégradations est le vieillissement de la couche de roulement vu l'âge de la chaussée. Les relevés de dégradations ont été faits après une pluie. Ce qui a permis de constater l'eau ne se stagne pas sur la voie après les pluies. Donc la chaussée n'a pas perdu complètement son profil en toit. Les épaufrures observées proviennent donc de

l'érosion vue que le climat de la zone est un climat subéquatorial avec une grande saison pluvieuse. Ainsi les principales causes des dégradations observées sont :

- La pluie ;
- Les matériaux de chaussées ;
- L'âge de la chaussée (l'usure, la fatigue et le vieillissement de la couche de surface) ;
- L'évolution d'une dégradation à une autre.

Le trafic aussi peut être soupçonné comme cause car les interventions faites sur la Voie Nationale 2 bis (RN2 Bis) obligent parfois les services d'entretien à faire des déviations sur le tronçon d'étude. Alors que ces charges supplémentaires n'avaient pas été prises en compte lors du dimensionnement de la chaussée. L'une des solutions préventives des dégradations est de faire une estimation des surcharges et d'en tenir compte lors du dimensionnement des chaussées.

2.6. Méthodes usuelles de réparation des nids-de-poule au Bénin

La réalisation des infrastructures routières nécessite une forte mobilisation de moyens financiers. Ainsi, il est très important de trouver des solutions de réparation des dégradations des chaussées afin de garantir la pérennité des infrastructures routières.

Au Bénin, pour la réparation des nids-de-poule, c'est le point à temps bitume qui est la méthode la plus utilisée. Cette méthode a essentiellement deux procédés : le point à temps bitume localisé et le point à temps bitume grande masse.

2.6.1. Point à temps bitume localisé

Ce type d'intervention est appliqué à la réparation de nids-de-poule, d'ornières, de flaches, d'affaissements prononcés, 'épaufrures, de faïençage à mailles serrées, sur des sections de route de superficie n'excédant pas cent (100) mètres carrés où la reprise du corps de chaussée est nécessaire.

Ce type de réparation comporte les opérations suivantes :

✦ Le marquage de la zone à réparer :

Le point à réparer est marqué à la peinture avec un nettoyage soigné du trou et son agrandissement pour le porter à des dimensions géométriques précises : rectangle ou carré avec réalisation de bords francs ;

✦ Enlèvement de tous les matériaux de la partie marquée

Il est indispensable d'approfondir l'excavation sur vingt-cinq (25) centimètres minimum, jusqu'à rencontrer au fond un matériau sain et compact. Il convient de tailler verticalement les parois du trou. Le fond du trou est à niveler horizontalement et compacter soigneusement. Le

compactage de ce fond de trou devra permettre d'atteindre un taux de compacité au moins égal à 95% de l'Optimum Proctor Modifié (OPM).

La zone à traiter doit être maintenue propre et débarrassée de tous objets ou matériaux étrangers jusqu'à la mise en place de nouvelles couches de chaussée.

✦ ***Le remplissage de l'excavation***

Le remplissage de l'excavation est fait avec du graveleux latéritique traité ou avec du concassé 0/31,5, ou du grave-bitume. L'épaisseur de remplissage est de vingt (20) centimètres au minimum.

Le compactage énergétique et soigné est fait à la dame sauteuse ou à la dame à la main par petite épaisseur ou au cylindre vibrant si la surface à traiter le permet de manière à garantir une compacité au moins égale à 97% de l'Optimum Proctor Modifié (OPM).

® ***La reconstitution de la couche de roulement***

La reconstitution de la couche de roulement sur la couche de base est faite suivant le cas, par la mise en œuvre de l'enduit superficiel mono ou bicouche (liant-gravillon), ou soit d'un enrobé. Pour la mise en œuvre de la couche de roulement en enduit superficiel mono ou bicouche, une mise en œuvre d'une couche d'imprégnation au bitume fluidifié (Cut-back 0/1) est faite.

Dans le cas de l'enrobé, l'épaisseur de la couche compactée d'enrobé à mettre en place sera égale à celle de la couche de roulement existante.

2.6.2. Point à temps en grande masse

Ce type d'intervention est appliqué à la réparation de nids-de-poule, d'ornières, de flaches, d'affaissements prononcés, 'épaufures, de faïençage à mailles serrées, sur des sections de route de superficie supérieure ou égale à cent (100) mètres carrés où la reprise du corps de chaussée est nécessaire.

Cette action comporte les mêmes étapes que le point à temps localisé : le marquage de la zone à réparer ; l'enlèvement de tous les matériaux des parties marquée, le remplissage de l'excavation, la reconstitution de la couche de roulement.

□ ***Caractéristiques des matériaux utilisés***

® ***Couche de base***

La couche de base est réalisée avec du concassé 0/31,5 pour les chaussées souples.

® ***Couche de surface***

La couche de surface est réalisée soit en enduit superficiel, réalisé en monocouche ou bicouche, ou avec de l'enrobé bitumineux.

Dans le cas de l'enduit superficiel, la couche d'imprégnation est faite avec de bitume fluidifié (Cut-back 0/1), à une température environ de 80°C.

Le liant utilisé pour la couche de roulement en enduits superficiels est l'émulsion de type ECR 65 (ou C65BF3 aux termes de la norme EN 13808). Ses caractéristiques sont dans le tableau 17.

Tableau 17 : Caractéristiques du liant bitumineux et des granulats

Caractéristiques du liant bitumineux	Caractéristiques des granulats
<ul style="list-style-type: none"> - Indice de rupture (fine, foshammer) : 70 à 155 ; - Teneur en liant (%) : 63 à 67 - Temps d'écoulement (s) orifice 2mm à 40°C : 40 à 130 - Temps d'écoulement (s) orifice 4mm à 40°C : 5 à 70s - Essai d'Adhésivité d'une émulsion cationique : $\geq 90\%$ <p><i>Mise en œuvre</i> : Première couche : 1,1 Kg/ m² ; Deuxième couche : 0,9 Kg/m²</p>	<p>Les granulats 6/10 et 10/14 sont les granulats utilisés pour la réalisation de l'enduit superficiel.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Coefficient d'aplatissement : $\leq 25\%$; - Coefficient Los Angeles : $\leq 25\%$; - Coefficient MDE : $\leq 20\%$.

Source : [26]

CHAPITRE 3 :

PROPOSITION DE TECHNIQUES AMÉLIORÉES DE RÉPARATION DES NIDS-DE-POULE

Au jour d'aujourd'hui, il existe de par le monde plusieurs procédés de traitement des nids de poule afin de garantir la pérennité des infrastructures routières. Quelques-unes des méthodes améliorées de réparation seront exposées dans la suite du document.

3.1. Méthode 1 : méthode proposée au Sénégal

Cette première consiste à :

- ⑩ délimiter la zone à réparer suivant une géométrie régulière puis procéder à l'excavation de ladite zone. L'excavation du matériau en place doit se faire jusqu'à une profondeur où nous avons un niveau relativement compact (figure 24) ;
- ⑩ compacter correctement le fond de fouille après avoir taillé les parois jusqu'à ce qu'elles soient verticales et taillé le fond jusqu'à ce qu'il soit plat et horizontal (voir figure 25);
- ⑩ boucher le trou avec un matériau de qualité semblable à celle de la couche de base en prenant soin de compacter par faibles épaisseurs de façon successive (voir figure 26) ;
- ⑩ prévoir une surépaisseur qui peut varier de $\frac{1}{5}$ à $\frac{1}{3}$ de la profondeur du trou pour tenir compte de la densification sous l'effet du trafic ;
- ⑩ refaire le revêtement. Il est préférable de prévoir une imprégnation au cut-back 0/1 si la nouvelle surface présente des pores fins ou du 10/15 si les pores sont grossiers puis enduire ou poser un tapis mince en enrobé selon le trafic [27].

Les caractéristiques du liant sont mentionnées dans le tableau ci-après (tableau 18).

Tableau 18 : Caractéristiques des matériaux utilisés

Nature des caractéristiques	Cut-back 0/1	Cut-back 400/600
Pseudo viscosité mesurée au viscosimètre STV en secondes		
Orifice de 4 mm	< 30	
Orifice de 10 mm		400 à 600
Densité relative à 25°C au pycnomètre	0,9 à 1,02	0,9 à 1,04
Pénétration à 25°C, 100g, 5s de résidu de la distillation à 360°C (en dixième de mm)	80/250	80/200

Source : [27]

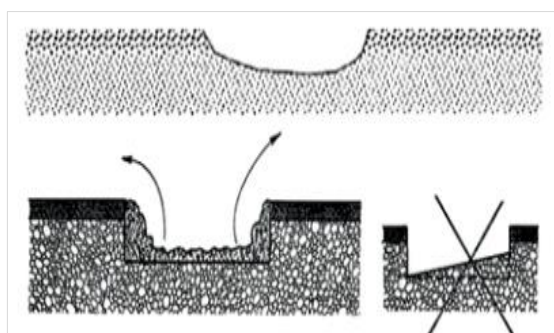


Figure 22 : Excavation du matériel de la zone dégradée [28]

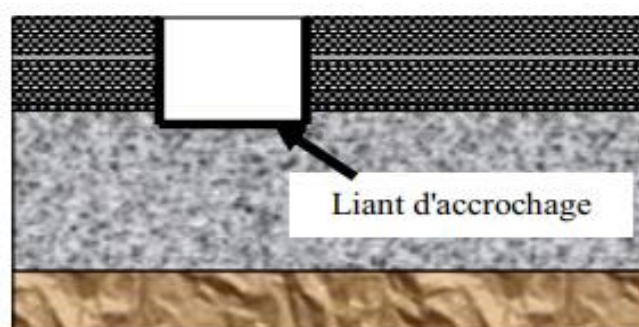


Figure 23 : Surface du trou taillée et Application du liant [28]

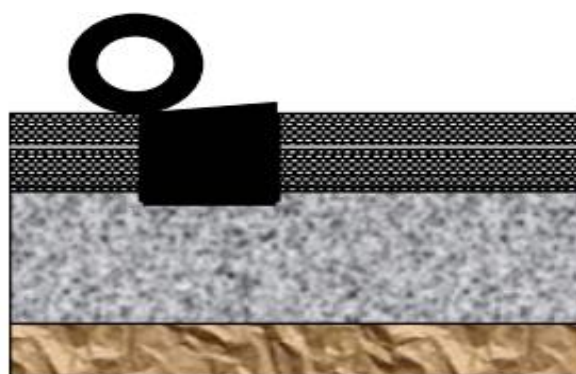


Figure 24 : Bouchage du trou et compactage [28]

3.2. Méthode 2 : méthodes améliorées utilisées au Québec et en Amérique du Nord

Cette deuxième méthode décrit trois (03) modes améliorés utilisés au Québec et en Amérique du Nord pour la réparation des nids-de-poule. Il s'agit de la réparation urgente, la réparation temporaire et la réparation permanente.

3.2.1. La réparation urgente

La réparation urgente consiste à colmater le nid-de-poule à l'aide d'un enrobé à froid. Les travaux de réparation sont réalisés rapidement de façon manuelle. La durée de vie de ce type de réparation varie de quelques semaines à au plus deux ans, selon les conditions de réalisation et le type de produit utilisé. Il est mis en œuvre lorsqu'il y a urgence de réparer un nid-de-poule d'un diamètre supérieur à 150 mm ou d'une profondeur supérieure à 50 mm [28].

● *Les étapes de la réalisation*

- ✦ Installer une signalisation conforme aux normes en vigueur ;
- ✦ Enlever la neige et la glace à l'aide du chalumeau (le cas échéant) ;
- ✦ Équarrir le pourtour de la cavité à l'aide du pied-de-biche et retirer toute particule lâche ;
- ✦ Nettoyer et assécher le nid-de-poule à l'aide du jet d'air ou du souffleur à feuilles (photo 12-a) ;
- ✦ À l'aide d'une pelle, au besoin, poser l'enrobé par couches de 50 mm d'épaisseur maximum (photo 12-b) ;
- ✦ Lors de l'utilisation d'un enrobé réactif à l'eau, ajouter l'eau jusqu'à saturation ;
- ✦ Densifier l'enrobé à l'aide d'un pilon manuel, d'un compacteur vibrant ou des roues de la camionnette (photo 12-c) ;
- ✦ S'assurer d'avoir une dénivelée maximale de 5 mm avec le revêtement adjacent (photo 12-d) ;
- ✦ Nettoyer la surface de la chaussée [28] .



Photo 11 : Réparation urgente des nids-de-poule [28]

3.2.2. Réparation temporaire

Ce type de réparation est pratiqué lorsqu'il y a urgence et que les conditions météorologiques ne permettent pas d'effectuer une réparation permanente. Elle est réalisée en hiver et au printemps, généralement avec un enrobé à froid. Ce produit est difficile à manier si la température est inférieure à $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. La durée de vie d'une réparation temporaire varie de quelques semaines à deux ans selon les conditions météorologiques dans lesquelles la réparation a été faite et selon la sollicitation du trafic. L'enrobé à froid est fabriqué avec une émulsion de bitume parfois non modifiée, mais plus souvent avec une émulsion additionnée de polymères et d'un agent antidésenrobage pour lui conférer une durabilité accrue [28].

Après la mise en place de la signalisation appropriée, les travaux sont exécutés manuellement ou à l'aide des engins spécialisés. La méthode consiste à enlever l'eau, la neige, la glace, les débris et le matériau dégradé, à nettoyer et assécher le nid-de-poule, à placer l'enrobé avec une pelle ou à le déverser à l'aide du camion, puis à le densifier à l'aide d'un compacteur vibrant. Le compactage par une roue du camion est possible bien que moins efficace. Plusieurs couches peuvent être déposées, la dernière dépassant la surface d'environ 25 mm avant compactage et 10 mm après (voir figure [28]).

La réparation est faite avec de l'enrobé à froid. Il doit être conditionné dans un entrepôt chauffé pendant 24 heures avant son utilisation et transporté dans une benne de camion fermée, de

préférence chauffée. Un enrobé à chaud est parfois utilisé pour une réparation temporaire. Il peut alors durer plus longtemps, surtout si le nid-de-poule a été bien nettoyé à l'air comprimé et si un liant d'accrochage a été pulvérisé sur les parois et le fond du trou. L'enrobé à froid ou à chaud doit avoir une teneur en bitume élevée. Ce dernier est choisi selon la classe de route, la sollicitation par le trafic et l'état de la route [28].

3.2.3. Réparation permanente

La permanence de la réparation doit rester l'objectif principal de l'intervention. La réparation permanente d'un nid-de-poule avec un enrobé à chaud doit se faire dans des conditions météorologiques favorables ($> 10\text{ °C}$). Elle est nécessaire particulièrement avant le resurfaçage de la chaussée. La durée de vie de ce type de réparation varie en fonction du trafic ; elle est de quelques années, généralement de l'ordre de cinq ans. L'enrobé à chaud doit être conservé dans une benne chauffée ou isolée. Les étapes de la réparation sont les suivantes :

- ❑ Installer la signalisation en fonction de la classe de route et en suivant les normes ;
- ❑ Délimiter l'aire à réparer par des droites à angle droit. Le marquage doit être à 150 mm au moins du bord de la dégradation ;
- ❑ Scier le revêtement et enlever les débris et les matériaux dégradés jusqu'aux matériaux sains (figure 3). L'usage d'une scie ou d'un petit équipement de planage est préférable au marteau piqueur, qui peut cependant être utilisé du centre vers les bords de la dégradation. Le nid-de-poule est nettoyé à l'air comprimé pour enlever tous les résidus, la poussière et l'humidité ;
- ❑ Remettre du matériau granulaire et le compacter si une partie de la fondation a été enlevée. Appliquer une émulsion de bitume sur le fond et les bords du trou, au moyen d'un pulvérisateur, en évitant les accumulations d'émulsion dans les dépressions (figure 3). La température ambiante recommandée est supérieure à 10 °C ;
- ❑ Placer l'enrobé à chaud (figure 4) avec un déversoir et une pelle en couches d'épaisseur maximale de 100 mm. Densifier chaque couche à l'aide d'une plaque vibrante ou d'un rouleau vibrant de dimension adaptée à la réparation. La dernière couche doit dépasser le revêtement d'environ 25 mm, avant compactage, pour que sa surface soit au même niveau ou légèrement plus élevée au centre de la réparation (5 mm maximum) ;
- ❑ Nettoyer la surface de chaussée et enlever la signalisation [28] (voir photo 13).



Photo 12 : Les étapes de réparation permanente

Le choix de la réparation permanente avec un enrobé à chaud dans de bonnes conditions météorologiques dépend de l'état et de la sollicitation de la chaussée (**tableau 19**). Ainsi, cette méthode s'applique davantage à un nid-de-poule large et profond d'une route où le trafic est important qu'à un nid-de-poule de petite dimension d'une route secondaire.

Tableau 19 : Choix de l'enrobé

	Enrobé à chaud			Enrobé à froid
	EB-5 PG 58-28 PG 64-28	EB-10C PG 58-28 PG 64-28	EB-10C PG 64-34 PG 70-28	
Température	> -5°	> -5°	> +10°	> -15°
Type de réparation	Tout type	Tout type	Permanente	Temporaire
Circulation DJMA	≤ 20 000	≤ 20 000	> 20 000	Tout niveau
Volume ou surface de la réparation	Petite surface	Toute surface	Toute surface	Petite surface

Source : [28]

3.3. Méthode 3 : Réparation des nids de poule par utilisation de nouveaux produits

Des produits sont mis en place et constituent aujourd'hui des solutions de réparation ou maintenance de la voirie visant une rénovation fiable sur long terme.

3.3.1. Réparation des nids de poule par utilisation de ChipFill et AggreFill

ChipFill et AggreFill sont deux produits utilisés pour la réparation des fissures surtout les nids-de-poule en fonction de l'ampleur des dégradations. Avec un temps d'interruption très court de la circulation, ces deux produits permettent une réparation rapide et efficace des nids-de-poule. Ces produits présentent de bonnes caractéristiques mécaniques et une bonne adhérence [29].

3.3.1.1. Description de ChipFill et AggreFill

ChipFill : est un matériau thermoplastique spécialement conçu pour la réparation de fissures, de petits nids-de-poule (diamètre maximal de 20 cm pour une profondeur maximale de 5 cm) et pour minimiser le risque que ces défauts s'agrandissent. La durée d'intervention est d'environ 30 minutes, du début de la réparation jusqu'à l'ouverture à la circulation.

Pour une réparation avec *ChipFill*, il est d'avoir un balai et un chalumeau. Lorsqu'il est chauffé, il fusionne avec les couches de fondation et les liants du support, permettant ainsi une meilleure tenue qu'un système de réparation à froid. Cela fait de *ChipFill* une solution non seulement durable, mais également économique puisqu'elle empêche l'aggravation des dommages et permet ainsi d'éviter des réparations supplémentaires plus coûteuses [29].

3.3.1.2. Utilisation de ChipFill

Réparation temporaire de nids de poule d'une profondeur maximale de 5 cm et d'un diamètre maximal de 20 cm. Réparation temporaire de craquelures naturelles et de raccords. *ChipFill* peut être mis en œuvre toute l'année, en cas de températures basses, un réchauffage est nécessaire. Le *ChipFill* qui n'est pas utilisé peut se stocker facilement pour une utilisation ultérieure.

ChipFill durcit rapidement, ce qui permet une réouverture de la voie de circulation 30 minutes après le début de la mise en œuvre. Les propriétés thermoplastiques de *ChipFill* le rendent capable de se conformer à la structure / géométrie de la surface. Les propriétés thermoplastiques de *ChipFill* permettent d'éviter les inégalités. *ChipFill* présente un coloris noir uniforme. Le système de liant de *ChipFill* assure une bonne liaison avec le substrat. Surface hautement anti-glissante). Saupoudré de grains de verre pour obtenir une forte surface d'abrasion initiale. *ChipFill* sert à la réparation temporaire des nids de poule, des craquelures et des raccords.

3.3.1.3. Composition de ChipFill

📖 **Pigment** : Le pigment permet à ChipFill de conserver sa couleur noire unie tout au long de sa durée de vie. Ce pigment ne contient ni plomb ni chromates ou autres métaux lourds. Le pigment est réparti de manière uniforme dans le ChipFill ;

📖 **Système de liant** : Le liant est composé de résines alkydes et de polymères.

📖 **Système de charges** : Les charges sont un mélange de carbonates de calcium, de sable et de matériau antidérapant.

📖 **Résistance environnementale** : Le matériau est résistant à la détérioration due au rayonnement solaire, à l'eau, au sel ou aux intempéries et étanche à l'huile et aux carburants.



Photo 13 : ChipFill [29]

® Composition

- Le liant est composé de 15 à 25% de résine à base d'alkydes ;
- Pigments/colorants : de 0 à 5% de pigments exempt de matériaux lourds ;
- Pigments / colorants : de 0-5% de pigments exempt de métaux lourds ;
- Charge : composé de 65 à 85% de matériaux naturels c'est-à-dire du sable.
- Densité du vrac : $\approx 0,8$ kg/litre ;
- Densité après mise en œuvre ≈ 2 kg/litre.

® AggreFill

AggreFill est la solution idéale pour les nids-de-poule de grandes tailles (diamètre maximum 1m², profondeur 2,5 à 6 cm). AggreFill doit systématiquement être utilisé en association avec ChipFill. ChipFill fait office de liant et fusionne littéralement avec le support, tandis qu'AggreFill comble le volume du nid-de-poule à traiter.

- Application facile et rapide, solution économique ;
- Excellente adhérence
- Système appliqué à chaud avec un chalumeau ;

- Composition : Graviers 14-20 mm enrobés de bitume ;
- Temps de remise en circulation : 20 min ;
- Matériel : Chalumeau ;
- Teinte : Noir.



Photo 14 : Mise en œuvre d'AggreFill [29]

3.3.1.4. Mise en œuvre de ChipFill

Les différentes étapes de mise en œuvre se présentent comme suit :

- mettre en place la signalisation conformément aux normes en vigueur ;
- la surface doit être exempte de saleté, de poussière, de produits chimiques et de substances huileuses. Les retirer en utilisant un balai, de l'eau sous haute pression ;
- la surface doit être entièrement sèche avant application ;
- éliminer toute humidité de la surface à traiter à l'aide d'un chalumeau ;
- mettre une première couche de liant avec un arrosoir ou avec la lance ou autre ;
- apposer une couche de ChipFill de 15 mm au maximum et faire chauffer le matériau à plus de 200°C à l'aide du chalumeau. Le ChipFill chauffé va commencer à se fluidifier et à suivre le contour du trou ;
- mettre la seconde couche de liant et mettre à nouveau ChipFill;
- continuer cette opération jusqu'à ce que le trou soit complètement bouché (photo 16) [29].



Photo 15 : Réparation des nids-de-poule avec ChipFill [29]

Avantage de cette méthode

- Des produits de qualité pour des réparations solides et durables ;
- Une application facile qui n'altère pas les différents substrats ;
- Des moyens humains et matériels restreints ;
- Peu de gêne au trafic ;
- Un entretien facilité pour une sécurité accrue et une durée de vie de la route prolongée [29]. .

3.3.2. Méthode 2 : Réparation des nids-de-poule des routes par la méthode d'injection

Le choix de la méthode dépend de plusieurs facteurs :

- la météo ;
- la densité et le type de revêtement en béton bitumineux actuel ;
- l'enveloppe financière et la rapidité du travail [30].

3.3.2.1. Les différents types de matériaux utilisés

Pour la réparation par imprégnation, on utilise des liants et des granulats. Les granulats sont de la pierre concassée et du sable de roches dures. Il y a trois sortes de liants qui peuvent être utilisés.

- **Asphalte mélangé à chaud.** Un mélange composé de bitume, de poudre minérale, de pierre concassée et de sable. L'avantage de cette méthode est haute qualité, car le matériau à partir duquel la route elle-même est faite est utilisé. Les matériaux réagissent différemment aux changements de température et de pression des véhicules. Si le matériau est homogène, la déformation et le compactage seront les mêmes, ce qui réduit la probabilité de fissures et de nids-de-poule locaux [30].

- **Enrobé d'asphalte coulé**

La température de l'asphalte coulé atteint également 250° C lors de la pose. Par conséquent, il est posé sans rouleau, le mélange est réparti en douceur sur la base. État d'agrégation rend le revêtement en enrobé coulé résilient, monolithique et hydrophobe [30].

- **Enrobé de bitume polymère**

Le liant polymère-bitume est un mélange composé de bitume de pétrole, de polymères, de plastifiants et d'un préfixe adhésif. Les polymères jouent ici le rôle principal. Leurs propriétés physiques permettent de prévenir l'orniérage sur les routes en été et l'apparition de fissures par temps froid (photo 17) [30].



a) Asphalte mélangé à chaud.



b) Enrobé d'asphalte coulé



c) Enrobé de bitume polymère

Photo 16 : Les produits utilisés pour la réparation des nids-de-poule par la méthode de patching [30]

3.3.2.2. Technique de réparation

Cette méthode ne nécessite pas de traitement des bords.

Les différentes étapes de réparation sont les suivantes :

Nettoyage des sites de réparation avec les brosses métalliques ou outil à main (panicules, pelles, grattoirs) ;

Souffler la surface de nid-de-poule avec un souffleur puis sécher ;

Verser la pierre concassée dans le trou. Il est recommandé que la composition fractionnaire et les propriétés correspondent au maximum au matériau utilisé dans la fabrication du béton bitumineux, à partir duquel le revêtement était fabriqué ;

Verser le bitume à l'aide d'un arrosoir ou d'un dispositif de distribution. Si la profondeur de nid-de-poule est supérieure à 5 centimètres, le remplissage et le déversement sont effectués en plusieurs couches, en effectuant les mêmes opérations que lors de la réparation des nids-de-poule en une seule étape ;

Compacter à l'aide d'une plaque vibrante d'un rouleau manuel ou automoteur [30].

Cette méthode de réparation utilise des liants et des granulats (photo 18).

3.4. Méthode 4 : Réparation des nids de poule avec de l'enrobé à chaud ou à froid

Cette méthode concerne la réparation des nids-de-poule avec de l'enrobé chaud ou tiède. Dans la pratique courante, quatre techniques de réparation des nids-de-poule sont utilisées. Le choix du procédé tient compte de plusieurs paramètres.

3.4.1. Critères de sélection des techniques de réparation

Le choix de la technique appropriée est fonction des conditions spécifiques à chaque municipalité soit, entre autres : le degré d'urgence de l'intervention, les conditions météorologiques, le niveau de trafic, l'ampleur de la réparation et la condition de la surface à réparer, la durée de vie attendue, le meilleur matériau disponible, dans des conditions de mise en œuvre optimales [31].

Par ailleurs, lorsque cela est possible, la meilleure technique consiste à utiliser des enrobés chauds et tièdes qui optimisent la durée de vie de l'intervention. Le tableau 20 dresse le récapitulatif des critères généraux de sélection de la technique de réparation des nids-de-poule [31].

Tableau 20 : Critère de sélection des techniques de réparation des Nids-de-poule

Produit disponible	Méthode de réparation	Nature de la surface à réparer		Limite de mise en œuvre		Durée de vie potentielle
		Nids-de-poule isolés	Nids-de-poule et surfaces périphériques dégradées	Conditions météo requises	Conditions de surface requises	
Enrobé froid	Manuelle	Applicable	Inadéquat	$T > -10^{\circ}c$	Sèche	3 à 12 mois
					Humide	Non recommandé
Enrobé tiède	Manuelle	Applicable	Applicable	$T > -10^{\circ}c$	Sèche	24 mois
					Humide	Non recommandé
Enrobé chaud	Manuelle	Applicable	Applicable	$T > +5^{\circ}c$	Sèche seulement	12 à 24 mois
Émulsion de bitume et granulats	Véhicule spécialisé	Applicable	Sans objet	$T > +5^{\circ}c$	Sèche seulement	3 à 18 mois
Enrobé froid, tiède et chaud	Véhicule spécialisé de type patchryte	Applicable	Sans objet	$T > -10^{\circ}c$	Sèche	Temporaire à 2 ans
					Humide	Non recommandé
Enrobé chaud	Équipement conditionnel de pose d'enrobé	Sans objet	Applicable	$T > +10^{\circ}c$	Sèche seulement	Jusqu'à 5 ans

Source : [31]

3.4.2. Étapes de réparation d'un nid-de-poule

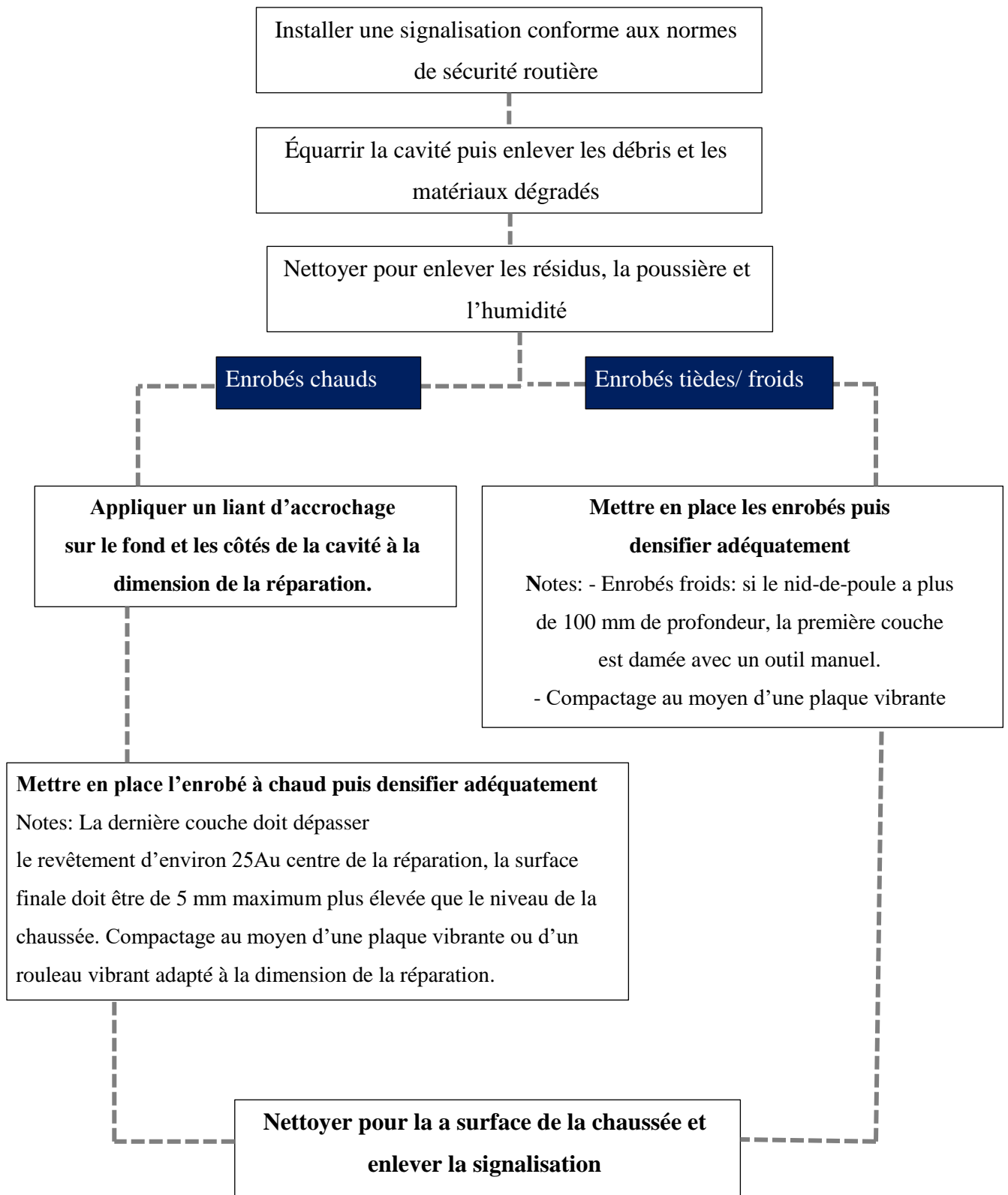


Figure 25 : Étapes de réparation d'un nid-de-poule [31]

3.5. Méthode 5 : Réparation des nids-de-poule avec colbifibre

3.5.1. Présentation de colbifibre

Colbifibre est composé :

- d'un enduit monocouche fibré 6/10 mm, à maille claire ;
- L'enduit est faiblement dosé en gravillons pour recevoir la quantité d'enrobé coulé à froid prévue, sans excès ni débordement ;
- Les dosages en émulsion sont adaptés à l'état de fissuration du support ;
- Le liant de base de l'émulsion est modifié par des élastomères de type latex ;
- d'un Enrobé Coulé à Froid fibré (Colmate fibré), 0/4 ou 0/6 mm. Son dosage permet de combler les vides du monocouche et de sceller les gravillons entre eux, en maintenant l'adhérence et un bon confort de roulage [32].

L'ajout de fibres dans l'enduit comme dans l'enrobé coulé à froid permet de limiter les coulures, de ralentir la propagation des fissures ou de renforcer les performances du complexe Colbifibre® sous trafic agressif et lourd. Tant pour le gravillonnage que pour l'enrobé coulé à froid, Colbifibre® utilise un matériel standard. Quelques ajustements sont toutefois souhaitables pour parfaire la qualité de l'application de l'enrobé coulé à froid et son dosage au sol. La rapidité d'exécution en fait un atout pour limiter la gêne aux riverains et aux usagers. Sa faible épaisseur (2 cm) permet d'éviter les travaux annexes de remise à niveau. Le gravillon 6/10mm noyé dans l'enrobé coulé à froid 0/4 ou 0/6 mm conduit à un faible bruit de roulement. Les propriétés de Colbifibre permettent d'augmenter la durée de vie des chaussées très fissurées de plusieurs années dans de bonnes conditions de service et de prévoir les investissements lourds de réhabilitation. C'est un atout majeur pour la gestion du patrimoine routier [32].

Colbifibre permet :

- d'imperméabiliser le support et, ainsi d'éviter les dégradations dues à l'effet du gel/dégel ;
- de retrouver une adhérence suffisante et pérenne,
- d'obtenir un aspect homogène et esthétique de la section traitée [32].

3.5.2. Domaines d'emploi de colbifibre

- Colbifibre est appliqué sur tout type de structure et sous tout trafic $\leq T 1$;
- Colbifibre est parfaitement adapté à l'entretien de chaussées fortement dégradées par fissuration, en attendant de plus amples travaux de réhabilitation [32].

3.5.3. Constituants de colbifibre

® Enduit superficiel

On utilisera une émulsion cationique à rupture rapide, spécialement adaptée pour réaliser cet enduit monocouche. Sa concentration en bitume polymère (latex) est de 69 %. Elle peut être légèrement fluxée. Son dosage doit être adapté à l'état du support, au trafic supporté, aux conditions environnantes du site. On peut aussi utiliser un liant anhydre, modifié par du latex. L'enduit est fibré pour éviter les coulures, accélérer la rupture, renforcer l'adhésivité des gravillons et pérenniser l'ensemble au jeune âge. La montée en cohésion est rapide et permet l'application dans la journée de l'enrobé coulé à froid sans désordre ou arrachement des gravillons. Un balayage léger du rejet par une balayeuse-aspiratrice peut être nécessaire. Cette émulsion est fabriquée dans les usines Colas, certifiées ISO 9001, ISO 14001. Le dosage en gravillon 6/10 mm doit être ajusté à l'état du support et devra faire apparaître une mosaïque claire, afin de favoriser l'incrustation de l'enrobé coulé à froid. Les granulats, tant pour l'enduit que pour l'enrobé coulé à froid, sont conformes aux normes NF P 18-545 et NF EN 13043 pour couches de roulement [32].

® L'enrobé coulé à froid

On s'assurera de la bonne montée en cohésion de la monocouche avant de lancer l'application de l'enrobé coulé à froid. L'enrobé coulé à froid est de granulométrie 0/4 mm ou 0/6 mm à base d'émulsion Colacid S ou CL à 60 % de concentration en bitume 70/100. Les fibres sont découpées in situ, la machine d'enrobé coulé à froid étant équipée d'un dispositif approprié de coupe et de stockage des bobines de fibre. Si ce dispositif n'est pas présent sur la machine d'enrobé coulé à froid, l'ajout de fibre peut se réaliser dans une centrale d'enrobage à froid. Cette étape permettra de reconstituer les fractions granulaires qui le composent, d'homogénéiser la teneur en eau et d'assurer le dosage et le mélange des fibres. Le compactage au pneu est recommandé pour incruster l'enrobé coulé à froid dans la matrice granulaire du gravillonnage [32].

3.5.4. Condition de mise en œuvre

Pour ces travaux, il est nécessaire de fermer la route à la circulation, soit totalement ou par demi-chaussée. Une fois l'enduit appliqué et gravillonné, il est possible de remettre le tronçon à la circulation avec limitation de vitesse jusqu'au moment de la pose de la couche de roulement. Le traitement ne peut que s'appliquer sur un support sec et avec des températures au sol supérieures à 10° C. Si la pose de l'enrobé s'effectue le lendemain, il faut veiller à ce que le

temps reste sec durant la nuit. Une fois l'enduit appliqué et recouvert d'un gravillonnage, il faut attendre que la température redescende à environ 20° C afin de ne pas abîmer le support par le trafic de chantier.

3.5.5. Mise en œuvre

Il faudra respecter en toutes circonstances les règles de l'art propres à chaque technique (enduit et enrobé coulé à froid). Lors de l'application, le respect des bonnes conditions climatiques est un facteur incontournable pour la réussite du procédé. Les températures de l'air, du support et des gravillons devront être $\geq 10^{\circ}\text{C}$ et le temps devra être sec pour que la montée en cohésion de l'enduit puisse se produire et pour que la réalisation de l'enrobé coulé à froid se fasse dans la même journée [32]. Les différentes étapes de la réalisation sont les suivantes :

- Mise en place d'une signalisation suivant les normes de sécurité routière ;
- Marquage la partie à réparer puis nettoyage du trou ;
- Balayage et lavage à l'eau sous pression ;
- Séchage de la chaussée avec un tracteur spécialement équipé d'un système à gaz (si nécessaire) ;
- Application de l'enduit de renforcement de la chaussée ;
- Gravillonnage ;
- Compactage avec le rouleau compacteur ou avec la dame à main ;
- Pose de la couche de roulement en enrobé et compactage ;
- Essais par le laboratoire ;
- Enlèvement de la signalisation.



Photo a)



Photo b)

Photo 17 : Mise en œuvre du colbifibre [32]

3.6. Étude comparative des différentes techniques de réparation des nids-de-poule et proposition de nouvelles techniques de réparation des nids-de-poule au Bénin

Après une analyse des cinq méthodes améliorées de réparation des nids-de-poule, utilisées dans le monde actuel, nous constatons que les étapes de réparation sont pratiquement les mêmes mais le choix des matériaux se fait en fonction du type de réparation. Comparativement à la méthode actuelle de réparation des nids-de-poule au Bénin, le liant utilisé n'a pas la même composition que ceux décrits dans les méthodes de réparation améliorées. Le choix de la technique de réparation dépend des caractéristiques des nids-de-poule à réparer, les conditions climatiques et les matériaux disponibles pour la réparation. Selon les méthodes de réparation urgente, temporaire et, permanente, le choix du matériau de réparation (l'enrobé bitumineux) se fait en tenant compte du nouveau trafic, de la classe de route et des conditions climatiques. Au Bénin, le choix du matériau ne tient pas compte de ces paramètres fondamentaux pour le choix des matériaux. C'est la technique qui est utilisée pour la réparation des nids-de-poule.

Parmi les techniques améliorées, la technique de réparation permanente et les techniques de réparation utilisant les produits tels que : le ChipFill, l'AggreFill, le colbifibre et la méthode d'injection sont autant des techniques que nous pouvons expérimenter dans notre pays le Bénin, en respectant les conditions de mise en œuvre de chaque technique de réparation.

3.7. Recommandations

Le nid-de-poule est une dégradation très sérieuse alors il faut une méthode de traitement très rigoureuse. Pour ce fait, il faut :

- nécessairement bien diagnostiquer les causes des dégradations en utilisant des méthodes plus quantitatives que qualitatives. Cela suppose l'utilisation de matériels adéquats tels que : analyseur de profil en long, pour des mesures d'uni, profilomètre ;
- prendre en compte lors du dimensionnement des chaussées, les surcharges qui peuvent subvenir dans le temps ;
- bien maîtriser les granulats disponibles ;
- prendre en compte le nouveau trafic, les conditions climatiques et la classe de la route dans le choix de la méthode de réparation des nids-de-poule ;
- avoir un enrobé résistant à l'arrachement ;
- faire l'essai de TWIT (Total Water Immersion Test) qui donne une idée de l'adhésivité de liant sur granulat en présence de l'eau ;
- faire l'essai de stabilité et celui de viscosité sur le liant avant la mise en œuvre.

- expérimenter d'autres méthodes de réparation appliquées sous d'autres cieux afin de trouver une méthode de réparation durable dans le temps.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Au terme des travaux menés sur la réparation des nids-de-poule sur les chaussées souples, nous pouvons dire que le réseau routier qui assure le transport des biens et des personnes, le développement économique du pays, est chaque année affectée par de nombreuses pathologies en l'occurrence les nids-de-poule. En effet, les phénomènes à l'origine des nids-de-poule sont innombrables et surtout multiformes. Le diagnostic des dégradations superficielles (nids-de-poule) ne doit pas s'arrêter à une auscultation visuelle de la chaussée. Il est bon de bien identifier l'origine des nids-de-poule avant de penser à leur réparation.

Le point à temps appliqué systématiquement pour la réparation des nids-de-poule doit être revue de par sa mise en œuvre et le choix des matériaux de réparation en tenant compte des conditions climatiques, les caractéristiques des nids-de-poule et le nouveau trafic.

Les nouvelles techniques de réparation des nids-de-poule du monde actuel (les méthodes de réparation urgente, temporaire, permanente, la méthode de réparation par utilisation des produits comme ChipFill, colbifibre...) offrent plusieurs avantages et le choix de la technique tient compte de certains paramètres clés. Avec la performance et les caractéristiques des nouveaux produits, on assiste à une réparation plus au moins efficace des nids-de-poule de nos jours.

Nous proposons l'expérimentation de ces nouvelles techniques sur nos routes tout en respectant en toutes circonstances les règles de l'art propres à chaque technique afin d'apprécier celles qui est plus adapté à notre pays.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] B. Y. LOKO, « THEME : Analyse des dégradations des chaussées revêtues et proposition d ' une structure adaptée : cas du tronçon AKASSATO – ALLADA de la RNIE2 . », 2012;
- [2] « Nids de poule, disponible sur »: [En ligne]. Disponible sur: <https://www.goethe.de/prj/mis/fr/lei/21904916.html>. [Consulté le: 10-sept-2022].
- [3] Thomas SIMONNOT et Fouad BOUYAHBAR, « La pathologie des chaussées, processus de dégradation, causes et diagnostic », *Tech. L'INGENIEUR*, vol. C7300 V1, p. 2, 2021;
- [4] LCPC-SETRA, *Conception et dimensionnement des structures de chaussée/Guide technique. République Française, Ministère de l'équipement, des transports et du Tourisme*,. 1994;
- [5] CEBTP-LCPC :, *Manuel pour le dimensionnement des chaussées souples en pays tropicaux*,. 1985;
- [6] Dr. Ezéchiel ALLOBA et Dr. de Paule Francois CODO, *Cours de route II, Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi*. 2000;
- [7] Bauer Pascal et al., *Guide technique : diagnostic et conception des renforcements de chaussées*, RST USIRF. 2007;
- [8] H. Di Benedetto et F. J. Corté, *Matériaux bitumineux, volume 2*, Hermes. 2005.
- [9] H. Z. Adalgice NADJO, « Amélioration du comportement des chaussées revêtues sur sols expansifs par l'utilisation d'un matériaux géosynthétique. cas de la section Pobè-Onigbolo au sud du Bénin. Cotonou: Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur de Lomé, » Memoire pour l'obtention du grade de Master, 2009;
- [10] C. S. A. R .DUPAIN, R .LANCHON, *Granulats, Sols, Ciments Et Bétons» 2e édition conforme aux normes européenne*,. 2009;
- [11] Union des syndicats de l'industrie routière française (USIRF), *Les enrobés bitumineux, tome 2*, RGRA. décembre 2003;
- [12] Said Laldji, *Cours ETS : Enrobés*. 2013;
- [13] Jean BERTHIER, « Les routes - Matériaux de chaussées souples et semi-rigides, Techniques de l'Ingénieur, » vol. C4314 v1, n° 1;
- [14] NF EN 13043, « *granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels*

- utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et d'autres zones de circulation* » ;
- [15] Norme NF P 98-150-1 :, *enrobés hydrocarbonés à chaud – constituants, formulation, fabrication, transport, mise en œuvre et contrôle sur chantier.* ;
- [16] NF P 98-130, *Béton bitumineux semi-grenu (BBSG)* ; .
- [17] NF P 98-141, *Béton bitumineux à module élevé (BBME)* ; .
- [18] NF P 98-136, *Béton bitumineux pour couche de surface de chaussées souples à faible trafic (BBS)* ; .
- [19] NF P 98-132, *Béton bitumineux mince (BBM)* ; .
- [20] NF P 98-134, *Bétons bitumineux drainants (BBDr)* ; .
- [21] NF EN 13108-1, *Enrobés bitumineux* ; .
- [22] LCPC-VIZIR, *Méthode assistée par ordinateur pour l'estimation des besoins en entretien d'un réseau routier.*, 1991;
- [23] R. MICHAÏ, « Portance résiduelle des structures des routes revêtues : contribution à l'étude de détermination des critères de déflexion sur le réseau routier béninois, » mémoire de fin de formation Master en Génie civil, EPAC;
- [24] M. des I. et des T. (MIT), *campagne de recueils des données routières au titre de l'année 2020.* 2020;
- [25] DJENONTIN Ignace, « Monographie communale de lokossa », 2006. .
- [26] Ministère des Infrastructures et des Transports, *Manuel d'entretien routier au Bénin.* 2020;
- [27] Boukari ALI, « Etude des défauts de surface des chaussées souples revetues », mémoire de fin de formatin pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Génie civil à l'Ecole Polytechnique de Thiès, 1990;
- [28] Direction du Laboratoire des Chaussées, « Réparation des Nids-de-poule, Bulletin d'informations techniques, » vol. Vol. 9, n° 2;
- [29] « Entretien et réparation des chaussées-produits de maintenance des routes, disponible sur »: [En ligne]. Disponible sur:
https://docs.google.com/document/d/1DBwGvhpT5eq6ADz98p_bcxmMP8Mh0PZz/ed
 it?usp=sharing&ouid=118178300889438858697&rtpof=true&sd=true. [Consulté le:
 05-sept-2022] ;
- [30] « Réparation de nids-de poules pour des routes par la méthode d'injection: technologie de répration des chaussées, mode d'emploi, disponible sur: » [En ligne]. Disponible sur:

- <https://valenteshop.ru/fr/yamochnyi-remont-dorog-inekcionnym-metodom-tehnologiya-remonta/>. [Consulté le: 01-sept-2022];
- [31] Centre D'Expertise et de Recherche en Infrastructures Urbaines, *Guide de bonnes pratiques de réparation de Nids-de-poule*. Montréal, Québec, 2010;
- [32] « Notice technique de colbifibre ». [En ligne]. Disponible sur: <https://dokumen.tips/documents/notice-technique-colbifibre-colas-un-enduit-superficiel-monocouche-fibre.html%0A%0A>. [Consulté le: 10-sept-2022].



ANNEXES

Annexe 1 : Tableau synodique des dégradations des chaussées revêtues

Tableau 21 : Tableau synodique des dégradations des chaussées revêtues

DÉGRADATIONS DE TYPE A	NIVEAU DE GRAVITÉ			CAUSES PROBABLES DE LA DÉGRADATION
	1	2	3	
Déformation	Déformation sensible à l'usager $F < 2 \text{ cm}$	Graves déformations, affaissements localisés ou orniérages $2 \text{ cm} < F < 4 \text{ cm}$	Déformations affectant la sécurité et/ou la vitesse $F > 4 \text{ cm}$	Portance insuffisante du sol support ou du corps de chaussée, sous dimensionnement du corps de chaussée, drainage insuffisant, fatigue de la chaussée, perte de cohésion de la couche de base, fluage de la couche de roulement
Fissuration	Fissures dans les traces de roues ou dans l'axe	Fissures ouvertes et/ou ramifiées	Fissures très ramifiées et/ou très ouvertes	Fatigue de la chaussée, épaisseur insuffisante de la chaussée par rapport au trafic, mauvaise qualité des matériaux.
Faièçage	Faièçage fin sans départ de matériau, maillage $< 50 \text{ cm}$	Faièçage serré sans départ de matériau avec des fissures ouvertes, maillage $< 50 \text{ cm}$	Faièçage très serré avec ou sans départ de matériau ; maillage $< 20 \text{ cm}$	Fatigue de la chaussée, épaisseur insuffisante de la chaussée par rapport au trafic, mauvaise qualité des matériaux
Réparation	Réparation des dégradations de type B	Réparation des dégradations de type A et tenue satisfaisante de la partie réparée	Apparition des dégradations sur la partie réparée	Si la dégradation apparait, cela peut être due à une dégradation mal exécutée ou inappropriée à la dégradation constatée ou au vieillissement de la chaussée

DÉGRADATIONS DE TYPE B	NIVEAU DE GRAVITÉ			CAUSES PROBABLES DE LA DÉGRADATION
	1	2	3	
Fissures transversales	Amorces de fissure, transversale rectiligne	Fissure transversale avec apparition de la couche de base	Fissure transversale et longitudinale avec apparition parfois de la couche de base	Phénomène de retrait des matériaux lors des changements de saison, fatigue sous trafic.
Nids-de-poule	Nombre < 5 et diamètre < 50 cm	5 < nombre < 10 et diamètre < 30 cm ou nombre < 5 et diamètre > 30 cm	Nombre > 10 et diamètre < 30 cm ou 5 < nombre < 10 et C	Agressivité de l'eau ou du trafic, arrachement d'une maille de faïençage, insuffisance de bitume dans la couche de roulement, dégradation d'une flache sous l'effet du trafic.
Arrachements	Arrachement ponctuel sans apparition de la couche de base	Arrachements continus ou ponctuels avec apparition de la couche de basse	Arrachements continus avec apparition de la couche de base	Mauvaise adhésivité liant-granulat ; sus dosage du liant ; mise en œuvre lors des mauvaises conditions météorologiques ; surface d'imprégnation ou d'accrochage non propre.
Ressuage	Ponctuel ou continue, peu marquée sur une bande de roulement	Remontée du liant continue, marquée sur une bande de roulement	Remontée du liant continue, très marquée sur toutes largeurs de la chaussée	Dosage en liant trop élevé, mauvaise formulation liant, granulat ; utilisation de liant mou et/ou présence de chaleur trop élevée.
Épaufrure de rive	Amorce d'épaufrure	Épaufrure entaillant la chaussée sur plus de 30 cm	Épaufrure entaillant la chaussée sur plus de 50 cm.	Roues de véhicules sur le bord de la couche de roulement, mise en œuvre défectueuse, vieillissement de la chaussée.
Dénivelé des accotements	1 < dénivelé < 5 cm	5 < dénivelé < 10 cm	diamètre > 10 cm	Érosion des accotements par l'eau de ruissellement provenant de la surface de roulement ; passages fréquents des véhicules sur les accotements.

Annexe 2 : photos des dégradations du tronçon d'étude



Photo A : Nids-de-poule en pleine chaussée



Photo B : Pelades devant la clôture de SITEX



*Photo C : Epaufrure au niveau du carrefour
du marché, côté gauche, sens Mairie
Lokossa-INSTI Lokossa*



*Photo D : Ornière devant l'entrée
principale de l'INSET*

TABLES DES MATIÈRES

Dédicace	iii
Remerciements	iv
Sommaire	vi
Liste des figures	viii
Liste des photos	ix
Liste des tableaux	x
Liste des graphes	xi
Liste des acronymes	xii
Liste des annexes.....	xv
Abstract	xvii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1: SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	3
1.1. Généralités sur les chaussées.....	3
1.1.1. Structure d'une chaussée	3
1.1.2. Mode de fonctionnement des structures de chaussées [5]	8
1.1.2.1. Les chaussées souples [5].....	8
1.1.2.2. Les chaussées rigidifiées [5].....	9
1.2. Dégradation des chaussées à revêtement bitumineux.....	10
1.2.1. Principales causes des dégradations	10
1.2.1.1. Trafic [7]	10
1.2.1.2. Conditions climatiques [7]	11
1.2.1.3. Qualité des matériaux [7]	13
1.2.1.4. Les défauts liés à la structure [7].....	13
1.2.2. Les différents types de dégradations	14
1.2.3. Processus de dégradation des chaussées souples.....	22
1.3. Les enrobés bitumineux.....	22
1.3.1. Classification des bitumes routiers	23
1.3.2. Propriétés essentielles des enrobés	24
1.3.3. Différents types d'enrobés.....	30
1.3.2.1. Enduits superficiels	31
1.3.2.2. Enrobés bitumineux à chaud	32

1.2.2.2.1. Enrobés épais pour couche de surface.....	32
1.2.2.2.2. Enrobés minces pour couches de surface	33
1.2.2.2.3. Bétons bitumineux drainants	34
1.3.2.3. Enrobés à froid	35
1.2.2.3.1. Enrobés coulés à froid	35
1.2.2.3.2. étons bitumineux à froid.....	35
1.2.2.3.3. Enrobés à froid stockables.....	36
1.3.4. Caractérisation de la performance des enrobés	36
1.4. Les granulats	37
CHAPITRE 2 : ÉTAT DES LIEUX DES NIDS-DE-POULE ET PRÉSENTATION DES MÉTHODES DE RÉPARATIONS USUELLES AU BENIN	39
2.1. Méthode d'évaluation des chaussées à revêtement bitumineux au BENIN [22]	39
2.1.1. La méthode VIZIR	40
2.1.1.1. Classification et quantification des dégradations	40
2.1.1.2. Relevé et notation des dégradations	41
2.1.1.3. Utilisation des quantificateurs de dégradation pour la détermination des besoins en entretien	42
2.1.1.4. Indice de dégradation	43
2.1.1.5. Note de qualité de la chaussée.....	44
2.1.1.6. Détermination de la solution	46
2.1.2. La méthode du CEBTP-LCPC	47
2.2. Présentation d du réseau routier au Bénin.....	49
2.3. Matériaux disponibles pour une utilisation en revêtement bitumineux au Bénin	50
2.3.1. Les enduits superficiels (ES).....	50
2.3.2. Les enrobés denses	51
2.4. Evaluation de la route mairie lokossa-INSTI lokossa-RN2 bis.....	51
2.4.1. Historique de la route d'étude	51
2.4.2. Le trafic sur le tronçon d'étude	54
2.4.3. L'environnement d'étude	55
2.4.4. La lithologie du tronçon d'étude	56
2.4.5. Inspection visuelle du tronçon « Mairie de Lokossa-INSTI LOKOSSA »	57
2.5. Analyse de l'évolution des dégradations de 2020-2022.....	61
2.4.6. Causes probables des dégradations observées.....	64
2.6. Méthodes usuelles de réparation des nids-de-poule au Bénin.....	65
2.6.1. Point à temps bitume localisé.....	65
2.6.2. Point à temps en grande masse.....	66

CHAPITRE 3 : PROPOSITION DE TECHNIQUES AMÉLIORÉES DE RÉPARATION DES NIDS-DE-POULE	68
3.1. Première méthode : méthode proposée au Sénégal	68
3.2. Deuxième méthode : méthodes améliorées utilisées au Québec et en Amérique du Nord	70
3.2.1. La réparation urgente	70
3.2.2. Réparation temporaire	71
3.2.3. Réparation permanente	72
3.3. Méthode 3 : Réparation <i>des nids de poule par utilisation de nouveaux produits</i>	74
3.3.1. Réparation <i>des nids de poule par utilisation de ChipFill et AggreFill</i>	74
3.3.1.1. Description de ChipFill et AggreFill	74
3.3.1.2. Utilisation de ChipFill	74
3.3.1.3. Composition de ChipFill	75
3.3.1.4. Mise en œuvre de ChipFill	76
3.3.2. Méthode 2 : Réparation des nids-de-poule des routes par la méthode d'injection.....	77
3.3.2.1. Les différents types de matériaux utilisés	78
3.3.2.2. Technique de réparation	79
3.4. Méthode 4 : Réparation des nids de poule avec de l'enrobé à chaud ou à froid	79
3.4.1. Critères de sélection des techniques de réparation	79
3.4.2. Étapes de réparation d'un nid-de-poule.....	81
3.5. Méthode 5 : Réparation des nids-de-poule avec colbifibre	82
3.5.1. Présentation de colbifibre.....	82
3.5.2. Domaines d'emploi de colbifibre	82
3.5.3. Constituants de colbifibre.....	83
3.5.4. Condition de mise en œuvre	83
3.5.5. Mise en œuvre	84
3.6. Étude comparative des différentes méthodes de réparation des nids-de-poule et proposition de nouvelles méthodes de réparation des nids-de-poule au Bénin.....	85
3.7. Recommandations	85
CONCLUSION GÉNÉRALE	87
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	88
ANNEXES	91
Annexe 1 : Tableau synodique des dégradations des chaussées revêtues	92
Annexe 2 : photos des dégradations du tronçon d'étude	94
TABLES DES MATIÈRES	96