

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



GC. 0528

École Supérieure Polytechnique
Centre de Thiès

DEPARTEMENT GENIE CIVIL

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

Titre : *Le sand asphalt est-il une technique de revêtement à adopter au Sénégal ? Cas de la RN1*

Auteur: El Hadji Mansour NIANG

Directeur interne : Pr. Ibrahima Khalil CISSE

Directeurs externes: M. Lamine CISSE Chef DP-BDR/AATR

M. Jean Christophe ANDRE DG Sénélabo-BTP

Année académique , 2007 - 2008

Dédicaces

*À
Mes parents,
Mes frères et sœurs
À mes amis et collègues
Pour le soutien, les conseils, les encouragements
Qu'ils m'ont apportés depuis le début de cette formation.*

Remerciements

Je tiens à remercier le Professeur Ibrahima Khalil CISSÉ, professeur titulaire au département de Génie Civil et Directeur de l'Ecole Polytechnique de Thiès d'avoir bien voulu encadrer ce projet. Il m'a fait partager son expérience enrichissante dans le domaine des routes et m'a prodigué de précieux conseils.

Je remercie tout particulièrement Monsieur Lamine CISSÉ chef de la Division de la Programmation – AATR, d'avoir eu confiance en moi en me proposant ce sujet. Les conseils qu'il m'a divulgués m'ont permis de mener à bien la rédaction de ce projet. Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du personnel de l'AATR/Dakar et AATR/Tamba notamment M. Lamine NDIAYE qui m'ont cordialement accueilli parmi eux

Mes plus sincères remerciements vont également à Monsieur Jean Christophe ANDRÉ. Son expérience, sa clarté d'esprit et ses qualités humaines ont été un précieux recours pour la réussite de cette étude. Je le remercie particulièrement pour avoir accepté de mettre à ma disposition les moyens humains et techniques nécessaires pour mener à bien ce travail. Nos remerciements vont également à l'attention de M. Bernard FAYE et de M. Serigne Sam SAMB pour m'avoir aidé à débloquer des problèmes dans plusieurs situations. J'exprime également toute ma reconnaissance à l'ensemble du personnel de SENELABO-BTP pour leur aide et leur collaboration qui m'a beaucoup aidé.

Je tiens également à remercier M. Dominique NDONG et M. Ndiaye Diouf NDIAYE pour les discussions qui m'ont permis d'enrichir mes connaissances scientifiques et techniques dans le domaine des revêtements et spécialement en sand asphalt.

C'est l'occasion aussi pour moi d'exprimer mes remerciements à tous les enseignants de l'Ecole Supérieure Polytechnique de Thiès pour l'ensemble des efforts qu'ils ont consenti pour que j'acquiesse une formation de qualité.

Sommaire

Le sand asphalt est-il une technique de revêtement à adopter au Sénégal ? Cas de la RN 1

Le but de ce projet était de faire un diagnostic et d'apprécier les causes des dégradations de la route Tamba-Kidira-Bakel (TKB), de proposer des solutions de remise en état et d'analyser si le sand asphalt est une technique de revêtement à vulgariser au Sénégal après observations faites du comportement du revêtement sur l'axe TKB.

La zone d'influence du projet se trouve dans sa majeure partie dans la zone sahéenne et soudano-sahéenne. Elle porte sur les tronçons de routes nationales RN1 et RN2 respectivement sur Tamba-Kidira et sur Kidira-Bakel en passant par Bala et Goudiry sur une longueur totale de 252 kilomètres.

Le diagnostic passe par un relevé des dégradations, la réalisation de carottages en pleine chaussée afin d'extraire le revêtement en sand asphalt et la réalisation d'essais de laboratoire en vue de déterminer pour chaque carotte : la teneur en liant, la granulométrie, la densité apparente et la pénétrabilité du bitume obtenu après extraction au Kumagawa. Un recoupement de données entre les dégradations relevées et celles de déflexion, d'IRI, de trafic etc. est fait pour évaluer les causes des dégradations, voir si elles sont d'ordre structural, géotechnique, problème de mise en œuvre, problème de formulation ou bien climatique.

Les zones fissurées représentent 17 % du linéaire diagnostiqué. Les zones traitées au bicouche viennent en seconde position avec 16,3% et ensuite arrivent les ornières avec 6%.

Les dégradations trouvent leurs causes dans divers paramètres qui entrent soit dans la phase de conception, soit dans la mise en œuvre ou du suivi de sa qualité. L'analyse qui ressort de cette étude montre que le sand asphalt en soi ne peut pas être incriminé.

L'utilisation du sand asphalt comme revêtement routier reste limité aux zones où les conditions environnementales sont telles qu'il évolue sans se fissurer, et où des trafics sont faibles à moyens pour limiter les ornières. Une grande partie du Sénégal est favorable à l'utilisation du sand asphalt tant du point de vu environnemental que circulation. Encore faudrait-il trouver des matériaux de qualité indispensables à sa mise en œuvre.

Mots-clés : sand asphalt –dégradation - Kumagawa – bitume – densité apparente – pénétrabilité – déflexion – IRI - trafic – carotte – bicouche

Liste des tableaux

	Page
Tableau I-1 Linéaire de routes classées en 2002 (en km).....	4
Tableau I-2 Linéaire de routes classées en 2004 (en km).....	4
Tableau I-3 Évolution globale de l'état du réseau routier.....	5
Tableau I-4 Classification du trafic des véhicules par type et par région.....	6
Tableau I.5 : Tableau de classification des bitumes semi-durs.....	23
Tableau I-6 : fuseaux granulométriques des sables pour le sand asphalt.....	30
Tableau III.1 : Spécifications techniques du bitume 40/50.....	54
Tableau III.2 : Spécifications pour le sand asphalt par Duriez.....	58
Tableau III.3 : Spécifications pour le sand asphalt par l'essai Marshall.....	58
Tableau III.4 : Spécifications pour le sand asphalt par l'essai Hubbard-Field.....	59
Tableau III.5 : Performances de la formule F2 par l'essai Duriez.....	60
Tableau III.6 : Performances de la formule F2 par l'essai Marshall.....	60
Tableau III.7 : Performances de la formule F2 par l'essai Hubbard-Field.....	61
Tableau III.8 : Étude Hubbard-Field de la formule F'2.....	61
Tableau III.9 : Définition des classes de trafic selon LCPC.....	62
Tableau III.10 : Evolution des facteurs thermiques pour les 5 dernières années (2001 à 2006).....	62
Tableau IV.1 : Tableau IV.1 : Liste des carottes prélevées.....	70
Tableau IV.2 : Épaisseur de revêtement et degré de collage des carottes.....	71
Tableau IV.3 : Densité apparente en fonction de la zone.....	72
Tableau IV.4 : Silhouette de véhicules lourds.....	77
Tableau IV.5 : Coefficient d'agressivité de quelques silhouettes d'après la campe de pesage sur l'axe Kaolack-Nioro.....	77
Tableau IV.6 : le nombre d'essieux équivalent de 2000 à 2007.....	77
Tableau IV.7 : NE calculé avec le trafic réel.....	78
Tableau IV.8 : NE calculé avec les hypothèses de trafic initial.....	79
Tableau IV.9 : Valeur de l'Uni (en IRI).....	84
Tableau IV.10 : Caractéristiques des différentes couches de la structure type.....	85
Tableau VI.11 : Statistiques des dégradations.....	89
Tableau IV.12 : Coûts Unitaires d'Entretien des Routes Revêtues.....	106
Tableau IV.13 : Prix unitaire pour le PAT (Point à temps).....	106
Tableau IV.14 : Coût de réfection de la chaussée.....	107
Tableau V. 1 : Débit journalier moyen par région.....	114
Tableau V.2 : Coût initial de la variante sand asphalt.....	115
Tableau V.3 : Coût initial de la variante sand asphalt (cas d'une exploitation d'emprunt de sables naturels).....	116
Tableau V.4 : Coût initial de la variante bicouche.....	116
Tableau V.5 : coûts d'entretien kilométrique du sand asphalt.....	117
Tableau V.6 : coûts d'entretien kilométrique du bicouche.....	118

Liste des figures

	Page
Figure I-1 : Structure du trafic motorisé en 2002.....	6
Figure I.2 : structure d'une chaussée.....	7
Figure I-3 : Enduit superficiel monocouche simple gravillonnage.....	16
Figure I-4 : Enduit superficiel en monocouche double gravillonnage.....	16
Figure I-5 : Enduit superficiel en bicouche.....	16
Figure I-6 : Enduit superficiel en bicouche inverse.....	17
Figure I-7 : Classification du bitume selon la norme NF et la norme EN.....	21
Figure I-8 : Susceptibilité thermique du bitume.....	22
Figure II-1 : Fissurations transversale sur une chaussée à revêtement bitumineux.....	35
Figure II-2 : Fissurations longitudinales	36
Figure II-3 : faïençage serré.....	37
Figure II-4 : la lézarde.....	38
Figure II-5 : ornière à grand rayon.....	40
Figure II-6 Affaissement de rive.....	40
Figure II-7 : gonflement.....	42
Figure II-8 : ondulations à courte longueur d'onde.....	42
Figure II-9 : les ressuges.....	43
Figure II-10 : pelades	45
Figure II-11 : désenrobage et arrachement de bitume.....	46
Figure II-12 : Nids de poule.....	47
Figure III.1 : courbe granulométrique sable de Falémé.....	55
Figure III.2 : courbe granulométrique sable fin du pk 35.....	56
Figure III.3 : Poutre de Benkelman.....	64
Figure III.4 : Analyseur de Profil en Long.....	65
Figure III.5 : Évolution de la pluviométrie de 2000 à 2006.....	66
Figure IV.1 : Carotteuse.....	69
Figure IV.2 : Appareil d'extraction de bitume : le Kumagawa.....	72
Figure IV.3 : Résultats des mesures de déflexion par de Tamba à Kidira.....	82
Figure IV.4 : Évolution de l'IRI.....	83
Figure IV.5 : cours général des isothermes.....	86
Figure IV.6 : Évolution de la dégradation d'une simple fissure vers un faïençage en passant par un maillage serré.....	87
Figure IV.7: Fissures longitudinales sur ornières créées sur les traces des roues.....	88
Figure IV.8 : Ressuage.....	89
Figure IV.9 : Mottes sur le revêtement en sand asphalt.....	92
Figure IV.10 : Effet de la température sur l'enrobé bitumineux.....	95

Liste des abréviations et symboles

Organisme Routier

AATR :	Agence Autonome des Travaux routiers
LCPC :	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
NF :	Norme Française
EN :	Norme Européenne
CEBTP :	Centre Expérimental de Recherches et d'Étude du Bâtiment et des Travaux Publics
AASHO:	American Association of State Highway and Transportation Officials
SETRA :	Service d'Étude Technique des Routes et Autoroutes
LBTP :	Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics
BCEOM :	Bureau Central d'Études pour les Equipements d'Outre-Mer
CEREEQ :	Centre Expérimental de Recherches et d'Études pour l'Équipement
CSE :	Compagnie Sahélienne d'Entreprise
DTP :	Direction des Travaux Publics
GIC :	Groupement d'Ingénierie et de Construction

Matériaux

BB :	Béton Bitumineux
EBM :	Enrobés bitumineux minces
MBB :	Micro-Bétons bitumineux
ES :	Enduit Superficiel
Mc :	Monocouche
Bc :	Bicouche

Paramètres de dimensionnement

ϵ_z :	Déformation verticale admissible
ϵ_6 :	Déformation pour laquelle la rupture conventionnelle en flexion sur éprouvette est obtenue au bout de 106 cycles avec une probabilité de 50%, à 10°C et 25 Hz
E :	Module de Young
N_{ad} :	Nombre cumulé de poids lourds admissible
$\sigma_{\tau ad}$:	Contrainte de traction au niveau de la couche traitée au liant hydraulique
$1/\beta$:	Pente de la droite de fatigue
u :	Variable aléatoire de la loi normale centrée réduite associée au risque r
b :	Pente de fatigue du matériau exprimée sous forme d'une loi bi-logarithmique
δ :	Écart type combinant dispersion la dispersion sur les épaisseurs et celle sur les résultats d'essais de fatigue

Essai et grandeur

PH :	Potentiel Hydrogène
d/D :	Il décrit les classes granulaires. d = dimension inférieur et D = dimension supérieure d'un granulat.
ES :	Équivalence de Sable

VBS :	Valeur au Bleu
Ic :	Indice de concassage
Rc :	Rapport de concassage
CBR :	Californian Bearing Ratio, indice portant
OPM :	Optimum Proctor Modifié
P_{2,5} :	Pression nécessaire pour réaliser un enfoncement de 2,5 mm
P₅ :	Pression nécessaire pour réaliser un enfoncement de 5 mm
IP :	Indice de Plasticité
Σ :	Surface spécifique conventionnelle
a :	Coefficient de correction
K :	Module de Richesse
R'_c :	Résistance à la compression après imbibition
R_c :	Résistance à la compression avant imbibition
γ_s :	Poids spécifique
Cu :	Coefficient d'Uniformité
Ce :	Coefficient de courbure
γ_d :	Poids des grains secs
Da :	Densité apparente
Dc :	Déflexion caractéristique
D90 :	Déflexion qui n'a que 10 chances sur 100 d'être dépassée
APL :	Analyseur de Profil en Long
IRI :	Indice de Rugosité International
σ :	Écart type
CV :	Coefficient de variation
Dm :	Déflexion moyenne
HDM :	Highway Design and Maintenance
EC :	Entretien Courant
EP :	Entretien Périodique

Trafic et Route

RN :	Route Nationale
TKB :	Tamba-Kidira-Bakel
RR :	Routes Régionales
RD :	Routes Départementales
VU :	Voiries urbaines
PR :	Pistes répertoriées
Ti :	Classe de trafic i
TCi :	Classe de trafic cumulé i
VPC :	Voies la plus chargée
CU2A :	Axe routier Dakar-Kaolack- Tambacounda-Kidira- Kayes-Bamako-Sikasso- Ouagadougou -Niamey-Zinder-Frontière Tchad.
MJA :	Moyenne Journalière Annuelle
NE :	Nombre Équivalent de passages d'essieux de référence de 130 KN
T.M.J.A. :	Trafic moyen journalier annuel
U.V.P. :	Unité de véhicule particulier
HPM :	Heures de pointe du matin
HPS :	Heures de pointe du soir
PK :	Point Kilométrique

N :	Nombre de poids lourds cumulés
T :	Trafic
d :	Durée de dimensionnement initial de la
t :	Taux de croissance linéaire annuelle du trafic lourds/100
CAM :	Coefficient d'agressivité moyen.
A :	Agressivité moyenne
P :	Poids de l'essieu en KN
Po :	Poids de l'essieu de référence
α :	Exposant en relation avec la pente des courbes de fatigue des matériaux
K :	Coefficient de configuration des essieux, dans le calcul de A

Tableau des Matières

Dédicaces-----	i
Remerciements-----	ii
Liste des tableaux-----	iv
Liste des figures-----	v
Liste des abréviations et symboles-----	vi
Tableau des Matières -----	ix
Introduction -----	1
I. GÉNÉRALITÉS -----	3
A. PRESENTATION DU RESEAU ROUTIER SENEGALAIS -----	3
I.1. Classification du réseau-----	3
I.2. Répartition du réseau-----	4
I.3. État du réseau-----	4
I.4. Le trafic-----	5
B. GENERALITE SUR LA STRUCTURE D'UNE CHAUSSEE-----	7
I.1. Description de la chaussée -----	7
I.2. COMPORTEMENT STRUCTURAL DES DIFFERENTS TYPES DE CHAUSSEES -----	9
I.2.1 Rôle de la couche de revêtement (ou couche de surface)-----	9
I.2.2 Rôle de la couche de base-----	9
I.2.3 Rôle de la couche de fondation -----	10
I.2.4 Rôle de la plateforme -----	10
I.3. LES FAMILLES DE STRUCTURE DE CHAUSSEES (CLASSIFICATION LCPC) -----	10
I.3.1 Les chaussées souples -----	10
I.3.2 Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques -----	11
I.3.3 Les chaussées à structure mixte-----	11
I.3.4 Les chaussées à structure inverse-----	12
I.3.5 Les chaussées en béton de ciment -----	12
C. GENERALITES SUR LES REVETEMENTS -----	14
I.1. TYPES DE REVETEMENT UTILISES AU SENEGAL -----	14
I.1.1 Les enduits superficiels-----	14
a) Le monocouche simple gravillonnage -----	15
b) Le monocouche double gravillonnage -----	16
c) Le bicouche-----	16
d) Le bicouche inverse -----	17
I.1.2 Les enrobés-----	17
a) Les enrobés denses ED -----	18
b) Les bétons bitumineux BB-----	18
c) Les mortiers bitumineux -----	18
I.2. LES CONSTITUANTS DES ENROBES -----	19
I.2.1 Les liants-----	19
a) Les bitumes-----	20
b) L'asphalt -----	23
c) Les émulsions de bitume -----	23
d) Les goudrons -----	24
I.2.2 Les granulats -----	24
a) Les sables -----	27
b) Les gravillons -----	29
c) Les graves -----	29
I.3. CAS DU SAND ASPHALT -----	29
a) Les sables-----	30
b) Le bitume -----	31
c) Le filler-----	31

d)	Les performances du mélange-----	31 -
II.	ÉTUDE DES DEGRADATIONS DES CHAUSSEES A REVETEMENT	
	BITUMINEUX-----	33 -
II.1.	Fissures-----	35 -
II.1.1	Les fissures transversales-----	35 -
II.1.2	Les fissures longitudinales-----	36 -
II.1.3	Les fissures de faïençages-----	37 -
II.1.4	Les fissures de glissance-----	37 -
II.1.5	La peau de crocodile-----	38 -
II.1.6	Les lézardes-----	38 -
II.2.	Déformations de la surface-----	39 -
II.2.1	Les ornières-----	39 -
II.2.2	Les affaissements-----	40 -
II.2.3	Le bourrelet-----	41 -
II.2.4	Le gonflement-----	42 -
II.2.5	Les ondulations à courte longueur d'onde-----	42 -
II.3.	Les mouvements de matériaux-----	43 -
II.3.1	Le ressuage-----	43 -
II.3.2	L'indentation ou glaçage-----	44 -
II.3.3	Remontée de fines-----	44 -
II.4.	Pertes ponctuelles du revêtement-----	45 -
II.4.1	La pelade-----	45 -
II.4.2	Le plumage-----	45 -
II.4.3	Le désenrobage-----	46 -
II.4.4	Le peignage-----	46 -
II.4.5	Les épaufrures-----	47 -
II.4.6	Les nids de poule-----	47 -
III.	LA ROUTE TAMBA-KIDIRA-BAKEL-----	49 -
III.1.	Présentation du projet-----	49 -
III.1.1	Le tracé :-----	49 -
III.1.2	La chaussée :-----	50 -
III.1.3	Les matériaux-----	50 -
III.2.	Historique de la route Tamba-Kidira-Bakel (TKB)-----	50 -
III.2.1	La géométrie du projet-----	51 -
III.2.2	Le revêtement bitumineux-----	51 -
III.2.3	Le corps de chaussée-----	51 -
III.3.	Consultation des documents existants :-----	52 -
III.3.1	La formulation utilisée pour le sand asphalt-----	53 -
III.3.2	Les propriétés du bitume utilisé-----	53 -
III.3.3	Propriétés du sable utilisé-----	54 -
III.3.4	Trafic-----	61 -
III.3.5	Déflexion-----	63 -
III.3.6	UNI-----	64 -
III.3.7	Climat : Pluviométrie, température-----	65 -
IV.	ÉTUDE DE LA DEGRADATION DE LA ROUTE TAMBA-KIDIRA-BAKEL -	68 -
IV.1.	EXECUTION DES RELEVES-----	68 -
IV.1.1	Relevés visuels-----	68 -
IV.1.2	Qualité de roulement (Constats et enquêtes)-----	68 -
IV.1.3	Identification des secteurs à problèmes-----	69 -
IV.1.4	Carottages-----	69 -
IV.1.5	Essais de laboratoire :-----	70 -
a)	Degré de collage du revêtement à l'assise-----	71 -
b)	Densité apparente-----	71 -
c)	Teneur en liant-----	72 -
d)	La granulométrie-----	74 -
e)	La pénétrabilité-----	74 -
IV.2.	ANALYSE DES DIFFERENTES DONNÉES COLLECTÉES-----	75 -
IV.2.1	Trafic-----	75 -

IV.2.2	Déflexion-----	81
IV.2.3	L'IRI -----	83
IV.2.4	Données géotechniques-----	85
IV.2.5	Données climatiques -----	86
IV.3.	INVENTAIRE DES DEGRADATIONS-----	86
IV.3.1	Les fissurations : -----	86
IV.3.2	Les ornières : -----	87
IV.3.3	Les nids de poule -----	88
IV.3.4	Les épaufrures-----	88
IV.3.5	Les ressuges-----	89
IV.4.	STATISTIQUE DES DEGRADATIONS-----	89
IV.5.	DEBUT D'APPARITION DES DEGRADATIONS (ENQUETES)-----	90
IV.6.	ÉVOLUTION DES DEGRADATIONS-----	90
IV.7.	CAUSES PROBABLES DES DEGRADATIONS -----	90
IV.7.1	Conception-----	90
a)	Choix du bitume -----	91
b)	Qualité du matériau : sable et bitumes -----	91
c)	Trafic -----	92
d)	Formulation -----	94
IV.7.2	La température -----	94
IV.7.3	La pluviométrie -----	96
IV.7.4	Exécution (Mise en œuvre) -----	96
IV.7.5	Le contrôle-----	97
IV.7.6	Les événements exceptionnels -----	97
IV.8.	IMPACT DES DEGRADATIONS SUR LES AUTRES PARAMETRES-----	97
IV.8.1	Le niveau de service-----	97
IV.8.2	Les coûts d'entretien -----	97
IV.8.3	Le confort au roulement -----	98
IV.8.4	La structure (corps de chaussée, ouvrages annexes)-----	98
IV.9.	IDENTIFICATION DES SOLUTIONS APPLICABLES-----	98
IV.9.1	Les solutions curatives-----	98
a)	Le scellement de fissure-----	99
b)	Les reprises ponctuelles de revêtement-----	99
c)	Le recouvrement bitumineux-----	100
d)	Un tapis d'enrobé-----	100
e)	Les enduits superficiels-----	101
IV.9.2	Les solutions préventives-----	101
a)	Le choix des matériaux (bitume, sable)-----	101
b)	Le trafic à prendre en compte -----	102
c)	Les zones climatiques -----	102
d)	L'entretien (suivi)-----	102
e)	La formulation à prendre en compte -----	103
f)	Les précautions à prendre pour la mise en œuvre-----	104
IV.10.	ANALYSE ET CHOIX DES SOLUTIONS OPTIMALES-----	105

V. RECOMMANDATIONS QUANT A LA VULGARISATION OU NON DU SAND ASPHALT AU SENEGAL VOIRE DANS LA SOUS REGION. ----- 109

V.1.	EXPERIENCE AFRICAINE DANS LA MISE EN ŒUVRE DU SAND ASPHALT -----	109
V.1.1	Expérience Ivoirienne -----	109
V.1.2	Expérience burkinabé-----	110
V.2.	TAUX DE SATISFACTION : NIVEAU DE SERVICE, DUREE DE VIE-----	111
V.3.	CAS PARTICULIER DU SENEGAL -----	112
V.3.1	Disponibilité de matériaux et équipement-----	112
V.3.2	Disponibilité d'expertise et de savoir faire-----	113
V.3.3	Mise en œuvre -----	113
V.3.4	Climat (pluviométrie, la température...) -----	113
V.3.5	Trafic -----	113
V.4.	PARAMETRE COUT -----	114
V.4.1	Coût initial-----	115
V.4.2	Coûts liés à la mise en œuvre du sand asphalt-----	115

V.4.3	Coûts liés à la mise en œuvre du bicouche-----	116
V.4.4	Coût d'entretien-----	117
CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS-----		119
LISTE DES ANNEXES -----		123

Introduction

Les tronçons des Routes Nationale N°1 et N°2 entre Tambacounda et BAKEL ont été aménagées et bitumées entre 1996 et 2000. Et compte tenu d'une surexploitation des carrières existantes et pour promouvoir l'utilisation de matériaux nouveaux en technique de construction routière et réduire ainsi les coûts de transport, la Direction des Travaux Publics à l'époque a opté pour la mise en œuvre d'un revêtement en sand asphalt en lieu et place du bicouche ou des enrobés denses. Cependant, presque 5 ans après sa mise en service, la route nationale n°1, entre Tamba – Kidira a atteint un niveau de dégradation très inquiétant, à tel enseigne que depuis 2006, l'AATR met en œuvre des travaux d'entretien périodique (resurfaçage bicouche) sur ce tronçon.

Vu les investissements consentis dans l'aménagement de ces axes, il urge de mettre sur pieds des politiques de renforcement adéquates pour palier aux dégradations en limitant leur évolution et sauvegarder ainsi l'investissement.

Le présent projet de fin d'études se propose d'établir le diagnostic et d'apprécier les causes de cette dégradation et de proposer des solutions de remise à niveau. Il consiste également à analyser si le sand asphalt est une technique de revêtement à vulgariser au Sénégal, quelle formulation à adopter et quelles précautions à prendre pour sa mise en œuvre. Il fait également un état des lieux sur l'expérience africaine et particulièrement ce qui a été fait dans la sous région en matière de sand asphalt.

La consultation des documents existants, le relevé des dégradations, la réalisation des carottages et des essais de laboratoire constituerons les étapes essentielles pour l'établissement du diagnostic.

Le présent rapport est composé de cinq chapitres. Le premier traite des généralités sur les structures de chaussée et sur les revêtements routiers en passant par une présentation du réseau routier sénégalais. Le second présentent une étude des dégradations d'une chassée à revêtements bitumineux d'une manière générale. Quant au troisième, il présente l'historique et les données existantes de la route Tamba-Kidira-Bakel. Le quatrième chapitre établit le diagnostic en passant par une étude des dégradations et propose des solutions curatives et

préventives. Les recommandations portant sur la vulgarisation ou non du sand asphalt comme technique de revêtement routier au Sénégal feront l'objet du chapitre cinq.

I. GÉNÉRALITÉS

A. PRESENTATION DU RESEAU ROUTIER SENEGALAIS

Le réseau routier est réparti en réseau *classé* et en réseau *non classé*. Les résultats de l'inventaire du réseau routier classé, réalisé en 2002 fait état d'un linéaire total *classé* de 14.634 km

En 2005 Le réseau routier du Sénégal était de 14.805 km. Ce réseau comprend 10 000 km de routes non revêtues et 4 805 km de routes revêtues. Lorsqu'on ne tient pas compte des routes qui n'ont jamais fait l'objet d'aménagement (5 786,2 km de routes en terre), ce linéaire passe à 9 018,8 km et est réparti comme suit:

- Routes revêtues : 4 805 km (53,3%)
- Routes en terre : 4 213,8 km (46,7%)

I.1. Classification du réseau

La loi n°74-20 du 24 janvier 1974 et l'arrêté ministériel n°15097 du 14 décembre 1985 portant classification du réseau routier national donne une simple classification administrative de ce réseau. Ce classement administratif distingue cinq (5) classes de route :

- les routes nationales (RN) qui assurent les liaisons à grande distance entre plusieurs régions administratives ou avec les Etats limitrophes ;
- les routes régionales (RR) qui assurent la liaison entre différents chefs – lieux de département d'une même région ;
- les routes départementales (RD) qui assurent la liaison entre différents chefs-lieux d'arrondissement ou de communautés rurales à l'intérieur d'un même département;
- les voiries urbaines (VU) qui assurent les liaisons à l'intérieur des centres urbains ;
- les pistes répertoriées (PR) qui relient les routes départementales aux centres de production agricole ;

Le réseau classé est à la charge de l'État, alors que le réseau non classé est à la charge des collectivités locales.

I.2. Répartition du réseau

Le réseau routier se répartit comme suit :

Catégorie de routes	Réseau total	Routes revêtues		Routes non revêtues	
	(km)	(km)	(%)	(km)	(%)
Routes nationales	3 364	2 857	85%	507	15%
Routes régionales	1 192	563	47%	629	53%
Routes départementales	5 640	813	14%	4 827	86%
Voiries urbaines	247	241	98%	6	2%
Pistes répertoriées	4 191	85	2%	4 106	98%
TOTAL	14 634	4 559	31%	10 075	69%

Tableau I-1 Linéaire de routes classées en 2002 (en km)

Catégorie de routes	Réseau total	Routes revêtues		Routes non revêtues	
	(km)	(km)	(%)	(km)	(%)
Routes nationales	3351,6507	2844,6	59,2%	507	5,1%
Routes régionales	1206,56	606,5	12,6%	600	6,0%
Routes départementales	5667,8781	886,4	18,4%	4 781	47,8%
Voiries urbaines	250,2006	244,2	5,1%	6	0,1%
Pistes répertoriées	4198,0106	91,6	1,9%	4 106	41,1%
Routes à classer	131,8	131,8	100%		
TOTAL	14 805	4 805	32%	10 000	68%

Tableau I-2 Linéaire de routes classées en 2005 (en km)

I.3. État du réseau

La politique de récupération du réseau a permis de réhabiliter dans la période 2002-2006 plus de 819,2 km de routes revêtues et 1651,5 km de routes non revêtues.

Le résultat obtenu est que l'état du réseau non revêtu a nettement évolué de 2002 à 2005 du fait d'importants programmes d'entretien périodique et/ou réhabilitation réalisés depuis 2002. En effet, le réseau en bon et moyen état est passé de 14 % à 67.9 % (compte non tenu des routes en terre non aménagées).

Par contre pour les routes revêtues, il y a lieu de noter que celles en bon état sont passées de 20,7 à 37 % soit une progression de 16,3 % même si dans le même temps les routes jugées en moyen état sont passées de 36,4 à 17,7 %.

Les conséquences directes des réalisations faites durant cette période se manifestent par une évolution globale de l'état du réseau qui peut être apprécié comme indiqué dans le tableau ci-après :

Routes revêtues	Année 2002	Année 2005
. Etat Bon	21%	37%
. Etat Moyen	36%	18%
. Etat Mauvais	43%	45%
Routes en terre	Année 2002	Année 2005
. Etat Bon	1%	39%
. Etat Moyen	13%	29%
. Etat Mauvais	86%	32%

Tableau I-3 Évolution globale de l'état du réseau routier

I.4. Le trafic

Le réseau routier est emprunté tous les jours par des catégories de véhicule. Parmi ces catégories il y a :

- Les véhicules particuliers ;
- Les camionnettes et minicars ;
- Cars et autocars ;
- Camionnettes marchandises ;
- Camions à deux essieux ;
- Camions de plus de deux essieux ;
- Ensemble articulé ;

- Voitures hippomobiles ;
- Cycles et motocycles.

Une comparaison des résultats de comptage du trafic entre 1996 et 2002 montre une croissance générale du trafic journalier moyen de 6,3% soit 1,02% par an en moyenne. Le trafic est inférieur à 500 véh/j sur la majorité du réseau. On ne rencontre un trafic supérieur à 2000 véh/j que sur 10,9% du réseau classé.

Région	Véhicules particuliers	Poids lourds	Circulation motorisée
Thiès	593 073	167 361	1 291 644
Dakar	235 334	72 812	563 580
Diourbel	224 708	66 069	476 345
Saint-louis	132 912	92 038	476 755
Louga	126 552	53 440	318 298
Kaolack	90 470	58 479	298 872
Tamba	84 724	60 356	318 610
Fatick	45 120	31 763	180 816
kolda	28 233	27 927	105 268
Ziguinchor	35 973	32 567	133 684

Tableau I-4 Classification du trafic des véhicules par type et par région

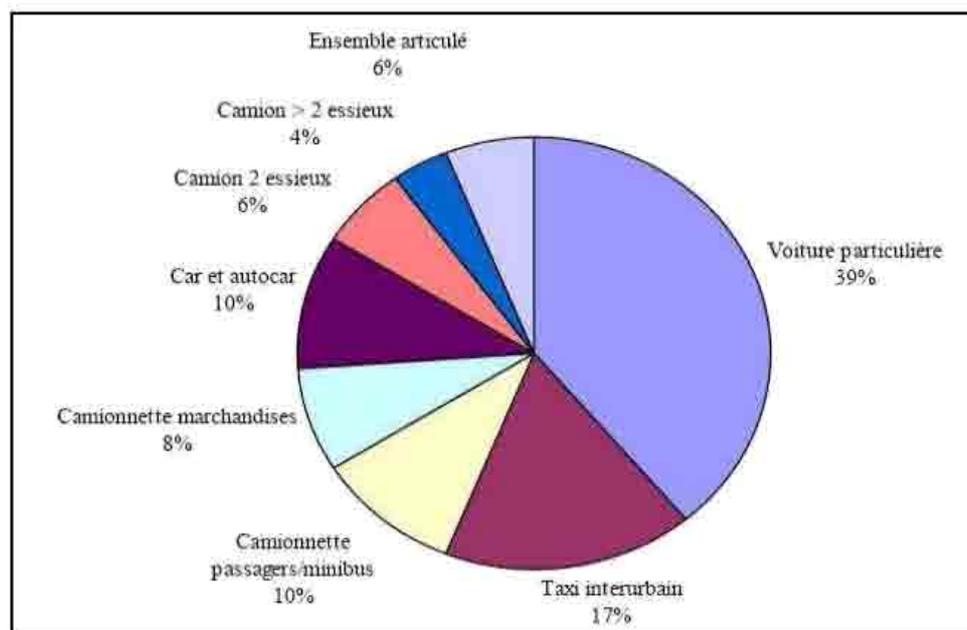


Figure I-1 Structure du trafic motorisé en 2002

B. GENERALITE SUR LA STRUCTURE D'UNE CHAUSSEE

Une chaussée routière est constituée de plusieurs couches mise en œuvre sur un sol support. C'est une structure plane et imperméable, conçue et dimensionnée pour permettre l'écoulement d'un trafic pour une période de service minimale fixée au stade de l'élaboration du projet et appelée *durée de vie*. Elle doit garantir de bonnes conditions de sécurité et de confort pour les usagers.

I.1. Description de la chaussée

C'est l'ensemble des couches construites au dessus du sol support ou de plateforme. De bas en haut nous avons :

- I.1 La sous-couche (éventuelle)
- I.2 La couche de fondation
- I.3 La couche de base
- I.4 La couche de surface

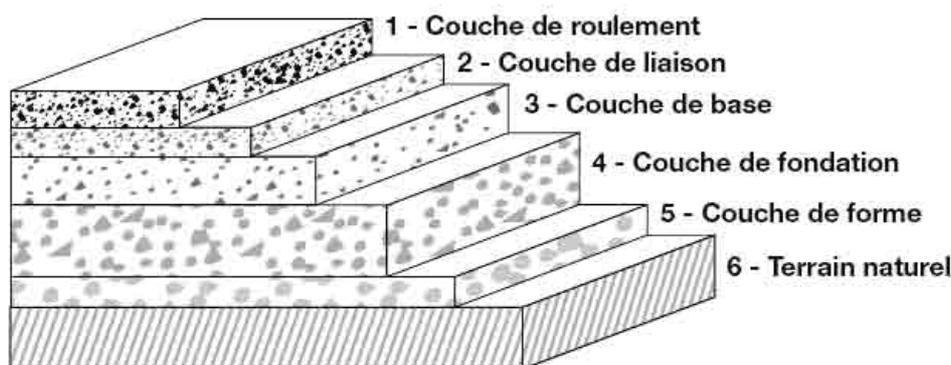


Figure I.2 : structure d'une chaussée

Le support peut se présenter sous différentes formes :

- Le terrain naturel : c'est le sol naturel trouvé sur place
- Le tracé des terrassements : c'est la face supérieure des remblais et des déblais.
- L'assiette (au sens structural) : c'est le terrain naturel préparé ou bien l'ensemble constitué par le terrain naturel et les remblais

- Couche de forme : c'est la couche de matériaux de bonne qualité à la partie supérieure des déblais ou des remblais. Elle peut être constituée de sols traités ou de matériaux rapportés.
- plateforme : c'est la face supérieure du sol support constitué par les remblais et les déblais ou d'une couche de forme lorsque celle-ci existe.

Il convient de distinguer cinq (05) classes de portance des sols de plate-forme.

S1:			CBR <	5
S2:	5	<	CBR <	10
S3:	10	<	CBR <	15
S4 :	15	<	CBR <	30
S5 :			CBR >	30

Du point de vue structural, on admet que le cas type de chaussée (corps de chaussée) peut être scindé en deux parties :

- La superstructure
- L'infrastructure
- La superstructure comprend : la couche de surface, la couche de base et la couche de fondation et éventuellement la sous couche. D'une manière générale la superstructure routière doit pouvoir supporter les charges de trafic et assurer leur diffusion selon des niveaux de contraintes supportables par l'infrastructure.
- L'infrastructure comprend ce qui est en dessous de la couche de fondation ou sous la sous-couche si elle existe.

Il existe plusieurs types de chaussées. Le choix du type de chaussée prend en considération les principaux facteurs suivants :

- ✓ la disponibilité des matériaux
- ✓ le coût des matériaux
- ✓ les qualités de la main-d'œuvre
- ✓ la disponibilité de l'équipement
- ✓ les conditions locales (environnement, climat...)
- ✓ la durée de vie projetée
- ✓ la nature de la circulation (trafic)

I.2. COMPORTEMENT STRUCTURAL DES DIFFERENTS TYPES DE CHAUSSEES

La route étant construite pour supporter un certain trafic pour une durée de vie et dans un environnement climatique donnés. La conception et le dimensionnement doivent tenir compte de ces contraintes. En fonction de leur composition, chaque couche de la structure participe à sa manière à la résistance.

I.2.1 Rôle de la couche de revêtement (ou couche de surface)

La couche de surface est constituée :

- de la couche de roulement, qui est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat.
- de la couche de liaison (ou d'accrochage), entre la couche de base et la couche de roulement. (cf. Figure I.2 page 7).

Elle doit pouvoir jouer les rôles suivants :

- résister sans déformation manifeste ni usure trop rapide, aux efforts transmis par les roues des véhicules.
- présenter un uni de surface durable, de façon à assurer un confort de roulement aux usagers.
- assurer une évacuation rapide des eaux de ruissellement et garantir une adhérence des pneumatiques.
- empêcher l'infiltration des eaux superficielles

I.2.2 Rôle de la couche de base

C'est la partie du corps de chaussée qui est la plus exposée aux contraintes verticales de compression ainsi qu'aux efforts de cisaillements et ceci d'autant plus que la couche de surface est mince. C'est pour cette raison qu'elle est la couche principale. Son rôle est de résister à l'attrition et d'augmenter la stabilité mais aussi la rigidité de la fondation. Pour cela elle doit avoir un grand indice portant CBR. Le matériau utilisé doit présenter en général un CBR supérieur à 80. Sinon il faudra procéder à un traitement soit avec un liant hydraulique, soit avec un liant hydrocarboné. Et dans ce cas le CBR visé est supérieur à 160.

I.2.3 Rôle de la couche de fondation

La couche de fondation assure la diffusion des contraintes afin de les ramener à un taux compatible avec la portance du sol de forme. Les matériaux de la couche de fondation doivent être de qualité satisfaisante, sinon on doit recourir à un traitement (amélioration ou stabilisation).

I.2.4 Rôle de la plateforme

La maîtrise de son mode de fonctionnement requiert une attention particulière puisque la plupart des méthodes de dimensionnement s'appuient sur la résistance au poinçonnement du sol de plateforme.

- A court terme elle doit permettre le passage des engins de chantier ainsi que le compactage de la couche de fondation qui serait impossible si le support était très compressible.
- A long terme elle doit assurer la stabilité générale de la chaussée.

I.3. LES FAMILLES DE STRUCTURE DE CHAUSSEES (CLASSIFICATION LCPC)

Il existe plusieurs structures de chaussées. Le choix d'une de ces structures est conditionné en partie par les sollicitations auxquelles la route sera soumise après sa mise en service. On distingue :

I.3.1 Les chaussées souples

Ces structures comportent des assises en matériaux granulaires et un revêtement bitumineux relativement mince, parfois réduit à un enduit pour les chaussées à faible trafic. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm et dépend du trafic et du climat.

Les efforts verticaux dus au trafic sont transmis au support avec une diffusion latérale. Les contraintes verticales élevées engendrent par leur répétition des déformations plastiques des matériaux granulaires.

Ces chaussées sont particulièrement sensibles aux variations d'état hydrique des sols supports. Cette sensibilité se manifeste par une réduction de portance en période humide pouvant conduire à des affaissements et fissurations de retrait en période sèche.

Les déformations peuvent évoluer en déformations permanentes du type orniéage à grand rayon, flaches et affaissement qui détériorent les qualités du profil en travers et du profil en long. Les sollicitations répétées de flexion alternée dans la couverture bitumineuse entraînent une dégradation par fatigue sous la forme de fissures qui évoluent vers un faïençage.

I.3.2 Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Également appelées chaussées semi-rigides, elles comportent une couche de surface bitumineuse et une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposée en une ou deux couches (base et fondation).

Les contraintes verticales transmises au sol support sont faibles. Cependant l'assise traitée subit des contraintes de traction et de flexion dont les ordres de grandeur varient selon que la couche de base est collée ou non à la couche de fondation. En effet lorsque l'adhérence entre ces couches assurent la continuité des déplacements, les deux couches se comportent comme une même couche et la contrainte maximale de traction est observée à la base de la fondation. Dans le cas contraire il se produit un déplacement relatif et les deux couches sont soumises chacune à une traction à la base.

Il faut noter que les matériaux traités aux liants hydrauliques sont sujets à des retraits thermiques et de prise et provoquent des fissurations qui peuvent remonter à la couche de roulement et entraîner la fissuration de celle-ci.

I.3.3 Les chaussées à structure mixte

La structure de ces chaussées se compose d'une couche de roulement, d'une couche de base en matériaux bitumineux et d'une fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. Les structures qualifiées de mixtes sont telles que les rapports de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de la chaussée est de l'ordre de 1/2.

La couche traitée aux liants hydrauliques placée en fondation diffuse et atténuée, du fait de sa raideur élevée, les efforts transmis au sol support. Elle est sollicitée en fatigue par flexion.

Quant aux couches bitumineuses elles ont plusieurs rôles :

- assurer la qualité d'uni de chaussée et la continuité (absence de joints)
- ralentir la remontée des fissures transversales de la couche sous-jacente
- réduire les contraintes de flexion à la base de la couche de fondation.

Elles sont peu sollicitées en traction si elles restent collées à la couche de fondation. Cependant l'adhérence peut se rompre par suite des mouvements de dilatation thermique et entraîner une augmentation des contraintes de traction à la base des couches bitumineuses. En plus la température participe avec le trafic à la propagation des fissures à travers la couche bitumineuse.

I.3.4 Les chaussées à structure inverse

Elles possèdent trois couches et chacune a un rôle spécifique. On a une couche en grave non traitée surmontée d'une couche bitumineuse, le tout reposant sur une fondation matériaux traités aux liants hydrauliques.

La couche de fondation a pour rôle d'atténuer les contraintes sur le sol support et d'assurer par ailleurs aux couches supérieures un support rigide.

La couche granulaire a pour fonction d'éviter la remontée des fissures consécutives aux phénomènes de retrait et aux mouvements de dilatation thermique de la couche sous-jacente. Elle est confinée entre un support rigide et revêtement à module élevé et subit des contraintes relativement élevées. Le matériau granulaire doit être choisi pour résister à l'attrition et avoir un module intrinsèque élevé afin de limiter la déformation de la couche bitumineuse.

La couche bitumineuse assure les qualités d'uni et d'étanchéité.

I.3.5 Les chaussées en béton de ciment

Elles comportent une couche en béton hydraulique de 15 à 40 cm d'épaisseur éventuellement recouverte d'une couche de roulement mince en revêtement bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche granulaire (traitée ou non) soit directement sur le sol support, dans ce cas on met une couche bitumineuse de protection sous la dalle de béton.

La couche granulaire a pour rôle d'améliorer l'homogénéité de l'infrastructure, permettre le passage des engins de chantier, d'éviter la contamination du béton frais...

Les fissurations dues à la prise et aux variations thermiques peuvent être contrôlées par la réalisation de joints transversaux. Cependant ces derniers posent un réel problème de tassement différentiel, d'où l'utilité de la couche de fondation.

La rupture par fatigue est obtenue en combinant l'effet du trafic et du gradient thermique. Il se développe des contraintes de traction élevées à la base de la dalle de béton qui peuvent entraîner des ruptures par traction.

C. GENERALITES SUR LES REVETEMENTS

Le revêtement (ou couche de surface) est la partie de la chaussée qui est directement sollicitée par le trafic et les agents climatiques. Il nécessite un traitement particulier de sa conception à sa réalisation, car étant, en plus du rôle incontournable qu'il joue sur la tenue globale de la structure de chaussée (protection et pérennité de la structure), la partie essentielle qui intéresse l'utilisateur (confort et sécurité). L'apport structurel est plutôt secondaire. La *qualité d'usage* dépend pour une large part de l'état et de la nature de la couche de surface.

Vu toutes ces fonctions, le choix de la couche de surface doit provenir de la prise en considération de plusieurs objectifs que l'on peut ranger en deux catégories :

- la sécurité et le confort des usagers, qui sont en relation avec les caractéristiques de surface de la couche de roulement,
- le maintien de l'intégrité de la structure de chaussée, par la protection des couches d'assise (infiltration, contamination...).

La qualité d'un revêtement s'évalue à travers :

- l'uni de surface : il décrit les défauts géométriques du profil de la chaussée.
- la rugosité : elle dépend de la texture de surface de la couche de roulement. La texture est composée de la macrotecture (liée à la dimension maximale des granulats et à la composition granulométrique) et de la microtexture (liée à la nature pétrographique et du mode d'élaboration des grains).
- la drainabilité : elle dépend de la capacité de la chaussée à évacuer les eaux de ruissellement.
- l'étanchéité : par son étanchéité, le revêtement doit protéger la structure des eaux de surface.

I.1. TYPES DE REVETEMENT UTILISES AU SENEGAL

Les types de revêtement les plus utilisés au Sénégal sont de deux types : les enduits superficiels et les enrobés.

I.1.1 Les enduits superficiels

L'enduit superficiel est une couche de faible épaisseur constituée de couches superposées de liant hydrocarboné et de matériaux granulaire.

L'enduit superficiel est une méthode largement répandue au Sénégal et c'est une technique qui présente des avantages certains à condition que l'exécution soit faite dans les conditions de l'art. Parmi les avantages de l'enduit superficiel on note :

- l'amélioration de la rugosité
- l'amélioration de l'étanchéité de surface qui procure une protection renforcée de la chaussée et une diminution des exigences sur les granulats destinés à la réalisation de l'assise.
- la rapidité d'exécution
- le coût relativement modeste comparé aux enrobés dense et aux bétons bitumineux.
- une bonne drainabilité (pas d'aquaplaning : phénomène qui se manifeste en période pluvieuse, lorsque un film d'eau de faible épaisseur recouvre le revêtement et que l'adhérence pneumatique-revêtement n'est plus assurée à partir d'une certaine vitesse, les véhicules ont tendance à patiner, posant ainsi un problème d'insécurité surtout lors des freinages brusques et au niveau des changements de direction.).

En revanche, il est sensible aux arrachements, au poinçonnement, au ressuage et aux conditions de mise en œuvre. Il est également très bruyant.

L'enduit superficiel a des limites d'emploi sur les routes à trafic dense en poids lourds et sur les chaussées comportant des rampes importantes, des virages serrés et des zones de freinage où les efforts tangentiels engendrés sont élevés.

L'exécution d'un enduit superficiel nécessite les opérations consécutives suivantes :

- le nettoyage des chaussées
- le répandage du liant
- le répandage des granulats
- le compactage de l'enduit
- le balayage et le ramassage des rejets.

Du point de vue de la structure on distingue :

a) Le monocouche simple gravillonnage

Spécialement conçu pour les circulations à faible trafic T3 ou T4 selon la classification du LCPC, il comporte une couche de liant et une couche de granulats calibrés. Du point de vue confort ce type de structure crée beaucoup de bruit. L'enduit monocouche utilise un liant chaud, et l'émulsion est souvent déconseillée si le délai de mise en circulation est court. Le support doit être homogène.

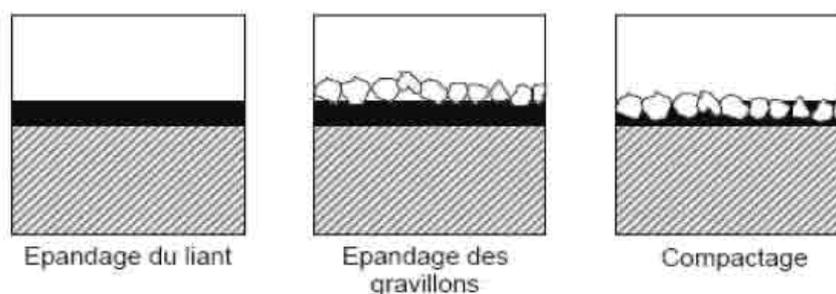


Figure I-3 : Enduit superficiel monocouche simple gravillonnage

b) Le monocouche double gravillonnage

Il consiste en l'épandage d'une couche de liant suivi d'un gravillonnage en deux phases : d'abord une couche de gravillons gros, immédiatement suivi d'une couche de gravillons plus fins. La combinaison la plus courante est le 8/16 suivi du 3/8.

Cet enduit nécessite un support dur et homogène. Cette structure, qui présente une rugosité élevée ainsi qu'une bonne drainabilité superficielle, s'utilise surtout pour des chaussées à trafic plus intense que dans le cas du simple gravillonnage.

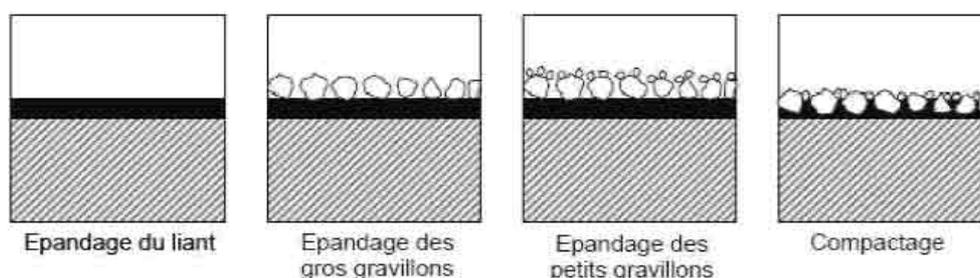


Figure I-4 : Enduit superficiel en monocouche double gravillonnage

c) Le bicouche

C'est une combinaison de deux enduits monocouches double gravillonnage, elle est donc composée de deux couches de liant et deux couches de granulat alternées. Ils sont utilisés aussi bien pour les chaussées à trafic fort que pour les chaussées à faible trafic. La combinaison utilisée est le 8/16 suivi du 3/8.

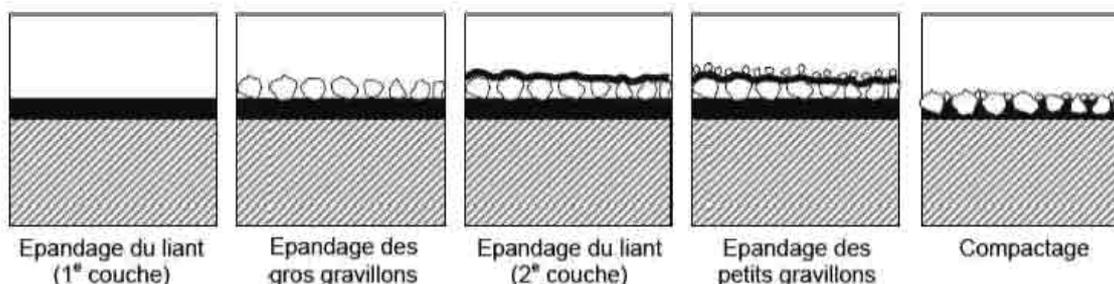


Figure I-5 : Enduit superficiel en bicouche

d) Le bicouche inverse

C'est une inversion de la technique de bicouche et prévoit l'application de petits gravillons en première couche et des gros en deuxième couche.

Le choix d'un type de structure dépend en premier lieu du trafic, c'est-à-dire de l'agressivité de la circulation mais aussi de l'état et de la nature des supports.

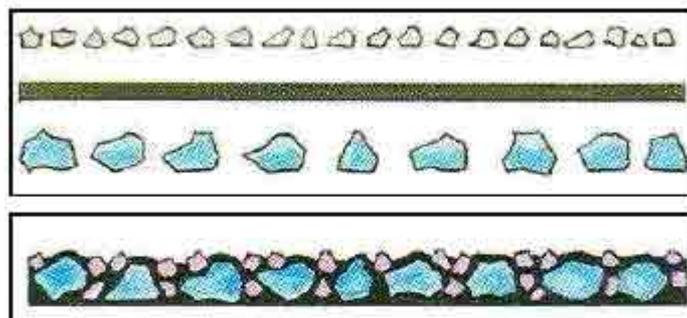


Figure I-6 : Enduit superficiel en bicouche inverse

Pour réussir un enduit, il est primordial de :

- mettre du liant dans la structure
 - à un endroit précis
 - à un dosage précis et il doit pouvoir y rester.
- respecter les dosages en gravillons

I.1.2 Les enrobés

Les enrobés hydrocarbonés employés en couche de roulement des chaussées doivent, par leurs propriétés, répondre du mieux possible aux problèmes qui sont engendrés par le trafic et par les contraintes que leur imposent le climat et l'exploitation du réseau (la circulation). Les enrobés bitumineux compactés sont fabriqués par mélange à chaud de gravillons, de sable avec ou sans fines, de filler, de liant bitumineux et d'éventuels dopés et/ou d'additifs. Leur mise en œuvre s'effectue à chaud et par compactage mécanique. Ils offrent plus de résistance que les enduits superficiels par leur participation à la capacité portante de la structure. Dans ces mélanges, souvent deux problèmes se posent : le choix du granulat (sa composition granulométrique) et la teneur en liant. Ces deux problèmes doivent être étudiés en tenant compte des caractéristiques mécaniques exigées, de la résistance à la fatigue et à l'ornièrage, des problèmes de fabrication et de mise en œuvre.

a) Les enrobés denses ED

Les enduits superficiels sont utilisés pour des trafics plus ou moins élevés sur des zones où l'on a une disponibilité suffisante en gisement de grave ou de sable de qualité. Les enrobés denses ont un pourcentage de vides compris entre 10 et 12 %. Leur pourcentage en filler, de l'ordre de 5 %, est faible et leur fuseau granulométrique est assez large.

En comparaison par rapport aux enduits ils offrent une :

- meilleure étanchéité (pourcentage de vide de 10 % en moyenne)
- bonne stabilité
- plus grande sécurité vis-à-vis de la glissance, compte tenu de leur granularité (granulats plus grenus)
- économie sur le liant hydrocarboné (teneur en bitume comprise entre 5,5 et 6,5 %)

Cependant ils présentent le défaut de n'être pas homogène sur le plan de la granulométrie. La formulation et la mise en œuvre sont cruciales pour les enrobés denses.

b) Les bétons bitumineux BB

« Dès que le trafic dépasse 1000 véhicules/jour, l'emploi du béton bitumineux (BB) s'avère nécessaire » [3]. Un béton bitumineux de granularité 0/D est un enrobé dense, très élaboré, constitué par le mélange d'éléments concassés (répartis selon des classes granulaires rigoureuses), de sable de concassage (de granularité aussi constante que possible) et de bitume. Les BB sont plus denses (compactes) que les enrobés denses et un pourcentage de vides de 5 % en moyenne, inférieur à celui des enrobés denses qui est de l'ordre de 10 %. Ils sont caractérisés par leur pourcentage en filler élevé et un fuseau granulométrique serré.

c) Les mortiers bitumineux

Les mortiers bitumineux sont des mélanges à base de sable, de filler et de bitume. Ils s'utilisent sur de faibles épaisseurs.

Les coulis bitumineux sont des mélanges d'émulsion de bitume à prise lente, d'agrégats fins et du filler auquel on peut ajouter de l'eau pour obtenir une consistance ressemblant à une bouillie, à une suspension épaisse, d'où le nom de coulis.

Le sheet-asphalt : c'est un mélange de sables moyens et fins gradués, de filler et de bitume. La teneur en liant et en éléments fins est très élevée. Les bitumes utilisés plus souvent sont très fluides. La teneur en liant est plus importante pour les sheet-asphalts que pour les micro-bétons et le sand asphalt. Il est utilisé en tant que revêtement mince (0,75 cm à 1,5 cm), et procure une bonne étanchéité.

Le micro-béton : c'est un mélange chaud de liant bitumineux avec du sable (calibré, propre et angulaire) et du filler. Son utilisation est normalement limitée à la couche de roulement. C'est un revêtement de hautes performances (bonne étanchéité, résistance élevée, bonne durabilité). En effet ils offrent plus de performances que les autres types d'enrobés de la famille des mortiers bitumineux.

Le sand asphalt : il est classé parmi les mortiers bitumineux. Il est traité plus en détail en fin de ce chapitre.

I.2. LES CONSTITUANTS DES ENROBES

Un enrobé bitumineux est constitué de différents matériaux :

I.2.1 Les liants

On distingue deux grandes familles :

– les liants dits « blancs », qui sont d'origine minérale (liants hydrauliques ou pouzzolaniques) et traités à froid :

-  Le ciment normalisé (liants routiers),
-  Le laitier granulé,
-  Les cendres volantes de hauts fourneaux,
-  Les pouzzolanes ;

– les liants dits « noirs », qui sont d'origine organique (liants hydrocarbonés) et traités sous plusieurs formes (à chaud, à froid, tiède, en émulsion...).

Contrairement aux liants hydrauliques qui sont généralement en poudres fines qui font prise avec l'eau par des réactions d'hydratation, les liants hydrocarbonés sont des liquides visqueux plus ou moins doués de rigidité à la température ambiante. Ils permettent la constitution de mortiers et de béton. Le liant joue dans ces derniers le rôle de l'eau qui mouille les agrégats et le rôle du ciment qui les agglomère. Cependant ils sont très sensibles à la température.

Les liants hydrocarbonés sont caractérisés par :

- leur cohésion, qui est le pouvoir agglutinant du liant. Cette cohésion est en rapport avec la viscosité.
- leur adhésivité : C'est une propriété qui marque le pouvoir du liant d'adhérer à la surface des agrégats auxquels il est mêlé. L'adhésivité dépend donc aussi bien du liant que du granulat.

- leur susceptibilité : c'est un avantage pour la mise en œuvre. Elle est caractérisée à une température donnée par la variation de la viscosité du liant pour une variation donnée de la température.
- leur capacité d'auto-colmatage, en effet lorsque la température augmente et sous l'influence du trafic les fissurations se ressoudent.

Le choix du liant est déterminant dans un projet routier. Ses caractéristiques à court et long terme doivent répondre aux exigences et aux différentes contraintes environnementales.

a) Les bitumes

Le bitume est un mélange d'hydrocarbures d'origine naturelle ou obtenu par pyrogénéation (exposition du réactif à une température très élevée), ou par combinaison des deux. Il est encore appelé *asphalt* dans les pays anglo-saxons. Les bitumes les plus utilisés en technique routière sont obtenus par distillation d'hydrocarbure et sont composés en moyenne de 20% d'asphaltènes (corps de poids moléculaire très élevé se présentant sous la forme d'une substance solide et noirâtre en suspension colloïdale) contre 80% de malthènes (huiles plus résines).

Le comportement mécanique du bitume en fonction de la température a une importance primordiale. D'une part dans les applications routières à chaud, il est nécessaire d'amener le bitume à l'état liquide pour réaliser de façon satisfaisante le mélange granulats-bitume. D'autre part le bitume doit conserver sa consistance dans la plage de température d'utilisation, les performances du bitume étant liées à un certain niveau de résistance.

Il s'avère nécessaire dans ces conditions de définir les caractéristiques du bitume telles que sa consistance et sa susceptibilité pour des températures normalisées.

On fait recours souvent aux essais suivants :

- Essai de pénétration : utilisé pour les bitumes semi-durs, il donne une mesure de la profondeur (enfoncement) en 1/10 mm d'une aiguille chargée à 100g pendant 5 s dans un échantillon de bitume à 25° et permet de les répartir en différentes classes.
- Le point de ramollissement est la température à laquelle une bille d'acier traverse une pastille de bitume enchâssée dans un anneau. Il caractérise la consistance du bitume et définit sa susceptibilité de changer de consistance aux variations de température.
- Essai sur la viscosité : il détermine la relation température-viscosité qui permet de connaître la température à laquelle il faut chauffer un bitume pour obtenir une viscosité requise.

- La ductilité du bitume: liée à l'allongement qui le caractérise avant qu'il se rompe
- La solubilité qui mesure la pureté du bitume
- Point éclair : température à laquelle le matériau peut être chauffé en sécurité sans danger d'un éclair (prise de feu) en présence de flamme.

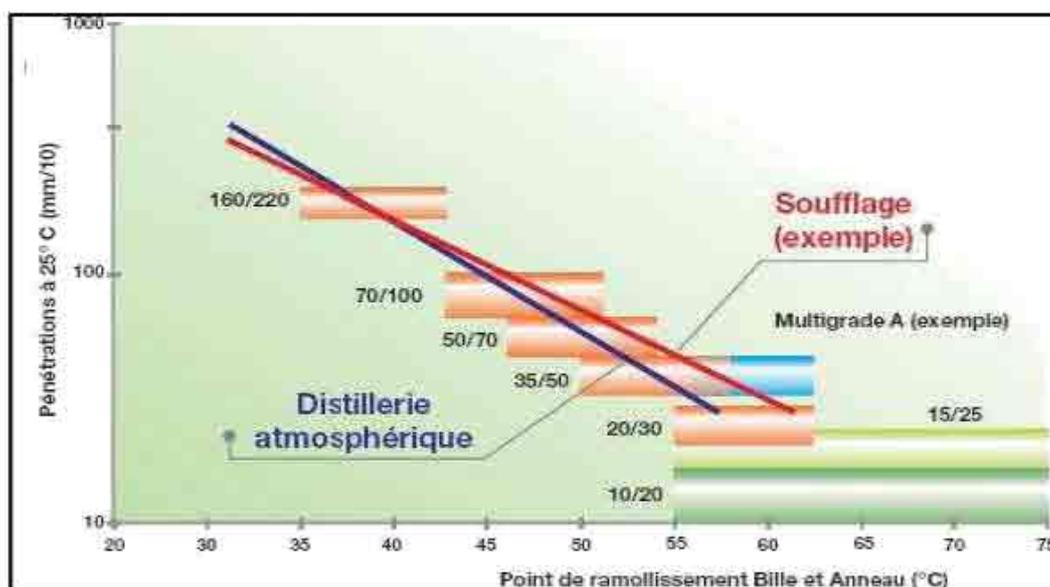


Figure 1-7 : Classification du bitume selon la norme NF et la norme EN

Une autre caractéristique du bitume est son module de rigidité qui peut être défini en fonction de quatre grandeurs :

- la consistance du bitume
- la susceptibilité thermique
- le temps de charge (durée d'application de l'effort)
- la température d'exposition

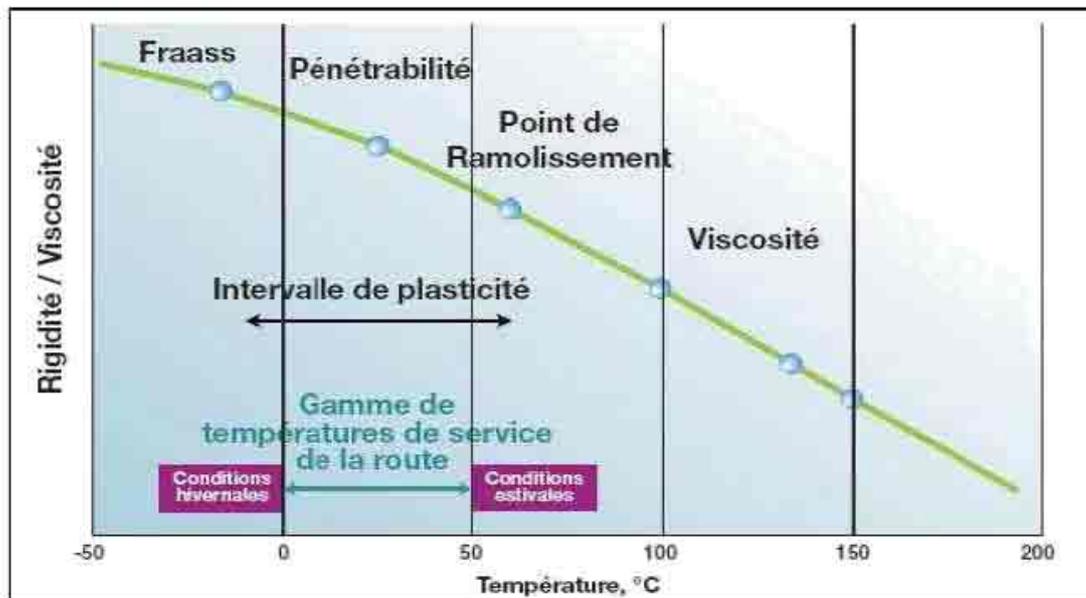


Figure I-8 : Susceptibilité thermique du bitume

Le bitume est un matériau qui vieillit. Le vieillissement du bitume est défini par le rapport asphalthènes / malthènes .En effet le rapport asphalthènes / malthènes croît lorsque le bitume vieillit. Ce phénomène est dû partiellement ou totalement à l'évaporation des huiles plastifiantes. On peut aussi définir le vieillissement du bitume comme étant le résultat de la variation des qualités du bitume en fonction du temps. Il se manifeste également par un durcissement du liant ce qui modifie leurs propriétés sous l'action de sollicitations diverses. Au point de vue de la classification (basée sur la consistance), les bitumes les plus utilisés en technique routière sont de 3 catégories :

➤ les bitumes durs

Ces types de bitumes vieillissent beaucoup plus vite. Ils améliorent les performances mécaniques des enrobés. Ils sont très adaptés pour les projets de routes à trafic lourd important.

Les bitumes durs possèdent des propriétés physicochimiques améliorant les performances mécaniques des enrobés et contribuent ainsi à augmenter la durée de vie des chaussées. Leurs performances permettent aussi, à résistance égale, de réduire les épaisseurs des couches d'enrobés, donc de diminuer les quantités des matériaux mis en œuvre.

Les bitumes durs sont définis par leur pénétrabilité, inférieure à 25 dixième de mm, et leur point de ramollissement, compris entre 55 et 76 °C (selon la norme européenne EN 13924). Il en existe deux classes principales, les 10/20 et les 15/25. Ils sont fabriqués en raffinerie, à

partir de bases issues de la distillation de pétroles bruts riches en asphaltènes ou de mélanges incluant des bases semi-soufflées.

➤ les bitumes semi-durs

Il ya cinq types de bitumes durs :

Classe de Bitume	40 - 50	60 – 70	85 - 100	120 - 150	200 - 300
Pénétrabilité (en 1/10 mm)	Min 40- Max 50	Min 60 – Max 70	Min 65 – Max 100	Min 120 – Max 150	Min 200 – Max 300

Tableau : I.5 : Tableau de classification des bitumes semi-durs

Les bitumes les plus durs dans cette famille sont recommandés pour les régions chaudes du fait de leur pénétrabilité faible.

b) L'asphalt

C'est un matériau cimentant dont la couleur varie du brun foncé au noir. Ses constituants prépondérants sont les bitumes naturels ou ceux qui sont obtenus par la distillation du pétrole. Ils peuvent également être obtenus par un mélange naturel de matériaux calcaires imprégnés de bitume. A l'état naturel, il est constitué par une roche calcaire imprégnée d'hydrocarbures lourds (jusqu'à 20 %). L'asphalt naturel entre traditionnellement dans la composition de l'asphalt coulé. Il peut également être utilisé comme appoint dans les enrobés auxquels il apporte du liant et des fines.

c) Les émulsions de bitume

Une émulsion est une dispersion, plus ou moins stabilisée, d'un liquide dans un autre liquide non miscible à l'état naturel. Il y a alors deux phases : le milieu dispersant et le milieu dispersé. L'une est la phase aqueuse et l'autre la phase huileuse. On distingue deux types d'émulsions : les émulsions directes (l'huile dispersée dans l'eau) et les émulsions indirectes (globules d'eau dispersés dans l'huile). En général les émulsions directes de bitume contiennent 40 à 75% de bitume. La viscosité varie avec la teneur en bitume. Quant aux émulsions indirectes, elles contiennent entre 5 et 30% d'eau voire plus.

Les paramètres permettant de caractériser les émulsions sont :

i. la teneur en eau

Elle détermine directement la teneur résiduelle en bitume après répandage.

Les émulsions courantes à 60,65 ou 69% de bitume correspondent à des teneurs en eau de 40 %, 35 % ou 31%.

ii. le PH

Il indique le caractère acide ou basique de l'émulsion. Les émulsions peuvent être cationiques (acides) ou bien anioniques.

iii. la viscosité

Elle est exprimée (degrés Engler) par le rapport entre les temps d'écoulement d'une émulsion et celui d'une même quantité d'eau.

iv. l'indice de rupture

Il correspond à la quantité de fines siliceuses qu'il faut ajouter à 100g d'émulsion pour la faire rompre.

Les émulsions les plus employées sont des émulsions directes car offrant plus de tenue en présence d'eau, on peut même les diluer avec de l'eau. Elles permettent de répandre à froid des liants très visqueux. Egalement elles permettent une économie en remplaçant le solvant car elles ont une grande surface développée. Les émulsions sont utilisées en enduit superficiel (répandage de liant puis cylindrage), en enduit par pénétration, lors de la fabrication d'enrobés bitumineux à froid et lors de la stabilisation des sols.

d) Les goudrons

Les goudrons sont obtenus par pyrogénéation de la houille ou d'autres matières tels que le bois, la tourbe,... Seuls les goudrons de houille sont utilisés en construction routière.

Ce sont des produits visqueux, mais doués d'une certaine fluidité qui leur permet de couler plus moins rapidement à la température ambiante.

De nos jours, le goudron n'est plus employé couramment en technique routière. On l'utilise seulement lorsque l'on veut bénéficier de sa résistance aux hydrocarbures, par exemple dans les stations services. Il est composé de centaines de substances chimiques, dont plusieurs sont considérées comme cancérigènes ou potentiellement dangereuses.

I.2.2 Les granulats

Les granulats sont utilisés pour la mise en œuvre de la structure de chaussée. Cette dernière exige la mise en œuvre de quantités considérables de matériaux de qualité. Les granulats sont caractérisés par la nature des gisements d'où ils sont extraits, par leur nature

pétrographique (roches sédimentaires, roches métamorphiques ou roches magmatiques) ou par leur niveau de performance en utilisation routière. Les granulats 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 ;
- *artificiels*, lorsqu'ils sont d'origine minérale résultant d'un procédé industriel comprenant des modifications thermiques ou autres.
- *recyclés*, lorsqu'ils proviennent de la démolition d'ouvrage ou lorsqu'ils sont réutilisés,
- *courants*, lorsque leur masse volumique réelle est supérieure ou égale à 2 t/m^3 .
- *légers*, lorsque leur masse volumique réelle est inférieure à 2 t/m^3 .

Les granulats sont décrits en termes de classes granulaires définies par la dimension des ouvertures de maille d/D (d : dimension inférieure et D dimension supérieure. C'est également l'ensemble des grains de dimensions comprises entre 0mm et 125 mm.

On distingue les familles de granulats suivantes selon la norme NF P 18 540 :

- 1) filler 0/D où $D < 2 \text{ mm}$ avec au moins 70% de passant à 0,063 mm.
- 2) sablon 0/D où $D \leq 1 \text{ mm}$ avec au moins 70% de passant à 0,063 mm.
- 3) sables 0/D où $1 < D \leq 6,3 \text{ mm}$.
- 4) graves 0/D où $D > 6,3 \text{ mm}$.
- 5) gravillon d/D où $d \geq 1 \text{ mm}$ et $D \leq 125 \text{ mm}$.
- 6) ballasts d/D où $d \geq 25 \text{ mm}$ et $D \leq 50 \text{ mm}$.

Les critères suivants sont utilisés en technique routière pour caractériser les granulats. Ces critères permettent de connaître les conditions dans lesquelles le sol peut être compacté et son comportement en vue du dimensionnement de la chaussée.

- la granularité

La granularité est la répartition du granulat en tranches dimensionnelles. C'est donc une distribution dimensionnelle des grains exprimée en pourcentage de masse passant au travers d'un ensemble spécifié de tamis. La granularité est le plus souvent représentée par une courbe granulométrique.

- la propreté

La propreté est mesurée par l'essai d'équivalent de sable et par l'essai au bleu de méthylène.

L'équivalence de sable ES est utilisée pour des sols contenant peu d'éléments fins et faiblement plastiques comme les sables. Il consiste à placer un volume donné de l'échantillon

dans une éprouvette graduée dans laquelle on verse un mélange d'eau et de solution floculante destinée à mettre en suspension et à départager les particules argileuses du sable. Après agitation normalisée, on laisse reposer, puis on mesure la hauteur h_2 du sable et la hauteur h_1 du sommet du floculat. L'équivalence de Sable ES est donnée par le rapport :

$$ES = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

Le matériau est d'autant plus propre que sa valeur de ES est proche de 100, et il est de plus en plus argileux lorsque sa valeur est inférieure à 20.

L'essai au bleu de méthylène permet de caractériser la fraction argileuse d'un sol sableux ou d'un granulat en mesurant sa capacité à absorber du bleu de méthylène. Il est réalisé sur la fraction 0/2 mm ou 0/5 mm. Il consiste à rechercher la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer le sol, cette saturation est indiquée par le test de la tache. Il consiste à prélever une goutte de suspension que l'on dépose sur un papier filtre. La tache ainsi formée se compose d'une partie centrale de sol coloré entourée d'une zone humide incolore. Le début de la sursaturation est marqué par une coloration de l'auréole. La valeur au bleu désignée par VBS est le nombre de grammes de bleu de méthylène nécessaire pour saturer 100 g de fines inférieures à 0,08 mm.

- l'angularité

Elle est définie par deux données :

- l'indice de concassage I_C , proportion en poids d'éléments supérieurs à la dimension D du granulat élaboré ;
- le rapport de concassage R_C , rapport entre d du matériau soumis au concassage et D du granulat obtenu

- la forme

Elle résulte de la fabrication du concassage du granulat, ou du processus qu'il a subi.

Elle est définie par la grosseur et l'épaisseur.

Du point de *comportement mécanique*, trois essais permettent de caractériser les granulats : la résistance à l'usure (essai micro deval), la résistance au polissage et la résistance à la fragmentation (essai Los Angeles).

On réalise également d'autres essais spécifiques :

- ✓ Essai Proctor : il permet de simuler l'évolution du sol au cours du compactage et de déterminer, pour une énergie de compactage déterminée, la teneur en eau qui permet d'obtenir la densité sèche maximale. On distingue l'*essai Proctor normal* et l'*essai Proctor modifié*. Le premier correspond plus aux matériaux utilisés en remblai et le second demande un compactage beaucoup plus poussée et correspond aux énergies mises en œuvre pour les couches de forme et les couches de chaussée.
- ✓ Essai CBR (Californian Bearing Ratio) : Il est exprimé en pourcentage. c'est le rapport entre les pressions produisant un enfoncement donné dans le matériau étudié d'une part, et dans un matériau type d'autre part. Cette notion d'indice portant est purement empirique. Si $P_{2,5}$ et P_5 sont respectivement les pressions nécessaires pour réaliser des enfoncements de 2,5 et 5 mm, le CBR est par définition la plus grande des deux valeurs alors on a :

$$CBR = \max \left[\frac{P_{2,5}}{0,7} ; \frac{P_5}{1,05} \right]$$

- ✓ Essai de la plaque : il permet de déterminer directement la déformabilité du sol en place, à l'aide d'une plaque circulaire de rayon a sur laquelle on exerce une charge induisant une pression moyenne Q sur le sol. La mesure de la déflexion W permet de calculer le module de déformation du matériau.

a) Les sables

C'est la désignation des classes granulaires de petites dimensions, pour lesquelles D est inférieur ou égal à 6,3 mm et dont le passant à 80 microns n'excèdent pas 35 %. Le sable peut résulter de l'altération naturelle de roches massives ou meubles et/ou de leur concassage ou du traitement de granulats artificiels

Du point de vue granulométrique, on distingue 3 catégories de sable :

- grossier : plus de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 microns sont comprises entre 0,5 et 5 mm.
- moyen : moins de 20% des éléments sont supérieurs à 2mm et plus de 50% des éléments supérieurs à 80 microns sont compris entre 0,2 et 2mm.
- fin : plus de 75% des éléments supérieurs à 80 microns sont inférieurs à 0,5 mm.

Le sable est utilisé en technique routière comme matériau d'apport en remblai ou pour la constitution d'une couche de chaussée. En fonction de l'utilisation le sable peut être du :

- Sables naturels (non traités) :

Les sables naturels non traités sont utilisables en assises de chaussées pour des trafics faibles à moyen. Ils sont utilisés en couche de fondation avec une couche de base en grave naturelle ou traitée, pour des trafics faibles à moyen (≤ 3000 véh/jour) et en couche de base pour des trafics très faibles (≤ 150 véh/jour) mais nécessitent une protection de surface.

Pour être utilisé en couche de fondation le sable doit avoir un CBR, après 4 jours d'imbibition, supérieur à 25 pour des trafics inférieurs à 300 véhicules/jour et 30 pour des trafics supérieurs à 300 véhicules/jour. Le pourcentage en fines ne doit pas dépasser 30% et l'Indice de Plasticité doit être inférieur à 15.

Pour l'emploi en couche de base, le CBR doit être au moins égal à 60.

- Sables traités au liant hydrocarboné

Le but du traitement est d'améliorer la tenue à l'immersion en évitant les entrées d'eau dans le matériau par colmatage des vides ouverts. Les sables traités au bitume sont soit appelés sable-bitume soit sable enrobé à froid.

Dans le premier cas, le sable utilisé est un sable propre ($ES > 40$, $IP = 0$) et le plus souvent on utilise du bitume pur, le plus dur possible. Ils sont utilisés aussi bien en couche de fondation qu'en couche de base avec des seuils de trafic et des niveaux de performance définis. Les épaisseurs couramment employées se situent entre 10 et 25 cm.

Pour les sables enrobés à froid, le liant a pour rôle d'améliorer la portance. Les liants les plus utilisés sont soit des émulsions, soit des bitumes fluidifiés. Ils sont utilisés en couche de base pour des trafics faibles à modérés. Ils sont également utilisables en trafic supérieur mais uniquement en couche de fondation.

Les sables sont employés en couche de roulement soit comme élément de sablage d'une couche de cure pour éviter le collage du liant aux pneus des véhicules, soit comme constituant d'enrobés à chaud, soit enfin comme matériau principal de cette couche de roulement (les mortiers bitumineux).

- Sable stabilisé au liant hydraulique

Le ciment portland et la chaux sont les plus utilisés. Les sables les plus utilisés ont un pourcentage de fines supérieur à 25% et un IP supérieur à 12. Le dosage en liant n'excède pas 5%. Les sables traités au liant hydraulique sont plus utilisés en sol de plateforme.

Il convient de distinguer le cas des sables améliorés de celui des sables stabilisés. Le comportement des sables améliorés est similaire à celui du matériau d'origine dont ils ne se distinguent que par des performances accrues alors que les sables stabilisés subissent une amélioration de leur tenue à l'immersion. Cependant les fissurations de retrait ne sont pas à négliger dans le cas de l'utilisation de liant hydraulique.

b) Les gravillons

Les gravillons sont des granulats pour lesquels la dimension la plus grande (D) est supérieure ou égale à 12,5 mm et dont la dimension la plus petite (d) est supérieure ou égale à 1 mm.

c) Les graves

La grave désigne quant à elle tous les granulats de dimension (d) égale à 0, et dont la dimension la plus grande (D) est supérieure à la limite désignant les sables, c'est-à-dire supérieure à 6mm (NF EN 13-242) et ce jusqu'à 90 mm. C'est un mélange de sables et de gravillons, voire de fillers.

Par exemple : "grave 0/31.5". Elles sont utilisées principalement dans l'exécution des corps de chaussées, de plates formes...

Elles peuvent être naturelles, reconstituées en centrale, traitées aux liants hydrauliques (ciment, laitier...) ou à la chaux, ou encore traitées aux liants hydrocarbonés (bitume).

I.3. CAS DU SAND ASPHALT

Le sand asphalt encore appelé sable enrobé à chaud, se distingue du sable bitume d'une part par sa destination finale et d'autre part par sa teneur en liant. C'est donc une technique réalisée à chaud avec du sable propre. Il s'agit d'enrobés 0/D avec $2 \leq D \leq 4$ mm constitués en majorité de sable roulé mais pouvant contenir dans des proportions variables du sable de concassage afin d'améliorer leur performance. Leur teneur en liant varie de 6,5 à 7%, ce qui témoigne de leur sensibilité aux écarts thermiques.

« Son utilisation est réservée pour des trafics faibles ou modérés (soit pour un nombre cumulé maximum de poids lourds de l'ordre de $1,5 \cdot 10^6$) » [3] en raison de la qualité du sable, de la teneur en bitume élevée, de son niveau de performance relativement modéré...

Son épaisseur normale d'utilisation varie de 3 à 5 cm, au delà il y a des risques de fluage et d'instabilité.

Cependant il est possible d'incorporer du sable concassé et du filler dans des proportions bien étudiées pour améliorer sa résistance au fluage et à la fatigue et permettre l'utilisation en couche d'épaisseur plus grande.

Du point de vue comportemental le sand asphalt est :

- sujet à des phénomènes de glissance. La rugosité du sand asphalt étant nettement moins bonne que celle des autres enrobés à base de granulats plus grenus.
- moins étanche (85% de compacité Duriez, qui correspond à 15% de vides).
- moins homogène. L'hétérogénéité est due à la dispersion des gisements de sable. Elle provoque des variations de performances des mélanges.
- moins stable que les autres enrobés à base de granulats plus grenus.

« Cependant le sand asphalt constitue une couche de roulement susceptible de se comporter sans défaillance majeur s'il est formulé et mise en œuvre correctement. Il est principalement composé de sable, de bitume, et filler et éventuellement de dopes » [3].

a) Les sables

Ils doivent être le plus anguleux possible, c'est-à-dire avoir un angle de frottement interne élevé. S'ils sont trop arrondis l'incorporation de sable de concassage s'avère nécessaire pour améliorer leur stabilité.

Les sables doivent être propres pour permettre un enrobage adéquat par le bitume. Ils doivent avoir un $ES \geq 40$, un passant au tamis 0,08mm limité à 12% et une teneur en matière organique inférieure à 0,5%.

Le fuseau granulométrique des sables utilisables pour l'exécution des sand-asphalts est le suivant :

Tamis (mm)	Fuseau Duriez pour le sand asphalt
4	95 - 100
2	80 - 100
1,25	65 - 98
0,63	40 - 94
0,315	19 - 85
0,2	9 - 70
0,08	0 - 10

Tableau I-6 : fuseaux granulométriques des sables pour le sand asphalt

La surface spécifique conventionnelle Σ du sable est donnée par :

$$\Sigma = 0,25G + 2,3S + 12s + 135 f \quad \text{en m}^2/\text{kg}$$

Avec en proportions pondérales :

- G éléments supérieurs à 6mm
- S éléments compris entre 6 et 0,315 mm
- s éléments compris entre 0,315 et 0,08 mm
- f éléments inférieurs à 0,08 mm

b) Le bitume

Le choix du type de bitume est conditionné par la température. En zone chaude le bitume doit être le plus dur possible pour palier aux risques de fluage ou d'orniérage, mais pas trop dur pour limiter la consommation d'énergie pour le chauffage et le vieillissement accéléré sous l'effet du climat. Le bitume doit être de préférence un bitume pur. Pour une composition granulométrique du mélange, les teneurs en liant seront déterminées par :

$$\text{Teneur en liant} = a \cdot K \cdot \Sigma^{1/3}$$

Où Σ est la surface spécifique

a est un coefficient de correction destiné à tenir compte de la masse volumique du sable.

$$a = \frac{2,65}{\text{masse}_\text{volumique}_\text{du}_\text{sable}}$$

et K est le module de richesse. « On peut admettre les valeurs : 3,5 ; 3,75 ; 4,00 et 4,25 » [3].

c) Le filler

L'utilisation du filler dépend de la granulométrie du sable. Si le sable est riche en éléments fins ou si les performances minimales souhaitées ne sont pas atteintes, il n'est pas nécessaire d'utiliser du filler. Toutefois, l'incorporation du filler d'apport s'avère souhaitable dès que le passant à 0,08mm est inférieur à 8%.

Le rapport optimal de filler/bitume se situe aux environs de 1,8.

d) Les performances du mélange

Le module de richesse doit être dans la plage 3,5-4,00. Le mélange doit avoir les propriétés suivantes :

- une insensibilité à l'eau, qui est fonction de l'adhésivité du liant aux granulats.

- une bonne compacité, qui dépend de manière intrinsèque de la granulométrie
- une bonne stabilité mécanique, liée à la forme et la nature des grains, au dosage en filler et au dosage et la nature du liant.

Les valeurs limites de stabilités Hubbard Field et Duriez recommandés par le CEBTP sont les suivantes :

Essai Hubbard Field :

Stabilité à 60°C $\geq 400\text{kg}$

Stabilité à 18°C $\geq 1200\text{ kg}$

Stabilité à 60°C sur stabilité à 18°C $\geq 0,1$

Essai Duriez (8 jours – 18°C – 1mm/s)

Résistance à la compression $R_c \geq 15\text{ bars}$

R'c après imbibition sur R_c avant imbibition $\geq 0,75$

Conclusion partielle :

À travers ce chapitre des généralités, nous avons fait une présentation du réseau routier sénégalais. Ce chapitre décrit et analyse également l'évolution du réseau routier et de son état actuel. La croissance du réseau en termes de longueur est très limitée depuis une dizaine d'années. Le réseau reflète mal la répartition de la population sur le territoire sénégalais. Par ailleurs, le réseau routier est majoritairement dans un état dégradé (45 % en 2005).

La deuxième partie traite des généralités sur la structure routière. Il existe une pléthore de structures de chaussée, le choix d'une structure de chaussée dépend d'une multitude de facteurs technico-économiques à prendre en compte. La chaussée la plus appropriée est celle qui est la moins coûteuse et qui peut assurer un comportement désiré durant la durée désirée.

La dernière partie de ces généralités porte sur les revêtements routiers. Nous avons vu que la qualité d'usage d'une chaussée dépend dans une large mesure de l'état et de la nature de la couche de surface ainsi que de la qualité des matériaux mis en œuvre. Le choix de la couche de surface doit prendre en considération plusieurs objectifs tels que la sécurité et le confort des usagers, le maintien de l'intégrité de la structure de chaussée etc. Une mauvaise conception de la couche de surface peut entraîner des dégradations de la chaussée. Ces dégradations doivent être étudiées afin d'identifier les causes et de pouvoir proposer des solutions idoines pour sa remise en état. Ceci est l'objet du chapitre suivant qui porte sur l'étude de la dégradation sur une chaussée à revêtement bitumineux.

II. ÉTUDE DES DEGRADATIONS DES CHAUSSEES A REVETEMENT BITUMINEUX

Les chaussées évoluent et se dégradent sous l'effet du trafic lourd et des conditions climatiques. Les dégradations sont des manifestations superficielles de la détérioration de la chaussée. Les dégradations les plus rencontrées se classent en deux catégories : les dégradations structurelles et les dégradations superficielles. Elles peuvent être caractérisées en termes d'étendue et de sévérité.

Les dégradations des chaussées dépendent essentiellement :

✓ du trafic

C'est un des paramètres qui contribue le plus à la dégradation des chaussées. L'agressivité du trafic dépend de l'intensité de la charge et de sa répétition dans une période bien déterminée. Il peut être caractérisé en termes de nombre de passage d'essieux lourds.

Les effets du trafic peuvent se manifester par différents types de dégradation : usure, fluage ou rupture par fatigue. Ils se traduisent aussi par un effort vertical égal au poids exercé sur la roue et un effort horizontal lié aux frottements entre le pneumatique et le revêtement. Un troisième type d'agression d'origine mécanique est l'agression combinée : trafic-pluviométrie en période d'hivernage.

✓ du climat : température, pluviométrie

La *température* à elle seule, crée des contraintes de traction-compression sur les couches traitées au liant hydraulique, ce qui se traduit par des contraintes de cisaillement entre deux couches et par la suite nous assistons à une rupture par fissuration de la couche la moins résistante. En plus elle agit sur les propriétés du liant de sorte qu'avec le trafic on assiste à des déformations des couches superficielles et à un affaiblissement des couches inférieures.

L'*eau* de la pluie pénètre dans les assises de chaussée par :

- le revêtement selon sa perméabilité
- les joints (longitudinaux)
- les fissures
- autres dégradations du revêtement (nids de poules, affaissements...)
- les accotements non imperméabilisés

Ce qui a pour conséquence l'accroissement de la teneur en eau dans les matériaux granulaires du corps de chaussée. On assiste à :

- une diminution de la densité du sol
- une augmentation de la pression interstitielle

- une diminution du frottement entre les particules d'où une réduction de la capacité portante, qui engendre des désordres structuraux.

✓ du vieillissement des matériaux mis en œuvre surtout le bitume

Ce vieillissement trouve son origine dans l'action des agents qui sont pour la plupart liés au climat :

- l'eau diminue les facultés d'adhésivité passive du bitume (c.-à-d. les liaisons entre bitumes et granulats) ; elle contribue donc au désenrobage des enrobés bitumineux ;

- l'air contribue à l'évaporation des solvants, et par conséquent à l'oxydation du bitume ;

- la lumière favorise l'oxydation du bitume;

- la température influe sur les propriétés mécaniques du bitume ; en particulier, les variations de température peuvent conduire à fissurer la couche de roulement;

Quant au vieillissement du bitume, il est lié au départ des huiles. Cela peut avoir comme conséquence un durcissement du bitume et qui se casse facilement avec le trafic.

✓ de la qualité des matériaux mise en œuvre

Le module des couches constituant la structure de chaussée dépend intrinsèquement des propriétés des matériaux mise en œuvre à savoir : le liant et les matériaux granulaires. Si lors de la conception le choix est porté sur des matériaux de qualités médiocres, évidemment les corps de chaussée dont ils constitueront la composition essentielle seront incapables de supporter des sollicitations importantes.

Donc une attention particulière doit être accordée au choix et à la mise en œuvre des matériaux constituant la structure de chaussée, car sa capacité à résister aux sollicitations en dépend fortement.

✓ du drainage et de l'assainissement

La partie de l'eau de pluie qui ne s'infiltré pas ruisselle vers les accotements et les fossés. Si le devers n'est pas suffisant, l'eau a tendance à stagner et à s'infiltrer. Ce qui diminue l'affinité liant-granat, qui sous l'effet du trafic contribue à des arrachements de matériaux...

Au niveau des fossés, il y a un phénomène d'érosion qui à la longue risque de déstabiliser la chaussée.

✓ de la gestion de la chaussée surtout en ce qui concerne l'entretien

Les dégradations affectent plusieurs paramètres surtout qualitatives de la chaussée tel que l'UNI, qui se mesure soit par la réaction d'un véhicule (évaluation objective) soit par la perception des usagers (évaluation subjective) circulant sur la surface déformée de la chaussée. Les dégradations doivent être suivies pour pouvoir intervenir à temps dans le cadre des entretiens courants et périodiques.

Les dégradations des chaussées à revêtement bitumineux peuvent être classées par type :

II.1. Fissures

Les fissures sont des lignes de rupture qui apparaissent à la surface de la chaussée. Elles peuvent prendre plusieurs formes :

II.1.1 Les fissures transversales

Ce sont des cassures de la couche de surface, perpendiculairement à l'axe de la chaussée.



Figure II-1 Fissurations transversale sur une chaussée à revêtement bitumineux

Causes :

- le retrait dû à la prise de l'assise traitée aux liants hydrauliques sous l'effet des variations de transversale température, la fissure remonte au travers de la couche de surface
- le défaut de construction d'un joint de reprise de tapis d'enrobés. Elle évolue vers l'épaufrure et les faïençages, flache et départ de matériaux.
- Le vieillissement du liant ou à une sensibilité du bitume aux contraintes thermiques.
- la fatigue de la couche de roulement due à la répétition des efforts de traction par flexion aux passages des charges.

Remèdes :

Un pontage à chaud avec un mastic spécial.

II.1.2 Les fissures longitudinales

Il s'agit de cassures de surface, parallèles à l'axe de la chaussée.



Figure II-2 Fissurations longitudinales

Causes :

- La fatigue de la chaussée due à une structure insuffisante vis-à-vis du trafic, ou d'une portance insuffisante du sol,
- Les défauts de construction (homogénéité du matériau mise en œuvre...)
- Les caractéristiques du sol : tassement, glissement, ou retrait du sol argileux à la suite d'une longue période de sécheresse.

Remèdes :

Pour des fissures fines (moins de 2mm d'ouverture) le traitement direct est presque impossible et dans ce cas, l'application d'une couche d'enrobés est requise. Dans le cas contraire, et en l'absence de désordre secondaire, il est procédé à un pontage à chaud avec mastic spécial ; en présence de désordre secondaire, il est procédé à une imperméabilisation de la surface.

NB : Elle évolue vers un faïençage à maille fines puis à un orniérage à grand rayon, à des nids de poules et à un départ de matériaux. Les paramètres qui influencent l'évolution des ces dégradations sont le trafic lourd, la pluviométrie, la sensibilité à l'eau des matériaux, l'accrochage et la qualité des couches.

II.1.3 Les fissures de faïençages

Il s'agit d'un ensemble de fissures plus ou moins rapprochées, formant un maillage.



Figure 11-3 faïençage serré

Causes :

- La fatigue de la couche de roulement ou de la totalité de la chaussée, due à une structure insuffisante vis-à-vis du trafic supporté, ou à une portance insuffisante du sol.
- Le durcissement et ou le retrait de l'enrobé.
- Décollement de la couche de roulement.

Remèdes :

On pourra appliquer un scellement et une imperméabilisation de surface.

II.1.4 Les fissures de glissance

Elles ont parfois la forme d'un croissant qui indique la direction de la poussée exercée par les roues.

Causes :

- manque d'adhérence entre la couche de surface et la couche sous-jacente. Ce manque d'adhérence peut être causé par l'eau ou par un corps étranger non adhésif.
- mélange ayant une grande teneur en sable.
- mauvais compactage lors de la construction.

Remèdes :

On applique un mince enduit d'accrochage, et remplir la partie nettoyée par un matériau bitumineux mélangé à chaud.

II.1.5 La peau de crocodile

C'est une maladie qui se manifeste par un réseau plus ou moins rectangulaire de fissures intéressant toute l'épaisseur du revêtement et pouvant aboutir à sa dégradation totale.

Causes :

- défaut de résistance de la couche de base
- sollicitations dues au trafic dépassant la limite de résistance du revêtement et des couches sous-jacentes.

Remèdes :

Débrider et remplir avec un matériau enrobé

II.1.6 Les lézardes

Ce sont des fissures intimement liées formant une série de patrons indéfinis.

Causes :

- changement de volume des mélanges bitumineux à agrégats fins qui ont une teneur élevée en bitume.



Figure II-4 le lézarde

Remèdes :

On applique un scellement épais sur toute la surface concernée.

II.2. Déformations de la surface

C'est la famille de dégradations de surface caractérisée par une détérioration de l'uni de chaussée sans départ de matériaux :

- ornière à grand rayon : déformation longitudinale en creux présente dans les bandes de roulement.
- affaissement hors rive : enfoncement ponctuel, prononcé et localisé.
- bourrelet transversal : déformation permanente linéaire de type renflement perpendiculaire à l'axe de la chaussée.
- flaches : affaissement hors rives de forme circulaire.

II.2.1 Les ornières

Ce sont des déformations de la section transversale de la chaussée (forme de dalot) sur les traces de roues des véhicules. C'est un tassement en pleine chaussée

Il existe 3 types d'orniérages:

- Ornières structurales
- Ornières de fluage
- Ornières d'usure

Causes :

- fatigue de la chaussée par tassement des couches inférieures due soit à un défaut de portance du sol (dans le cas d'un orniérage à grand rayon) soit à une mauvaise stabilité d'un enrobé mou dans les fortes pentes ou rampes, ou encore dans les zones de freinage (dans le cas d'un orniérage à petit rayon).
- contraintes verticales excessives à la surface du sol support
- défaut de drainage entraînant une réduction de la portance
- évolution d'une fissure longitudinale des couches inférieures.

Remèdes :

Les principales techniques d'entretien sont le reprofilage dans les ornières avec des matériaux bitumineux (orniérage inférieur à 5 cm), le rechargement (orniérage supérieur à 5 cm) et le fraisage des bourrelets.

NB : Ils évoluent vers un faïençage dans les ornières et la constitution de bourrelets (grand rayon), ou vers une augmentation de la profondeur (petit rayon).



Figure II-5 ornière à grand rayon

II.2.2 Les affaissements

Les affaissements peuvent se présenter sous deux formes :

Les affaissements de rive

Ce sont des enfoncements prononcés, localisés à la partie de la chaussée comprise entre le bord et la bande de roulement de rive.



Figure II-6 Affaissement de rive

Causes :

- sous-dimensionnement localisé, lié à une hétérogénéité au niveau de l'assise ou du sol support.
- la mauvaise qualité ou même l'absence de l'épaulement (ou butée) insuffisant sur les accotements qui peut être aggravée par des conditions géométriques particulières (intérieur de virages à petit rayon).
- le drainage ou l'assainissement localement défectueux.
- le retrait hydrique du sol support sous l'effet du climat.

Remèdes :

Il faudra procéder à une reprise du profil en travers.

NB : Ils évoluent vers un faïençage à mailles fines, ainsi que par l'apparition éventuelle d'une fissure d'adaptation (tassement d'épaulement ou de sol support).

Les affaissements hors rive (ou flash)

Il s'agit d'enfoncement ponctuel, prononcé, localisé avec ou sans fissuration vers le milieu de la bande roulable. Ce type d'affaissement prend le nom de flache lorsqu'il présente une forme circulaire.

Causes :

- sous-dimensionnement localisé, lié soit à une hétérogénéité de l'assise ou du sol support, soit à la présence d'eau consécutive à la perméabilité des couches supérieures.
- Insuffisance de stabilité du revêtement.

Remèdes : un déflashage pourra être appliqué.

NB : Ils évoluent vers un approfondissement de l'affaissement accompagné d'une fissure d'adaptation et de faïençage à mailles fines.

II.2.3 Le bourrelet

C'est un renflement apparaissant de manière sensiblement perpendiculaire à l'axe de la chaussée. Il peut être associé à un affaissement.

Causes :

- Compression par dilatation thermique au niveau d'une fissure transversale et le soulèvement superficiel de la couche de roulement.
- Grands espacements entre les fissures transversales.
- Mise en œuvre de matériaux à prise rapide suivie de très fortes températures les jours suivant la prise.
- Infiltration d'eau entraînant une perte de portance du corps de chaussées.

Remèdes :

- Déflachage si les bourrelets sont de faibles hauteurs
- Réfection localisée du corps de la chaussée s'ils sont de fortes hauteurs accompagnées de fissures.

NB : Il évolue vers une fissuration et/ou des arrachements de la couche de roulement, ainsi qu'à une détérioration de l'uni longitudinal.

II.2.4 Le gonflement

C'est un soulèvement ponctuel, le plus souvent circulaire, de la chaussée.

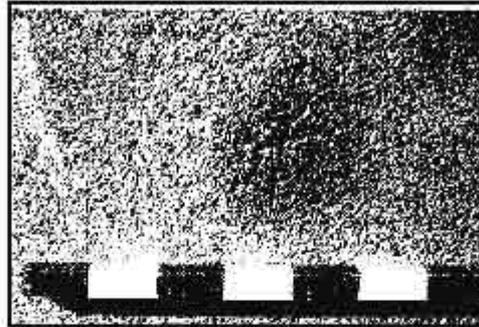


Figure II-7 : gonflement

Cause :

- Les réactions physico-chimiques ponctuelles entre des constituants de la structure et l'eau, réactions qui forment des composés gonflants.

Remède : Il faudra faire une réfection localisée du corps de chaussée.

NB : Elle évolue en prenant de la hauteur et à terme à une fissuration en étoile de la couche de roulement.

II.2.5 Les ondulations à courte longueur d'onde

Ce sont des rayures longitudinales. Ils se produisent couramment au niveau des rampes.



Figure II-8 ondulations à courte longueur d'onde

Causes :

- Viscosité élevée du bitume,
- Revêtement épais,
- Freinages répétés,

Remèdes :

Un reprofilage sera nécessaire ou bien on aplanit les aires affectées et on applique un nouveau traitement de surface.

II.3. Les mouvements de matériaux

II.3.1 Le ressuage

Le ressuage s'observe plus sur les enduits, lorsque le dosage en liant est trop élevé. Il peut se produire pour la même raison sur les enrobés. C'est une remontée du liant à la surface du revêtement. Lorsqu'il est prononcé il peut se former des plaques glissantes très dangereuses pour la circulation. Il peut se manifester également par un décollement et un arrachement du revêtement lors du passage des véhicules et par des amorces de nids de poule.



Figure II-9 : les ressuges

Causes :

- Surdosage en liant
- Liant inadapté
- Formulation d'enrobé inadaptée aux sollicitations.
- Défaut d'homogénéité du revêtement

Remèdes :

- Si le ressuage est très prononcé, il faudra enlever l'excès de liant
- Sablage suivi d'un cylindrage
- Le brulage, peut être employé mais est très couteux

II.3.2 L'indentation ou glaçage

Il s'agit d'une usure ou d'un enfoncement des gravillons de la couche de roulement conférant à la surface un aspect lisse et brillant. Il entraîne une usure progressive des gravillons rendant la chaussée de plus en plus glissante quand il pleut.

Causes :

Le glaçage est causé par une dureté insuffisante des granulats du revêtement.

Les causes de l'indentation sont liés à :

- des pertes superficielles de granulats.
- un surdosage en liant de l'enrobé.
- un compactage à une température très élevées.
- une qualité du liant inadaptée au trafic ou au climat.
- des réparations localisées (point à temps) et les incidents de chantier (surdosage ponctuel ou fuites d'huile des engins de chantier).

Remèdes :

- Gravillonnage.
- Cloutage avec des granulats à chaud.
- fraisage superficiel.

NB: Elle évolue vers une extension du désordre dans les bandes de roulement, voire l'apparition d'ornières accompagnées de bourrelets transversaux et longitudinaux.

II.3.3 Remontée de fines

Ce sont des mouvements vers la surface des particules fines entraînée par l'eau circulant dans l'assise sous l'effet de la circulation du trafic lourd.

Causes :

- Sol support en sol fin sensible à l'eau.
- Pluviométrie intense entraînant une fluctuation de nappe.
- Trafic lourd.
- Fissuration transversale ou longitudinale ou un faïençage intense.

Remèdes :

Une des solutions consiste à aménager des drains

II.4. Pertes ponctuelles du revêtement

II.4.1 La pelade

Elle est due à des arrachements par plaques de l'enrobé de la couche de surface.

Causes :

- Instabilité de la couche de roulement
- Défaut d'adhérence de la couche de roulement à la couche sous-jacente
- Épaisseur insuffisante de la couche de roulement
- Chaussée fortement sollicitée par le trafic.

Remèdes : Refaire le revêtement



Figure II-10 : pelades

II.4.2 Le plumage

Il s'agit de l'état d'un enduit dont la mosaïque est rendue non jointive par départ de granulats. Ce type de dégradation se rencontre souvent dans les zones humides ou ombragées.

Causes :

- le sous-dosage en liant d'un enduit superficiel
- la mise en œuvre de l'enduit dans des conditions atmosphériques défavorables, l'utilisation de gravillons sales,
- un compactage insuffisant,
- un répardage de liant inadapté
- la remise trop rapide sous circulation.

Remèdes :

- Réalisation d'un enduit superficiel
- Réalisation d'un tapis mince d'enrobés

NB : Il évolue vers un arrachement progressif de la totalité des gravillons.

II.4.3 Le désenrobage

C'est la séparation progressive du film bitumineux et de l'agrégat. Souvent le plus petit granulat s'enlève d'abord, suivi du plus grand granulat. La surface de la chaussée devient de plus en plus rugueuse.

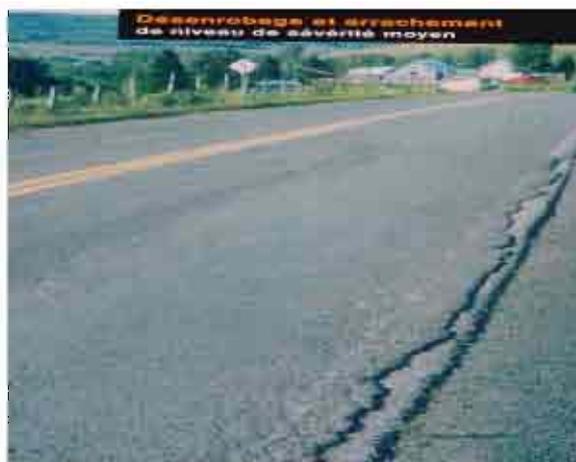


Figure II-11 désenrobage et arrachement de bitume

Causes :

- Dosage inadéquat (peu de bitume dans le mélange)
- Granulat sale ou hydrophile
- Manque de compactage lors de la construction

Remèdes : Traitement de surface (vaporisation de bitume sur l'aire à traiter)

II.4.4 Le peignage

Il s'agit du départ de gravillons se développant suivant des sillons ou irrégularités de surfaces parallèles à l'axe de la chaussée. Il conduit à une imperméabilité mal assurée et à l'apparition de nids de poule. Il est courant sur les revêtements en enduit superficiel.

Causes :

- la mauvaise application du liant sur la chaussée
- le répandage à trop basse température.

Remèdes :

Nivellement et réalisation d'un enduit superficiel ou d'un tapis mince en enrobés.

NB : Il évolue vers la mise à nu du liant au fond des sillons, le départ des gravillons hors des sillons, ainsi que la mise à nu totale de l'ancien revêtement.

II.4.5 Les épaufrures

Ce sont des ruptures au niveau des rives de la chaussée.

Causes :

- Dégradations des accotements
- Action de l'eau sur les bords de la chaussée
- Compactage insuffisant des enrobés en zone de rive
- Insuffisance de la largeur de la chaussée

Remèdes :

Réfection localisée du corps de chaussée

II.4.6 Les nids de poule

Il s'agit de désagrégrations localisées du revêtement sur toute son épaisseur formant des trous de forme généralement arrondie, au contour bien défini, de taille et de profondeur variables. Ils représentent généralement le stade final d'un faïençage ou d'une flache.

Causes :

- désagrégation et départ de matériaux dus à une mauvaise qualité de la chaussée.
- faiblesse ponctuelle de la fondation.
- désagrégation et le départ de matériaux dus à une mauvaise qualité de la chaussée.
- épaisseur insuffisante du revêtement.
- forte perméabilité de la couche de roulement.
- chaussée fortement sollicitée par le trafic lourd.



Figure II-12 : Nids de poule

Remèdes :

Les trous peuvent être comblés par du rapiéçage temporaire ou par le bouchage avec enrobés à froid ou enrobés spéciaux conditionnés.

NB : Ils évoluent vers une augmentation en taille et en nombre des trous, et vers la ruine totale de la chaussée.

Conclusion partielle :

Ce chapitre jette les bases d'une étude des dégradations de toute chaussée à revêtement bitumineux. Il identifie l'ensemble des dégradations en les classant par catégorie (les fissures, les déformations et les départs de matériaux). Pour chaque type de dégradation, il étale l'ensemble des causes possibles et en même temps une ébauche de solutions pour y remédier. Les structures de chaussée ne se dégradent pas de la même manière. La détérioration des chaussées souples résulte principalement d'une accumulation de déformations consécutives à une portance insuffisante de la structure. L'amplitude et l'extension des déformations est un élément capital d'appréciation de l'état de dégradation de la structure. Le relevé des fissurations n'apportant qu'une information complémentaire sur les risques de voir ces déformations s'amplifier et/ou s'accélérer.

La détérioration des chaussées à assise traitée se produit par ruptures et arrachements : les déformations traduisent des phénomènes de fluage de la couche de roulement ou, plus rarement, des stades ultimes de fissuration avec mouvement de bloc. Le relevé des fissurations est primordial, car il donne directement accès à l'endommagement structurel ; les déformations résultent le plus souvent de phénomènes d'orniérage, sans rapport avec l'état de l'assise. Enfin, la détection d'un décollement entre le revêtement et l'assise devient un élément important d'analyse de la fissuration, notamment du faïençage.

Nous pouvons postuler qu'il existe plusieurs morphologies de fissuration, parfaitement reconnaissables, qui traduisent des phénomènes de détérioration distincts ; on parle de familles de fissures (transversales, longitudinales spécifiques aux bandes de roulement ou non, etc.). Au sein de chaque famille, certains caractères (ramifications, épaufrures) trahissent le degré d'évolution du phénomène. Par ailleurs, l'extension de la fissuration détermine la zone touchée par le phénomène, et donc le volume des travaux à entreprendre.

III. LA ROUTE TAMBA-KIDIRA-BAKEL

III.1. Présentation du projet

La route Tamba-Kidira-Bakel a été conçue et réalisée avec un double rôle, dans la mesure où elle permet d'assurer le désenclavement du département de Bakel d'une part, elle contribue en même temps à favoriser l'intégration sous-régionale d'autre part.

Elle porte sur les tronçons de routes nationales RN1 et RN2 respectivement sur Tamba-Kidira et sur Kidira-Bakel et passe par Bala et Goudiry. L'origine se trouve à Tambacounda et se termine à Bakel. Le tronçon Tamba-Kidira constitue un des maillons de la liaison routière Dakar-Bamako par le corridor CU2A (Kaolack-Tambacounda-Kidira-Kayes-Bamako-Sikasso-Ouagadougou-Niamey-Zinder-Frontière Tchad).

La zone d'influence du projet se trouve dans sa majeure partie dans la zone sahélienne et soudano-sahélienne.

Du point de vue hydraulique, la région du projet appartient au bassin du fleuve Sénégal et à la Falémé.

Elle a été aménagée et bitumées entre 1996 et 2000 et elle porte sur environ 250 km.

La particularité de cette route est liée au type de revêtement qui est utilisé à savoir le Sand asphalt. En effet c'est le seul grand axe sur tout le réseau routier où le revêtement est en Sand asphalt.

III.1.1 Le tracé :

Les caractéristiques du tracé se résument comme suit :

- Longueur = 252 km
- Largeur revêtue = 7 m sur la RN 1 et 6m sur la RN2
- Accotement = 2x1,5 m sur la RN1 et 2x1m sur la RN2
- Rayon de courbure minimale absolue = 240 m ou 260 m
- Vitesse de base minimale = 80 km/h
- Pente transversale du revêtement = 2,5 %
- Pente transversale des accotements = 3,5%
- Pente longitudinale maxi = 3%

III.1.2 La chaussée :

Le corps de chaussée est composée d'une :

- couche de fondation de 15 cm en latérite naturelle
- couche de base de 15 cm en latérite améliorée au ciment
- couche de roulement en Sand Asphalt d'épaisseur moyenne de 3,5 cm.

III.1.3 Les matériaux

- Couches élémentaire de remblai : 95% OPM
- Plateforme supérieure des terrassements : 95% OPM (sur 30 cm de profondeur)
- Couche de fondation en latérite crue: 95 % OPM
- Couche de base en latérite ciment : 95% OPM

III.2. Historique de la route Tamba-Kidira-Bakel (TKB)

La route TKB a été réalisée sur une piste existante qui était marquée par la présence de tôles ondulées entrecoupées parfois de zone de cuirasses latéritiques et de graves caillouteuses ou rocailleuse dans une matrice limoneuse et un sol limoneux-argileux rendant une circulation difficile et très pénible. Le gouvernement du Sénégal en partenariat avec la République de Chine ont financé la construction de la nouvelle route. Le coût final du projet était de 38 milliards de francs CFA.

Les études de faisabilité ont démarré en juillet 1996 et s'en est suivie l'élaboration d'un dossier d'appel d'offre. Le projet a démarré effectivement en juin 1997 pour un délai contractuel de 54 mois.

L'analyse du tracé a privilégié l'itinéraire Tambacounda-Bala-Goudiry-Kidira-Bakel (250,500 Km) qui permet d'arriver jusqu'à la frontière avec le Mali par la route nationale I (185,200 Km) et de remonter sur Bakel, située à la frontière avec la Mauritanie, par la Route Nationale II (65,300 Km).

La conception géométrique de la route est faite en se basant sur les normes routières «AASHO (American Association of State Highway and Transportation Officials)» sous forme de traitement automatique par le logiciel « Road calc » de « EAGLE POINT ».

Il est important de noter qu'il n'y avait pas eu d'études techniques d'exécution de base qui définissaient de manière explicite les caractéristiques techniques de base dans le cahier des charges. Les études ont été complétées et ajustées au fur et à mesure de l'avancement des

travaux. En conséquence des modifications ont été apportés au projet et elles portaient essentiellement sur :

III.2.1 La géométrie du projet

Ces modifications concernaient la ligne rouge et des rectifications sur le tracé et avaient une incidence financière positive sur le budget du projet, et, ont permis de pouvoir exécuter les travaux conformément aux normes et règles de l'art. En tout, ces modifications ont porté sur environ 5% du linéaire du projet

III.2.2 Le revêtement bitumineux

Le revêtement initialement prévu dans le marché de base est l'enduit superficiel de type bicouche sablé. Mais le CPT avait stipulé ce qui suit :

« Les revêtements de chaussée pourront, suivant les classes de trafic, être constitués soit en enduit superficiel de type bicouche sablé soit en Sand asphalt. Les définitions du type de revêtement à mettre en œuvre seront proposées par l'entrepreneur. La solution définitive ne sera retenue qu'après son approbation par l'Administration par zones homogènes. L'entrepreneur devra s'en tenir à ces indications.

Les matériaux, dont l'utilisation sera nécessaire pour la mise en valeur du revêtement seront donc :

- *des granulats roulés*
- *des liants hydrocarbonés* »[3]

L'entreprise avait fait un dossier sur le sand asphalt en proposition comme une variante par rapport au bicouche sablé. La proposition de l'entreprise était basée sur 80% de sable de Falémé + 20% de sable limoneux. La mission de contrôle également a transmis sa proposition sur la formule de sand asphalt. Dès lors, il se posait un problème de savoir la formulation du sand asphalt qui serait performante et capable de résister au temps par rapport à la durée de vie anticipée de la route (10 à 15). La formulation retenue est présentée plus loin dans ce même chapitre.

III.2.3 Le corps de chaussée

a. la couche de base

Le matériau de couche de base prévu dans le marché en latérite crue n'a pas été trouvé dans la zone du projet à cause d'une insuffisance dans l'indice portant CBR. Cela a entraîné la modification du matériau prévu en mettant en place pour la couche de base y compris les accotements des graveleux latéritiques améliorés au ciment.

Dans la plupart des cas les propriétés des graves rencontrées s'inséraient dans les plages définies dans le cahier des charges à quelques exceptions près, hormis le l'indice portant CBR qui était généralement inférieurs à 80. C'est la raison pour laquelle, sur l'ensemble de la route, à l'exception d'une section de planches d'essais sur l'axe Kidira-Bakel, la couche base a été faite avec des graveleux latéritiques améliorés au ciment au taux de 1,5% à 3%.

b. la couche de fondation

Initialement l'épaisseur de la couche de base en latérite crue devait être de 20 cm tel que spécifié dans le cahier des charges. Cependant à cause de l'amélioration de la couche de base l'épaisseur de la couche de fondation est devenue 15 cm.

Du point de vue organisationnel, les travaux se déroulaient sur quatre (4) fronts repartis comme suit :

1^{er} front : Kidira-Bakel = 65,3 km

2^{ème} front : Kidira-Goudiry = 70,835 km

3^{ème} front : Goudiry-Bala = 52,4 km

4^{ème} front : Tambacounda-Bala = 62,425 km

La fin des travaux initialement prévue au mois de mai 2001 a été effective en fin décembre 1999 soit une réduction de 17 mois du délai contractuel.

III.3. Consultation des documents existants :

Les documents existants sont d'une importance capitale et il est fondamental de les consulter pour mieux appréhender le projet depuis sa phase de conception jusqu'à sa réalisation.

III.3.1 La formulation utilisée pour le sand asphalt

La disponibilité régionale de sable roulé marquée par la présence du fleuve Falémé dont le lit en décrue, est occupé par d'importants dépôts et, dans un souci de valorisation de ce sable, il a été suggéré l'utilisation du sand asphalt en revêtement en lieu et place du bicouche sablé.

Des essais de formulation ont été menés avec les constituants de base mis en œuvre dans la zone à savoir :

- Le sable grossier de la Falémé
- Le sable limoneux entre Kidira (à 13 et 35 km) et Goudiry

L'examen des possibilités d'introduire du sable de basalte 0/3 de Diack (situé à 400 km de Tamba) a été effectué en vue d'améliorer certaines qualités du sand asphalt (angularité, propreté, granularité).

Trois formules ont été étudiées en vue d'être appliquées en planche d'essais sur les axes Kidira-Bakel et Kidira-Goudiry. Ces formules sont :

- F1 : 80% de sable de Falémé, 20% de sol limoneux et 7,4% de bitume.
- F2 : 75% de sable de Falémé 0/6, 15% de sol limoneux, 10% de 0/3 de basalte et 7,4% de bitume.
- F3 : 70% de sable de Falémé 0/6, 15% de sol limoneux, 15% de 0/3 de basalte et 7,5% de bitume.

L'acheminement du 0/3 de basalte depuis Diack engendrait des coûts qui rendaient plus couteux le sand asphalt et du coup compromettrait sa compétitivité vis-à-vis du bicouche. Sur ce, l'entreprise a équipé le chantier d'un broyeur qui produit à partir du gravier (obtenu après écrêtage du tout venant) de Falémé un sable équivalent à celui de Diack.

Finalement, la composition F2 a été appliquée sur un certain nombre de sections en attendant la mise au point d'une composition F2' constituée de 75% de sable de Falémé 0/6 + 15% de sable limoneux + 15% de sable de broyage 0/6.

III.3.2 Les propriétés du bitume utilisé

Le choix a été porté sur le bitume 40/50 qui est le plus dur des bitumes semi-dur. Sa pénétrabilité mesurée en 10ème de millimètre est comprise entre 40 et 50. Il a une densité de

l'ordre de 1,03. C'est le bitume le plus approprié (parmi les bitumes semi-durs) pour les trafics très denses et les poids lourds dans les pays chauds. Le bitume 50/70 a été substitué au 40/50 car étant moins dur que le 40/50 et plus dur que le 60/70.

Le bitume 40/50 sert en majorité à la fabrication d'enrobés à chaud pour :

- la construction de routes neuves en béton bitumineux pour les trafics très denses et poids lourds,
- les renforcements de chaussées,
- l'application spéciale des pistes aéroportuaires ou tout emplacement devant supporter de lourdes charges,
- les routes et autoroutes à grande circulation

On donne au tableau suivant les caractéristiques de ce bitume.

Caractéristiques	Enveloppe
Densité relative à 25° C	1,00 - 1,10
Point de ramollissement (°C)	47 – 60
Pénétration à 25°C 0,1 mm	40 – 50
Ductilité à 25°C (cm)	mini 60
Point d'éclair cleveland (°C)	mini 250
Solubilité dans le sulfure de carbone (% poids)	mini 99,5
Perte de masse au chauffage (%)	maxi 1
Pourcentage de pénétrabilité (%)	mini 70

Tableau III.1 : Spécifications techniques du bitume 40/50. [27]

Grâce à ses qualités spécifiques il offre :

- une meilleure résistance à l'orniérage et au fluage des chaussées,
- une résistance accrue face aux intempéries,
- une souplesse d'utilisation,
- une immobilisation réduite pour une remise en circulation immédiate de la chaussée,
- une longue durée de vie de la chaussée.

III.3.3 Propriétés du sable utilisé

Le sable utilisé est obtenu par mélange de sables d'origines différentes. Les constituants de ce mélange sont les suivants :

a. Le sable de Falémé passant à 6,3 mm

En période de décrue il est possible d'exploiter le lit de sable roulé du fleuve qui à l'état brut comporte des proportions de sable et de gravier. Le granulat extrait du lit est criblé afin d'obtenir du sable et du gravier. Le sable obtenu est plus ou moins arrondi ce qui lui confère la capacité d'améliorer la maniabilité du mortier bitumineux. Au sortir de l'essai granulométrique du sable écrêté les résultats font état d'un sable grossier qui a les caractéristiques suivantes :

$D > 2\text{mm}$:	15,5%
$0,5 < D < 2\text{mm}$:	48,5%
$D < 0,08\text{mm}$:	1,5%

NB : Ces valeurs sont la moyenne des essais réalisés au laboratoire du chantier de l'entreprise.

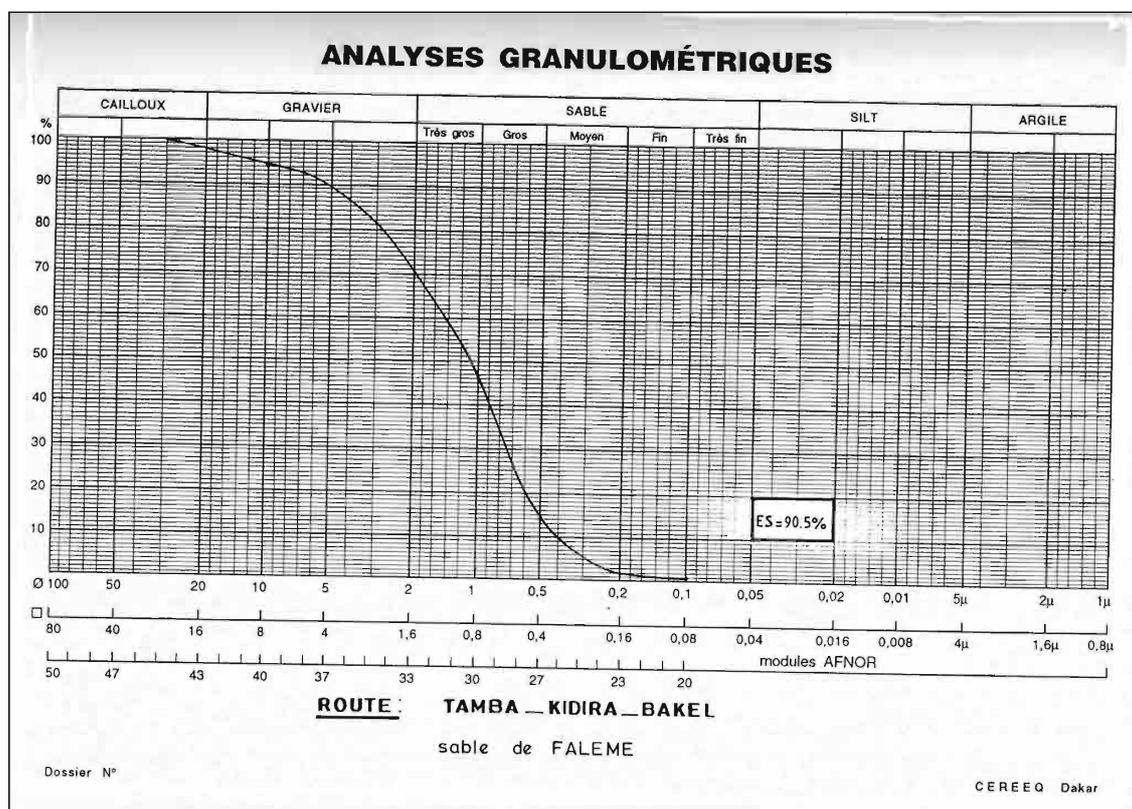


Figure III.1 : courbe granulométrique sable de Falémé

La détermination de son équivalence de sable a montré un sable très propre (sable lavé par la crue, donc absence de fines) avec une valeur de ES de 87% (selon la mission de contrôle) et de 92% (selon l'entreprise).

b. Le sol fin limoneux

C'est un sable naturel trouvé sur deux sites aux environs de Kidira. Le faible pourcentage de fines du sable de Falémé a justifié sa correction par adjonction d'un sol à caractère limoneux prélevé sur les emprunts du pk 150 et du pk 155 sur l'axe Tamba-Kidira. Les essais d'identification portaient sur l'analyse granulométrique et la détermination de l'Équivalence de Sable, et fournissent les résultats suivants :

$D > 2\text{mm}$:	0%
$0,5 < D < 2\text{mm}$:	16%
$0,08 < D < 0,5\text{mm}$:	59%
$D < 0,08\text{mm}$:	26%
ES :	27%

VBS (en g de bleu pour 100g de sol): 0,86

Matières organiques : traces

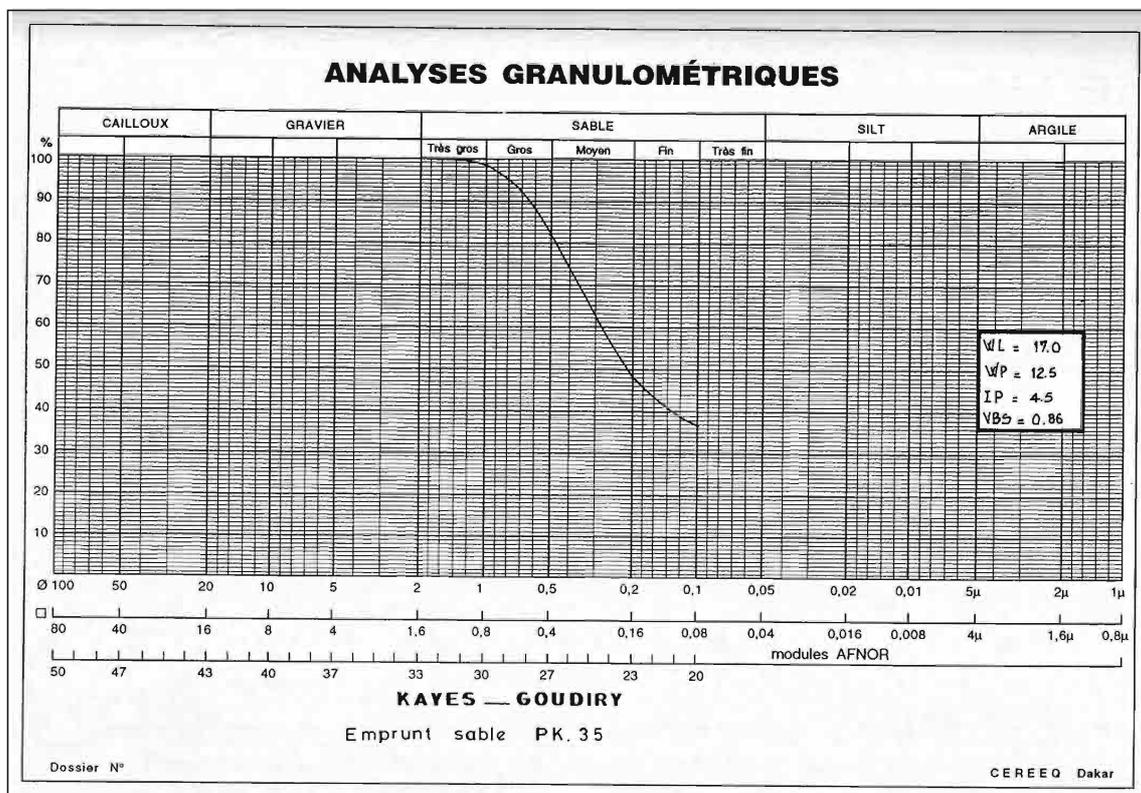


Figure III.2 : courbe granulométrique sable fin du pk 35

Les conditions minimales pour l'exploitation du sable d'emprunt étaient les suivantes :

- $ES \geq 18\%$
- Pourcentage de fines $\geq 25\%$

c. Le sable de broyage

Il est obtenu par concassage du gravier de Falémé pour obtenir du sable s'apparentant à un 0/2. Le sable de broyage ainsi produit a les caractéristiques suivantes :

ES	:	57,4
% de fine	:	14
γ_s	:	2,5

Les caractéristiques du mélange sont :

Granulométrie	➤ ES = 68,4%
	➤ Poids spécifique $\gamma_s = 2,7$
	➤ Cu = 5,75
	➤ Cc = 1,2
	➤ Surface spécifique = 12,1
	➤ Adsorption = 1,4 %
	➤ Passant à 6,3 mm = 100
	➤ Passant à 5 mm = 99,2
	➤ Passant à 4 mm = 97,6
	➤ Passant à 2,5 mm = 91,7
	➤ Passant à 1,25 mm = 72,8
	➤ Passant à 0,63 mm = 52,2
	➤ Passant à 315mm = 21
	➤ Passant à 0,16 mm = 9,7
➤ Passant à 0,08 mm = 6,4	

Performances du mélange (formule F'2) :

Les performances sont définies par les essais tels que :

- i. l'essai DURIEZ

L'essai Duriez aide à la formulation des enrobés, en termes de résistance mécanique à la compression et de tenue à l'eau. Il sert à mesurer la résistance à l'eau ou résistance au désenrobage.

L'essai Duriez mesure la chute de certaines des caractéristiques mécaniques (résistance ou module) des enrobés. Le rapport des résistances en immersion et dans l'air est un paramètre important. Plus ce rapport est élevé, plus le mélange résiste au désenrobage.

Caractéristiques	Enveloppe des performances
Densité apparente	2-2,15
Compacité (en %)	85-90
Rc 18°C à sec (en bars)	35-50
R'c 18°C après immersion (en bars)	30-45
Rapport R'c/Rc	0,75-1

Tableau : III.2 : Spécifications pour le sand asphalt selon Duriez

ii. l'essai MARSHALL

Il permet de déterminer pour une température et une énergie de compactage donnée, la résistance mécanique dite stabilité et l'affaissement dit fluage des éprouvettes de mélange hydrocarbonés.

Il s'effectue avec trois énergies de compactages : 25, 50 et 75 coups afin d'examiner l'évolution de la stabilité et de la compacité en fonction du trafic. À l'exécution on se référera aux taux de compactage correspondant à 50 coups.

La répétition de l'essai pour plusieurs teneurs en liant, dans les mêmes conditions d'essai permettra de choisir la teneur en liant qui serait optimale et respectant les spécifications concernant les fourchettes de fluage ainsi que la stabilité minimale à atteindre.

L'intérêt de l'essai Marshall réside dans sa commodité de contrôler la stabilité et le compactage lors de la réalisation des travaux.

Caractéristiques	Performances minimales
Stabilité à 60°C	300 kg
Compacité	86 %

Tableau : III.3 : Spécifications pour le sand asphalt par l'essai Marshall

iii. l'essai HUBBARD-FIELD

Il permet de mesurer la stabilité conventionnelle d'un matériau fin, traité par un liant hydrocarboné à une température et selon un mode de compactage donné. Il permet de déterminer la tenue à l'eau et le pourcentage de vides.

Il a essentiellement trois buts :

- faire ressortir la variation des performances des mélanges en fonction de la variation du pourcentage de bitume.
- choisir la formule optimale qui satisfait le mieux aux conditions requises
- définir la plage de variation du pourcentage de bitume aux tolérances admissibles au moment de la fabrication.

Caractéristiques	Enveloppe des performances
Densité apparente	2,10-2,28
Compacité (en %)	88-95
Stabilité HF à 18°C (en kg)	2500-5500
Stabilité HF à 60°C (en kg)	500-1500
Rapport HF 60°C/HF 18°C	0,10-0,40

Tableau : III.4 : Spécifications pour le sand asphalt par l'essai Hubbard-Field

Formule F2

La formule F2 a la composition suivante :

- ✓ 75% de sable de Falémé
- ✓ 15% de sol fin du pk 150
- ✓ 10% de 0/3 de basalte de Diack
- ✓ 7,4% de bitume

Le choix a été porté sur cette formule car elle présente le meilleur rapport Hubbard-Field HF 60°C/HF 18°C. Cette formule a été appliquée au niveau des tronçons Kidira-Goudiry et Kidira-Bakel.

Elle présente les performances suivantes :

1. _Essai Duriez :

Caractéristiques	Formule F2
% de bitume	7,4

Densité apparente	2,04
Compacité en %	84,1
% de vide	15,9
% de vide air+bitume	29,5
Rc à 24h à sec (en bars)	46,2
Rc à 8 jours à sec (en bars)	45
R'c 1 jour à sec + jours d'imbibition (en bars)	46
Rapport R'c/Rc	1,022

Tableau : III.5 : Performances de la formule F2 par l'essai Duriez

2. Essai Marshall

Caractéristiques	75 coups	50 coups	25 coups
Stabilité	716 kg	786 kg	-
% de bitume	7,4	7,4	7,4
Da	2,18	2,13	2,138
Compacité (en %)	90	88	88,3
% de vide	10	12	11,7
γ_d agrégat	2.028	1,981	1,989
% vide air+bitume	24,7	26,5	26,2

Tableau : III.6 : Performances de la formule F2 par l'essai Marshall

3. Essai Hubbard-Field

Caractéristiques	Valeurs obtenues au laboratoire		
% de bitume	7	7,4	7,8

Densité apparente	2,129	2,187	2,172
Compacité en %	87,3	90,2	90
HF à 18°C	3921	4314	4202
HF à 60°C	1782	1962	1678
Rapport HF	0,45	0,45	0,40
% vide	12,7	9,8	10
γ_d agrégat	1,99	2,036	2,015
% vide air+bitume	26,2	24,4	25,2

Tableau : III.7 : Performances de la formule F2 par l'essai Hubbard-Field

Formule F2'

La formule F2' a la composition suivante :

- ✓ 70% de sable de Falémé 0/6,3mm
- ✓ 15% de sol fin du pk 150
- ✓ 15% de sable de broyage 0/6mm
- ✓ 7,4% de bitume

Etude Hubbard-Field

Caractéristiques	6,8% de bitume	7,3% de bitume	7,7% de bitume
Compacité en %	88,5	89,5	88,7
HF à 18°C	5200	5466	5466
HF à 60°C	2033	2175	2175
HF 60°C/HF 18°C	0,39	0,40	0,40

Tableau : III.8 : Étude Hubbard-Field de la formule F'2

III.3.4 Trafic

La connaissance du trafic (lourds) intervient :

- comme critère de choix de matériau à mettre en œuvre.
- comme paramètre d'entrée pour l'analyse mécanique du comportement en fatigue de la structure de chaussée (cas des logiciels tel que ALIZÉ).

Les chaussées sont dimensionnées vis-à-vis du trafic poids lourds. Le dimensionnement se fait sur la base d'un nombre cumulé NE de passages d'essieux de référence, obtenu par conversion du trafic réel constitué de combinaisons variables de véhicules ayant des charges à l'essieu et des configurations d'essieux différentes. Le Sénégal a adopté une charge à l'essieu de 13 T (soit 130 KN). Le poids lourds étant tout véhicule ayant une charge utile supérieure ou égale à 5 tonnes. Il est admis un regroupement des trafics par classe, ainsi la classe T_i est déterminé à partir du trafic poids lourd par sens, compté en moyenne journalière annuelle (MJA), pour la voie la plus chargée, à l'année de mise en service.

Les classes de trafic sont données par les limites données par le tableau ci-dessous.

classe	T5		T4		T3		T2		T1		T0	
			T3-	T3+	T2-	T2+	T1-	T1+	T0-	T0+		
MJA	0	25	50	85	150	200	300	500	750	1200	2000	

Tableau III.9 : Définition des classes de trafic selon LCPC

En voici quelques définitions des termes couramment employés :

- trafic de transit: origine et destination en dehors de la zone étudiée
- trafic normal : On parle d'accroissement normal du trafic lorsque la croissance est due au développement économique de la région et non à des aménagements nouveaux.
- trafic induit : dû aux conditions nouvelles d'accessibilité, baisse de coûts, amélioration des conditions de vie.
- trafic dérivé : causé par une nouvelle construction.
- Circulation libre - circulation gênée : On parle de circulation libre par opposition à la circulation gênée lorsque la charge de la route est assez faible pour ne pas réagir pratiquement sur le volume qui l'emprunte.
- trafic d'échange: origine à l'intérieur de la zone étudiée et destination à l'extérieur de la zone d'échange et réciproquement (important pour définir les points d'échange).
- trafic local: trafic qui se déplace à l'intérieur de la zone étudiée.
- trafic moyen journalier annuel (T.M.J.A.) : égal au trafic total de l'année divisé par 365.
- unité de véhicule particulier (U.V.P.) exprimé par jour ou par heure, on tient compte de l'impact plus important de certains véhicules, en particulier les poids lourds en leur affectant un coefficient multiplicateur de deux.
- trafics aux heures de pointe, avec les heures de pointe du matin HPM, et les heures de pointe du soir HPS.

Dans la conception géométrique et la réalisation de la route Tamba-Kidira-Bakel il a été tenu compte d'un niveau de trafic T2+. Les résultats des comptages routiers en 2002 sur le tronçon Tamba-Kidira sont présentés en ANNEXE I

III.3.5 Déflexion

Les chaussées sollicitées par le trafic lourd réagissent d'une manière ou d'une autre face à ces sollicitations. L'aptitude à réagir face à ces sollicitations définie par sa capacité portante permet de modéliser l'évolution de la chaussée.

La déflexion reflète la réponse de tout le corps de chaussée aux sollicitations du trafic. De ce fait, elle constitue une caractéristique intrinsèque de la portance des chaussées.

Sur les chaussées souples (à assise non traitée) elle apporte une information pertinente pour juger de la capacité d'une chaussée à supporter le passage répété de poids lourds.

Plus la déflexion est élevée, moins la chaussée durerait sous un trafic de poids lourds donné et plus elle est faible plus la chaussée est apte à supporter le passage répété des poids lourds.

Le niveau de déflexion est un indicateur important du comportement de la chaussée. Il intervient par ailleurs pour:

- la détermination du trafic admissible de la chaussée existante et pour le dimensionnement des solutions de renforcement.
- la modélisation de la chaussée existante (avec le modèle HDM par exemple).

Mode opératoire :

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

Le déflectographe mesure la déformation verticale (déflexion) d'une chaussée sous l'essieu d'un poids lourds en mouvement à vitesse constante (environ 3Km/h). La déflexion est mesurée sur chaque jumelage de l'essieu arrière du véhicule par des bras palpeurs munis de capteurs rotatifs et articulés sur une poutre de référence. Cette poutre de référence, désolidarisée du véhicule, repose sur la chaussée par 3 (trois) points situés hors de la zone d'influence de la charge. Le véhicule avançant, on enregistre la déflexion jusqu'à ce que les jumelages viennent au niveau des palpeurs. La poutre de référence est alors prise en charge par le véhicule, ramenée vers l'avant, et reposée sur la chaussée dans sa position initiale vis-à-vis du véhicule, pour une nouvelle mesure, sans que le véhicule interrompe son mouvement.

La corrélation avec les mesures statiques de déflexion (au moyen de capteurs ancrés dans la chaussée) est très bonne, y compris pour les très faibles déformations de la chaussée.

La déflexion caractéristique d'un tronçon est la valeur de la déflexion qui n'a que 10 chances sur 100 d'être dépassée et se calcule par la formule suivante:

$$D_{90} = \text{Moyenne} + 1.29 \times \text{Ecart type}$$

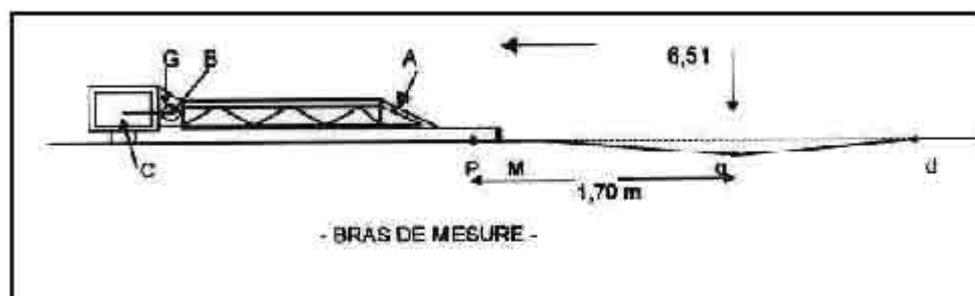


Figure III.3 : Poutre de Benkelman

S'agissant de la route Tamba-Kidira-Bakel, les mesures de déflexion ont été réalisées par SCI-lab. Les résultats sont présentés en ANNEXE II

III.3.6 UNI

L'uni (longitudinal) de chaussée est l'ensemble des irrégularités ou défauts de surface que va rencontrer un véhicule sur une chaussée lors de son roulage. La vitesse de parcours dépend fortement de l'état de surface de la route.

L'évaluation de la qualité d'uni repose sur un relevé du profil longitudinal de la chaussée au moyen de l'appareil de mesure LPC « Analyseur de Profil en Long » (APL) et d'une quantification de la qualité de l'uni. Le système APL -Analyseur de Profil en Long- permet la mesure en continu de l'uni longitudinal des chaussées routières et plus généralement de toute voie circulaire par des engins automobiles, quelles que soient la structure de la chaussée et la nature de son revêtement.

Le capteur est constitué d'une remorque reliée à un véhicule tracté par l'intermédiaire d'une articulation à cardans. Les défauts d'uni du profil sont traduits en signaux électriques par une double transformation.



Figure III.4 : Analyseur de Profil en Long

L'IRI : Indice de Rugosité International

L'uni, défini par l'IRI est exprimé en m/km. Il représente le mouvement vertical de la suspension d'un véhicule standardisé parcourant à 80 km/h le profil de la chaussée.

La chaussée à l'état neuf correspond à un niveau de service de 100% et un IRI de 2m/km et elle évolue jusqu'à son stade ultime correspondant à un niveau de service de 0% et un IRI de 12m/km.

Les mesures d'uni sont présentées en ANNEXE III

III.3.7 Climat : Pluviométrie, température

Les conditions climatiques interviennent dans le choix de la nature des liants hydrocarbonés.

Les conditions climatiques (abondance des précipitations et cycles saisonniers et valeurs extrêmes de températures) ont une influence sur la résistance, la durabilité et les caractéristiques de déformabilité des chaussées et des supports.

a. Pluviométrie :

Les conditions hydrologiques en liaison avec le profil géométrique et les dispositions de drainage ont une incidence importante sur l'état hydrique de la chaussée. La région de Tamba reçoit en moyenne environ 1000mm par an.

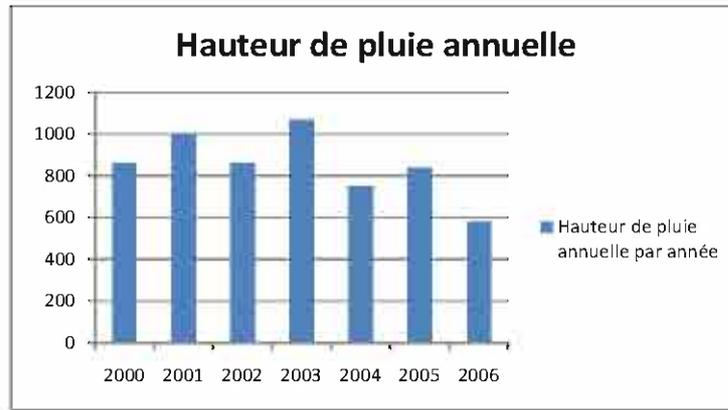


Figure III.5 : Évolution de la pluviométrie de 2000 à 2006

b. Température :

La température influe sur le comportement de la chaussée :

- en ce qu'elle affecte les caractéristiques mécaniques des matériaux bitumineux ;
- par la variation cyclique d'ouverture des fissures de retrait des matériaux traités aux liants hydrauliques ;
- par les déformations des matériaux traités aux liants hydrocarbonés dues aux gradients thermiques.

Comme pour le calcul de l'agressivité du trafic, le calcul de température équivalente se base sur une équivalence de dommages cumulés par la température.

Les écarts de température journaliers participent avec l'effet du trafic à la propagation des fissures à travers la couche bitumineuse.

Désignation	Janv,	Fév,	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil,	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Temp. Max	35,8	37,2	40,1	41,1	40,8	37,1	33,5	32,3	32,5	35,6	37,5	36,3
Temp. Min	17,8	20,6	22,8	25,2	25,9	24,9	23,4	22,8	22,4	23,1	20,0	19,1
Temps. Moy	26,8	28,9	31,5	33,2	33,3	30,1	28,4	27,6	27,6	29,3	28,8	27,6
Insolation en Heures	350,0	231,1	262,7	269,6	256,3	232,6	184,8	198,5	205,5	236,8	224,3	241,3

Tableau III.10 : Evolution des facteurs thermiques pour les 5 dernières années (2001 à 2006)

Source : station météorologique de Tambacounda

Conclusion partielle :

Ce chapitre traite de l'historique de la route TKB en passant par une présentation de l'ensemble des paramètres de sa conception géométrique et géotechnique, paramètres dont dépend essentiellement son comportement dans le temps. De surcroît, ces données de déflexion, de mesure d'UNI, de comptage de trafic et les données météorologiques recueillies permettront de mener une étude soutenue des dégradations de la route TKB, objet du prochain chapitre.

IV. ÉTUDE DE LA DEGRADATION DE LA ROUTE TAMBA-KIDIRA-BAKEL

Il est important d'accorder un intérêt capital à l'étude des dégradations en ce qu'elle permet d'évaluer leur ampleur, leurs causes et leurs évolutions. Elle permet en outre d'identifier les solutions applicables et de voir en fonction des impératifs, comment planifier les campagnes d'entretien.

IV.1. EXECUTION DES RELEVES

Les relevés ont été effectués dans la semaine du 7 au 13 avril 2008. La mission chargée de faire les relevés était composée en plus du rapporteur, du chef de la Division de la Programmation de l'AATR, du Directeur Général de SENELABO-BTP et du chef d'antenne AATR de Tambacounda.

Les relevés ont été effectués à trois niveaux :

1. identifications des secteurs à problèmes
2. identification et quantification des dégradations
3. prélèvement des carottes sur les zones identifiées

IV.1.1 Relevés visuels

Nous avons parcouru tout le tronçon de Tamba à Kidira et une partie de Kidira-Bakel pour effectuer les relevés visuels des dégradations. Pour chaque type de dégradation une évaluation de son amplitude et de son niveau de gravité est faite. Ce qui nous a permis d'identifier les différentes sections homogènes présentant les mêmes types de dégradation. Ces sections homogènes sont résumées et présentées en ANNEXES IV.

IV.1.2 Qualité de roulement (Constats et enquêtes)

Les observations faites sur l'état de la chaussée sont optimistes. La chaussées se comporte globalement bien, malgré le fait qu'il y a des zones où le faïençage a gagné du terrain, mais n'influence pas de manière significative le confort au roulement.

Les usagers de la route interpellés sur le niveau de confort de la route ont exprimé de manière générale leur satisfaction.

Leur seule inquiétude se situe au niveau du tracé. En effet ils estiment que les courbures (virages) sont trop abruptes et nombreuses ce qui pose un problème d'insécurité surtout lorsque les poids lourds stationnent sur les accotements.

L'analyse des données d'IRI obtenues à partir de la campagne de mesure d'uni effectuée par l'AATR en 2007 permettra de se prononcer plus amplement sur l'état de la route et de son niveau de confort.

IV.1.3 Identification des secteurs à problèmes

La route Tamba-Kidira-Bakel peut être subdivisée en cinq (5) zones :

- a. Zones saines (en bon état)
- b. Zones faïencées
- c. Zones fissurées
- d. Zones caractérisées par des ornières
- e. Zones réparées

L'ANNEXE IV.a dresse la liste et la localisation de chaque zone. Au vue des résultats des relevés visuels, les zones saines sont entrecoupées de zones dégradées, et les dégradations sont plus amplifiées sur le coté de la voie la plus chargée (celle qui mène vers Mali).

IV.1.4 Carottages

Les carottages sont très riches en information car ils renseignent sur l'état des couches bitumineuses, sur l'épaisseur, sur les interfaces (collage) et sur les fissures.

Le carottage est un essai qui consiste à découper et à extraire d'une chaussée un échantillon cylindrique, appelé carotte. Une simple observation visuelle permet de connaître la nature et l'état des matériaux.



Figure IV.1 : Carotteuse

L'implantation des carottes est fonction du problème identifié. Elle résulte donc d'une identification préalable des secteurs à problème. Elle prend en compte les dégradations visibles à la surface de la chaussée.

Le carottage comprend cinq parties après identification de la zone à carotter :

- La mise en place
- L'exécution du carottage proprement dit
- L'extraction de la carotte
- L'observation de la carotte et de la cavité
- Le rebouchage avec un matériau adéquat

Avec le concours de SENELABO, treize (13) carottages ont été exécutés sur les zones identifiées. Le tableau ci-dessus dresse la liste des carottes prélevées et des zones où ces carottes ont été extraites.

Carottes	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
PK	29+010	29+010	65+100	65+150	70+300	78+000	95+700
Description de la zone	zone faïencée	zone faïencée, carotte sur la fissure	zone saine, apparence sombre	zone saine, apparence claire	zone fissurée	zone saine, apparence claire	zone traitée au bicouche.

Carottes	C8	C9	C10	C11	C12	C13
PK	119+000	130+600	145+600	159+400	3+000	13+800
Description de la zone	zone saine	zone fissurée	zone traitée au bicouche.	Retraitement d'une zone traitée en 2006	zone saine	zone fissurée

Tableau IV.1 : Liste des carottes prélevées

IV.1.5 Essais de laboratoire :

Les carottes prélevées sur la route Tamba-Kidira-Bakel ont été acheminées au laboratoire de SENELABO-BTP pour effectuer des essais qui permettront de caractériser le sand asphalt et ses composants.

a) Degré de collage du revêtement à l'assise

Lors de la préparation de l'échantillon (enlèvement de la latérite collée à la couche de revêtement) pour la détermination de la densité apparente (D_a), il est effectué une appréciation visuelle de l'état du collage du revêtement à la couche de base. Cette appréciation plus ou moins subjective est basée sur la difficulté qu'il y a à décoller la latérite du revêtement lors de la préparation de l'échantillon à la détermination de la densité apparente. Nous déterminons par ailleurs l'épaisseur de revêtement en sand asphalt. Le tableau suivant résume les épaisseurs et le degré de collage de chaque carotte.

Carottes	Épaisseur sand asphalt (cm)	Degré de collage
C1	3	bon
C2	3	même zone que C1
C3	2,8	bon
C4	3	bon
C5	4	mauvais
C6	3,8	mauvais
C7	3,5	le collage n'est pas parfaitement uniforme - latérite crue
C8	4,5	bon
C9	3,7	bon
C10	3	très bon
C11	0	Revêtement en bicouche
C12	4	bon
C13	2	bon

Tableau IV.2 : Épaisseur de revêtement et degré de collage des carottes.

b) Densité apparente

Pour chaque carotte, nous déterminons sa densité apparente. La densité apparente permet en rapport avec la densité au laboratoire (obtenue lors de la conception du projet) de calculer la compacité et de faire une étude comparative par rapport aux spécifications des normes. La densité théorique est prise égale à $2,153 \text{ KN/m}^3$ (densité moyenne obtenue au laboratoire pendant la réalisation du chantier). Les densités apparentes obtenues sont du même ordre de grandeur.

Carottes	Densité apparente	Compacité (%)	Zone
C1	2,16	100,03	Fissurée
C3	2,12	98,47	Saine
C4	2,198	102,09	Saine
C5	2,11	98	Fissurée
C6	2,073	96,28	Saine
C7	2,115	98,23	Traitée
C8	2,115	98,23	Saine
C9	2,12	98,46	Fissurée
C10	2,119	98,42	Traitée

Tableau IV.3 : Densité apparente en fonction de la zone

Certaines zones ont une compacité supérieure à 100%, probablement due à un post compactage. Les zones identiques ne présentent pas la même compacité. Ceci peut avoir pour cause une différence au niveau du sable utilisé ou bien au niveau de la mise en œuvre.

c) Teneur en liant

Après détermination des épaisseurs et des D_a (densités apparentes), l'échantillon est mis à l'étuve pour un préchauffage avant l'extraction. L'extraction du bitume se fait au Kumagawa.

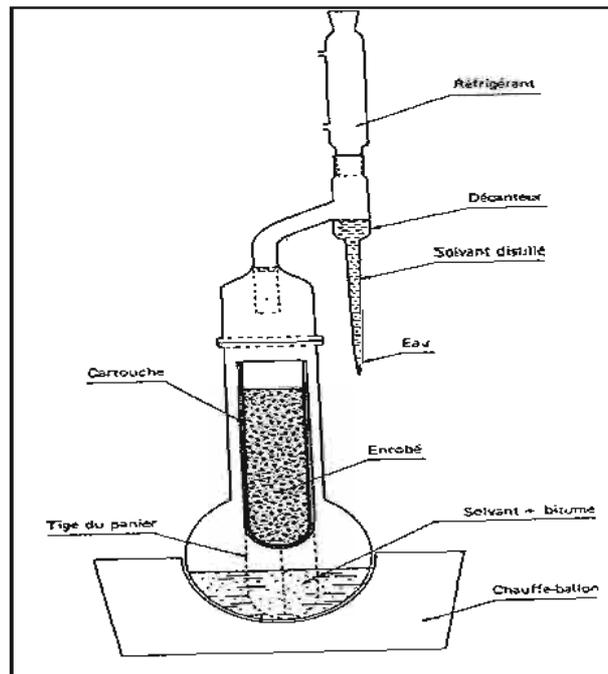


Figure IV.2 Appareil d'extraction de bitume : le Kumagawa

Après extraction, la teneur en bitume de la carotte est calculée par la formule suivante :

$$Teneur_en_bitume = \frac{masse_totale_de_l'enrobé - masse_des_grains_solides}{masse_totale_de_l'enrobé}$$

Les résultats sont les suivants :

Extraction de bitume : C8 , C6 , C4 et C3

Description : zones saines

Carottes	C3	C4	C6	C8	Moyenne
Teneur en bitume (en %)	6,7	7		7,2	6,96

Extraction de bitume : C7 et C10

Description : zones traitées

Carottes	C7	C10	Moyenne
Teneur en bitume (en %)	7,5	7,3	7,4

Extraction de bitume : C1 , C5 et C9

Description : zones fissurées

Carottes	C1	C5	C9	Moyenne
Teneur en bitume (en %)	5,9	6	6,5	6,03

La teneur en liant optimale était de 7,4 % ±0,4. Cette teneur doit avoir dépréciée après 8 ans de mise en service. Il ressort de ces résultats que les zones saines sont dans la plage définie dans les spécifications. Les zones traitées présentent une teneur en bitume élevée due probablement au liant d'accrochage de la nouvelle couche de roulement (le bicouche). Par contre les zones fissurées ont une teneur en bitume très faible, la moyenne est de 6,03%.

d) La granulométrie

Une analyse granulométrique est effectuée sur les grains solides récupérés après extraction du bitume. Cette analyse a permis de connaître la composition granulométrique de la carotte et par conséquent la formulation utilisée. Elle a permis en plus vérifier si la courbe granulométrique de l'échantillon rentre dans le fuseau proposés par Duriez. De surcroît, nous vérifions l'insertion des courbes granulométrique dans le fuseau des micro-bétons, car le model de sand asphalt utilisé est du type amélioré (D = 6 mm) qui est à cheval entre les sand asphalt et les micro-bétons.

Au vu des courbes granulométriques, présentées en ANNEXES V aucune des courbes granulométriques ne s'insère dans le fuseau de Duriez. Cependant elles s'insèrent tous partiellement dans le fuseau des micro-bétons. La courbe initiale de la formule F2 quant à elle, s'insère bien dans les deux fuseaux. Les proportions de grains de tailles inférieures à 0,3 mm ne s'insèrent dans aucun des fuseaux et pour toutes les courbes.

e) La pénétrabilité

Le bitume obtenu par extraction est séché (évaporation du solvant) à l'air libre puis étuvés. Ensuite on procède aux essais de pénétrabilités pour déterminer la classe du bitume. Les tableaux ci-dessous donnent les teneurs en bitume.

Extraction de bitume : C8 + C6 + C4 + C3

Description : zones saines

Échantillon	Pénétrabilité (en dixième de mm)	Moyenne
N°1	49	47,7
N°2	46	
N°3	48	

Ce bitume appartient à la classe des 40/50.

Extraction de bitume : C7 + C10

Description : zones traitées

Échantillon	Pénétrabilité (en dixième de mm)	Moyenne
N°1	55	53,7
N°2	52	
N°3	54	

Ce bitume n'est pas de la classe des 40/50 mais s'apparente au 50/70.

Extraction de bitume : C1 + C5 + C9

Description : zones fissurées

Échantillon	Pénétrabilité (en dixième de mm)	Moyenne
N°1	49	50,0
N°2	51	
N°3	50	

À l'instar de celui obtenu dans les zones traitées, le bitume extrait des zones fissurées présente une pénétrabilité qui fait référence à la classe des 50/70.

IV.2. ANALYSE DES DIFFERENTES DONNÉES COLLECTÉES

IV.2.1 Trafic

L'action répétée des poids lourds sur la chaussée fait apparaître quatre types de dommages :

- une usure superficielle de la couche de roulement due aux efforts tangentiels;
- la formation d'ornières par fluage des couches liées, sous l'effet des contraintes verticales et des efforts tangentiels;
- une fatigue des couches, provoquée par leur flexion sous l'effet des charges;
- une accumulation des déformations permanentes au niveau du support ou des couches males (voir non) liées.

Le nombre de poids lourds cumulés sur une période donnée (d) avec un taux d'accroissement du trafic t est donnée par :

$$N = 365 \times T \times C$$

Avec T : trafic en MJA à l'année de mise en service sur la voie la plus chargée,

$$C = d + t \times d \times (d-1) / 2$$

Avec d : durée de dimensionnement initiale de la chaussée (15ans)

Et t : taux de croissance linéaire annuelle du trafic lourd.

Le trafic lourd étant de composition variable, la conversion de tout ce trafic en un trafic équivalent devient plus que nécessaire en vue d'une étude plus objective des effets du trafic sur le comportement de la chaussée.

$$NE = CAM \times N \quad \text{où}$$

NE = Nombre équivalent d'essieux standards de référence de 130kN et dont le CAM est le coefficient d'agressivité moyen.

L'agressivité moyenne du trafic :

La valeur du CAM dépend de :

- La composition du trafic
- La configuration des essieux (isolé, tandem, tridem)
- Le type de roues (simples ou jumelées)
- La charge des essieux
- Des matériaux constituant la structure

L'agressivité moyenne est donnée par :

$$A = K \times (P / P_0)^\alpha$$

P = poids de l'essieu en KN

P₀ = poids de l'essieu de référence

α = exposant en relation avec la pente des courbes de fatigue des matériaux (α = 6).

K = coefficient de configuration des essieux

Au Sénégal, le poids de l'essieu de référence (P₀) est pris égal à 130 KN soit 13 Tonnes.

Au sujet des chaussées avec couche de base en sol – ciment, du fait que leur comportement s'apparente plus aux chaussées de type souple qu'aux chaussées de type semi-rigide, la tendance actuelle est de limiter l'exposant α entre 4 et 6. Dans le cas notre étude, nous attribuerons à l'exposant α la valeur de 6 comme il est préconisé aussi par le « manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux » du CEBTP.

La charge maximum admise à l'essieu pour les 4 silhouettes poids – lourd de référence est synthétisée sur le tableau suivant :

SILHOUETTE	Poids KN	Répartition par essieu (KN)				Répartition %			
		60	90			40,0	60,0		
Bus - Autocar 2E (S+S)	150	60	90			40,0	60,0		
Camion 2 E (S+S)	190	60	130			31,6	68,4		
Camion 3 E (S+Tn)	240	60	90	90		25,0	37,5	37,5	
Semi-articulé 2 S 3 (S+S+Td)	420	60	120	80	80	14,3	28,6	19,0	19,0

Tableau : IV.4 : Silhouette de véhicules lourds [17]

Et les coefficients d'agressivité sont pour les différentes silhouettes :

SILHOUETTE	CAM $\alpha = 6$
Bus - Autocar 2E (S+S)	0,34
Camion 2 E (S+S)	3,39
Camion 3 E (S+Tn)	0,76
Semi-articulé 2 S 3 (S+S+Td)	2,86

Tableau : IV.5 : Coefficient d'agressivité de quelques silhouettes d'après la campagne de pesage sur l'axe Kaolack-Nioro [17]

Nous supposons un accroissement normal de 4% de 2000 à 2002. Et de 2002 à 2007. Et à partir de 2002, l'accroissement est calculé sur la base des résultats de comptage de 2002 et de 2007.

Il s'obtient : $423(1+x/100)^5 = 583$

Il vient alors $x = 6,62\%$ qui est le **taux d'accroissement entre 2002 et 2007**.

AXE		Tamba - Kidira			
Classes véhicules		Bus	2 essieux	3 essieux	Semi rem.
TMJA 2002 voie la plus chargée		39	40	9	53
CAM $\alpha = 6$		0,39	3,39	0,76	2,86
Essieux équivalents 2004		5 552	49 494	2 497	55 327
Mode de transport		Passagers	Marchandises		
Cumul essieux équiv 2004		5 552	107 317		
Mode de transport		Passagers		Marchandises	
Année	Période d'analyse	Essieux éq	Croissance	Essieux éq	Croissance
2 000	An n°0	5 133	0,04	99 221	0,04
2 001	An n°1	5 338	0,04	103 190	0,04
2002 (comptage)	An n°2	5 552	0,04	107 317	0,04
2 003	An n°3	5 919	0,0662	114 422	0,0662
2 004	An n°4	6 311	0,0662	121 996	0,0662
2 005	An n°5	6 729	0,0662	130 073	0,0662
2 006	An n°6	7 174	0,0662	138 683	0,0662
2 007	An n°7	7 649	0,0662	147 864	0,0662
Essieux équiv. 2000-2007		1 012 571			

Tableau : IV.6 : Le nombre d'essieux équivalent de 2000 à 2007

On obtient alors $NE_{2007} = 1,01 \cdot 10^6$ essieux équivalents de 130 KN.

Le nombre de poids lourds équivalent à un essieu de 13 tonne pour la durée de vie de la chaussée (15 ans) est de :

Trafic réel					
AXE		Tamba - Kidira			
Classes véhicules		Bus	2 essieux	3 essieux	Semi rem.
TMJA 2002 voie la plus chargée		39	40	9	53
CAM $\alpha = 6$		0,39	3,39	0,76	2,86
Essieux équivalents 2004		5 552	49 494	2 497	55 327
Mode de transport		Passagers		Marchandises	
Cumul essieux équiv 2004		5 552	107 317		
Mode de transport		Passagers		Marchandises	
Année	Période d'analyse	Essieux éq	Croissance	Essieux éq	Croissance
2 000	An n°0	5 133	0,04	99 221	0,04
2 001	An n°1	5 338	0,04	103 190	0,04
2002 (comptage)	An n°2		0,04		107 317
2 003	An n°3	5 919	0,0662	114 422	0,0662
2 004	An n°4	6 311	0,0662	121 996	0,0662
2 005	An n°5	6 729	0,0662	130 073	0,0662
2 006	An n°6	7 174	0,0662	138 683	0,0662
2007 (comptage)	An n°7	7 649	0,0662	147 864	0,0662
2 008	An n°8	8 156	0,0662	157 653	0,0662
2 009	An n°9	8 695	0,0662	168 089	0,0662
2 010	An n°10	9 271	0,0662	179 217	0,0662
2 011	An n°11	9 885	0,0662	191 081	0,0662
2 012	An n°12	10 539	0,0662	203 731	0,0662
2 013	An n°13	11 237	0,0662	217 218	0,0662
2 014	An n°14	11 981	0,0662	231 598	0,0662
2 015	An n°15	12 774	0,0662	246 929	0,0662
Essieux équiv. 2000-2015		2 690 625			

Tableau : IV.7 : NE calculé avec le trafic réel

$N_{15} = 2,69 \cdot 10^6$ essieux équivalents de 130 KN.

Trafic avec hypothèses initiales					
AXE		Tamba - Kidira			
Classes véhicules		Bus	2 essieux	3 essieux	Semi rem.
TMJA 2002 voie la plus chargée		39	40	9	53
CAM $\alpha = 6$		0,39	3,39	0,76	2,86
Essieux équivalents 2004		5 552	49 494	2 497	55 327
Mode de transport		Passagers		Marchandises	
Cumul essieux équiv 2004		5 552	107 317		
Mode de transport		Passagers		Marchandises	
Année	Période d'analyse	Essieux éq	Croissance	Essieux éq	Croissance
2 000	An n°0	5 133	0,04	99 221	0,04
2 001	An n°1	5 338	0,04	103 190	0,04
2002 (comptage)	An n°2		0,04		107 317
2 003	An n°3	5 774	0,04	111 610	0,04
2 004	An n°4	6 005	0,04	116 074	0,04
2 005	An n°5	6 245	0,04	120 717	0,04
2 006	An n°6	6 495	0,04	125 546	0,04
2007 (comptage)	An n°7	6 754	0,04	130 568	0,04
2 008	An n°8	7 025	0,04	135 791	0,04
2 009	An n°9	7 306	0,04	141 222	0,04
2 010	An n°10	7 598	0,04	146 871	0,04
2 011	An n°11	7 902	0,04	152 746	0,04
2 012	An n°12	8 218	0,04	158 856	0,04
2 013	An n°13	8 547	0,04	165 210	0,04
2 014	An n°14	8 888	0,04	171 818	0,04
2 015	An n°15	9 244	0,04	178 691	0,04
Essieux équiv. 2000-2015		2 277 470			

Tableau : IV.8 : NE calculé avec les hypothèses de trafic initial.

$N_{15} = 2,28. 10^6$ équivalents de poids lourds

Vérification :

Le module de rigidité de calcul sera évalué avec la formule $E(MPa) = 5 \times CBR$.

La vérification du sol support définie par la condition $\sigma_z < \sigma_{z,adm}$

Avec $\sigma_{z,adm}(mm) = A \times (NE)^{-0.222}$ où A est un coefficient qui dépend du trafic.

Dans le cas d'espèce (trafic T2+), nous avons A = 0.012.

On vérifie également si la contrainte verticale σ_z ne dépasse pas la contrainte admissible $\sigma_{z,adm}$. Elle est calculée avec la formule de Kerkoven et Dormon.

$$\sigma_{z,adm} = \frac{0,3x CBR}{1 + 0,7 \log NE} \text{ en bars}$$

Et la contrainte horizontale de la couche de latérite-ciment devra vérifier $\sigma_t < \sigma_{t,ad}$.

La contrainte horizontale admissible est définie par :

$$\sigma_{t,ad} (\text{bars}) = \sigma_6 \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b k_r k_d k_c k_s$$

Où $\sigma_6 = 0,75$ MPa, $b = -1/15$, $K_r = 10^{-ub\delta} = 1$ pour un risque de 50% ($u=0$), $K_d = 1$ (grave-ciment), $K_c = 1,4$ et $K_s = 1$ ($E \geq 120$ MPa)

Applications Numériques :

À 15ans : NE = 2,69 millions

- $\varepsilon_{z,adm} = 448,5 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$
- $\sigma_{z,adm} = 1,31$ bars (plateforme en sable limoneux)
- $\sigma_{t,adm} = 0,983$ MPa

À 7ans : NE = 1,012 millions

- $\varepsilon_{z,adm} = 557,2 \cdot 10^{-6} \mu\text{m}$
- $\sigma_{z,adm} = 1,384$ bars (plateforme en sable limoneux)
- $\sigma_{t,adm} = 0,983$ MPa

Dans le cadre d'une chaussée avec assise en grave ciment, la vérification doit porter essentiellement sur deux conditions :

- $\varepsilon_z < \varepsilon_{z,adm}$
- $\sigma_z < \sigma_{z,adm}$

IV.2.2 Déflexion

On élabore les résultats statistiquement suivant la méthode proposée par AASHTO, dite « des surfaces équivalentes », pour déterminer les sections avec capacité de support résiduelle homogène. Pour chaque section homogène on calcule la déflexion moyenne (D_m), l'écart type (σ).

La déflexion caractéristique est la valeur qui a 10 % de chance d'être dépassée. Elle est donnée par :

$$(D_{90} = D_m + 1,282 \times \sigma)$$

et le coefficient de variation est :

$$CV = 100 \times \sigma / D_m$$

Le coefficient de variation représente le niveau d'homogénéité des valeurs à l'intérieur d'une même section :

CV = 15	bonne homogénéité
CV = 30	homogénéité moyenne
CV = 45	inhomogénéité

Pour tout le tronçon : de Tamba à Kidira

Moyenne D_m	37,79
Ecart type	14,43
Déflexion caractéristique D_c	56,29
Coefficient de variation	38,18

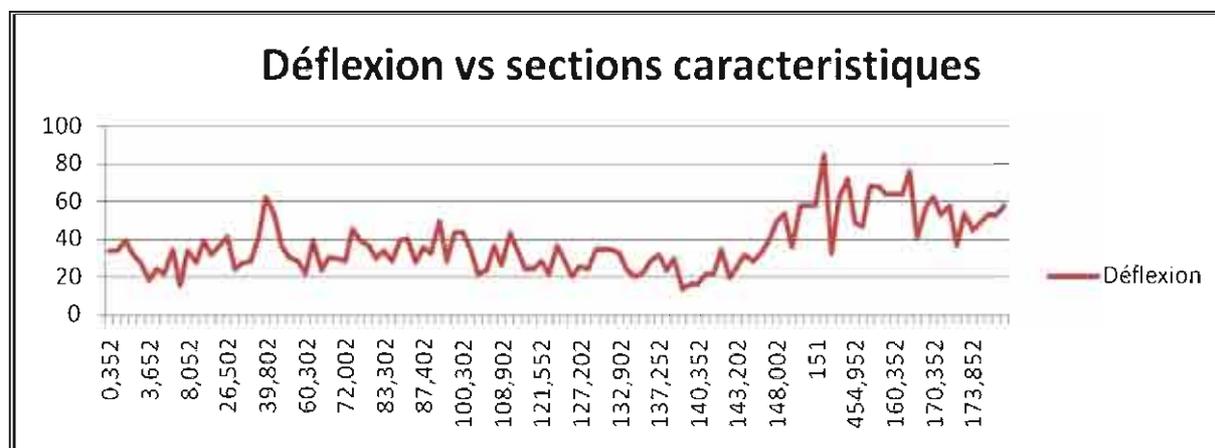


Figure IV.3 : Résultats des mesures de déflexion entre Tamba et Kidira

Pour la présente étude, il a été établi des seuils de déflexion. Le seuil bas de la déflexion est la valeur en dessous de laquelle il existe de très fortes présomptions pour que la chaussée ait un bon comportement mécanique. Ce seuil correspond à une valeur de 60 (centièmes de mm).

Le seuil haut de déflexion correspond à une valeur au-dessus de laquelle la chaussée présente une faiblesse mécanique, c'est-à-dire que leur dimensionnement n'est pas adapté au trafic qu'elle doit supporter. Cela signifie que la chaussée est vulnérable du point de vue du fonctionnement mécanique. La valeur suivante a été retenue à savoir 80 centièmes de mm (elle est de 100 pour les routes de trafic T2 selon le Manuel pour le Renforcement des Chaussées Souples en Pays Tropicaux du CEBTP-LCPC).

La déflexion moyenne sur l'ensemble du tracé est égale à 37,79 centièmes de mm et la déflexion caractéristique (D_c ou bien D_{90}) est de 56,29 centièmes de mm et le coefficient de variation est égal à 38,18 %.

Les sections ayant les valeurs de déflexion les plus élevées se situent entre le PK 150 et Kidira avec un pic de 80 centièmes de mm obtenu entre le PK 152+502 et le PK 152+952. Les valeurs de déflexion supérieures à 80 montrent l'état de fatigue de la chaussée sur le tronçon concerné, et son incapacité à supporter encore un trafic lourd. Ces tronçons correspondent à des sections qui ont fait l'objet de réparation en 2006 et en 2007 et des ressuyages ont été observés sur cette zone.

Partout ailleurs la déflexion est faible et avoisine les 30 centièmes de mm. Ce qui montre le niveau de qualité de la chaussée en termes de capacité portante sur une bonne partie de la route de Tamba à Kidira.

IV.2.3 L'IRI

Les différents relevés ont été élaborés statistiquement pour obtenir les paramètres suivants :

- la valeur moyenne (X_m),
- l'écart type (σ),
- et la valeur caractéristique à 90 % de probabilité.

$$(X_{90} = X_m + 1,282 \times \sigma)$$

Les calculs ont permis d'avoir les valeurs suivantes :

$$X_m = 2,74$$

$$\sigma = 0,315$$

$$X_{90} = 3,14$$

NB : Ces valeurs concernent tout le tronçon de Tamba à Kidira.

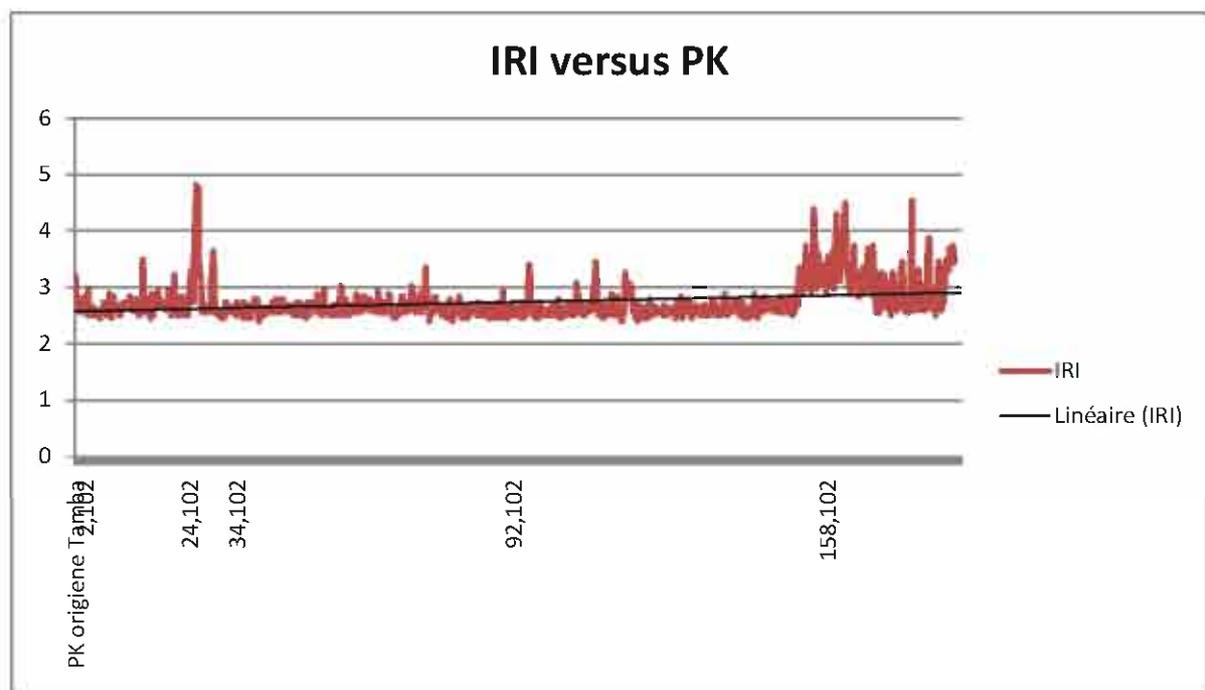


Figure IV.4 : Résultat des mesures d'IRI de Tamba à Kidira

L'uni a été estimé en adoptant les valeurs suivantes suggérées par HDM :

Qualité de la chaussée	Valeur de l'IRI pour route revêtue
Surface lisse	2
Surface raisonnablement lisse	4
Surface moyennement lisse	6
Surface rugueuse	8
Surface très rugueuse	13

Tableau : IV.9 : Valeur de l'Uni (en IRI)

Nous avons eu 43 sections homogènes. Parmi ces quarante trois (43) sections, quatorze (14) ont une valeur d'IRI correspond à X_{90} qui sont supérieures à 3 et seulement deux (2) ont une valeur de X_{90} supérieure à 4.

La valeur maximale d'uni est de 4,81. Les valeurs extrêmes constatées correspondent à des zones traitées au bicouche et sont très proches de Kidira (du PK 150 à Kidira), zone où les interventions de resurfaçage sont très consistantes. Partout ailleurs les valeurs d'uni sont voisines de 2,6. Ce qui montre la qualité du revêtement en termes d'uni longitudinal.

Si l'on compare ces valeurs à celles obtenues dans le cas d'un revêtement en bicouche d'une manière générale, on voit que celles-ci (pour le cas du sand asphalt) sont très faibles et donne plus de confort aux usagers. Ces constatations faites sont en phase avec les appréciations des usagers de la route.

Le modèle HDM4 propose les solutions suivantes vis-à-vis des normes appliquées selon les valeurs de l'IRI (indice de rugosité):

- Entretien courant de chaussée quand $IRI < \text{ou} = 6$
- Entretien Périodique quand $IRI > 6$
- Renforcement quand $IRI = \text{ou} > 10$
- Réhabilitation quand $IRI = \text{ou} > 13$

Puisqu'aucune des valeurs ne dépassent 6 cm/km, l'entretien courant de la chaussée pourra être effectué si toute fois des solutions optimales concourent vers celui-ci.

Encore une fois ces valeurs d'uni montrent le niveau de confort de la chaussée après 8 ans de mise en service et après des opérations de resurfaçage effectuées sur de ces certains tronçons.

IV.2.4 Données géotechniques

La route Tamba-Kidira-Bakel a été construite sur les traces d'une piste existante qui reliait Tamba à la frontière malienne. Elle a été réajustée par endroit afin de se conformer aux spécifications sur les rayons de courbure minima. La plateforme est soit en graveleux latéritique reposant sur un sol d'assise de sables fins généralement argileux, soit de sable fins argileux. Il y a une prédominance de graveleux latéritique sur des longueurs homogènes de profondeurs allant de 20 à 70 cm. Le grave latéritique est un sol grenu de classe A2-4 et A2-6 et a un CBR après 96H d'immersion compris entre 23 et 98 (moyenne de 40) et repose sur un sol d'assise en sols fins de classe A4, A6, A7-6 avec un CBR après 96H d'immersion compris entre 12 et 44 (moyenne de 24). La latérite crue utilisée en remblai est de qualité moyenne à médiocre avec des portances CBR se situant entre 20 et 50. La densité maximale moyenne obtenue vaut $2,08 \text{ t/m}^3$ avec une teneur en eau optimale moyenne de 8,20%.

La couche de base est améliorée au ciment à 3% maximum, elle porte sur 15 cm d'épaisseur. Son CBR est compris entre 50 et 80. La densité sèche maximale obtenue est comprise entre $2,11$ et $2,29 \text{ t/m}^3$.

La couche de fondation en latérite crue a 15 cm d'épaisseur. La latérite est soit du type graveleuse, soit quartzitique, soit graveleuse gréseuse. La plage de variation des indices portants CBR est de 39 à 75 avec une moyenne de 57. La densité sèche maximale moyenne est de $2,28 \text{ t/m}^3$ avec une teneur en eau de 7,5%. Les caractéristiques des différentes couches sont résumés dans le tableau suivant :

COUCHE	MATERIAU	MODULE (MPa)	Coeff. de Poisson
REVETEMENT (3,5 cm)	Sand asphalt	-	0,45
COUCHE DE BASE (15 cm)	Latérite amélioré au ciment	400	0,25
FONDATION (15 cm)	Latérite CBR > 30	250	0,35
SOL-SUPPORT (option 1 : base existante)	Latérite CBR > 30	250	0,35
SOL-SUPPORT (option 2)	Sable limoneux CBR = 24	120 (E = 5 x CBR)	0,35

Tableau : IV.10 : Caractéristiques des différentes couches de la structure type.

Les simulations avec ALIZÉ se feront sur la base du tableau précédent.

IV.2.5 Données climatiques

Avec le climat qui prédomine dans cette région du Sénégal, les chaussées à revêtement bitumineux sont soumises à des chaleurs éprouvantes (Température moyenne maximale entre 40 et 42 degrés Celsius). Ce qui a un effet non négligeable sur la tenue de la chaussée devant un trafic lourd de plus en plus important.

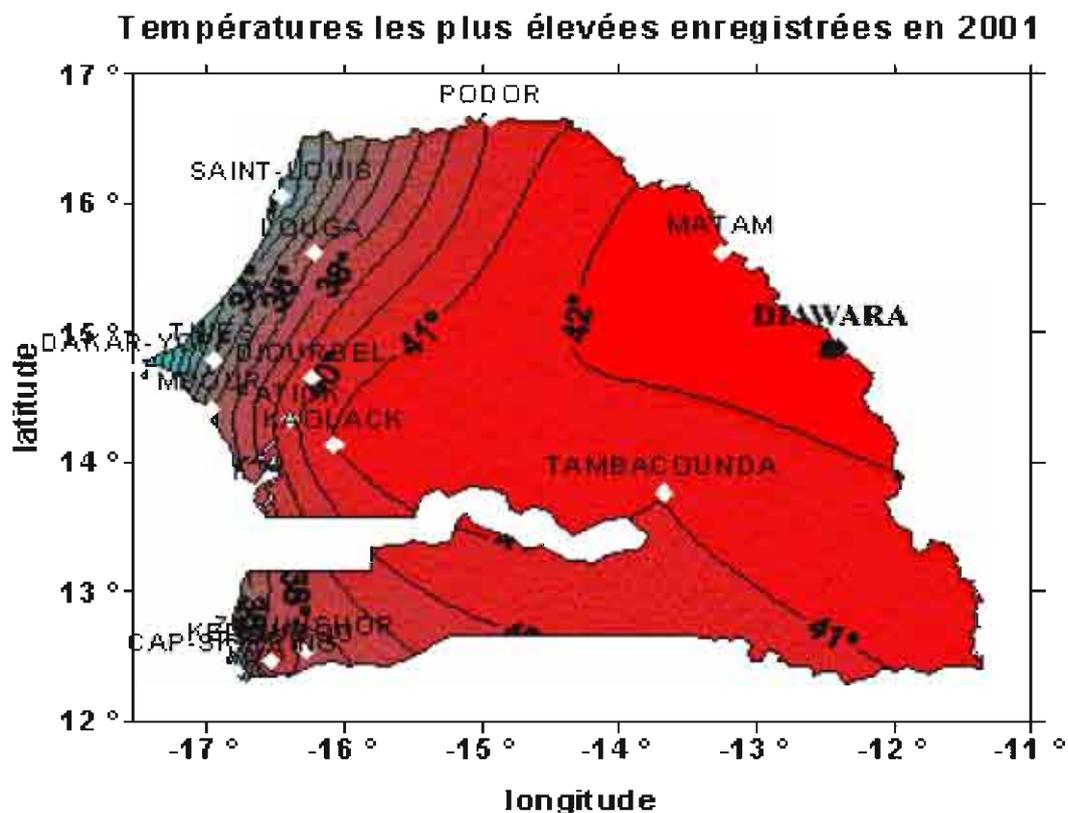


Figure : IV.5 : cours général des isothermes

La température influe sur le module des enrobés hydrocarbonés (cf. Figure VI.11). Ce dernier est inversement proportionnel à la température. Une augmentation de la température a pour conséquence une chute de résistance et l'amplification de la déformation avec le trafic.

IV.3. INVENTAIRE DES DEGRADATIONS

Les dégradations peuvent être regroupées dans l'ordre décroissant selon leur ampleur :

IV.3.1 Les fissurations :

- Fissurations longitudinales et transversales
- Fissuration à grandes mailles
- Fissurations fines

○ faïençages

Les fissurations peuvent être d'origines diverses. Quant au faïençage, il témoigne d'un état de fatigue intense du revêtement bitumineux. En effet le revêtement bitumineux, soumis à des cycles de flexion et de traction excessifs sous trafic, se fissure en blocs, forme un réseau d'écailles plus ou moins dense.

Le vieillissement du bitume peut contribuer à accentuer le phénomène en augmentant la rigidité du revêtement bitumineux et diminuer ainsi sa flexibilité sous le passage des charges.



Figure IV.6 : Évolution de la dégradation d'une simple fissure vers un faïençage en passant par un maillage serré.

IV.3.2 Les ornières :

Les ornières ont un rayon inférieur à 1 m et des profondeurs variables dépassant rarement les 3 cm. Elles sont localisées du côté de la voie la plus chargée et elles portent sur 11,5 km. Elles sont canalisées sur les bandes des roues des véhicules très chargés allant vers le Mali.

Elles montrent l'effet du trafic sur le revêtement bitumineux, car le fait qu'elles soient localisées dans la voie la plus chargée en constitue la preuve la plus évidente.

L'orniérage apparaît au niveau des traces des roues, à moins d'un mètre du bord de la couche de roulement. Il est souvent associé à une fissuration en faïençage. La faiblesse des dénivelés prouve que ces déformations sont dues essentiellement à la déformation du revêtement sous trafic canalisé, et nous ne pouvons pas incriminer l'assise ou du sol-support à ce sujet.



Figure IV.7: Fissures longitudinales sur ornières créées sur les traces des roues

IV.3.3 Les nids de poule

On assiste fréquemment à la dégradation prématurée des chaussées avec couche de base en sol-ciment et revêtement mince. Ce type de chaussée périt par fatigue à cause des cycles de flexion répétés transmis par le trafic. A moyen terme les contraintes tangentielles transmises par les charges roulantes entraînent la désorganisation du sommet de la base stabilisée au ciment ayant comme conséquence l'arrachement du revêtement mince et la formation de nids de poule.

Les nids de poules constituent un stade terminal atteint par les fissures qui passent de fissures à grand mailles à un faïençage. Au stade de faïençage il y a arrachement de plaques de revêtement et un début de développement de nids de poule.

Ce sont des dégradations localisées, et des opérations de bouchage ont déjà été effectuées sur certaines zones notamment sur la zone allant du PK 150 à Kidira. Ils n'occupent pas une place importante en termes de superficie sur la dégradation de la route d'une manière générale.

IV.3.4 Les épaufrures

Localisées sur les zones où la largeur de la chaussée est faible (axe Kidira-Bakel) et sur les virages plus ou moins serrés. Elles portent rarement sur une longueur supérieure à 500 m.

IV.3.5 Les ressuges

Les parties où le revêtement a le plus ressue ne concernent pas le sand asphalt. Et les rares cas où c'est le sand asphalt qui a ressue, ces ressuges sont ponctuels et pourraient s'agir d'une trainée de liant sur le revêtement.



Figure IV.8 : Ressuage

IV.4. STATISTIQUE DES DEGRADATIONS

Il est difficile de parler statistiquement en termes de pourcentage représentatif de chaque type de dégradations sur un tronçon d'un km car les dégradations sont dans la plupart des cas regroupées sur des zones où l'on ne retrouve qu'un seul type de dégradation. Donc il est plus judicieux de parler de tronçons homologues. Sur ce, nous établissons les statistiques basés sur les relevés visuels portant sur toute la route Tamba-Kidira-Bakel.

Le linéaire total inspecté = 191km

Caractéristiques	kilométrage	Pourcentage représentatif
Zones saines (en bon état)	115	60 %
Fissurations	32,4	17 %
Ornières	11,5	6 %
Épaufrures	0,400	< 1 %
Ressuage	0,400	<1 %
Traitement bicouche	31,2	16,3 %

Tableau : VI.11 : Statistiques des dégradations

Le constat est que les zones saines représentent 60 %. Les zones de fissuration très fines de moindre importance sont considérées comme faisant partie des zones saines.

Les zones fissurées viennent en seconde position après les zones saines. Les traitements opérés en 2006 et en 2007 ont été faits sur des zones qui atteignent un niveau de dégradation très avancées. Elles viennent en troisième position avec une proportion de 31,2%.

IV.5. DEBUT D'APPARITION DES DEGRADATIONS (ENQUETES)

Certaines fissures ont apparu avant même la fin la construction de la route. D'après le rapport final de la mission de contrôle la bretelle de l'aérodrome de Bakel a été refaite en bicouche « *après avoir constaté que par défaut de circulation le sand asphalt commencé à se fissurer* ».

Les fissurations du revêtement ont suivi sa mise en service. Elles ont évolué dans les premières années jusqu'à atteindre un niveau inquiétant en 2005.

C'est en 2006 que la première intervention d'entretien a eu lieu et avait pour but de réparer les tronçons défectueux. Ces réparations portaient sur des zones faïencées et sur des nids de poule.

IV.6. ÉVOLUTION DES DEGRADATIONS

Les dégradations commencent dans la plupart des cas par des fissures et de ornières. Les fissurations sont souvent désordonnées (longitudinales, transversales, maillage à grand rayon...). Elles évoluent tous vers un faïencage localisé qui se généralise par la suite sur certains tronçons (cf. Figure IV.6 page 88). Dès lors, des plaques se forment et avec l'effet du trafic il y a arrachement. C'est là, le point de départ de la formation des nids de poules. Sous l'effet conjugué du trafic et du climat, ces derniers évoluent en augmentant de diamètre. Ils constituent des zones de faiblesses où l'eau a tendance à stagner et à s'infiltrer puis attaquer la structure, pouvant entraîner une chute de portance. D'où une destruction de la chaussée à la longue.

IV.7. CAUSES PROBABLES DES DEGRADATIONS

IV.7.1 Conception

L'objectif dans ce qui suit est de voir pour chaque paramètre entrant dans la conception son effet soit direct soit indirect sur les dégradations constatées.

a) Choix du bitume

Le bitume 40/50 est le bitume le plus dur de la famille des bitumes semi-durs. Son choix se justifiait par les conditions climatiques de la zone du projet. Il a été substitué au bitume 50/70 qui est un bitume à cheval entre le 40/50 et le 60/70, donc plus mou que le 40/50 et plus dur que le 60/70. [2]

La mise en œuvre du 40/50 est difficile car demande beaucoup plus d'énergie pour le chauffage et il refroidit encore plus vite alors que le 50/70 l'est un peu moins. L'autoréparation, paramètre intrinsèque des bitumes n'est plus assurée donc les fissurations de retrait (causées par le départ des fluidifiants) seront irréversibles. À cause de leur finesse, les grains (<6mm) ne s'opposent pas au développement de ces fissures.

Par défaut de circulation également les revêtements en bitume 40/50 se fissurent plus vite.

Le compromis qu'on a essayé de trouver entre les conditions climatiques et les qualités intrinsèques du bitume trouve sa justification dans le comportement du revêtement en sand asphalt et celui des réparations effectuées en bicouche. En effet sur le bicouche, les dégradations sont encore plus importantes (ressuage, pelade, peignage etc.) à tel enseigne que des réparations ont encore été effectuées en 2007 sur celles de 2006.

Le bitume obtenu par extraction sur les carottes a les caractéristiques suivantes :

- Zones saines 47,6 (dixièmes de mm)
- Zones fissurées : 50 (dixièmes de mm)
- Zones traitées : 54 dixièmes de mm)

Conclusion : le bitume le plus dur est obtenu sur les zones saines.

Le bitume, après 8 ans de mise en service devrait perdre une classe. Cela, à cause du vieillissement.

Le bitume extrait des zones saines a conservé sa classe (40/50), quant aux bitumes des zones fissurées et des zones traitées, ils sortent de la classe des bitumes semi-durs 40/50. Et, ils s'apparentent plus à la classe 50/70.

b) Qualité du matériau : sable et bitumes

Il faut rappeler l'hétérogénéité de l'emprunt qui constitue un des problèmes majeurs des sables naturels. Certaines poches sont de qualité médiocre par rapport à d'autre.

Ci-dessous une illustration de médiocrité de matériaux d'emprunt. Le revêtement laisse apparaître des mottes qui sous l'effet du trafic se détachent et donne naissance à des nids de poules.



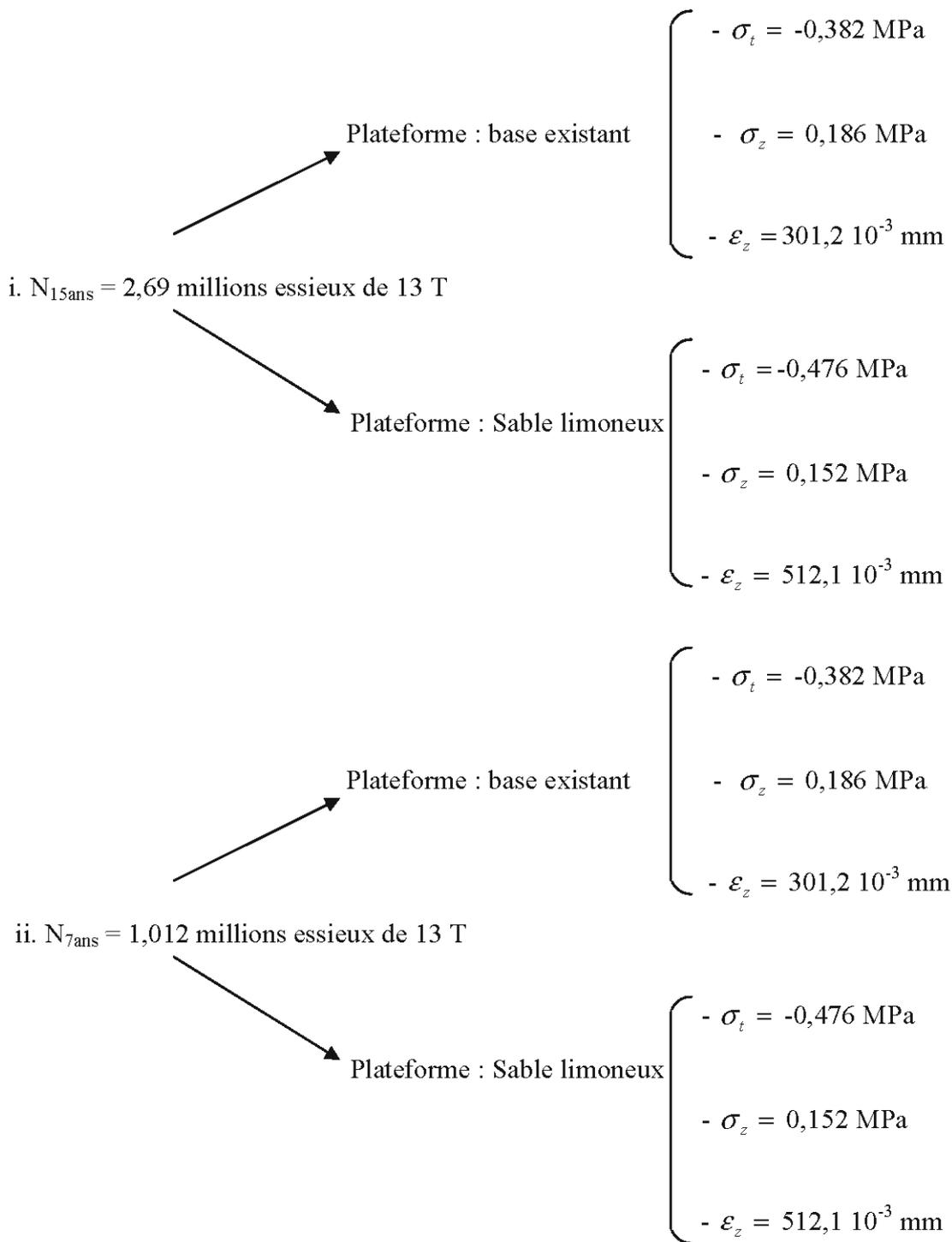
Figure IV.9 : Mottes sur le revêtement en sand asphalt

L'alternance de zones saines d'apparence claire qui présentent une bonne tenue et des zones sombres souvent dégradées, et théoriquement pour les mêmes teneurs en bitume, montre l'effet de la composition granulométrique voir minéralogique sur la qualité du revêtement en sand asphalt. Par moment il a été utilisé du granulat de qualité meilleure, vu les tronçons de qualité très marquants rencontrés sur la route entre Tamba et Kidira. Et, par moment également du sable de qualité médiocre a été utilisé.

c) Trafic

Les dégradations sont plus accentuées sur la voies la plus chargée (VPC), à tel enseigne que par endroit, des opérations de traitement ont été effectuées sur celle-ci et non sur la voie adjacente. Des ornières ont été notées sur les traces des véhicules coté VPC. Cela montre l'effet du trafic sur la chaussée. Le taux d'accroissement du trafic est passé de 4% à 6,62% après les événements de septembre 2002 en Côte d'Ivoire. Ce trafic induit composé essentiellement de poids de lourds en partance du Mali, augmente l'agressivité du trafic. D'où une augmentation de l'endommagement sous trafic, et l'apparition de nouvelles dégradations telles que les ornières.

Une simulation avec le logiciel ALIZÉ 4 a été faite afin de voir le comportement de la chaussée à l'état actuel ainsi que vers la fin de sa durée de vie prévu à 15 ans et voir si la structure tiendra jusqu'à cette période. Les résultats de la simulation son présentés en ANNEXE VII. Nous obtenons avec ALIZÉ 4 les valeurs suivantes :



Les déplacements ε_z (obtenues avec ALIZÉ) sont inférieures à $\varepsilon_{z,adm}$ (calculées) sous le trafic équivalent obtenu après 7 ans. Donc, la chaussée est en mesure de supporter le trafic actuel. La condition $\varepsilon_z < \varepsilon_{z,adm}$ n'est pas vérifiée à 15 ans, c'est-à-dire qu'à la fin de la durée de vie de la chaussée (prévue pour 2015) la capacité portante du sol de plateforme sera dépassée.

S'agissant de la contrainte de traction à la base de la couche latérite-ciment, la condition $\sigma_t < \sigma_{t,adm}$ est vérifiée aussi bien à 7ans qu'à 15 ans.

d) Formulation

Ce type de revêtement a fait l'objet de beaucoup de discussions et de doutes. En effet toutes les parties qui intervenaient dans le projet, à savoir le consultant, le contrôle et l'entreprise, chacun en ce qui le concerne a proposé une formulation qui selon lui était la meilleure.

La formule F2 initialement retenue fut ajournée au profit de la formule F'2 en d'autre terme le sable 0/3 de Diack a été remplacé par du concassé provenant du gravier 5/25 de Falémé. Ce qui posait comme problème :

- l'hétérogénéité de l'emprunt

Le tout-venant est composé de latérite, de gré siliceux, de quartz... il présente une hétérogénéité très marquante. Ce qui fait que même le concassage provenant de tout-venant écrêté, ne sera pas toujours de la même composition minéralogique entraînant ainsi des différences d'apparence et de comportement sous une même sollicitation (trafic). Du coup, certains tronçons se dégradent beaucoup plus vite que d'autres. Les zones d'apparence claires sont plus saines que celles qui ne le sont pas.

- La variation de la teneur en bitume

La teneur en bitume dépend de la surface spécifique et du poids spécifique, qui sont deux paramètres intrinsèques du granulat utilisés. Si l'on change de granulat il faudra revoir la nouvelle teneur en bitume qui concorderait le mieux aux nouvelles conditions, d'où une nouvelle formulation.

L'analyse granulométrique effectuée sur les carottes après extraction montre que la formule utilisée s'apparente plus aux micro-bétons qu'au sand asphalt traditionnel. En effet aucune des courbes ne s'insère dans le fuseau des sand-asphalts selon Duriez. Seules les parties supérieures des courbes granulométriques provenant des carottes des zones saines s'insèrent correctement dans le fuseau des micro-bétons. C'est-à-dire qu'il y a plus d'éléments grossiers dans la composition granulométrique des carottes prévenant des zones saines que celles provenant des zones fissurées et des zones traitées.

IV.7.2 La température

Les matériaux de la couche de roulement et des assises sont exposés à des températures élevées et à des excursions thermiques importantes.

Les matériaux traités aux liants hydrocarbonés sont sensibles aux températures élevées et les matériaux traités aux liants hydrauliques sont sensibles aux différences de température.

Le ciment (prise normale, par opposition à prise rapide) utilisé a été judicieusement choisi, ce qui a permis d'éviter un dégagement de chaleur et les prises accélérées qui peuvent entraîner des retraits et par conséquent créer des fissures. Sur de rares cas où les fissures sont très ouvertes, nous pouvons incriminer les remontées de fissures depuis la base, cas de la zone où la carotte C1 a été extraite. Le carottage effectué sur une fissure (C2) a montré que la base était fissurée également.

La zone géographique de la route étant caractérisée par des températures élevées (la température moyenne maximale à l'ombre à Tambacounda est de l'ordre de 40°C), l'ensoleillement important entraîne des températures bien plus élevées à l'intérieur des couches bitumineuses. Pendant les heures les plus chaudes la température de l'air est de l'ordre de 41 °C. En plus, la couche de base améliorée au ciment, d'une raideur relativement élevée, entraîne une faible dissipation des contraintes verticales dans la couche de roulement bitumineuse, entraînant l'apparition des orniérages sous l'action du trafic lourd.

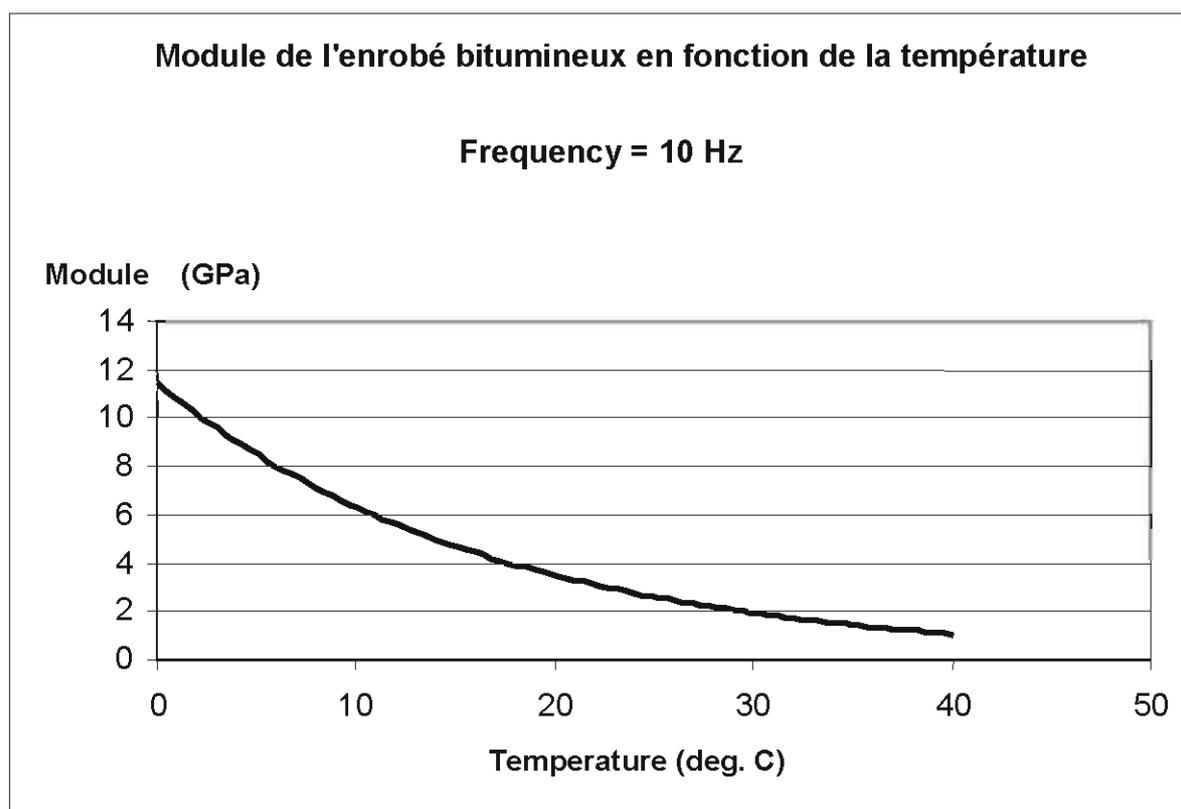


Figure IV.10 : Effet de la température sur l'enrobé bitumineux

Nous ne disposons pas d'informations suffisantes sur la tenue en compte ou non de l'influence de la température de l'air sur le comportement élastique immédiat des couches bitumineuses lors de la conception hormis la justification du choix du 40/50.

Cependant la température et l'humidité influencent le comportement à long terme des couches bitumineuses (vieillessement par oxydation). Ce vieillissement qui commence avec le vieillissement primaire ayant lieu à haute température au moment du malaxage des mélanges bitumineux à la centrale d'enrobage est une chose difficile à maîtriser.

En définitive, la température a contribué en rapport avec le trafic au développement d'orniérages. Ces dernières qui se manifestent uniquement sur la voie la plus chargée (voie de droite i.e. celle qui va vers le Mali).

IV.7.3 La pluviométrie

Les effets de la pluie sur la chaussée se résument à une accélération de l'endommagement de la chaussée. La pluie n'influe pas de façon indépendante sur la détérioration de la chaussée. Elle a un impact sur la chaussée en interaction avec la charge par essieu. Par conséquent, l'impact net de la pluie conjugué avec les lourdes charges entraîne une plus grande vulnérabilité à la dégradation.

Le sand asphalt est de nature très poreux et a une teneur en bitume élevée. Ce qui montre sa sensibilité à l'eau et les risques de percolation d'eau nuisible au sein de l'assise sont élevés. Ce phénomène a été constaté sur deux points particuliers où des gonflements ont apparu. Ces gonflements peuvent être dus à des poches d'eau dans l'assise ou bien à une percolation de l'eau à travers le revêtement.

IV.7.4 Exécution (Mise en œuvre)

La mise en œuvre du sand asphalt une technique qui reste à maîtriser. Le projet de route Tamba-Kidira-Bakel constituait une innovation en matière de sand asphalt au Sénégal.

Le tronçon de route Tamba-Kidira est sollicité par le même trafic et les matériaux utilisés pour la mise en œuvre du revêtement proviennent normalement du même emprunt. La différence de comportement entre des tronçons peut trouver également une explication dans la mise en œuvre de ceux-ci.

Les compacités obtenues sur les carottes prélevées sont très élevées (>95%) si l'on sait que le post compactage du sand asphalt par le trafic entraînent une fissuration très intense, il devait y avoir plus de marge pour laisser le revêtement évoluer avec le trafic et dans le temps. Lors de

la mise en œuvre, dans certaines zones, la compacité dépassait déjà 100% (cf. le rapport n°5 de la mission de contrôle).

IV.7.5 Le contrôle

Les discontinuités notées sur l'avancement des travaux, discontinuités dues à une différence dans la composition des matériaux utilisés, dénote un manque de suivi rapproché. Les zones saines sont entrecoupées de zones dégradées avec des limites franches à tel enseigne qu'on ne peut pas incriminer le trafic. La continuité de la qualité n'est pas assurée. La figure IV.9 est une illustration incontestable des ces affirmations.

IV.7.6 Les événements exceptionnels

Après la crise ivoirienne de 2003, le trafic lourd a explosé, entraînant ainsi des sollicitations plus importantes que celles pour lesquelles la route a été dimensionnée. Ce trafic dévié essentiellement composé de trafic de transit entre le Sénégal et le Mali est constitué essentiellement de poids lourds.

Une pluie exceptionnelle de 227 mm a été enregistrée en une journée pendant la réalisation des travaux en 1997 à Kidira au moment où les ouvrages hydrauliques tels que les fossés, les buses, les dalots n'ont pas été aménagés.

IV.8. IMPACT DES DEGRADATIONS SUR LES AUTRES PARAMETRES

IV.8.1 Le niveau de service

Sur la base des résultats des relevés d'UNI, il apparaît que les dégradations ont un effet sur la qualité de roulement et donc sur le niveau de service. La zone allant du PK 152 à Kidira a fait l'objet de beaucoup de traitement dans le cadre d'entretiens périodiques et c'est effectivement dans cette zone que les valeurs d'UNI sont les plus grandes sur tout le tronçon Tamba-Kidira. Cependant en dépit de ces réparations opérées, la qualité de l'UNI reste acceptable et offre une qualité de roulement suffisante aux usagers.

IV.8.2 Les coûts d'entretien

Le premier entretien périodique a eu lieu en 2006 et un autre en 2007. Ce traitement consiste à mettre un revêtement en bicouche sur les tronçons dégradés ou à des bouchages de

nids de poules. Actuellement le linéaire traité au bicouche atteint 31,2 km, et le montant total consacré à l'entretien de cet axe s'élève à 1 279 094 512 F CFA TTC.

IV.8.3 Le confort au roulement

Le confort de roulement ou l'uni de la surface d'une chaussée en enrobé est un indicateur d'état important pour les usagers de la route. Il influe sur la sécurité des usagers et sur les coûts d'entretien et d'utilisation des véhicules. De plus, il est démontré qu'une chaussée se comporte d'autant mieux à long terme que son uni initial est meilleur. Le confort de l'utilisateur de la route est tributaire de l'uni de la chaussée et de son comportement à long terme.

Globalement les mesures d'UNI sur la route Tamba-Kidira-Bakel font état d'une chaussée lisse. Certes, les opérations de resurfacement effectuées en 2006 et en 2007 ont eu un effet sur l'UNI, les valeurs mesurées ne dépassent guère 4,7 mm/km et dans ces conditions on reste toujours dans la gamme des chaussées lisses.

IV.8.4 La structure (corps de chaussée, ouvrages annexes)

Les zones qui ont fait l'objet d'entretien périodique présentent des déflexions plus élevées.

Les fissures du revêtement constituent des zones de faiblesse par lesquelles l'eau peut s'infiltrer et attaquer l'assise conduisant ainsi à la ruine de la structure de chaussée. Les ornières évoluent en endommagement de plus en plus sévère par un accroissement du rayon et de la profondeur de l'orniérage et, affectant ainsi les couches inférieures du revêtement.

L'ensemble des dégradations conduisent pratiquement vers la ruine de la chaussée, d'où la nécessité de les bloquer en trouvant les moyens techniques les plus appropriés et les plus économiques.

IV.9. IDENTIFICATION DES SOLUTIONS APPLICABLES

IV.9.1 Les solutions curatives

Les solutions curatives visent à redonner à la chaussée des caractéristiques fonctionnelles suffisantes. Elles peuvent consister en une opération d'entretien généralisé ou bien une intervention ponctuelle.

On entend par opérations d'entretien généralisé, la mise en œuvre :

- de coulis ou d'enduits superficiels,

- d'enrobés en couche mince.

Les interventions ponctuelles concernent le bouchage de nids de poule et de façon générale la réparation d'une dégradation ponctuelle.

a) Le scellement de fissure

Il a pour principal objectif celui d'améliorer l'étanchéité de la surface de la chaussée mais aussi celui de prévenir le décollement de plaques d'enrobés sous l'effet du trafic. Il s'agit d'une technique d'obturation des fissures visant à les rendre étanches. Trois principales techniques existent. La première est la pénétration : elle consiste à introduire par gravité un liant fluide dans le corps de chaussée. La deuxième est le garnissage : elle consiste à couler un produit d'étanchéité dans une réservation (cas des joints de chaussée en béton de ciment). La dernière est le pontage : il consiste à répandre un mastic en faible surépaisseur à cheval sur la fissure. Le pontage est souvent utilisé et il est adapté au traitement des fissures de formes diverses et de longueur importante, cette technique consiste à mettre en œuvre, sur une largeur de 7 à 10 cm encadrant la fissure et sur une épaisseur d'environ 2 mm, un produit de scellement.

Les principales étapes à observer étant les suivants :

- non exécution par temps de pluie,
- préparation du support (par décapage et séchage),
- mise en place du produit et réglage en épaisseur comme en largeur du cordon de mastic,
- respect de la température de coulée,
- micro gravillonnage de surface avec un sable sec totalement exempt de fines,
- limitation des largeurs de pontage rectiligne par mise en place de bandes adhésives collées de part et d'autre de la fissure à ponter afin d'éviter les ruissellements incontrôlés.

La mise en œuvre reste difficile et demande une main d'œuvre qualifiée. Car si le pontage n'est pas bien fait, la percolation de l'eau à travers les fissures persistera et l'objectif de rendre étanche la chaussée ne sera atteint.

b) Les reprises ponctuelles de revêtement

Les reprises ponctuelles du revêtement sont nécessaires pour réparer des dégradations localisées de la chaussée telles que les nids de poules, les épaufrures... Ces dégradations pouvant affecter la chaussée sur une profondeur dépassant celle de la couche de roulement, leur nature conditionnera le traitement à effectuer. Les reprises localisées de revêtements en

enrobés seront effectuées avec les précautions habituelles nécessaires à une bonne tenue de la réparation, à savoir :

- délimitation de l'aire à traiter incluant la dégradation de manière suffisamment large pour permettre le compactage ultérieur des matériaux d'apport,
- découpage à bords francs de la zone défectueuse sur une profondeur à estimer en fonction de la dégradation,
- purge des différentes couches de chaussée concernées,
- mise en œuvre des matériaux d'apport correspondant aux différentes couches traitées,
- interposition, selon la nature de la couche atteinte, de couches d'accrochage ou d'imprégnation,
- compactage et réglage soigné des différentes couches d'apport,
- traitement du joint créé par la réparation.

c) Le recouvrement bitumineux

C'est un coulis qui permet de rétablir l'étanchéité et la rugosité de surface. Il s'agit d'un mélange de granulats et d'émulsion de bitume. Les classes de granulats utilisées sont 0/4 voire du 0/6.

d) Un tapis d'enrobé

Il peut être en :

Enrobés bitumineux minces (EBM) :

Les enrobés bitumineux minces (EBM) sont des mélanges de bitumes purs, de granulats, de sable et de filler. Ils sont fabriqués dans une centrale d'enrobage et mis en œuvre par un finisseur. Une couche d'accrochage est nécessaire avant l'application du tapis d'EBM. Les EBM sont destinés aux couches de roulement des routes nationales et régionales empruntées par un trafic moyen et dense sur des chaussées qui ne connaissent pas de déficit structurel ou des dégradations importantes. Ils s'appliquent sur des épaisseurs de 3 à 7 cm.

Micro-Bétons bitumineux (MBB) :

Les MBB sont obtenus à partir d'un mélange de bitume pur ou modifié, de granulats fabriqués dans une centrale d'enrobage. Ils se caractérisent par un module de rigidité E plus élevé que les enrobés classiques et par une bonne tenue à l'orniérage.

Les MBB sont destinés aux couches de roulement des routes nationales et régionales empruntées par un trafic moyen et dense. Les MBB permettent une meilleure résistance à l'orniérage. Ils s'appliquent sur des épaisseurs de 5 à 7 cm.

e) Les enduits superficiels

La mise en œuvre d'enduits superficiels permet également de rétablir l'étanchéité de surface ou de redonner des caractéristiques de rugosité satisfaisantes à la chaussée.

Ils sont adaptés :

- à la couche de roulement des chaussées neuves (déflexion inférieure à 80) ou renouvelées
- au renouvellement des couches d'usure sur chaussée supportant un trafic de classe T2 et T1 et sur chaussée supportant un trafic de classe T4 et T3. Ils ne conviennent pas aux chaussées très déformées.

IV.9.2 Les solutions préventives

Les solutions préventives tendent à ralentir le processus de dégradation de la chaussée et à retarder le recours à des techniques plus lourdes de réfection. Elles permettent également d'anticiper sur la dégradation future de la chaussée.

Les solutions préventives que nous proposerons dans ce qui suit concernent la mise en œuvre du sand asphalt dans son environnement. Le problème qui se pose dès lors est de savoir quelles sont les précautions à prendre pour éviter les dégradations constatées ?

a) Le choix des matériaux (bitume, sable)

La construction d'une chaussée fait appel à différents matériaux ordonnancés de telle manière que l'ouvrage ainsi construit satisfasse le maître d'ouvrage par un bon comportement sous les sollicitations du trafic et les contraintes de l'environnement.

Compte tenu du fait qu'il constitue entre 80 et 95 % en poids du mélange, le sable est un élément important en ce qui concerne le comportement du sand asphalt.

La nature chimique et minéralogique du granulat peut influencer de diverses manières le comportement vis-à-vis des sollicitations (trafic et climat).

Le comportement appréciable noté sur les zones d'apparence claire du revêtement, nous conduisent sans doute vers une recommandation de l'utilisation de sable ayant une proportion importante de sable de concassage provenant de granulat ayant une composition

minéralogique lui conférant des qualités intrinsèques suffisantes. A ce titre les sables de concassage provenant du gré constituent un exemple singulier.

Le bitume représente jusqu'à 7,5% en masse du mélange. C'est un constituant non négligeable du mélange, car certaines qualités dépendent principalement de lui.

Le choix du bitume est fait en fonction du niveau de sollicitation : lorsque celui-ci est important et qu'il n'y a pas de risque élevé de fissuration thermique (variations journalières importantes par exemple 20°C) on s'oriente généralement vers la classe la plus dure.

Lors du choix du bitume, il faudra trouver également un compromis entre le vieillissement du bitume et les exigences liées au trafic et aux conditions environnementales. Les bitumes les plus durs résistent plus au trafic, mais sont plus susceptibles de se fissurer avec le temps. Le bitume 40/50 supporte bien le climat dans les zones les chaudes du Sénégal. Cependant le problème de son vieillissement est à signaler. Avec des bitumes plus mous des risques de déformation par orniérage sont très élevés sous un trafic important.

b) Le trafic à prendre en compte

Le trafic n'agit toujours pas seul, la limitation du trafic doit tenir compte de la qualité du granulat et du bitume utilisé ainsi que les conditions environnementales dans lesquelles évolue la chaussée. En raison des qualités médiocres du sand asphalt, son utilisation se limite à des trafics faibles à moyens.

c) Les zones climatiques

Le climat a son effet sur le comportement mécanique du sand asphalt. La disponibilité de chaque zone en matériau de qualité conditionne en partie le choix de la structure de chaussée à retenir.

Pour chaque zone il faudra prendre en compte les paramètres élastiques appropriés (module d'élasticité et coefficient de Poisson) en fonction de la température d'exercice. Et de faire les études appropriées de capacité portante et de déformation admissible sur le revêtement en sand asphalt.

d) L'entretien (suivi)

Comme toute infrastructure, les axes routiers font l'objet d'efforts d'investissement de construction qu'il faut préserver afin qu'ils puissent assurer les fonctions qui leur sont dévolues. Leur niveau de service ne peut être maintenu que si elles sont régulièrement entretenues.

L'entretien a pour but de prolonger la durée de vie en bon état de la chaussée, en retardant les dégradations. Il limite ainsi l'évolution en fatigue du revêtement voir de la

chaussée. La bonne intervention, au bon endroit et au bon moment permettra de faire des économies en matière d'entretien périodique également.

Dans le cadre d'un revêtement en sand asphalt les dégradations à traiter en premier lieu concernent les fissures et les ornières. L'intervention aura pour but de limiter le développement de ces fissures et ornières et limiter leur évolution vers une situation plus sérieuse où c'est la tenue de la structure qui est affectée.

Dès lors, il est fondamental de suivre l'évolution de la chaussée et de pister les dégradations qui apparaissent dans les premières années qui suivent la mise en service et d'étudier en fonction de ces dégradations les interventions les plus convenables (coût de l'intervention et les exigences du trafic).

Deux types d'entretien sont à distinguer :

- l'entretien courant
- l'entretien périodique

Les principaux objectifs de l'entretien sont :

- la conservation en bon état de la structure de chaussée et son adaptation à l'évolution du trafic,
- le maintien de conditions de sécurité et de confort satisfaisantes,
- la conservation de l'intégrité de la couche de surface

Pour l'entretien courant : Il s'agit de travaux partiels de remise en état de sections de routes présentant, d'une année à l'autre, des dégradations pouvant être dues à des accidents ou des faiblesses localisées de la structure ne mettant pas en péril l'ouvrage global.

Pour l'entretien périodique : La notion d'entretien périodique est tout à fait différente car elle implique, avec le vieillissement des routes, des dégradations suffisamment fréquentes et répétées. Si ces dégradations ne sont pas reprises d'une façon globale, elles entraîneront la destruction de l'ouvrage.

Un entretien périodique, comme son nom l'indique, se réalise suivant une périodicité dont la valeur n'est pas forcément constante. Seules des inspections systématiques pourront permettre d'en déterminer l'opportunité.

e) La formulation à prendre en compte

L'observation faite du comportement du sand asphalt sur la route Tamba-Kidira-Bakel et sur la base des résultats des essais laboratoires (teneur en bitume, analyse granulométrique) effectués sur les carottes extraites nous permettent de dire que la formulation la mieux adaptée

pour un trafic identique à celui de la route Tamba-Kidira-Bakel est celle de la zone où la carotte C4 a été extraite à savoir au pk 65+150. cette zone similaire à tant d'autres zones où le revêtement présente une bonne tenue malgré les différentes sollicitations. Ces zones sont caractérisées par un matériau granulaire riche en concassé de gré d'une qualité minéralogique certaine. Nos recommandations à ce sujet vont surtout vers l'utilisation de plus de concassés. Ce concassé améliore la rugosité et la tenue du revêtement. Cependant, l'utilisation du concassé a un effet sur le coût du sand asphalt.

Les performances attendues sont celles de l'enrobé et non celles du liant de base ou des constituants de base. Les études de laboratoire sur l'enrobé ne permettent pas de révéler ou de mettre en évidence certaines caractéristiques comme la durabilité de la macrotexture ou de la durabilité vis à vis du vieillissement, ni la résistance à l'élasticité de l'enrobé lui permettant d'accepter des déformations importantes sans se fissurer. Le choix est donc arbitraire en fonction des conditions de sollicitation (climat, trafic).

f) Les précautions à prendre pour la mise en œuvre

L'hétérogénéité des emprunts de sable est l'un des problèmes les plus sérieux à traiter en priorité. Car il en dépend de la qualité du sand asphalt. Il faut alors veiller au maintien de la qualité, Il ne doit pas y avoir :

- de mottes de sable non enrobées
- de ressuage sous trafic

Les épaisseurs excessives (supérieures à 5 cm) contribuent à la formation d'orniérage au passage des poids lourds.

Ces couches doivent à la fois résister à l'orniérage, au cisaillement et au vieillissement. Le problème de la résistance à l'orniérage étant réglé lors de l'épreuve de formulation, le choix du type de liant influera directement sur les deux autres paramètres

Le pourcentage de vides est un paramètre important en ce qui concerne différentes caractéristiques, telles que : la résistance à la traction, le module en traction ou en flexion, la résistance à la fatigue, l'imperméabilité, la résistance au vieillissement, etc. Il doit être aussi bas que possible dans la plage autorisée par la norme produit, tout en restant compatible avec l'exigence de macrotexture pour les couches de roulement. Le surcompactage conduit à une détérioration du revêtement sous trafic par des phénomènes d'attrition, de cassure...

IV.10.ANALYSE ET CHOIX DES SOLUTIONS OPTIMALES

Nous procéderons par sectionnement du tracé en tronçons homogènes nécessitant du même niveau d'intervention.

Au regard des dégradations constatées sur les parties traitées au bicouche, le bicouche bien que plus économique ne constitue pas une solution irrévocable.

La capacité de support résiduelle (résultats des essais de déflexion) de la chaussée existante par rapport à la classe de trafic de projet est le critère discriminant au sujet du choix de la stratégie de réhabilitation. La capacité de support résiduelle est évaluée par le biais d'une grille de décision prenant en compte les résultats de la campagne de déflexion et le relevé visuel des dégradations de nature structurelle (orniérages, fissures, faïençage). Les sections avec capacité de support résiduelle insuffisante seront classées parmi les sections à réhabiliter ou à reconstruire. Les sections avec capacité de support résiduelle suffisante seront classées parmi les sections à réparer de façon ponctuelle.

Vu l'importance du trafic lourd sur cette axe, la mise en œuvre d'un tapis d'enrobé est la solution la meilleure pour répondre aux sollicitations nouvelles. Le bicouche réalisé en 2006 et 2007 a montré ses limites avec les dégradations qui sont apparues juste un an après leur achèvement (à cause surtout de sa mauvaise mise en œuvre). En plus le bicouche n'a pas un apport structural sur le comportement global de la chaussée sa mise en œuvre est très délicate. Au vue des investissements consentis sur cet axe, il serait plus commode de mettre un enrobé afin de protéger ces investissements en augmentant la durée de vie de la chaussée. Les défauts constatés sur le revêtement ne devraient pas causer la ruine de la structure par manque d'entretien adéquat.

Le paramètre coût n'est cependant pas à négliger, car elle conditionne en partie les stratégies d'entretien. Les coûts de réhabilitation et d'entretien : ces coûts varient en fonction de la disponibilité des matériaux, du coût de transport, du trafic, du relief, de la pluviométrie et du réseau hydrographique de la zone.

Dans le cadre de la présente étude, nous adopterons les coûts unitaires (au km) de travaux d'entretien fournis par l'AATR. Ils sont déterminés hors TVA (Taxe sur la Valeur Ajoutée) en fonction des différentes tâches et de la largeur des routes. Ils sont résumés comme suit :

Tâches principales	Classe de trafic	Coût au km en Francs CFA	
		Largeur (m)	
		6	7
Monocouche		22 900 000	26 125 000
Bicouche	< 3000	33 100 000	38 025 000
Enrobés 4 cm	> 3000	62 125 000	70 225 000
Enrobés 5 cm	> 3000	74 275 000	84 400 000
Enrobés 7 cm	> 3000	98 575 000	112 750 000
Renforcement 4		69 470 000	77 670 000

Tableau IV.12 : Coûts Unitaires d'Entretien des Routes Revêtues [source AATR Septembre 2007]

Eu égard à la situation actuelle, le choix est porté sur un enrobé de 4 cm dont le prix au kilomètre est de **70 225 000 F CFA** au lieu d'un bicouche qui est actuellement utilisé sur le même tronçon dans le cadre d'entretien périodique depuis 2006.

Les coûts de points à temps sont déterminés en fonction de l'importance des nids de poule.

	U	PU
PAT (enrobés à froid ou Concassés + bicouche)	m ²	15 000

Tableau IV.13 : Prix unitaire pour le PAT (Point à temps) [10]

Sur la base des solutions retenues, il a été effectué une évaluation financière qui se résume ainsi :

Désignation	Linéaire	Coût unitaire	Coût total
Traitement des fissures avec un enrobé de 4 cm	32,4 km	70 225 000	2 275 290 000
Traitement des ornières avec un enrobé de 5 cm	11,5 km	84 400 000	970 600 000
Renforcement de la zone du Pk 152+502 au Pk 152+952 (Renf 4)	450 m	77 670 000	34 951 500
Bouchage de nids de poule	-	15 000	-
Traitement des épaufrures	400 m	14 100 000	5 640 000
Montant total			3 286 481 500

Tableau IV.14 : Coût de réparation de la chaussée

Les coûts des solutions retenues porte à 3 286 481 500 F CFA HT.

Conclusion partielle :

Cinq types de dégradation ont été observés sur tout le tronçon TKB. Il s'agit des fissures, des ornières, des ressuyages, des nids de poule et des épaufrures. Les fissures et les ornières viennent en premier lieu avec respectivement 17% et 6% du linéaire total inspecté. Ces deux types de dégradation constituent le point de départ de l'endommagement de la chaussée qui tend vers un faïençage et un début de nids de poule.

Ces dégradations trouvent leurs causes dans la mise en œuvre, la qualité de l'emprunt, le trafic, les effets du climat...

Les orniérages notés sur les traces des véhicules, côté VPC montrent l'effet du trafic sur la dégradation de la chaussée. La température a contribué en rapport avec le trafic au développement d'orniérages.

La différence de comportement entre les tronçons trouve une explication dans la mise en œuvre de ceux-ci. Les zones saines entrecoupées de zones dégradées ou traitées montre que la continuité de la qualité n'a pas été assurée lors de la mise en œuvre.

Cependant ces dégradations n'ont pas d'effet notable sur le niveau de service de la route. Les mesures d'UNI sur la route TKB font état d'une chaussée lisse.

Un comportement appréciable est noté sur les zones d'apparence claire du revêtement, Cela nous conduit à formuler une recommandation de l'utilisation de sable ayant une proportion importante de sable de concassage provenant de granulats ayant une composition minéralogique lui conférant des qualités intrinsèques suffisantes. Cependant les performances attendues sont celles de l'enrobé et non celles des constituants de base.

Les solutions curatives proposées consistent en une mise en œuvre d'un tapis d'enrobé, qui demeure la meilleure solution pour répondre aux sollicitations nouvelles. Les coûts engendrés

portent à 3 286 481 500 F CFA. Vu ce capital investi (entretien périodique), qui vient s'ajouter au coût initial de la route Tamba-Kidira-Bakel, devrions nous penser à réutiliser encore ce type de revêtement au Sénégal ? Le chapitre prochain traite des recommandations quant à l'adoption ou non du revêtement en sand asphalt au Sénégal.

V. RECOMMANDATIONS QUANT A LA VULGARISATION OU NON DU SAND ASPHALT AU SENEGAL VOIR DANS LA SOUS REGION.

Le sand asphalt, considéré à l'époque (1997) comme une innovation au Sénégal en matière de revêtement routier, avait éveillé beaucoup d'inquiétudes quant à son comportement dans un environnement comme celui du Sénégal oriental.

Aujourd'hui, après avoir constaté et étudié son évolution, faudrait-il continuer à utiliser cette technique dans d'autres zones, d'autres trafics et d'autres conditions climatiques ?

V.1. EXPERIENCE AFRICAINE DANS LA MISE EN ŒUVRE DU SAND ASPHALT

Le sand asphalt a pris du temps avant d'entrer au Sénégal. Cependant dans beaucoup de pays, il a été, depuis longtemps une technique utilisée dans des axes routiers notamment la Côte d'Ivoire, le Burkina...

V.1.1 Expérience Ivoirienne

La Côte d'Ivoire dispose d'une expérience propre en matière revêtement en sand asphalt à tel enseigne qu'en 1978 une recommandation sur le choix, l'étude et la réalisation des sand asphalt a été formulée par le LBTP. Dans cette recommandation, il est fait état de la répartition du réseau routier ivoirien de l'époque. Cette répartition plaçait les routes avec revêtement en sand asphalt en seconde position avec un pourcentage représentatif de 37% du réseau routier soit un linéaire plus de 1000 km.

L'utilisation du sand asphalt en Côte d'Ivoire se justifie par une disponibilité en quantité de sable roulé eu égard au nombre pléthorique de fleuves qui traversent le pays ainsi que les nombreuses rivières. La technique de revêtement sand asphalt est particulièrement développée dans les régions du sud-est ivoirien. L'absence de roches convenables, et les difficultés d'ouverture ou d'exploitation de carrière en sont la cause. *Partout où le substratum rocheux est constitué de formations schisteuses et dès que les distances de transport des roches granitiques ou que les frais d'une carrière deviennent prohibitifs, eu égard au niveau de l'aménagement prévu, une couche de roulement en sand asphalt peut constituer si les ressources en sables sont adéquates et suffisantes une solution intéressantes.*" [3]

Les gisements de sable exploités dans le cadre de la mise en œuvre du sand asphalt sont composés essentiellement de sables siliceux ou quartzitiques d'origine résiduelle provenant de l'altération des granites qui ont été transportés par colluvionnement dans les dépressions.

Le sable de concassage est également utilisé pour améliorer les performances du sand asphalt. Lorsque les conditions du choix en faveur du sand asphalt sont réunies l'expérience ivoirienne prouve incontestablement que s'il est correctement formulé et mis en œuvre, le sand asphalt constitue une couche de roulement susceptible de se comporter sans défaillance majeure sous le trafic pour lequel il doit être prévu.

La côte d'Ivoire continue encore aujourd'hui de construire des routes à revêtement en sand asphalt. En effet, actuellement le prolongement de l'autoroute du nord Abidjan-Yamoussoukro (sur un tronçon de 19,26 km), l'un des axes principaux du réseau ivoirien car reliant la capitale économique à la capitale politique, est en construction et il est prévu un aménagement en sand asphalt. C'est dire que si le sand asphalt est utilisé sur un axe où le trafic est très intense, c'est qu'il a fait ses preuves au fil des années en Côte d'Ivoire.

Le sand asphalt est employé comme revêtement de protection des accotements ou des bandes d'arrêt d'urgence pour la grande voirie urbaine ou pour les routes et autoroutes à plus fort trafic, en rase campagne.

V.1.2 Expérience burkinabé

Au Burkina Faso, trois types de revêtement bitumineux ont été mis en œuvre à l'heure actuelle :

- l'enduit superficiel sur la majorité des routes ;
- l'enrobé ou béton bitumineux sur certaines voiries urbaines
- le sand asphalt sur la route Fada-Pâma-Frontière du Bénin.

Le sand asphalt a été utilisé sur la route Fada-Pâma-Frontière du Bénin, région où le sable de rivière, disponible en très grande quantité, lui a conféré une compétitivité intéressante au point que le sand asphalt soit retenu devant les enduits superficiels et les enrobés qui utilisent beaucoup de concassés en manque dans cette région. Cette route construite vers les années 1990-1991 porte sur 150 Km et constitue l'une des plus grandes expériences burkinabés en matière de sand asphalt. Elle a été dimensionnée pour un trafic T2 (approximativement) et le revêtement porte sur 4 cm d'épaisseur.

Toutefois *la chaussée a connu quelques désordres dès sa construction, notamment de la fissuration.* [22]

Les fissurations apparues sur le revêtement étaient si préoccupantes à tel enseigne que l'administration burkinabé a fait réaliser différentes études et expertises pour connaître l'origine. Un rapport du BCEOM de mars 91, a analysé cinq zones à fissures dans lesquelles il apparaît des défauts de qualité (nature du matériau, compacité ou portance) de la sous couche de forme et de la plateforme. La responsabilité du sand asphalt sur ces dégradations est levée. En 1996 une inspection avait été faite. Il ressortait de cet étude que des fissurations de gravité 1 ou 2 gangrenaient l'ensemble de l'itinéraire et qui donnaient un indice structural VISIR compris entre 1 et 3. Parfois les fissures étaient accompagnées de déformation. Ce qui fait qu'en 1996 la route avait besoin d'un renforcement sur une part non négligeable de sa longueur.

Lors d'une inspection menée en 2003 dans le cadre de l'étude citée plus haut les dégradations suivantes ont été notées :

- fissures transversales et longitudinales de retrait
- fissures, simple ou multiples de mouvement de matériau
- ornières
- tassement de remblai, déformations...

Cependant c'est une route qui a tenue jusqu'à la fin de sa durée de vie qui était de 15 ans malgré les dégradations apparues. « En 2003, elle assurait encore un écoulement correct du trafic à forte vitesse de base » [22].

V.2. TAUX DE SATISFACTION : NIVEAU DE SERVICE, DUREE DE VIE

Le sand asphalt est jusqu'à présent réservé pour les trafics de faible (<1000 véhicules/jour). Cette limitation est due essentiellement à la qualité (propreté, taille, angularité) des sables utilisés, à la forte teneur en bitume et leur susceptibilité au fluage et à l'orniérage sous un trafic plus important.

L'expérience de leur comportement sous un trafic de 100 à 1000 véhicules/jour (40% de poids lourds) montre que des phénomènes de fatigue commencent à se manifester au bout de 15 ans. Les niveaux de résistance relativement modérés qui leur sont accessibles ne leur permettent pas de supporter un nombre cumulé trop important de passage d'essieux équivalent de 13 tonnes.

Le sand asphalt procure un taux de satisfaction acceptable, car les routes où ce type de revêtement est utilisé arrivent souvent au terme de leur durée de service moyennant quelques entretiens périodiques.

V.3. CAS PARTICULIER DU SENEGAL

V.3.1 Disponibilité de matériaux et équipement

L'exploitation des carrières de Diack et de Bandia sont en phase d'atteindre leur niveau de congestion dû à une surexploitation des ces dernières. Le concassé de basalte utilisé le plus dans les revêtements bitumineux des routes du Sénégal proviennent essentiellement de Diack. Cette surexploitation est liée à une indisponibilité de matériaux de qualité suffisante pour être utilisé en revêtement routier dans d'autres zones du domaine national. L'utilisation du concassé de Diack risque d'entraîner des surcoûts importants liés au transport des matériaux vers les zones à aménager si ces dernières sont trop éloignées de la carrière.

Quant à la disponibilité en sable naturel, le Sénégal est un pays plat aux sols sablonneux de qualité médiocre pour être utiliser en revêtement sand asphalt. En effet les sables ont souvent des dimensions inférieures à 2 mm. Ils résultent d'un processus d'altération complexe d'érosion et de sédimentation. La majeure partie des formations sableuses est constituée de quartz.

Toute fois il n'est pas exclu leur utilisation en technique routière notamment dans la mise en place de plateforme de remblai ou des couches protectrices voire même en revêtement comme apport en quantité contrôlée pour améliorer les mélanges bitumineux ou bien comme revêtement à part entière en les améliorant avec du sable de concassage plus grossier.

Les zones où le sable naturel présente des opportunités certaines (pour la mise en œuvre du sand asphalt) sont des zones parcourues par un cours d'eau permanent ou temporaire .Trois fleuves traversent le pays d'est en ouest : le Sénégal (1700 km) au nord, la Gambie (750 km) et la Casamance (300 km) au sud). Parmi ces zones il y a le bassin du fleuve Sénégal et le cas particulier de la Falémé.

Bref, en matière de disponibilité d'emprunt le Sénégal est doté d'étendus immenses. Cependant la qualité et l'homogénéité de ces emprunts constituent les seuls obstacles dans leur utilisation à grande échelle en technique de revêtement bitumineux à tel enseigne qu'on persiste toujours à vouloir utiliser le concassé de Diack.

V.3.2 Disponibilité d'expertise et de savoir faire

L'expertise en matière de construction routière n'est pas en reste par rapport aux secteurs du BTP au Sénégal. Le sand asphalt à l'instar des autres types de revêtement en épaisseur et module faibles ne participent pas de manière significative à la portance globale de la structure de chaussée. L'assise (base plus fondation) se dimensionne de la même manière que celle d'une chaussée à revêtement en enduit superficiel. Les essais de convenance usuels (essai Hubbard-Field, fluage et stabilité Marshall, essai Duriez ...) des enrobés bitumineux sont réalisés sur le sand asphalt lors de la phase de conception.

D'ailleurs dans le cadre du projet de construction de la route TKB, une formule améliorée de sand asphalt a été mise sur pieds, formule qui est à cheval entre le sand asphalt traditionnel et les micro-bétons et offre plus de portance que le sand asphalt classique.

V.3.3 Mise en œuvre

Le sand asphalt, c'est du sable enrobé à chaud. Comme tout enrobé bitumineux l'enrobage se fait en central. Les techniques d'enrobage sont identiques à tous les enrobés bitumineux à chaud, sous réserves de quelques dispositions préalables de traitement du sable (préchauffage pour séchage suffisante des sables afin d'éviter la présence de mottes).

Le répannage du sand asphalt se fait au finisseur. Cette technique est très utilisée dans la mise en œuvre des bétons bitumineux et des enrobés denses au Sénégal.

V.3.4 Climat (pluviométrie, la température...)

Le domaine de privilégie du sand asphalt est le climat tempéré. La situation exceptionnelle du Sénégal sur la côte atlantique qui lui permet de bénéficier d'un climat tempéré pendant 5 mois sur 12. Les températures moyennes annuelles sont plafonnées à 42°C et la pluviométrie à 1200 mm. Les températures maximales sont enregistrées au Centre-Est et en Sénégal Oriental. Le sand asphalt est très sensibles aux variations thermiques, mais un choix judicieux du bitume permettrait de limiter les effets de la température. Une bonne partie du pays allant du centre vers l'ouest présente un environnement favorable au sand asphalt.

V.3.5 Trafic

Plus de 25% de la population est concentrée dans la région de Dakar. L'autre pôle de concentration est le centre du pays (le bassin arachidier) avec plus de 35 % de la population.

L'Est du pays est très faiblement peuplé. Pas loin de la moitié de la population sénégalaise vit sur un territoire inférieur à 6% de la superficie globale du pays.

Les régions de Dakar et Thiès combinées représentent 60% des émissions et des réceptions de trafic, et l'on arrive à 80% en ajoutant les régions de Kaolack et Diourbel.

Ce qui fait que les flux de trafic les plus importants sont notés dans la parties ouest du pays. Le reste du pays reçoit un trafic, faible à moyen, pratique pour les revêtements du type sand asphalt. Le sand asphalt se comporte de façon convenable pour des trafics inférieurs à 1000 véhicule/jour (40% de PL). Eu égard au tableau (*Tableau V. 1*) les régions de Fatick, Kolda, Louga, Saint-Louis, Tambacounda et Ziguinchor présentent un trafic favorables à l'utilisation du sand asphalt comme revêtement routier.

Région	DJM 1996	DJM 2002
Dakar	5961	7828
Thiès	2169	3548
Diourbel	706	1470
Kaolack	627	1045
Fatick	524	438
Kolda	143	234
Louga	289	492
Saint-Louis	671	597
Tambacounda	155	353
Ziguinchor	536	325

Tableau V. 1 : Débit journalier moyen par région

V.4. PARAMETRE COUT

Dans cette partie nous faisons une étude comparative entre le sand asphalt et le bicouche. Ces deux types de revêtement présentent des similitudes du point de vue comportement structural. En effet ils n'ont pas d'apport structural.

Dans le cadre des projets routiers, le paramètre coût constitue un critère de disqualification d'une technique par rapport à d'autres. Car les investissements à consentir son très importants ; il est alors souhaitable d'être plus ou moins élastique lors du choix d'une technique de mise en œuvre. Les autres qualités attendues pour la couche de roulement doivent bien évidemment être prises en compte.

La compétitivité du sand asphalt à coté des autres techniques de revêtement reste à étudier.

V.4.1 Coût initial

Le sand asphalt utilise du sable naturel roulé qui, souvent, est à proximité de la route. Les seuls coûts liés à l'utilisation de ce sable restent l'extraction et le transport sur chantier. Le sable de concassage est le seul composant qui demande un surplus de coût lié à l'achat et le transport. Encore que le sand asphalt utilise une forte teneur en bitume (jusqu'à 7% en masse).

À contrario, le bicouche utilise du concassé à 100%, qui en plus des coûts liés à l'extraction et le transport des granulats demande un prétraitement lourd (concassage).

Nous considérons une distance de 100 km du centre d'approvisionnement au barycentre du projet pour la prise en compte du transport des matériaux tels que les concassées et le bitume.

V.4.2 Coûts liés à la mise en œuvre du sand asphalt

Les travaux de mise en œuvre du sand asphalt comportent :

- une imprégnation de la chaussée au cut-back 0/1 à raison de 1 kg/m²,
- l'exécution juste avant le revêtement d'une couche d'accrochage à raison de 0,3 kg/m²,
- le revêtement en sand asphalt de 3,5 cm d'épaisseur (après compactage) sur une largeur de 7m.

Au kilomètre de sand asphalt correspond 245 m³. Si l'on prend un coefficient de foisonnement de 15%, le volume réel de sand asphalt produit est de 282 m³. La teneur en bitume est prise égale à 7%. La densité apparente est 2,18 T/m³ avec une compacité de 90%.

Le tableau suivant

Volume bitume = $[245 \times 0,9 \times 7\%] \times 1,1 = 17$ tonnes

Quantité de sable = $(245 \times 0,9 \times 2,18 \times 93\%) / 1,8 = 248,35$ m³ soit 447 tonnes

Désignation	Unité	Prix unitaire	Quantité	Prix total
Fourniture de bitume 60/70	T	454 000	17	7 708 239
Sable 0/6	T	7000	447	3 129 000
Transport de granulat (100 km)	m ³ /km	95	248,35	2 359 500
Transport de bitume (100 km)	T/km	175	33,6	588 000
Fabrication et mise en œuvre	T	23 000	282	6 486 000
Montant total en Francs CFA				20 270 736

Tableau V.2 : Coût initial de la variante sand asphalt

Dans le cas d'une exploitation d'une carrière de sable naturel, le coût du sand asphalt est résumé dans le tableau suivant :

Désignation	Unité	Prix unitaire	Quantité	Prix total
Fourniture de bitume 60/70	T	454 000	17	7 708 239
Sable 0/6	T	-	-	-
Transport de granulat (60 km)	m ³ /km	95	248,35	2 359 500
Transport de bitume (100 km)	T/km	175	33,6	588 000
Fabrication et mise en œuvre	T	23 000	282	6 486 000
Montant total en Francs CFA				17 141 739

Tableau V.3 : Coût initial de la variante sand asphalt (cas d'une exploitation d'emprunt de sables naturels)

N.B : le coût de revêtement au kilomètre était de 23 942 100 F CFA dans le cadre du projet TKB.

V.4.3 Coûts liés à la mise en œuvre du bicouche

La formule de bicouche est la suivante :

- 1^{ère} couche de liant : 1,2 kg/m² de 400/600
- gravillon 8/16 : 12 l/m³
- 2^{ème} couche de liant : 1,1 kg/m² de 400/600
- gravillon 3/8 : 9 l/m²

Les quantités au kilomètre correspondantes sont :

- 1^{ère} couche de liant : 8 400 kg de 400/600
- gravillon 8/16 : 84 m³
- 2^{ème} couche de liant : 7 700 kg de 400/600
- gravillon 3/8 : 63 m³

Désignation	Unité	Prix unitaire	Quantité	Prix total
Fourniture de bitume fluidifié 400/600	T	454 000	16,1	7 245 000
Basalte 8/16	m ³	7000	84	588 000
Basalte 3/8	m ³	7000	63	441 000
Transport de gravillon (100 km)	m ³ /km	95	147	1 396 500
Transport de bitume (100 km)	T/km	175	16,1	281 750
Mise en œuvre	m ²	408	7000	2 856 000
Montant total en Francs CFA				12 808 250

Tableau V.4 : Coût initial de la variante bicouche

Le coût initial du bicouche est presque deux fois moins cher que celui du sand asphalt. La teneur en bitume du sand asphalt est très élevée par rapport aux enrobés classiques (ED, BB), ce qui renchérit son coût.

V.4.4 Coût d'entretien

Il s'agit de maintenir sur le réseau routier une qualité de service constante. Les coûts d'entretien sont fonctions de l'évolution des dégradations pour chaque type de revêtement. Les coûts d'entretien représentant une part importante des budgets routiers, leur élaboration demande une évaluation scrupuleuse des coûts y afférents.

Pour faire une étude comparative des coûts d'entretien entre un revêtement en sand asphalt et un revêtement en bicouche, nous nous basons sur les politiques d'entretien des deux axes, à savoir l'axe Tamba-Kidira-Bakel et l'axe Bakel-Ourossogui respectivement en sand asphalt et en bicouche. Ces deux tronçons ont été aménagés au même moment. Cependant le tronçon Tamba-Kidira est plus sollicité du point de vue trafic, ce qui a un effet non négligeable sur le type et l'intensité des dégradations.

Pour le sand asphalt nous avons :

Désignation	Quantité
Entretien périodique de 2006	712 728 732 F CFA TTC
Entretien périodique de 2007	566 365 780 F CFA TTC
Linéaire	250,5 km
Moyenne kilométrique	5 106 166 F CFA TTC/km
Moyenne annuelle	638 271 F CFA TTC/km/an

Tableau V.5 : coûts d'entretien kilométrique du sand asphalt

Pour le bicouche nous aurons :

Désignation	Quantité
Entretien périodique de 2005	377 900 000 F CFA TTC
Entretien périodique de 2006	76 800 000 F CFA TTC
Entretien périodique de 2007	150 000 000 F CFA TTC
Linéaire	116 km
Moyenne kilométrique	5 212 931 F CFA/km
Moyenne annuelle	651 616 F CFA TTC/km/an

Tableau V.6 : coûts d'entretien kilométrique du bicouche

En matière d'entretien, le sand asphalt coute moins cher que le bicouche. Cependant, si l'on capitalise les coûts d'entretien annuel, on se rend compte que le bicouche reste toujours le plus économique selon cet exemple.

Conclusion partielle :

Le sand asphalt occupe une part non négligeable dans les types de revêtements utilisés dans la sous région. Certains pays comme la Cote d'Ivoire ont acquis une expérience particulière dans la mise en œuvre de ce type de revêtement.

Dans ce chapitre nous avons présenté le cas du Sénégal par rapport à sa situation géographique qui fait qu'une bonne partie du pays est caractérisée par un climat favorable pour l'utilisation du sand asphalt. Et, du point de vu géologique, le Sénégal est riche en sable, mais de qualité moindre, qui pour être utilisé en revêtement sand asphalt demande à être amélioré pour répondre aux exigences des normes en matière de performances.

Nous avons fait également une évaluation financière des coûts liés à la mise en œuvre du sand asphalt et du bicouche mais aussi des coûts d'entretien occasionnés par ces deux types de revêtement. Il en ressort de cette analyse que le bicouche est plus économique que le sand asphalt.

Certes le Sénégal est doté d'un environnement favorable au sand asphalt et le trafic sur une bonne partie du pays est inférieure à 1000 véhicules/jour, cela n'exclut cependant pas de procéder à une étude technico-économique pour justifier son choix par rapport aux autres types de revêtement.

L'utilisation du sand asphalt peut se justifier dans certaines conditions par une disponibilité de matériaux de qualité. Cependant il faudra vérifier les conditions de circulation si elles sont compatibles avec le revêtement en sand asphalt.

Les revêtements en enduit superficiels, considérés jusqu'ici comme étant les plus économiques, ne le sont plus dans la mesure où ils sont coude-à-coude avec le revêtement en sand asphalt. De surcroît les revêtements en enduit superficiel (bicouches ou monocouches) ne sont pas recommandés par les Hautes Autorités du Sénégal. L'autre inconvénient des bicouches, c'est une technique dont la mise en œuvre n'est pas maîtrisée par la plupart des entreprises évoluant dans le secteur routier. Cela offre alors plus d'avantages au sand asphalt qui demeure ainsi le revêtement le moins cher par rapport aux autres types de revêtement tels que les enrobés denses et les bétons bitumineux.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

La route Tamba-Kidira-Bakel a été aménagée dans un contexte particulier. L'environnement du projet se situe dans la zone la chaude et la plus pluvieuse du pays. Les dégradations sont de deux types principalement : les fissures et les ornières.

Nous ne pouvons pas dire si les dégradations qui se sont manifestées après cinq ans de mise en service sont prématurées car aussi bien l'expérience ivoirienne que burkinabé montre que le problème majeur du sand asphalt reste son comportement vis-à-vis du retrait hygrothermique qui se manifeste par une fissuration du revêtement. D'ailleurs ce phénomène a été constaté avant même la fin des travaux sur un tronçon aménagé dans le cadre du projet TKB. Ces fissurations peuvent évoluer très vite en endommagement plus sérieux tels que le faïençage et les nids de poule.

Il ressort de cette étude que les dégradations apparues sont liées principalement à :

- la nature du sable, dont l'emprunt est caractérisé par une hétérogénéité causant des performances différentes des mélanges bitumineux et par conséquent des différences du point de vue comportement sous les différentes sollicitations.
- le type de bitume : le bitume utilisé vieillit plus vite que ses pairs. Le bitume au niveau des zones saines est plus dur que celui des zones fissurées et des zones traitées. Le premier est de la classe des 40/50 et les derniers de la classe des 50/70.
- le trafic : il a connu une croissance exponentielle, surtout le trafic lourd, après la crise ivoirienne de 2002.
- le climat : principalement la température qui a un effet sur le module de l'enrobé, Il diminue la faculté de l'enrobé à résister à l'orniérage sous trafic.
- mise en œuvre : alternance de zones saines et de zones dégradées avec des limites franches pour un même trafic et pour une même formulation.
- contrôle : suivi de la qualité de la mise en œuvre.

Les solutions curatives proposées portent sur la mise en œuvre d'un tapis d'enrobés. Ce choix se justifie d'une part par les sollicitations nouvelles auxquelles la chaussée est exposée et les limites du revêtement en bicouche réalisé en 2006 et en 2007, vu les dégradations apparues sur les zones traitées d'autre part.

Les solutions préventives concernent les mesures nécessaires à prendre en compte pour anticiper sur les dégradations et il s'agit de la prise en compte de l'environnement du projet, du suivi de la qualité des matériaux à mettre en œuvre, des précautions de mise en œuvre et de la formulation à utiliser entre autres.

Le comportement appréciable des zones similaires à celle où la carotte C4 a été extraite nous a conduits à formuler des recommandations sur le type de formulation à utiliser et sur l'importance de la qualité minéralogique du granulat.

Au chapitre 5, nous avons passé en revue l'expérience ivoirienne et burkinabé en matière de réalisation de revêtement en sand asphalt, et nous avons vu que l'utilisation du sand asphalt était liée à un certain nombre de paramètres, principalement la disponibilité de sable de qualité et l'éloignement du barycentre du projet par rapport aux carrières de production de concassées en constituent les raisons les plus admises.

Le Sénégal est doté de sable, mais en majeure partie de qualité médiocre hormis dans certaines zones qui sont traversées par un cours d'eau. Le climat dans la majeure partie du pays est favorable pour le sand asphalt. On serait tenté de dire que si les études technico-économiques sont favorables pour le sand asphalt, alors il peut être adopté comme revêtement routier au Sénégal si toute fois les dispositions définies à la section IV.8.2 sont respectées.

Comme tout œuvre humaine, ce travail gagnerait à être perfectionné afin de maîtriser le comportement du sand asphalt au même titre que les ED et les BB.

Il serait nécessaire de mettre sur place une politique de suivi régulier de ce type de revêtement afin de maîtriser son comportement : étudier les dégradations qui naissent et leur évolution.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] RAPPORT N°5 DE SURVEILLANCE ET CONTROLE DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION DE ROUTES BITUMEES RNI : Tambacounda-Bala-Kidira (185,200 km) RN2 Bakel – Kidira. GIC, Juillet 1998
- [2] RAPPORT FINAL DE SURVEILLANCE ET CONTROLE DES TRAVAUX DE CONSTRUCTION DE ROUTES BITUMEES RNI : Tambacounda-Bala-Kidira (185,200 km) RN2 Bakel – Kidira. GIC, Mai 2000
- [3] RECOMMANDATION pour le choix, l'étude et la réalisation des couches bitumineuses de surface : Sand-asphalt, LBTP, Mai 1978
- [4] Rapport de présentation de la variante sand-asphalt pour le revêtement de la route Tamba-Kidira-Bakel, CSE & CEREEQ, Août 1997
- [5] CHAUVIN, Jean-Jacques. Les sables : Guide d'utilisation routière, CETES
- [6] Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussée, LCPC-SETRA, 1994
- [7] Autopsie d'une chaussée, LORINO, Tristan. LCPC, fichier .pdf, 83p.
- [8] Granulats et liants routiers, BERTHIER, Jean. Techniques de l'Ingénieur, fichier.pdf, 13p.
- [9] Manuel sur les routes dans les zones tropicales et désertiques – Tome 3 Entretien et exploitation de la route, Secrétariat d'Étude chargé aux Affaires Étrangères chargé de la coopération 1972
- [10] Plan triennal glissant : Étude du plan triennal de transports au Sénégal 2007-2009, APAVE Sahel, 77p.
- [11] cahier des charges "granulat", GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG, Juin 2006
- [12] cahier des charges "Enrobés", GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG, Juin 2006
- [13] cahier des charges "ENDUITS SUPERFICIELS D'USURE", GRAND-DUCHE DE LUXEMBOURG, Juin 2006
- [14] DIOME, Soulye. Cours de ROUTE II, École Supérieure Polytechnique. 2006/2007
- [15] BA, Bakary. Étude de l'utilisation du sand asphalt en couche de revêtement (Application au chantier Tamba-Kidira-Bakel). Projet de Fin d'Étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, ESP Thiès, Juillet 2007. 83 p.
- [16] DIOUF, Cheikh Yatt. Élaboration d'un catalogue des structures types de chaussées neuves au Sénégal. Projet de Fin d'Étude en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, ESP Thiès, Juillet 2007. 83 p.

- [17] Rapport sur l'évaluation et la présentation de propositions pour le dimensionnement des structures de chaussées à adapter (Gossas-Kaolack-Sokone / Nioro / Birkilane), Associated Engineers, 2005
- [18] JANATI IDRISSE A. les techniques de renouvellement des couches d'usure, DRCR
- [19] Catalogue des dégradations de surface des chaussées, Méthode d'essai N°52, LCPC
- [20] Exécution et analyse des carottages de chaussées, Méthode d'essai N°43, LCPC
- [21] DORÉ, Guy. Réhabilitation des chaussées. GCI -Université LAVAL, notes de cours. Fichier ppt.
- [22] Étude du niveau de sollicitation des routes du Burkina Faso face à la crise ivoirienne, BCEOM-avril 2003
- [23] Construction de la structure routière Tome II : Liants hydrocarbonés, R. CROTTAZ, LAVOC, avril 1978.

Webiographie

- [24] www.lcpc.fr
- [25] www.setra.fr
- [26] www.wikipedia.org
- [27] <http://www.bitume.info>
- [27] www.smbci.ci
- [28] www.aatr.sn

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I.a : Résultat de comptage de trafic 2002 sur l'axe Tamba-Kidira.

ANNEXE I.b : Résultat de comptage de trafic 2002 sur l'axe Kidira-Bakel

ANNEXE II : Déflexion caractéristique

ANNEXE III : Données IRI

ANNEXE IV : Relevés visuels des dégradations et positions des carottes

ANNEXE V.a : Essai granulométrique, vérification avec le fuseau

ANNEXE V.b : Essai granulométrique, vérification avec le fuseau

ANNEXE VI : Coupe de sondage

ANNEXE VII : Simulation avec ALIZÉ 4

ANNEXE I.a : Résultat de comptage de trafic 2002 sur l'axe Tamba-
Kidira.

**ANNEXE I.b : Résultat de comptage de trafic 2002 sur l'axe Kidira-
Bakel**

ANNEXE II : Déflexions caractéristiques

ANNEXE III : Données IRI

ANNEXE IV : Relevés visuels des dégradations et positions des
carottes

ANNEXE V.a : Essai granulométrique, vérification avec le fuseau

Duriez des sand asphalts

**ANNEXE V.b : Essai granulométrique, vérification avec le fuseau des
micro-bétons**

ANNEXE VI : Coupe de sondage

ANNEXE VII : Simulation avec ALIZÉ 4