Evaluation de la portance résiduelle des routes revêtues- Contribution à l'étude de réhabilitation de la route Parakou-Béroubouay

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE **MASTER**

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE/ROUTES ET OUVRAGES D'ART

Présenté et soutenu publiquement le 30/09/2020 par

Louange Maurel A.G. BOSSOU (20131126)

Directeur de mémoire : Prénom NOM suivi du grade ou du titre

Encadrant 2iE : Célestin OVONO MEZUI, Enseignant au 2IE

Maître de stage : Herman GBEDJI, Directeur Départemental des Infrastructures et des Transports Borgou-Alibori

Structure d'accueil du stage : Centre National d'Essais et de Recherches en Travaux Publics (CNERTP)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Pr Igor OUEDRAOGO

Membres et correcteurs : Dr Philbert NSHIMIYIMANA

M. Patrick GBOHOUI

Promotion [2020/2021]

Dédicaces

Je dédie ce document à mes parents : Innocent et Monique BOSSOU pour leurs efforts fournis à ma formation et leur soutien durant mes années de formation à l'Institut 2iE. Prenez ce document comme l'accomplissement des années de sacrifices que vous avez consentis pour faire de moi ce que je suis. Sachez qu'il est le début d'une aventure noble.

CITATIONS

L’Eternel mon Dieu

Aucune œuvre ne saurait aboutir sans ton agrément,

Prend ceci comme l’œuvre de tes exploits

Gloire à toi, louanges à toi, vers toi sera le retour. Amen

Remerciements

A DIEU le père tout puissant, à son fils Jésus Christ notre Seigneur, et à l'Esprit Saint.

A la Sainte Vierge Marie, ma mère et à toute la cour Céleste.

A toute ma famille.

Je tiens à remercier également tous ceux qui ont contribués d'une manière ou d'une autre, tant par leurs conseils, leurs soutiens, que leurs savoir-faire au bon déroulement de mon stage et à l'aboutissement de ce travail. Ces remerciements s'adressent particulièrement aux personnes dont les noms suivent :

- Pr Mady KONDA, Directeur Général de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau de l'Environnement (2IE) ;
- Monsieur OVONO MEZUI Célestin, encadreur et enseignant à 2IE pour ses conseils et le sacrifice de son précieux temps malgré ses nombreuses occupations ;
- Monsieur Herman Hervé GBEDJI, Directeur Départemental des Travaux Publics Borgou- Alibori pour son aide dans l'obtention de mon stage et en tant que maitre de stage pour sa disponibilité ;
- Monsieur Romuald DANSOU, Ingénieur Génie Civil, Directeur Technique du CNERTP ;
- Monsieur Omer ATTAKPA, mon très cher oncle pour ses conseils et sa disponibilité
- Monsieur Armel EBLOHOUE, Ingénieur Géotechnicien a SOGEA SATOM Bénin pour son aide
- Monsieur Barthélémy AKOUETE, Ingénieur qualité au CNERTP pour son suivi au Laboratoire
- A l'ensemble du personnel du CNERTP, pour m'avoir permis de m'intégrer facilement et pour leurs conseils et disponibilité

- A mes amis et camarades Silifath SALAMI, Noé et Daniel ONIDJE, Boris KOUAME, Younaise ADEOTAN, Modeste KOGNONSA pour leur soutien tout au long de mon parcours.

Par ailleurs, à tous ceux et celles dont les noms ne figurent pas sur cette liste, qu'ils trouvent en ces mots, l'expression de ma profonde gratitude.

Résumé

Le présent travail est une étude consacrée à la recherche de solution à l'apparition précoce des ornières relativement importantes dans les couches de chaussée. Le but visé est de ressortir les causes potentielles à l'origine de l'apparition précoce de l'orniérage afin de proposer une solution durable pour sa limitation. Le tronçon Parakou – Béroubouay de la RNIE2 a fait l'objet de cas pratique.

L'inspection visuelle de la chaussée, a permis à faire un relevé des dégradations du Pk 29+400 au Pk 151+753 a été exposée. Il ressort de l'inspection que, le trafic actuel de 705 Poids Lourds (PL) en 2019 sur la voie la plus chargée contre 259 PL en 2009, est inadapté à la structure existante. Une agressivité importante des charges, l'inadaptation des matériaux, une transformation de la granulométrie initiale, une perte de rigidité, un vieillissement rapide du revêtement, sont d'énormes causes qui expliquent l'état de dégradation précoce avancée de ladite route. L'évaluation de la chaussée a conduit à la nécessité d'un renforcement, les études de trafic et de portance ont montré que la classe du trafic est T4 et celle de la plate-forme est S5.

Au terme de cette étude, il est retenu que la solution finale de renforcement comprend donc 25 cm de matériaux recyclés améliorés au ciment (3%) en couche de fondation, 8 cm de Grave Bitume en couche de base et une couche de roulement en Béton bitumineux de 6 cm.

Les études hydrologiques et hydrauliques ont permis d'avoir les débits des bassins qui croisent le tronçon et de trouver les sections des ouvrages à remplacer dont nous avons fait le dimensionnement structural. Les questions de signalisation routière, d'éclairage routier et d'impact environnemental et social ont été abordées. Après estimation, il ressort un coût de projet de **onze milliards deux cents trente-six millions sept cent vingt mille cinquante Francs (11 236 720 050) francs CFA.**

Mots Clés :

1 – Agressivité
2 – Dégradation
3 – Orniérage
4 - Trafic
5 – Portance résiduelle

ABSTRACT

The present work is a study devoted to the search for a solution to the early appearance of relatively important ruts in the road layers. The aim is to highlight all the different causes behind the early appearance of rutting in order to offer a lasting solution to its limitation. The Parakou - Béroubouay section of the RNIE2 was the subject of a practical case.
The visual inspection of the roadway, which consisted of a survey of the damage from Pk 29 + 400 to Pk 151 + 753, was exposed. The inspection revealed that the current traffic (2019) 705 PL on the busiest track against 259 PL in 2009 is unsuitable for the existing structure. Significant aggressiveness of the loads, unsuitability of the materials, transformation of the initial particle size, loss of rigidity, rapid aging of the coating, are enormous causes which explain the state of early advanced degradation of the said road. The pavement assessment led to the need for reinforcement, the traffic and lift studies have shown that the traffic class is T4 and that of the platform is S5.
At the end of this study, it is retained that the final reinforcement solution therefore includes 25 cm of recycled materials improved with cement (3%) in the foundation layer, 8 cm of Grave Bitumen in the base layer and a concrete wearing course. bituminous 6 cm.
The hydrological and hydraulic studies made it possible to have the flows of the basins which cross the section and to find the sections of the works to be replaced which we have made the structural dimensioning. The issues of road signs, road lighting and environmental and social impact were addressed. After estimation, a project cost of eleven billion two hundred thirty-six million seven hundred twenty thousand fifty Francs (11,236,720,050) CFA francs emerges.

Key words:

1 - Traffic

2 – Residual lift

3 - Degradation

4 - Floor

5 – Recycled material

Liste des abréviations

AASHO:	American Association of State Highway Official
AG :	Analyse Granulométrique
AQTR :	Association Québécoise du Transport et des Routes
Autob. :	Autobus
ATS :	AïwaTechnical Service
BB :	Béton Bitumineux
BOAD :	Banque Ouest Africaine de développement
BCEOM :	Bureau Central des Etudes d'Outre-Mer
CBR :	Californian Bearing Ratio
CEBTP :	Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics
CEDEAO :	Communauté Economique Des Etats d'Afrique de l'Ouest
CEE :	Communauté Economique Européenne
CNERTP :	Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics
CRR :	Centre de Recherches Routières
Ctte :	Camionnette
C.Lgers :	Camions Légers
C.Lrds :	Camions Lourds
DDTPT :	Direction Départementale des Travaux Publics et des Transports
DER :	Direction de l'Entretien Routier
DGTP :	Direction Générale des Travaux Publics
DPR :	Direction des Pistes rurales
DPSE :	Direction de la Programmation et du Suivi-Evaluation
DROA :	Direction des Routes et Ouvrages d'Arts
DTN :	Direction des Travaux Neufs
EA :	Ensembles articulés
EME :	Emulsion de bitume à Module Elevé
FED :	Fonds Européen pour le Développement
GB :	Grave bitume
LA :	Limites d'Atterberg
LCPC :	Laboratoire Central des Ponts et Chaussée

LERGC : Laboratoire d'Essai et de Recherches en Génie Civil

MB : Minibus

MJA : Moyenne Journalière Annuelle

MTPT : Ministère des Travaux Publics et des Transports

OPEP : Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole

OPM : Optimum Proctor Modifié

PK : Point Kilométrique

PL: Poids Lourds

PSI: Present Service ability Index

PTF: Plateforme

RNIE : Route Nationale Inter-Etats

SETRA : Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

SCET : Société Centrale pour l'Equipement du Territoire

SOGEA : Société Générale de Gestion des Eaux et Assainissement

TMJA : Trafic Moyen Journalier Annuel

TP : Travaux Publics

UVP : Unité de Véhicule Particulier

VL : Véhicule Léger

VP : Véhicule Particulier

Table des matières

Dédicaces i

CITATIONS ii

Remerciements iii

Résumé v

ABSTRACT vi

Liste des abréviations vii

Table des matières ix

LISTE DES TABLEAUX xii

LISTE DES FIGURES xiii

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE I : GENERALITES 4

I.1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL 4

I.1.1. Historique du CNERTP 4

I.1.2. Situation Géographique 5

Fiche d'identification 5

I.1.3. Missions et attributs du CNERTP 5

I.1.4. Activités du CNERTP 6

I.1.5. Réalisation du CNERTP 6

I.2. PRESENTATION DU PROJET 8

I.2.1. Situation géographique de la zone du Projet 8

I.2.2. Contexte et justification du projet 9

I.2.3. Caractéristiques géo-climatiques de la zone du projet 9

I.2.4. Objectif général 10

I.2.5. Objectifs spécifiques 10

I.3. METHODOLOGIE DE CONCEPTION 10

I.3.1. Méthode 10

I.3.2. Matériels utilisés 13

CHAPITRE II : ETUDE TECHNIQUE 14

II.1.1. Etude Topographique d'exécution du projet 14

II.1.2. Résultats d'étude topographique 14

II.1.3. Inspection visuelle et Relevé des dégradations de la chaussée 15
II.1.4. Mesures et analyse des résultats de déflexion 18
II.1.5. Analyse croisée déflexion- dégradation 23
II.1.6. Evaluation de la chaussée 23
II.1.6.1. Caractérisation de l'état global de la chaussée 24
II.1.6.1.a. Valeur de la déflexion caractéristique 24
II.1.6.1.b. Quantification des dégradations du PK74 au PK84 24
II.1.6.2. Méthodes d'évaluation des chaussées 25
II.1.6.2.a. Par la méthode du VIZIR 26
II.1.6.2.b. Par la méthode du Centre de Recherches Routière (CRR) de Bruxelles 29
II.1.7. Solutions de renforcement 32
II.1.8. Conclusion partielle 33
II.1.9. Etude de trafic 33
II.2. Conception géométrique 35
II.2.1. Rappel des Termes de Références 35
II.2.2. Calcul des paramètres cinématiques en fonction de la vitesse de référence 36
II.3.1. Présentation des différentes structures de renforcement 37
II.3.2. Choix de la variante 37
II.3.3. Principe de dimensionnement 38
II.3.4. Limites admissibles des contraintes et déformations 39
II.3.5. Vérification du dimensionnement 40
II.3.6. Conclusion de l'étude 45
II.4.1. ETUDE HYDROLOGIQUE 45
II.4.1.1. Présentation des caractéristiques des bassins versants 45
II.4.1.2. Présentation des méthodes d'évaluation de débits 46
II.4.1.3. Calculs des débits Projet 47
II.4.2. ETUDE HYDRAULIQUE 49
II.4.3. DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DES OUVRAGES HYDRAULIQUES 50
II.4.3.1. Méthode de calculs 50
II.4.3.2. Résultats de calculs 50
CHAPITRE III : SIGNALISATION ROUTIERE – ECLAIRAGE PUBLIC 52
III.1.1. Signalisation horizontale 52
III.1.2. Signalisation verticale 53
CHAPITRE IV : ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET 56
SOCIAL ET ESTIMATION DU COUT DU PROJET 56

IV.1.1. Cadre institutionnel, législatif et réglementaire 56
IV.1.2. Impacts positifs..... 57
IV.1.3. Impacts négatifs et mesures d'atténuation 58
Conclusion 65
Recommandations et perspectives 66
Bibliographie..... 67
ANNEXES 68
ANNEXE 0 : Historique de la route Parakou-Béroubouay 69
ANNEXE 1 : ETUDE GEOMETRIQUE 71
ANNEXE 2 : ETUDE GEOTECHNIQUE ET DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSEE 73
ANNEXE 3 : ETUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE 122
ANNEXE 4 : DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DE DALOT 137
ANNEXE 5 : TABLEAU DES SIGNALISATIONS VERTICALES..... 161
ANNEXE 6 : COUT ESTIMATIF DU PROJET 162
ANNEXE 7 : PROFILS EN TRAVERS..... 168

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Différentes sections du CNERTP et leurs tâches 6
Tableau 2: Données climatiques de la Station de N'Dali 9
Tableau 3: Caractéristiques du profil en travers type de la route existante 14
Tableau 4 : Interprétation de la qualité de la structure en fonction de la déflexion (manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux) 19
Tableau 5: Synthèse des mesures du PK9+400 au PK151+753 21
Tableau 6: Diagramme des déflexions caractéristiques sur l'axe Parakou-Béroubouay (Côté Droit et Côté Gauche) 22
Tableau 7: Récapitulatif et quantification des dégradations : Gravité et Etendue du PK 74 au PK84 24
Tableau 8: VIZIR-DIAGRAMME METHODOLOGIQUE 26
Tableau 9: Note de qualité (Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux) 28
Tableau 10: Mesures de déflexion sur ces 15km 29
Tableau 11: Degré d'endommagement du Pk 74 au PK 84 31
Tableau 12: Résultats du comptage manuel tronçon Parakou-Béroubouay de 2011 à 2014 33
Tableau 13: Caractéristiques géométriques de la route 36
Tableau 14: Calcul des paramètres cinématiques 37
Tableau 15: Différentes variantes de structure de renforcement 37
Tableau 16: Choix de la variante 38
Tableau 17: Paramètres d'entrée des différents matériaux utilisés 41
Tableau 18: Vérification du dimensionnement de la variante choisie 42
Tableau 19: Vérification du dimensionnement de la variante de 8cm de Grave Bitume 43
Tableau 20: Vérification du dimensionnement de la variante de SOGEA-SATOM 44
Tableau 21: Caractéristiques des bassins versants obtenus 46
Tableau 22: Débits calculés selon la méthode rationnelle 48
Tableau 23: Débits calculés selon la méthode ORSTOM 48
Tableau 24: Récapitulatif des sections des dalots transitant les débits 49
Tableau 25: Tableau récapitulatif des sollicitations du dalot 51
Tableau 26: Tableau récapitulatif du ferraillage du dalot 51
Tableau 27: Tableau des caractéristiques des lignes de marquage 53
Tableau 28: Impacts négatifs et mesures d'atténuation 60
Tableau 29: Coût estimatif du Projet 64
Tableau 30: coefficient de frottement longitudinal pneus/chaussée en fonction de Vr 71
Mesures de déflexion : Tableau 31: Tableaux des mesures de déflexion 73
Tableau 32: Calcul du coefficient d'agressivité par TRE 90
Tableau 33: Formulation d'un diagnostic 104
Tableau 34: Récapitulatif des différentes caractéristiques de nos matériaux 111
Tableau 35: Calcul des limites absolues 113
Tableau 36: Caractéristiques des bassins versants 123
Tableau 37: Calcul des débits des bassins versants selon la méthode rationnelle 125
Tableau 38: Calcul des débits selon la méthode ORSTOM 127
Tableau 39 : Sections des ouvrages hydrauliques 136
Tableau 40: Récapitulatif du calcul des sollicitations 149
Tableau 41: Récapitulatif des ferraillages du dalot 160
Tableau 42: Etude du coût estimatif du Projet 167

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : *Entrée du CNERTP* 4
Figure 2 : *Plan de situation du CNERTP* 5
Figure 3 : *Itinéraire du tronçon* 8
Figure 4: Méthodologie d'étude adoptée 12
Figure 5: Poutre BENKELMAN 18
Figure 6: Classification du trafic en fonction du nombre d'essieux équivalents (CEBTP) 34
Figure 7: Zones de Grande Masse PK 12 au PK15 Figure 8: Zone de faïençage Pk 17 87
Figure 9: Zone du PK 81-82 : Dégradation avant Guéssou Figure 10: PK 103-105 : Zone avant l'agglomération de Gando (Bembèrèkè)
8
8
Figure 11: Effets du fluage et du ressuage sur la 88
signalisation horizontale: Cas de GAMIA PK 130 Figure 12: Affaissement au droit d'un 88
Figure 13: Choix de la structure en grave bitume (Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux) 93
Figure 14: Choix de la structure en grave ciment (Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux) 94
Figure 15: Variation du nombre d'années de service futur en fonction du degré de saturation 100
Figure 16: Abaque permettant de caractériser l'état global du tronçon ausculté 102
Figure 17: Modélisation Alizé de la variante choisie 115
Figure 18: Synoptique des interventions retenues par SOGEA-SATOM pour la reprise des travaux 119
Figure 19: Délimitation des Bassins versants (Global Mapper) 123
Figure 20: Abaque de détermination du temps de base en fonction de la superficie du bassin (ORSTOM) 127
Figure 21: Abaque de détermination du coefficient d'abattement (ORSTOM) 128
Figure 22: Abaque de détermination de H*=F (Q*) (BCEOM) 131

INTRODUCTION GENERALE

Le Bénin occupe une position stratégique parmi les pays côtiers d'Afrique de l'Ouest. Il constitue un couloir naturel pour le transit des marchandises à destination et en provenance de plusieurs pays dont le Niger via le Port de Cotonou. La RNIE 2 est un des chaînons du corridor de la dorsale Sud – Nord (Cotonou – Parakou – Malanville – Frontière du Niger) et constitue un atout non négligeable pour la nation béninoise dans l'environnement régional.

En effet, les performances à long terme de l'économie d'un pays ainsi que l'amélioration des conditions de vie de la population ne sauraient alors être une réalité sans avoir connu un développement irrévocable en infrastructures routières.

Ces dernières assurent le transport des marchandises entre les zones de production ou d'importation et les zones de consommation ou d'exportation. Elles permettent donc le contact direct entre les populations productrices ou consommatrices et est aussi un moyen d'échange entre elles ou avec l'extérieur. Donc elles constituent le principal mode de liaison qui rattache les régions entre elles, qu'elles soient rurales ou urbaines et assurent le rôle d'interconnexion entre les pays limitrophes ou voisins.

Ainsi, ces infrastructures constituent un patrimoine précieux qu'il faut entretenir et évaluer son comportement dès sa mise en service. Pendant son exploitation, la chaussée est appelée à subir des dommages. Ces dommages se traduisent par une dépréciation progressive c'est-à-dire une dégradation du confort offert aux usagers sous l'effet de certains facteurs comme les contraintes du trafic ; les conditions climatiques et les activités humaines.

En d'autres termes, l'un des principaux effets du développement économique d'un pays, est alors sans aucun doute d'accroitre les échanges de telle façon que ces infrastructures routières se trouvent d'un moment à un autre, sollicité au-delà de leur capacité de résistance. De plus, partant de leur évolution, elles sont appelées à écouler des trafics de plus en plus élevés et la rupture de leur structure peut être brutale à cause des différentes sollicitations.

L'accroissement du trafic, l'augmentation de la charge transportée induisent des effets considérables au sein des couches bitumineuses. Celles-ci atteignent rapidement plus tôt que prévu leur limite de résistance aux déformations permanentes, ce qui conduit à un affaissement de la chaussée aux endroits de passage des roues des véhicules. On parle alors d'irrégularité

dans le comportement ou dans l'exploitation de la chaussée voir de dégradations précoces notamment l'orniérage (dépressions longitudinales et bourrelets dans les traces des roues). Ce dernier pose ainsi des problèmes de sécurité routière ; de la tenue de la chaussée quand il atteint des profondeurs critiques, et diminue non seulement la période de service des routes mais peut causer une gêne lors du changement de files par temps chaud et provoquer des risques d'aquaplanage lorsque l'eau rentre dans les ornières par temps de pluie.

Les rapports d'expertise et autres rapports finaux de chantier que nous avons consultés à la phase de la collecte de données, nous ont révélé que la plupart des routes nouvellement construites ou réhabilitées dans ces dernières années au Bénin, sont menacées par le phénomène des dégradations précoces notamment l'orniérage. Ce phénomène, constitue une préoccupation pour les bailleurs de fonds et l'administration routière à cause de la rentabilité de l'investissement que constituent ces infrastructures routières.

L'idée de contribution à l'analyse des dégradations précoces par orniérage des chaussées neuves, nous vient du constat fait au terme de notre enquête de cette préoccupation des bailleurs de fonds et de l'administration routière et enfin d'une interrogation, celle de savoir le niveau de recherches en matière des solutions adéquates du concept des dégradations précoces au bénin.

La quête de la réponse à cette question, nous a permis de constater dans ces dernières années que ce phénomène a été observé au Bénin peu de temps après l'achèvement des travaux sur la plupart des routes nouvellement construites ou réhabilitées. Il s'agit de :

- Aménagement et bitumage de la route Savè – Parakou entre 1986 et 1993 ;
- Réhabilitation de la route Godomey – Bohicon de 1993 à 1994 ;
- Aménagement des voies d'accès et de traversée de Cotonou : lots A et B de 1994 à 1996 ;
- Aménagement et bitumage de la route Djougou – Natitingou de 1994 à 1996
- Réhabilitation et renforcement de la route Béroubouay – Malanville entre 1995 et 1998 ;
- Réhabilitation de la route Tohoun – Azovè – Abomey – Bohicon de 1995 à 1998 ;
- Réhabilitation de la route Cotonou – Hillacondji entre 1997 et 1999 ;
- Reconstruction de la route Cotonou – Porto/Novo de 1998 à 2002

- Aménagement et bitumage de la route Savalou – Djougou : section Savalou – Prèkètè de 2000 à 2003 ;

La plupart de ces dégradations précoces enregistrées sur ces routes, ont trouvé des solutions adéquates dans le temps. Mais malheureusement certaines de ces routes, principalement celles de la RNIE2 dont plus de 50% de ces tronçons présentent de nos jours des ornières sur leur revêtement juste après leur achèvement.

Pour notre travail nous avons choisi la route Parakou-Béroubouay comme cas d'étude à cause de son état de dégradations précoces avancés survenu après son exécution en 2010, et présente maintenant d'énormes difficultés de circulation qui engendre des cas d'accidents graves, et ne favorise pas l'acheminement des marchandises de centaines de millions en transit entre le Port Autonome de Cotonou et les pays limitrophes notamment le Niger.

C'est dans ce contexte que se justifie le projet de fin de formation intitulé : « Evaluation de la portance résiduelle des routes revêtues- Contribution à l'étude de réhabilitation de la route Parakou – Béroubouay. »

CHAPITRE I : GENERALITES

I.1. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

I.1.1. Historique du CNERTP

Figure 1 : ***Entrée du CNERTP***

Le Laboratoire National de Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) Créé en 1950 par les français a disparu en 1977 au profit du Centre National d'Essais et de Recherches des Travaux Publics (CNERTP) à cause de la nationalisation des entreprises menée par le régime révolutionnaire de cette époque.

Ce centre a un capital social qui est composé des immeubles et des matériels fixes d'exploitation appartenant au Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics. Ce centre joue pleinement aujourd'hui le rôle d'un organisme scientifique et technique mis à la disposition des services publics et des organismes privés pour les études du sol et le contrôle géotechnique des travaux. Le CNERTP est donc un laboratoire qui permet de sécuriser aussi bien les ouvrages que leurs usages.

Ce laboratoire intervient avant, pendant et après la construction de tout ouvrage par le contrôle rigoureux de la qualité des matériaux de construction à travers de multiples essais.

I.1.2. Situation Géographique

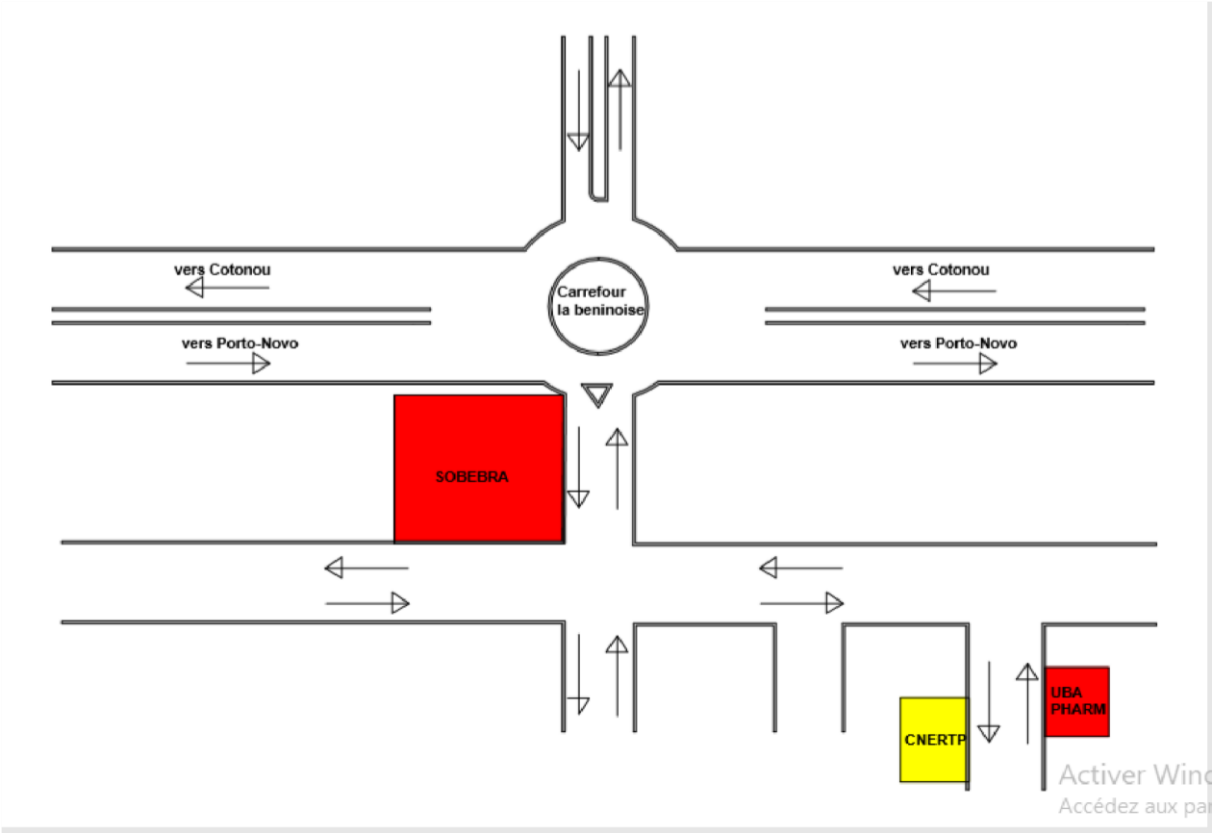


Figure 2 : ***Plan de situation du CNERTP***

Fiche d'identification

Dénomination : Centre National d'Essais et de Recherche et des Travaux Publics (CNERTP)

Adresse : 01 BP 1270 Cotonou BENIN

Tél : 21 33 09 78 / 21 33 52 48

Fax (229) 21 33 52 46

E-mail : cnertp@internet.bj

I.1.3. Missions et attributs du CNERTP

Le CNERTP a pour mission :

- D'assurer le contrôle de la qualité des matériaux et de leur mise en œuvre ;
- De participer à l'élaboration des normes et de veiller à leur application dans le domaine du bâtiment et des travaux publics

- De promouvoir et de développer la recherche en matière de bâtiment et de travaux publics ;
- De donner des agréments techniques relatifs aux matériaux et aux procédés de mise en œuvre.

Pour atteindre ses objectifs, le CNERTP se doit d'être une structure très bien organisée donc dirigée par une administration hiérarchisée et compétente en raison de la complexité de la tâche qui lui est assignée.

I.1.4. Activités du CNERTP

Sections	Tâches
Mécanique des sols	• Etudes des sols de fondations, ponts et ouvrages divers • Etudes et contrôles de géotechnique des barrages et remblais • Dimensionnements des fondations d'ouvrages
Routes	• études géotechniques routières, ferroviaires, et aéroportuaires • contrôle géotechnique des travaux
Essais spéciaux	• Des essais en vue du contrôle de qualité des matériaux de construction (granulats, liants, hydrauliques, etc. ……) • Contrôle de la qualité des bétons • Contrôle de la qualité des matériaux de construction importés.
Béton	• Formulation du béton • Contrôle de la résistance des ouvrages • Essais entrant dans la vérification de la qualité du béton

Tableau 1 : Différentes sections du CNERTP et leurs tâches

Au CNERTP, les activités sont réparties dans quatre sections citées dans le tableau 1 ci-dessus.

I.1.5. Réalisation du CNERTP

Le CNERTP a participé aux études et contrôles de la plupart des routes, ouvrages d'arts et aérodromes au Bénin notamment :

- L'agence BCEAO
- Les hôtels Sheraton, Novotel ;
- Les ponts de Porto-Novo et de Cotonou

Il a contribué aussi à la réalisation d'ouvrage importants à l'étranger tels que :

Au Togo :

- Hôtels du 02 février, de la paix et Sarakawa ;
- Aéroport de Niamtougou

Au Niger :

- Agence BCEAO
- Pont sur le fleuve Niger

I.2. PRESENTATION DU PROJET

I.2.1. Situation géographique de la zone du Projet

Le tronçon de route Parakou-Béroubouay, est une partie de la Route Nationale Inter- Etats N°2 (RNIE2) située dans le Nord- Est du Bénin plus précisément dans les départements du Borgou et de l'Alibori.

Cette dernière est répartie en deux lots : le lot 2 du PK 9 + 400 au PK 109 + 400 et le lot 3 du PK 109 + 400 au PK 151 + 755.

L'itinéraire du tronçon est tracé dans la carte du Bénin suivante :

Figure 3 : ***Itinéraire du tronçon***

I.2.2. Contexte et justification du projet

Le trafic vers les pays voisins passe par la RNIE 2 dont la section Parakou-Béroubouay est en mauvais état de praticabilité malgré ses réhabilitations en 2009 et en 2014 respectivement par les entreprises RCC et SOGEA-SATOM. En effet, cette section de route a connu des dégradations précoces avant la réception provisoire des travaux exécutés par l'entreprise RCC. Les travaux ont été suspendus suite à un règlement à l'amiable entre l'Etat Béninois, l'Union Européenne et RCC. La reprise des travaux a été donc confiée à l'entreprise SOGEA-SATOM.

Malgré la reprise des travaux, les dégradations persistent et se propagent. C'est donc dans ce cadre que nous avons estimé que la réponse aux dégradations passe par une étude que nous proposons sous forme de contribution à travers le présent thème.

I.2.3. Caractéristiques géo-climatiques de la zone du projet

Les relevés effectués régulièrement par la station météorologique de N'Dali sont présentés dans le tableau suivant pour la période janvier 2010 - Juin 2013**.** On note dans la région une saison des pluies très marquée de juillet à septembre.

Mois	Année 2010		Année 2011		Année 2012		Année 2013	
	Hauteur (mm)	Nombre de jours	Hauteur (mm)	Nombre de jours	Hauteur (mm)	Nombre de jours	Hauteur (mm)	Nombre de jours
Janvier	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0
Février	0,0	0	10,0	2	21,0	1	0,0	0
Mars	5,8	1	6,0	1	0,0	0	48,0	2
Avril	53,8	4	21,0	3	77,0	5	79,3	5
Mai	109,5	4	173,5	7	201,0	11	105,0	6
Juin	112,2	6	118,5	11	154,0	9	120,5	8
Juillet	187,2	11	164,5	9	363,0	13		
Août	157,7	7	237,5	9	197,0	9		
Septembre	367,0	16	250,0	15	455,5	12		
Octobre	76,3	8	136,5	11	100,0	3		
Novembre	28,0	4	0,0	0	0,0	0		
Décembre	0,0	0	0,0	0	0,0	0		

Tableau 2: Données climatiques de la Station de N'Dali

Comparé au relief de la partie méridionale du Bénin, celui de la zone d'étude est accidenté avec une hauteur variant entre 0 et 400 mètres. La partie ouest de la N'Dali est traversée par une bande d'élévation de collines dans les régions de Tèmé et Kori.

Le réseau hydrographique est caractérisé par deux affluents du fleuve Ouémé (OKPARA et APRO). La zone d'étude regorge également de nombreux petits cours d'eau très favorables à la pêche mais sous exploités jusqu'à ce jour.

I.2.4. Objectif général

Améliorer les performances routières pour répondre aux enjeux du développement économique sous régional des pays souvent tributaire de la surexploitation toujours croissante faite par les usagers.

I.2.5. Objectifs spécifiques

Pour atteindre cet objectif général, il est nécessaire de :

- Faire l'état des lieux de la situation de la route Parakou-Béroubouay (Visite de terrain, collecte et analyse des informations recueillies) ;
- Faire des études (géotechnique, hydrologique, hydraulique et d'impact environnemental) de la chaussée dégradée et Identification des causes des dégradations ;
- Proposer une solution de renforcement de la route.

I.3. METHODOLOGIE DE CONCEPTION

I.3.1. Méthode

- Recherche documentaire

Cette étape constitue en la recherche de toutes pièces écrites traitant des principales thématiques de l'étude. Elle a abouti à l'obtention d'anciens documents d'étude menées dans la zone du projet telle que :

- Les cours reçus lors de notre formation ;
- Les mémoires et thèses ;
- Les articles d'études scientifiques et des normes internationales en vigueur dans l'art ;
- Les différentes pièces écrites régissant les clauses afférentes à l'exécution de projet.

- Collecte de données

Nous avons procédé dans cette partie à l'assemblage de toutes les données relatives aux différentes études menées dans le cadre du projet ou sur des phénomènes se produisant dans l'environnement immédiat du projet. Il s'agit entre autre de :

- Le rapport géotechnique fourni par la mission de contrôle TRE;
- Les données du trafic fourni par la DPSE/DGI ;
- Les données topographiques ;
- Les différentes pièces écrites traitant de l'exécution du projet
- Les normes en vigueur.

- Organisation

Le chronogramme de la figure 3 suivante présente les différentes étapes de la démarche utilisée pour l'organisation notre travail.

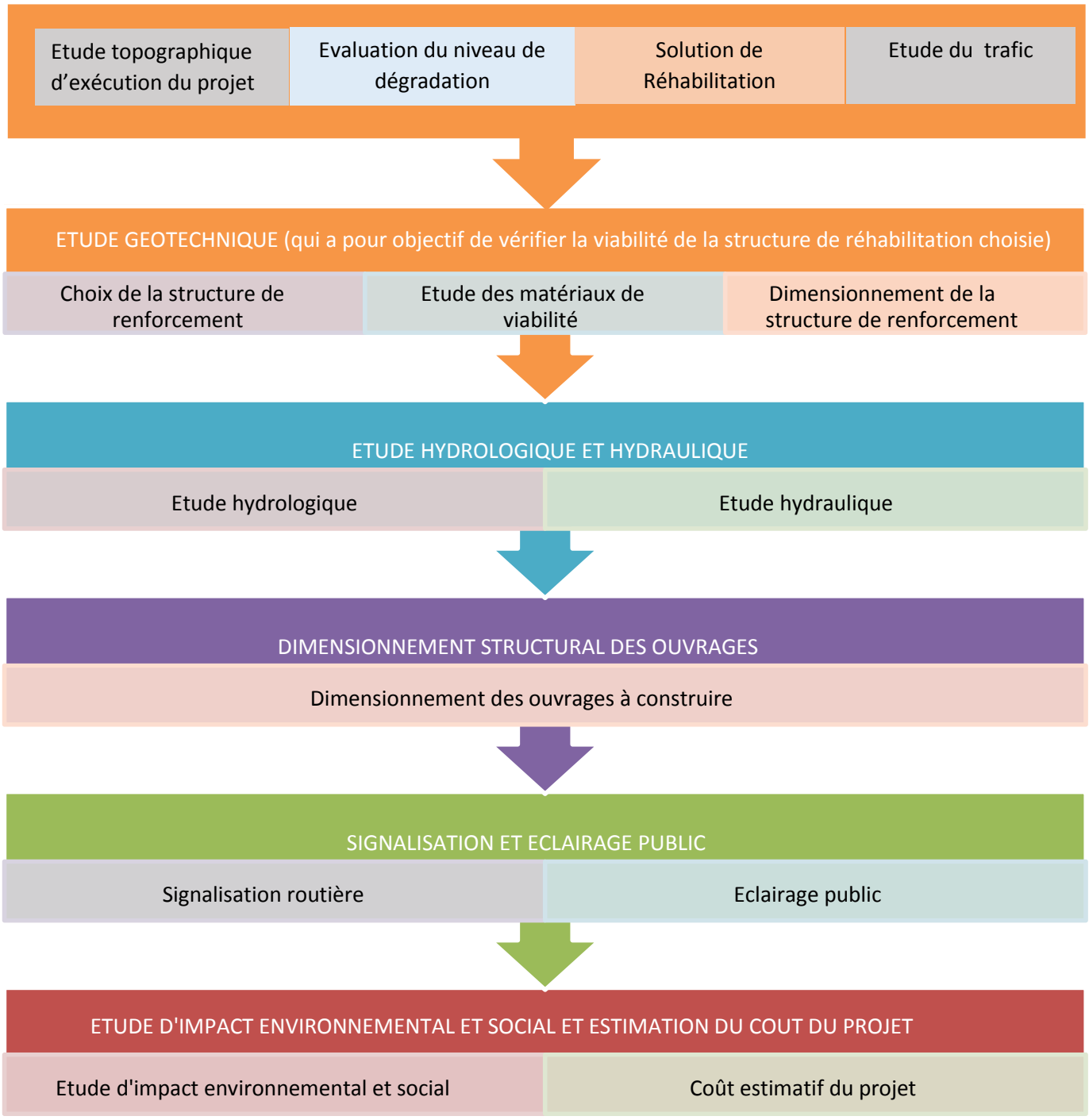


Figure 4: Méthodologie d'étude adoptée

I.3.2. Matériels utilisés

- Supports physiques et numériques

Il s'agit de tous les documents issus de la recherche documentaire et de la collecte des données

- Matériels de collecte et traitement des données

Le traitement des données s'est fait essentiellement avec des logiciels, applications et moteur de recherche de différents groupes de développeurs :

- Microsoft avec office 2013 (Microsoft Word ; Microsoft Excel) pour la rédaction du rapport
- Autodesk (AutoCad 2018 ; Civil 3D 2018.) pour les plans de ferraillage
- Google (Google Earth ; Global Mapper 17 ; Google Chrome ; Google) pour la délimitation des bassins versant, la détermination des caractéristiques de ces bassins versants et comme moteur de recherches
- Alizée LCPC pour l'analyse et le dimensionnement de la structure de renforcement

CHAPITRE II : ETUDE TECHNIQUE

II.1. Etat des lieux et Diagnostic

II.1.1. Etude Topographique d'exécution du projet

Les études topographiques sont effectuées selon la méthodologie décrite comme suit :

- Descente de la brigade topographique sur le terrain ;
- Reconnaissance du terrain
- Mise en place des polygonales ;
- Observation au GPS différentiel de tous les points de la polygonale principale ;
- Calcul des coordonnées des points de la polygonale principale à l'aide du logiciel Léica géo-office ;
- Levée des points de la polygonale secondaire à l'aide de la station totale ;
- Levée de l'état des lieux de la zone du tronçon (amorces, localités, ouvrages, etc…)
- Traitement des données à l'aide des logiciels Autocad, Civil 3D et Covadis.

II.1.2. Résultats d'étude topographique

L'étude topographique effectuée dans le cadre de notre projet a révélé les résultats suivants :

- La longueur totale du projet est d'environ 146 km
- Identification de buses et dalots ;
- Localisation des points singuliers et des amorces
- Détermination de l'ensemble des points de la polygonale du tronçon
- Profil en travers type de la route existante

Le Tableau 3 présente les caractéristiques du profil en travers de la route existante :

		Caractéristiques du profil en travers type		
Localisation PK	Type de profil	N°	Désignation	Dimensions
PK 9+400 PK 151+752 (Gauche et Droit)	Tout l'ensemble du tronçon	1	Chaussée 2x1 voies (Rase campagne) Chaussée unique (agglomération)	2x3.5 = 7m 1x9.0 = 9m
		2	Caniveaux en U ou fossés en terre	Variable
		3	Accotements	1.5m/ côté

Tableau 3: Caractéristiques du profil en travers type de la route existante

Le profil en travers type de la route existante étant différent de celui préconisé par les termes de références, il devient donc nécessaire d'étudier le nouveau tracé afin de répondre aux exigences fixées par le maitre d'ouvrages. Concernant les études du nouveau tracé, elles ont été menées par SOGEA-SATOM, nous nous sommes donc fiés à leurs spécifications pour l'exécution de nos travaux.

II.1.3. Inspection visuelle et Relevé des dégradations de la chaussée

L'inspection visuelle de la chaussée a été effectuée sur tout le long du tronçon du PK 9+400 de la sortie de Parakou au PK 151+752 sortie de Béroubouay. L'objectif visé est de relever toutes les pathologies constatées en précisant leur nature, leur position, leur étendue. Le point de ces relevés se trouve résumé dans le ‘’schéma itinéraire ‘’ élaboré à cet effet.
(Annexe 2)

1. Observations d'ordre général

Le tronçon Parakou-Béroubouay est dans l'ensemble affecté par les arrachements, les fissurations, les déformations importantes, et des remontées de matériaux :

- Les arrachements observés sont essentiellement les nids de poule, et les épaufrures. Ces nids de poule ont parfois un diamètre supérieur à 150 cm qui sont de gravité 2 selon VIZIR ;
- Au cours de sa réhabilitation en 2014, la largeur de la chaussée était de 7 m, aujourd'hui, cette largeur varie considérablement tout au long du tronçon. Variation due aux épaufrures ou dentelles de rive beaucoup plus marquées du côté droit, sens Parakou – Béroubouay ;

  Le constat épatant fait au cours de cette inspection visuelle, est l'état de la chaussée vis-à-vis des déformations importantes du revêtement sur la partie revêtue. Il s'agit des affaissements et plus particulièrement d'ornières longitudinales très profondes avec des bourrelets qui indiquent un fluage du béton bitumineux. Les zones d'ornières sont particulièrement situées aux approches et dans les agglomérations ou sur les pentes. Il s'agit des zones caractéristiques d'accélération, de décélération et de faible vitesse des poids lourds, qui produisent de plus fortes sollicitations sur la chaussée.

D'autres observations méritent d'être soulignées. Il s'agit :

- ✓ Les ouvrages de drainage sont envahis par les mauvaises herbes et souffrent d'ensablement. Néanmoins ils sont en bon état apparent ;
- ✓ Les talus sont dégradés et érodés notamment aux PK 60 et PK107 ;
- ✓ Le profil en toit de la chaussée a disparu, en témoigne les affaissements et orniérages accompagnés de bourrelets notés dans l'axe de cette dernière ;
- ✓ Les dégradations et particulièrement les nids de poule et les déformations sont plus prononcés sur le côté droit, sens Parakou – Béroubouay.

Après l'inspection visuelle de ladite route, un découpage par tronçon a été effectué afin de mieux ressortir les zones qui sont affectées visuellement. Ce découpage est répertorié dans les tableaux suivants :

- **Section 1 : Sortie Nord de Parakou – Poste de péage pesage de Sirarou**

Localisation	Nature de la dégradation et description	Causes
PK 9+400 Au PK 29+400	Fissurations : Petite cassure du revêtement avec ou sans rupture du corps de chaussée ; elles apparaissent soit longitudinalement ou transversalement à l'axe de la chaussée. • Affaissements • Nids de poules localisés	

- **Section 2 : Poste de péage pesage de Sirarou**

Localisation	Nature de la dégradation et description	Causes
PK 29+400 au PK 29+700	Aucune dégradation apparente	Aucunes

- **Section 3 : Planche d'essai (Mariborou)**

Localisation	Nature de la dégradation et description	Causes
PK 29+700 au PK 29+800	• Fluage • Ornières moins importantes	• Mauvais drainage. • Fondation en sol argileux

- **Section 4 et 6 :**

Localisation	Nature de la dégradation et description	Causes
PK 29+800 au PK 50+000 Et du PK 29+800 au PK 50+000	• Chaussée en bon état • Pas de déformation • Pas de fissuration	• Aucunes

- **Section 5 :**

Localisation	Nature de la dégradation et description	Causes
PK 50+000 Au PK 120+000	• Affaissements • Nids de poules • Ressuages • Ornières : Affaissement localisé apparaissant sous le passage des véhicules et pouvant affecter soit la couche de roulement soit la couche de chaussée.	• Sous dimensionnement du corps de chaussée. • Compactage insuffisant. • Perte de portance des couches sous-jacentes du revêtement et Stabilité insuffisante du revêtement

- **Section 7 : Gamia-Béroubouay**

Localisation	Nature de la dégradation et description	Causes
PK 126+000 Au PK 151+753	• Affaissements • Nids de poules • Ornières récurrentes avec bourrelets • Ressuage : Remontée du liant à la surface de la couche de roulement.	• Sous dimensionnement du corps de chaussée. • Compactage insuffisant. • Perte de portance des couches sous-jacentes du revêtement et Stabilité insuffisante du revêtement. • Mauvaise formulation du liant. • Granulat. • Mauvaise mise en œuvre.

* **Nids de poules :** Cavités arrondies à bords francs apparaissant sur le revêtement par arrachement de matériaux.
* **Affaissements :** Dépressions très prononcées et souvent assez étendues localisées soit en rive ou en pleine largeur de la chaussée ; ils peuvent être soit transversaux soit longitudinaux
* **Epaufrures :** Cassure des bords de la chaussée.

* **Bourrelets :** Renflement de la surface de chaussée, généralement accompagné d'ornière.

II.1.4. Mesures et analyse des résultats de déflexion

La déflexion est un critère global de portance d'un sol ou d'une chaussée. Elle fait partie aussi des indicateurs d'état d'une chaussée. C'est la déformation verticale que subit un point de la surface du sol ou de la surface de la chaussée sous l'action des essieux de référence. La mesure de la déflexion s'exprime en centième de millimètre.

La campagne de mesures de déflexion a été effectuée en quinconce (droite, gauche, axe) suivant un pas régulier de 20 m à l'aide de la poutre Benkelman et sous une charge à l'essieu de 13 tonnes.

Principe de fonctionnement de la poutre BENKELMAN

Figure 5: Poutre BENKELMAN

Ce matériel permet de mesurer la déflexion ponctuelle, à l'aide d'un comparateur mécanique, d'une structure de chaussée sous un essieu de véhicule. La poutre Benkelman est composée de deux Parties :

- Le bâti en partie fixe, constitue d'une poutre de 1.50 m environ ;
- Le fléau en partie mobile qui se compose d'une poutre de 3.75 m environ pouvant osciller autour de l'axe porté par le bâti.

L'horizontalité de la poutre Benkelman est contrôlée par un niveau à bulle. Le comparateur au

1/100 mm électronique se monte sur l'extrémité du châssis, par son oreille de fixation.

Description de la mesure de la déflexion

La valeur de la déflexion retenue pour les sections unitaires de quelques centaines de mètres de longueur est calculée, en gommant les accidents de portance très ponctuels, avec la formule :

D90 = Dm + kσ, Ou :

D90 = déflexion caractéristique sur la section considérée,

Dm = valeur moyenne sur la section considérée,

k = coefficient de probabilité,

σ = écart type,

Dans notre cas comme dans de nombreux pays on adopte k = 1,3 c'est-à-dire à une probabilité de dépassement d'environ 10% qui est considérée admissible.

On a donc D90 = Dm + 1,3σ

Coefficient d'homogénéité = d/Dm
On classe alors les sections suivant le tableau à partir de la plus élevée des 2 valeurs mesurées (axe ou rive). L'exploitation statistique de ces paramètres pour un réseau situé dans une unité géologique et climatique, donne les valeurs des seuils de déflexions critiques :

- d1 : valeur en dessous de laquelle on considère que la structure se comporte d'une façon satisfaisante. Dans notre cas d1= 55.

- d2 : valeur au-dessus de laquelle on considère que la structure présente de sérieux défauts de portance. Dans notre cas d2= 85.

D'où le *Tableau* ci-après tiré du manuel du CEBTP-LCPC (mai 1985) :

Déflexion	Faible d1		d2 Forte
Portance	Elevée	Médiocre	Faible
Qualité des structures	Bonne	Douteuse	Mauvaise

Tableau 4 : Interprétation de la qualité de la structure en fonction de la déflexion (manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux)

- **Relevé des mesures et Interprétation des résultats**

Les résultats des mesures de déflexion que nous allons vous présenter sont ceux de Août 2014 réalisées par ATS et LERGC SA au profit de l'entreprise SOGEA-SATOM. Les essais ont été

réalisés vers la fin du mois d'Août. Les résultats de cette campagne sont consignés dans le tableau et représentés sur le graphe ci-après :

Source : Laboratoires ATS et LERGC SA 2014

Tableau 5: Synthèse des mesures du PK9+400 au PK151+753

Section	Linéaire Km	Nombre de mesures	Déflexion Individuelle brute 1/100mm	Ecart Type	Déflexion caractéristique 1/100mm	Observations
PK 9+ 400 - PK29+400	20,000	D+A+G=400	Min= 16Axe Max=120C/D	Min= 4 Max= 34	Min= 20 Moy= 75 Max= 127	Sortie Parakou - Péage SIRAROU
PK29+400 - PK74+500	45,100	D+A+G= 902	Min= 6C/G Max=122C/D	Min= 4 Max= 40	Min= 20 Moy= 50 Max= 90	Péage SIRAROU - INA
PK74+500 - PK84+400	10, 100	D+A+G= 340	Min= 10C/G Max=156Axe	Min= 6 Max= 17	Min= 23 Moy= 90 Max= 144	INA - Entrée Guéssou
PK84+400 - PK105+000	20,600	D+A+G=472	Min= 4C/G Max=116C/D	Min= 9 Max= 29	Min= 25 Moy= 65 Max= 102	Entrée Guéssou - Entré Bembérékè
PK105+00 - PK151+753	46,753	D+A+G=928	Min= 4C/G Max=136C/D	Min= 4 Max= 37	Min= 22 Moy= 50 Max= 102	Entrée Bembérékè - Béroubouay

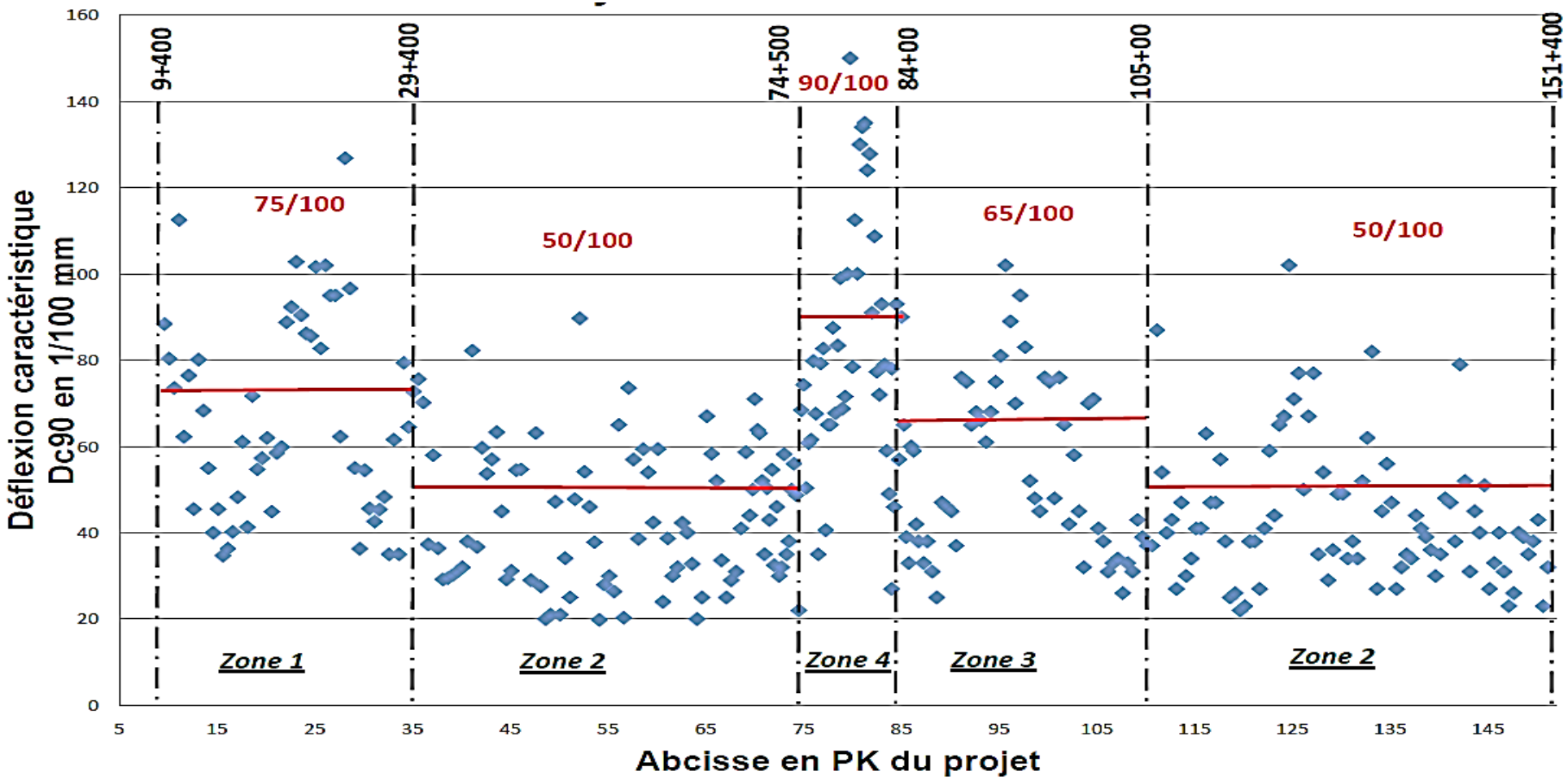


Tableau 6: Diagramme des déflexions caractéristiques sur l'axe Parakou-Béroubouay (Côté Droit et Côté Gauche)

Les valeurs individuelles consignées dans le tableau ci-dessus varient de 4 à 156/100 mm sur tout le tronçon de route et fait apparaître une ascendance des valeurs du côté droit par rapport à celles du côté gauche. Ce phénomène est probablement le résultat des poids lourds qui partent toujours chargés du port de Cotonou vers le Niger.

II.1.5. Analyse croisée déflexion- dégradation

Cette analyse fait apparaître une certaine concordance entre les constats faits au niveau de l'inspection visuelle et des valeurs caractéristiques des déflexions.

En effet, les observations faites sur l'état des différentes sections notamment celles qui présentent un aspect plus ou moins bon, sont confirmées par les valeurs des déflexions caractéristiques les plus faibles caractérisés par sa valeur représentative 50/100 mm.

A l'opposé, la section 1 sur laquelle la couche de base en latérite ciment recouverte seulement d'un enduit monocouche et est fortement menacé par les diverses pathologies notamment les nids de poule présente des valeurs de déflexions caractéristiques plus ou moins élevées.

De plus, les sections 5 et 7 considérées comme les zones critiques sont le siège des arrachements et des déformations à grandes échelles. Ces sections correspondent bien à la zone où les valeurs des déflexions caractéristiques sont les plus élevées, allant jusqu'à 144/100 mm. Toute chose qui justifie le mauvais état très remarquable de ces zones. Selon la littérature, une augmentation de la déflexion caractéristique entraine une diminution importante de la portance du sol et une déformation permanente de la structure.

II.1.6. Evaluation de la chaussée

L'évaluation de la structure d'une chaussée permet d'identifier toutes les causes à l'origine des désordres superficiels et structurels qu'elle présente. Ceci permet de caractériser son état face aux actions internes et externes, afin d'en tirer sur les responsabilités pour sa réparation, son renforcement ou sa reconstruction.

Dans le cadre de notre étude, nous allons nous focaliser sur la méthode VIZIR et apprécier par celle du Centre de Recherches Routières de Bruxelles.

II.1.6.1. Caractérisation de l'état global de la chaussée

Dans cette partie, nous allons ressortir les données qui entreront dans l'évaluation de la portance résiduelle de la route. Il s'agit de :

- retenir la valeur de la déflexion caractéristique optimale de la section ;
- quantifier toutes les dégradations de la section choisie ;
- relever les insuffisances au niveau de l'assainissement ;
- relever tous les éléments nécessaires à la prise de décision allant dans le sens de l'amélioration de la situation actuelle de la route.

II.1.6.1.a. Valeur de la déflexion caractéristique

Les valeurs caractéristiques varient de 20 à 144/100 mm sur toute la section de route. Comme nous l'avions mentionné plus haut, l'évaluation portera uniquement sur la sous-section PK74 au PK105 considéré comme zone critique et marquée par une fatigue structurelle. Cette remarque est confirmée par les valeurs les plus élevées de la déflexion caractéristique obtenues.

Ce faisant, nous prendrons la valeur 90/100 mm comme valeur caractéristique moyenne de référence pour toute la section choisie, c'est-à-dire du PK 74 au PK84 à cause des faïençages qui sont généralisées et des ornières très profondes de cette section.

II.1.6.1.b. Quantification des dégradations du PK74 au PK84

Les ornières, les faïençages et les réparations sont à l'origine de la fatigue structurelle de la chaussée et sont considérées comme des dégradations de type A. Pour des raisons de précisions, ces dégradations seront évaluées par séquence de 500 m sur les 10 km à savoir du PK74 au PK84. Voir tableau 7.

Famille de Dégradation	Nature	Linéaire (ml)	Superficie (m2)	Gravité	Etendue (%)
Fissurations	Fissures longitudinales et/ou transversales	8000	56000	**3**	**80**
	Faïençage	9600	672000	**3**	**96**
Déformations	Ornière	9620	33670	**3** hmoy=3cm	**96,2**
	Affaissements	–	–	–	–
Réparations	Réparations	–		**2**	**15 – 20**

Tableau 7: Récapitulatif et quantification des dégradations : Gravité et Etendue du PK 74 au PK84

Les gravités et les étendues des différentes dégradations énumérées dans le tableau ci-dessus proviennent du rapport trimestriel du bureau d'études en charge du projet TR Engineering.

II.1.6.2. Méthodes d'évaluation des chaussées

Les méthodes d'évaluation des structures de chaussée sont conçues pour apprécier à des échéances bien précises l'aptitude de la chaussée à remplir son rôle. Au nombre de ces méthodes nous pouvons citer les plus utilisées au Bénin ces dernières années. Il s'agit de :

- La méthode VIZIR ;
- La méthode du CEBTP- LCPC ;
- La méthode AASHO ;
- La méthode du Centre de Recherches Routières (CRR) de Bruxelles et ;
- La loi de MINER.

Les trois premières permettent de déterminer un indice de qualité de service de la chaussée à partir d'une échelle de notes correspondant à l'état de la chaussée.

Les deux dernières sont basées sur la notion de fatigue des matériaux ; c'est-à-dire l'endommagement des structures. Elles permettent de déterminer la durée de vie ou la portance résiduelle de toute structure mise en service.

II.1.6.2.a. Par la méthode du VIZIR

DETERMINATION DE L'INDICE DE DEGRADATION

Pas de fissuration ni de déformation	0

(1) Indice de fissuration If	Etendue / Gravité	0 à 10%	10% à 50%	>50%
	1	1	2	3
	2	2	3	4
	3	3	4	5

Indice de déformation Id	Etendue / Gravité	0 à 10%	10% à 50%	>50%
	1	1	2	3
	2	2	3	4
	3	3	4	5

(1) Calcul effectué séparément pour la fissuration longitudinale et le faïençage.

L'indice retenu est le plus grand des deux calculés.

Id \ If	0	1-2	3	4-5
0	1	2	3	4
1-2	3	3	4	5
3	4	5	5	6
4-5	5	6	7	7

1ère note de dégradation

Gravité \ Etendue	0 à 10%	10% à 50%	>50%
1	0	0	0
2	0	0	+1
3	0	+1	+1

Correction pour réparation

Note finale

Indice de dégradation de surface IS

Note de 1 à 7

Tableau 8: Diagramme méthodologique du Vizir

- ***Calcul de l'indice de fissuration If***

L'indice de fissuration est calculé séparément avec les données de la fissuration (fissures longitudinales et/ou transversales) d'une part et celles du faïençage d'autre part. Seul le faïençage sera pris en compte car les fissures longitudinales notées sont négligeables.

Etendue : 96% ; Gravité : 3 Alors If = 5

- ***Calcul de l'indice de déformation Id***

L'identification des déformations portera essentiellement sur les ornières car les affaissements sont négligeables en termes d'étendue.

Etendue : 96,2% ; Gravité : 3 ; Alors Id = 5

- ***Détermination de la note de qualité Q***

Au vue des mesures de déflexion et de relevés de dégradation la méthode de détermination de la qualité apparente de la chaussée utilisée est la méthode du « Manuel pour le renforcement des chaussées souple en pays tropicaux » (CEBTP LCPC, Mai 1985). Cette méthode préconise que la qualité (Qi) de la chaussée soit déterminée par le couple (déflexion, état apparent de la structure). On cherchera donc à établir une corrélation entre le niveau des dégradations sur un itinéraire ou plutôt sur un ensemble d'itinéraire et le niveau de déflexion.

Chaque valeur de Qi correspond à une solution de remise en état comme présenté dans le Tableau 9. (i) varie de 1 à 5 comme indiqué.

Q1 pour une chaussée en bonne état,

Q2 nécessite un enrobé courant,

Q3 et Q4 nécessite un renforcement de la structure

Q5 nécessite une reconstruction de la structure

Le croisement de deux paramètres que sont l'état apparent et la déflexion de la chaussée permet de déterminer la note de qualité à donner à la structure. Cette note de qualité oriente vers le choix de la solution d'entretien ou de renforcement à appliquer à la structure de chaussée étudiée. A chaque valeur de qualité Qi, i allant de 1 à 5 correspondent une solution de remise en état à appliquer à la structure comme le montre le tableau ci –dessous :

Déflexion Indice de dégradation IS de surface	d_1	d_2	
	Bonne	**Douteuse**	**Mauvaise**
1-2 : Peu ou pas de fissures ou pas de déformation	Q_1	Q_2	Q_3
3-4 : Fissures sans ou avec peu de déformation et déformations sans fissures	Q_2	Q_3	Q_4
5- 6-7 : Fissures et déformation	Q_3	Q_4	Q_5

Entretien

Renforcement

Tableau 9: Note de qualité (Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux)

La première note de dégradation est déterminée par la combinaison de If et de Id

$\begin{cases} If = 5 \\ Id = 5 \end{cases}$ => Première note = 7

Il n'y a pas de correction à apporter à la première note de dégradation comme l'indique le diagramme (Cf. Méthode du Vizir), car la gravité des réparations est de 2 et leur étendue comprise entre 15 et 20%. De ce fait, la note de correction est 0.

La note de qualité de la chaussée découle de l'analyse croisée de l'indice de dégradations de surface et de la déflexion de la chaussée. Dans le cadre de notre étude, l'indice retenue est Is = 7 et les seuils de déflexion sont : d1=55 et d2=85. Dans notre zone d'étude du PK74 au PK84, plus de 50% des valeurs de déflexions caractéristiques sont supérieures à 85/100mm. Ainsi, la note de qualité à donner à la chaussée est Q5.

- ***Conclusion partielle***

La note de qualité obtenue Q5 montre d'après la grille de décision, que le niveau de dégradation atteint par la route nécessite un renforcement comme solution de remise en état.

II.1.6.2.b. Par la méthode du Centre de Recherches Routière (CRR) de Bruxelles

➢ ***Auscultation***

L'auscultation des chaussées à revêtement hydrocarboné, effectué dans le cadre de leur renforcement ou de leur réhabilitation, a pour but de fournir les données relatives à la portance et à sa variation le long du tracé. Le premier paramètre à relever est la déflexion mesurée en continue.

PK	Déflexion moyenne D_m	Ecart type σ	Rapport $\frac{\sigma}{Dm}$
74	*42,05*	*18*	*0,428*
79	*67,74*	*25*	*0,369*
84	*31,66*	*14,77*	*0,466*

Tableau 10: Mesures de déflexion sur ces 10km

Nous allons utiliser les résultats issus de ces mesures et vérifier le rapport $\frac{\sigma}{Dm}$ pour apprécier l'état de la chaussée dans la zone d'étude allant du PK 74 au PK 84 à tous les 5 kilomètres comme le montre le tableau ci-dessus.

Selon ces résultats il est donné dans la méthode que : $\frac{\sigma}{Dm} < 0{,}3$ alors chaussée dans un bon état et $\frac{\sigma}{Dm} > 0{,}3$ alors chaussée dans un mauvais état.

- ***Conclusion de l'auscultation*** : Toutes les valeurs du rapport sont supérieures à 0,3. Alors il en résulte que la chaussée est dans un mauvais état.

➢ ***Diagnostic***

☐ **Calcul du nombre d'années de service futur P de la chaussée**

Il est à rappeler que le nombre d'essieu équivalent obtenu dans le dossier d'expertise de 2013 pour une durée de vie de 15 ans avec un taux d'accroissement du trafic de 5,2% environ est N = 5.800.000 essieux équivalent de 13 tonnes soit T4 de la classe du CEBTP. A cette étape il est important de déterminer le degré de saturation S qui nécessite une brève étude du trafic de la chaussée, afin de déterminer le nombre d'année de service futur P.

Des informations reçues de la DPSE pour les campagnes de comptage effectuées, nous donne : 6125 Unité de Véhicules Particuliers (UVP) par jour dans les deux sens.

- Le trafic dimensionnant est celui de la trentième heure et sensiblement égal au sixième du trafic moyen journalier calculé sur toute l'année. Nous avons alors 1021UVP/heure dans les deux sens.

En considérant la capacité théorique C de 1000 UVP/heure/sens, le degré de saturation sera :

S= J_0/C = 1021/1600 = 64%

Alors l'abaque donnant le nombre d'année de service futur en fonction du degré de saturation, donne 8 ans 2 mois. Vu qu'au bout de deux ans d'une mise en service précoce de ladite route, sa durée de vie est déjà réduite de 5 ans. Dans ces conditions, selon la méthode on peut déjà envisager à un renforcement comme solution de remise en état en attendant le résultat du diagnostic dans les paragraphes à suivre.

☐ **Evaluation de la durée de vie résiduelle de la chaussée n = N – N'**

N : la durée de vie escomptée ; N' : la durée de service de la chaussée existante

Il est à rappeler que le nombre d'essieu équivalent obtenu dans le dossier d'expertise de 2013 pour une durée de vie de 15 ans avec un taux d'accroissement du trafic de 5,2% environ est N=5.800.000 essieux équivalent de 13 tonnes soit T4 de la classe du CEBTP.

Considérons alors pour notre étude, N = 5.800.000 essieux de 13 tonnes. Selon la loi de LIDDLE – 1 essieu de 13 tonnes = 18,41 essieux de 8 tonnes, alors pour une structure semi-rigide N = 106.778.000 essieux de 80 KN (avec 1 tonne = 10 KN).

Le trafic cumulé N' supporté durant la durée de service allant de 2012 à 2014 sur la voie la plus chargée sens Parakou-Béroubouay est de 3.374.486 essieux de 13 tonnes, soit 62.133.780 essieux de 80 KN. Alors la durée de vie résiduelle de la chaussée est **n= 44.660.549 essieux de 80 KN.**

☐ **Evaluation de la cause des dégradations**

✓ **Caractérisation de l'état global du tronçon :**

- ***Calcul du rapport N'/N***

  Le rapport N'/N = 0,41

- ***Calcul du degré d'endommagement S =*** $\frac{0,5F+f+r}{L \times V}$

  - F : longueur des frayées affectées par les fissures longitudinales (m),
  - f : longueur cumulée des frayées affectées par les faïençages (m),

- r : longueur cumulée des frayées affectées par les réparations (ne sont pas retenues les réparations dues manifestement aux activités des tiers : pose de conduites souterraines par exemple)
- L : longueur du tronçon ausculté (m),
- v : nombre de voies de circulation soumises à l'examen visuel

L'évaluation du degré d'endommagement sera fait exclusivement sur la section d'étude c'est-à-dire du PK74 au PK 84.

F (m)	f (m)	r (m)	L (m)	v (m)	S (%)
16000	19200	0	20000	2	**68**

Tableau 11: Degré d'endommagement du Pk 74 au PK 84

A la lecture du tableau ci-dessus, le degré d'endommagement est de **68%,** or le maximum admis étant de **50%,** nous pouvons affirmer que le degré d'endommagement de la chaussée est trop poussé.

- ***Profondeur d'ornière***

Suivant les quantités du tableau 11 ci-dessus, la profondeur d'ornière est en moyenne de **3cm**. Le positionnement des points représentatifs qui viennent d'être calculés à savoir le rapport $\frac{N'}{N}$**,** le degré d'endommagement de la chaussée **S** et la profondeur d'ornière sur *l'abaque 4.1*, montre que lesdits points sont tous situés au-dessus des courbes limites.

Conformément à la méthode du CRR de Bruxelles, cette position des points traduit un état non satisfaisant de la chaussée.

❖ ***Evaluation de la portance résiduelle***

La portance résiduelle est évaluée à partir de la valeur du rapport $\frac{N'}{N}$. Dans notre cas, nous avons $\frac{N\prime}{N}$ = 0,42 < 1. Ce qui nous permet de dire que la portance résiduelle de la structure en place est suffisante.

Toute chose qui confirme la solution obtenue à travers l'évaluation de la même section par la méthode VIZIR.

❖ ***Formulation du diagnostic***

La formulation du diagnostic procède d'une étude croisée de l'état global du tronçon ausculté et de la portance résiduelle.

Ainsi pour une portance résiduelle $\frac{N'}{N}$ = **0,42** à la limite satisfaisante et l'état non satisfaisant de la chaussée, le Tableau 33 en Annexe 3 nous permet de formuler un diagnostic et révèle que la cause probable des dégradations précoces est :

- ✓ Soit une épaisseur insuffisante du revêtement hydrocarboné,
- ✓ Soit une faiblesse des couches de structure,
- ✓ Soit un dimensionnement inadapté aux besoins du trafic actuel.

En générale, la méthode du CRR de Bruxelles nous a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- ✓ La vérification du rapport $\frac{\sigma}{d}$ nous a révélé que 100% des valeurs sont supérieurs à 0,3 dans la zone d'étude. Toute chose qui prouve que la fissuration est généralisée sur la section étudiée ;
- ✓ La vérification du degré de saturation révèle une diminution de la durée de service futur de la route.
- ✓ La durée de vie résiduelle semble déjà faible. Ce constat appelle une réaction à court terme ;
- ✓ Le degré d'endommagement S de la structure est largement supérieur au maximum de **50%** admis ;

Le diagnostic formulé est une **faiblesse des couches de la structure**.

II.1.7. Solutions de renforcement

Le renforcement est l'ensemble des opérations portant sur la chaussée ou sur le revêtement du fait de l'augmentation du trafic et/ou de la fatigue de la structure et qui ont pour but de remettre cette dernière à nouveau en état de remplir normalement ses fonctions. Ces opérations ne visent que l'amélioration de la portance de la structure.

La réhabilitation est une technique de construction routière qui consiste à restituer à la route ses caractéristiques initiales ou celles rendues nécessaires du fait de l'exploitation de la route ou des nouveaux objectifs visés.

En cela, la réhabilitation permet non seulement le renforcement si nécessaire, mais aussi l'amélioration du système d'assainissement, des rectifications du tracé en planimétrie et en altimétrie et la reprise des équipements de la route.

Tenant compte des résultats de l'évaluation de la portance et de la durée de vie résiduelle ainsi que des observations faites sur le terrain, de notre point de vue, le tronçon de route Parakou-Béroubouay a besoin d'être renforcé.

II.1.8. Conclusion partielle

En définitive, nous retenons que l'évaluation de la structure de la chaussée a fait apparaître une faible durée de vie, et un état d'endommagement non satisfaisant causé soit par une insuffisance de l'épaisseur du revêtement ou une faiblesse des couches inférieures. Alors les désordres enregistrés sont en partie les signes de l'inadaptation de matériaux des différentes couches à la plateforme qui, engendre des déformations permanentes sous l'effet conjugué des sollicitations induites par le trafic. D'où l'apparition précoce des ornières.

Ce faisant, un renforcement est adéquat afin de rehausser les caractéristiques des matériaux constituant les différentes couches de la structure de chaussée.

II.1.9. Etude de trafic

Le trafic, encore appelé volume de circulation, est le nombre de véhicules passant dans une section donnée de route, dans une direction, pendant une unité de temps donnée.

- ***Trafic antérieur (2011-2014)***

Les données disponibles dans le cadre de cette étude, sont obtenues auprès des services de la DPSE/DGI. Elles couvrent la période de 2011 à 2014.

Les données relatives au trafic antérieur sur ce tronçon sont consignées dans le tableau suivant :

TRONÇONS	ORIGINE	DESTINATION	TRAFIC 2011		TRAFIC 2012		TRAFIC 2013		TRAFIC 2014		Taux croissance VL	Taux croissance PL	Trafic moyen
			VL	PL	VL	PL	VL	PL	VL	PL			
BU03	PARAKOU	N'DALI	853	427	-	-	809	427	1 605	587	17,13	8,29	579
BU04	N'DALI	GUESSOU SUD	885	563	-	-	1 327	589	1 021	557	3,63	-0,27	
BU05	GUESSOU SUD	BEMBEREKE	671	464	-	-	942	468	904	545	7,74	4,12	
BU06	BEMBEREKE	BEROUBOUAY	978	607	786	426	926	468	1 426	695	9,89	3,45	
Source : DPSE/DGI Bénin											9,6%	5%	

Tableau 12: Résultats du comptage manuel tronçon Parakou-Béroubouay de 2011 à 2014

Détermination du trafic de mise en service (2019)

En considérant une croissance exponentielle du trafic, le trafic moyen journalier annuel actualisé est donné par la formule suivante :

$$TMJA = Tpl \times (1 + i)^{n}$$

- i : taux de croissance géométrique ;
- TMJA : trafic moyen journalier à l'année de mise en service des véhicules poids lourds de la route ;
- Tpl : trafic moyen journalier à l'année de comptage des poids lourds ;
- n : intervalle de temps entre l'année de comptage et l'année de mise en service.

Donc TMJA = 705 PL/Jr/Sens

Calcul du nombre cumulé d'essieux standard (NES)

$$NES = 365 * t * A * n * \frac{(1+i)^n - 1}{n * i} = t * A * n * C \quad \text{où} \quad C = 365 * \frac{(1+i)^n - 1}{n * i}$$

Avec :

- t=705 PL, le trafic moyen journalier annuel de l'année de base en UPL
- n=15 ans, la durée de service de la route en année
- i= 5%, le taux de croissance annuelle du trafic.
- A, l'agressivité du poids lourds type
- C, le facteur de cumul.

Ainsi, pour une durée de service de 15 ans, les trafics cumulés donnent **NES = 6,18.10^6 essieux standard,** conférant à la route une classe de trafic **T4** dans la classification CEBTP.

Conformément à la classification CEBTP :

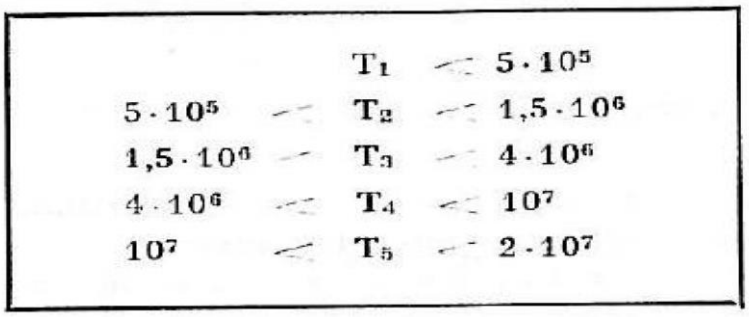


Figure 6: Classification du trafic en fonction du nombre d'essieux équivalents (CEBTP)

II.2. Conception géométrique

II.2.1. Rappel des Termes de Références

Les termes de références pour l'étude du tracé de la route Parakou-Béroubouay ont été définis par le maitre d'ouvrage et se présentent comme suit :

- La vitesse de référence est de 100Km/h
- Profil de 2 x 1 voies de 3.50m de largeur en rase campagne + 2 accotements de 1,50 m + assainissement en perrés maçonnés par endroit.
- Profil de 1 x 1 voie de 9.00m de largeur en agglomération + 2 trottoirs de 2 m + assainissement + accès aux riverains avec surlargeurs ponctuelles pour des zones de parking

En considérant les normes utilisées, l'étude a été faite en se basant sur « les recommandations techniques pour la conception générale et la géométrie de la route – Aménagement des Routes Principales (ARP) » du SETRA.

Pour le tracé en plan, les caractéristiques géométriques des sections routières relatives à la catégorie R80 telles que définies par l'ARP sont rappelées dans le Tableau 13 ci-dessous :

Les raccordements entre alignements droits sont effectués au moyen de courbes circulaires. Le dévers de chaque chaussée est en pente unique de 2,5% vers la bordure extérieure.

L'ensemble des caractéristiques géométrique appliquées est présenté dans le tableau 13 suivant:

PARAMETRES	**SYMBOLES**	**CARACTCTERISTIQUES**
Vitesse de référence	Vr	100 Km/h
Essieux standard	Es	13 T
Convois types	Bc	30 T
Convois types	Bt	32 T
Classe de trafic	T4	4. 106 à 10^7d'essieuxéquivalents
Profils en travers	PT4	7,00 m+2x1,50 m

		Agglomération	7,00m+ 1x 1,50m + 1x 3,00m + 1x1, 00(trottoir) + Caniveau béton
Largeur des stationnements longitudinaux			2,50 m
Pente des talus (Remblais)		P	3/2 (3h/2v)
Devers minimal		δm%	2%
Devers maximal		δ%	3%
Rayon en plan	Minimal	RHm	665m
	Minimal absolu	RH'	425m
Déclivité maximale du projet		π%	3%
Rayon en point haut	Minimal	RVm	5000m
Rayon en point bas	Minimal	RVm'	3000m

Tableau 13: Caractéristiques géométriques de la route

II.2.2. Calcul des paramètres cinématiques en fonction de la vitesse de référence

Le calcul des paramètres cinématiques est effectué pour assurer la sécurité et le confort des usagers de la route, c'est pour cette raison que nous avons déterminé tous les paramètres fonction de la vitesse de référence nécessaires à une meilleure conception géométrique de la route. Les détails de calcul sont présentés en annexe 1. Les résultats de calculs sont regroupés dans le Tableau 14 ci-dessous.

Désignation		Unités	Valeurs
Vitesse de référence		Vr (Km/h)	100
Distance de freinage		d_0 (m)	101,52
Distance d'arrêt en alignement droit		d_1(m)	116,80
Distance d'arrêt en courbe		d2 (m)	142,18
Distance de visibilité de dépassement	Minimale	d_d(m)	388,89
	Normale	dD(m)	583,33

Tableau 14: Calcul des paramètres cinématiques

II.3. Etude géotechnique

II.3.1. Présentation des différentes structures de renforcement

Les variables d'entrée (trafic T_4 et note de qualité Q_4) qui nous permettent d'obtenir les différentes variantes choisis dans le « Manuel de renforcement des chaussées souples en pays tropicaux » du CEBTP sont présentés dans le tableau suivant :

Variantes	Revêtement	Couche de base
1ère variante	Béton bitumineux (6cm)	Grave bitume (12 cm) en bicouches
2ème variante	Béton bitumineux (6cm)	Grave bitume (15 cm) en tricouches
3ème variante	Béton bitumineux (6cm)	Grave ciment (25 cm) en bicouches
4ème variante	Béton bitumineux (6cm)	Grave ciment (22 cm) en tricouches

Tableau 15: Différentes variantes de structure de renforcement

II.3.2. Choix de la variante

Ces structures finales sont obtenues à partir des solutions proposées par le « Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux » du CEBTP étudiés dans le précédent paragraphe.

Variante	Couche de roulement	Couche de base	Couche de fondation	Sol support
Variante 1	6 cm BB	12 cm GB	25 cm matériaux améliorés au ciment 3%	Ancienne structure
Variante 2	6 cm BB	15 cm GB	25 cm matériaux améliorés au ciment 3%	Ancienne structure
Variante 3	6 cm BB	25 cm GC	25 cm matériaux améliorés au ciment 3%	Ancienne structure
Variante 4	6 cm BB	22 cm GC	25 cm matériaux améliorés au ciment 3%	Ancienne structure

Tableau 16: Choix de la variante

II.3.3. Principe de dimensionnement

Le dimensionnement routier consiste à évaluer le niveau de sollicitation de la chaussée et à déterminer les épaisseurs à donner aux différentes couches afin de réduire les contraintes et les déformations à des valeurs admissibles pour un trafic donné. Ce type de dimensionnement prend en compte la méthodologie du Guide technique du LCPC-SETRA qui fait appel au programme de calcul de structure ALIZE. Ce dernier est basé sur la méthode de Burmister, calculé sous une charge circulaire, les contraintes et déformations en différents points dans un massif multicouches semi-infini, où chaque couche est homogène, isotrope à comportement élastique linéaire.

De façon générale, les critères retenus pour le dimensionnement de chaussées sont au nombre de trois :

- la déformation verticale des matériaux non traités et du sol support, notée $\boldsymbol{\varepsilon z}$ et exprimée sans unité, paramètre retenu pour les chaussées souples ;
- la déformation horizontale exercée à la base des matériaux bitumineux, notée $\boldsymbol{\varepsilon t}$ et exprimée sans unité, paramètre retenu pour les chaussées en enrobés ;
- la contrainte horizontale exercée à la base des matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH), noté $\boldsymbol{\sigma t}$ et exprimée en bars ; critère retenu pour les matériaux traités aux liants hydrauliques.

II.3.4. Limites admissibles des contraintes et déformations

A la lumière de ce bref rappel sur les fondements de la méthode rationnelle de dimensionnement, nous retenons trois critères et leurs valeurs admissibles

- $\boldsymbol{\varepsilon tadm}$: la déformation horizontale admissible à la base des matériaux bitumineux d'assise de chaussée ;
- la déformation verticale à la surface de la plate-forme $\boldsymbol{zadm}$
- la contrainte horizontale exercée à la base des matériaux traités aux liants hydrauliques $\boldsymbol{\sigma tadm}$.

Sur cette base et en fonction de plusieurs coefficients définis ci-dessous, ces critères de dimensionnement sont donnés par les équations suivantes :

- ***La déformation horizontale exercée à la base des matériaux bitumineux***

$$\boldsymbol{\varepsilon_{tadm} = \varepsilon_6 \times \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{0,5} \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{b} \times k_c \times k_r \times k_s}$$

Ou :

- (NE/106) b : coefficient lié au nombre d'essieux équivalents
- ε6 : l'élongation admissible pour une fréquence de 25 Hz et une température de 10°C
- E1 : le module du matériau à la température équivalente de 10°C
- E2 : le module du matériau à la température équivalente du milieu d'utilisation ;
- NE : nombre d'essieux équivalents
- b : la pente de la droite de fatigue des matériaux
- kc : coefficient de salage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul ou comportement observé de chaussée du même type. Pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, la valeur retenue est 1.5
- Kr = 10-ub10$-ub$: coefficient qui traduit l'approche probabiliste de la méthode
- ks : coefficient lié à la qualité de la plate-forme qui vaut 1/1,2 si PF1 ; 1/1 si PF2 et 1 pour PF3 et PF4.
-

- ***La contrainte horizontale exercée à la base des matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH)***

$$\boldsymbol{\varepsilon tadm = \sigma i \times kc \times kr \times kd \times k}$$

Ou :

- σt(NE) : contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360j est obtenue pour 106 cycles
- kd : coefficient introduit pour prendre en compte l'effet des discontinuités pour la couche de base, il prend pour valeur 1/1,25 pour les graves traités

.

- ***La déformation verticale des matériaux non traités et du sol support***

$$\mathbf{zadm} = \mathbf{2,8.10{-}2} \times \boldsymbol{NE}\mathbf{{-}0}, \text{ (Loi de tassement de Shell)}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{\mathbf{zadm}} = \frac{\mathbf{0,3}\times \boldsymbol{CBR}}{\mathbf{1+0,7}\boldsymbol{logNE}} \text{(Kerkhoven et Dormon)}$$

II.3.5. Vérification du dimensionnement

ALIZE LCPC permet de déterminer à partir d'un modèle multicouches, élastique et linéaire, les déformations et contraintes réellement observées au niveau de nos différentes couches, ensuite nous comparons ses valeurs à celles des déformations et contraintes admissibles. Il est possible d'ajuster les épaisseurs pour obtenir de meilleurs résultats. Les hypothèses considérées sont les suivantes :

- La structure d'une chaussée est déterminée par n couches d'épaisseurs finies hormis la dernière couche.

- Les matériaux ont un comportement élastique et linéaire,

- Les contraintes sont des pressions ou des cisaillements. Chaque couche de chaussée est caractérisée par quatre paramètres de base. Les données à rentrer dans le modèle pour les différentes simulations sont :

  - L'épaisseur hi ;
  - Le module de Young (Ei) ;
  - Le coefficient de poisson (ν) ;
  - Les types d'interface entre les couches (conditions de collage) : Ici toutes les couches utilisent **l'interface « collé »**

Les paramètres d'entrée des différents matériaux utilisés sont indiqués dans le *Tableau* suivant :

Matériaux	e (cm)	CBR	CAM	Module de rigidité E (MPa)	Coefficient de Poisson	□6 (µm)	□6	Sh (cm)	1/b	SN	kc	r (%)	u	c (cm^{-1})	ks	Kd
Béton bitumineux	6		1.2	2220	0,35	100	-	1	5	0,25	1,1	10	-1,28	0,02	1	
Grave Bitume 2	12	-	1.2	3420	0,35	80	-	1+0,3(e-10) =1	5	0,3	1,3	10	-1,28	0,02		
Sol ciment	25	-	1.2	12000	0,25	-	0.42	2,5	12	0,8	1,4	10	-1,28	0,02	1	1
Grave Latéritique Ciment	15	-	1.2	5000	0,25	-	0.21	2.5	10	0.8	1.4	10	-1.28	0.02	1	1
Grave Latéritique	18		1.2	280	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grave Latéritique argileuse	30		1.2	148	0.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grave Latéritique	-		1.2	100	0.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 17: Paramètres d'entrée des différents matériaux utilisés

Les hypothèses, les résultats des valeurs admissibles et les valeurs obtenues après simulation sur le logiciel *Alizé* sont présentés en ANNEXE 2 : ETUDE GEOTECHNIQUE ET DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSEE.

Après vérification nous obtenons les résultats consignés dans le *Tableau 18* ci-dessous

COUCHES	EPAISSEURS	VALEURS ADMISSIBLES (MPa)	VALEURS OBTENUES (MPa)	CONDITION
Roulement en BB	6	εt, adm =118,76	εt sup = -7,4	Condition vérifiée
			εt inf = -11.4	Condition vérifiée
Base en GB	12	εt, adm =118,24	εt sup =-11,4	Condition vérifiée
			εt inf = 6,6	Condition vérifiée
Fondation en matériaux recyclés améliorés au ciment 3%	25	$\sigma_{t,\,adm}$ = 0,604	σ_{Tsup} = 0,233	Condition vérifiée
			σ_{Tinf} = −0,464	Condition vérifiée
Plateforme 2 (Ancienne structure)	50	$Zadm$ = 437,23	Z = 50,7	Condition vérifiée
Plateforme 1 (Sol support ancienne structure)		$Zadm$ = 437,23	Z = 62,0	Condition vérifiée

Tableau 18: Vérification du dimensionnement de la variante choisie

Après avoir procédé à des variations automatiques des épaisseurs de la Grave Bitume, nous nous rendons compte qu'avec une épaisseur de 8 cm les conditions sont toujours vérifiées et nous obtenons toujours une structure acceptable aussi bien sur le plan technique qu'économique. Le *Tableau 19* montre les vérifications pour cette variante révisée :

COUCHES	EPAISSEURS	VALEURS ADMISSIBLES (MPa)	VALEURS OBTENUES (MPa)	CONDITION
Roulement en BB	6	εt, adm =118,76	εt sup = 5,4	Condition vérifiée
			εt inf = -12,2	Condition vérifiée
Base en GB	8	εt, adm =118,24	εt sup =-12,2	Condition vérifiée
			εt inf = 8,8	Condition vérifiée
Fondation en matériaux recyclés améliorés au ciment 3%	25	$\sigma_{t,\,adm}$ = 0,604	σ_{Tsup} = 0,306	Condition vérifiée
			σ_{Tinf} = −0,521	Condition vérifiée
Plateforme 2 (Ancienne structure)	50	$Zadm$ = 437,23	Z = 55,8	Condition vérifiée
Plateforme 1 (Sol support ancienne structure)		$Zadm$ = 437,23	Z = 68,2	Condition vérifiée

Tableau 19: Vérification du dimensionnement de la variante de 8cm de Grave Bitume

Nous retenons donc la structure suivante pour notre variante 1

- **6 cm de Béton Bitumineux en couche de roulement**
- **8 cm de Grave bitume en couche de base**
- **25 cm de Matériaux recyclés améliorés au ciment (3%) en couche de fondation**
- **50 cm de graveleux recyclés (nouvelle plateforme)**
- **L'ancienne plateforme**

La deuxième variante à vérifier est celle utilisée par la structure d'accueil à savoir :

- **5cm de Béton Bitumineux a Module Elevé en couche de roulement**
- **7 cm d'Emulsion de bitume a Module Elevé en couche de base**
- **25 cm de Matériaux recyclés améliorés au ciment (3%) en couche de fondation**

Les vérifications avec le logiciel Alizé ont donné les résultats consignés dans le *Tableau* suivant, les détails de calculs et résultats obtenus étant en ANNEXE 2 : ETUDE GEOTECHNIQUE ET DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSEE.

COUCHES	EPAISSEURS	VALEURS ADMISSIBLES (MPa)	VALEURS OBTENUES (MPa)	CONDITION
Roulement en BBME	5	$\varepsilon t, m$ =118,76	$\varepsilon t\ sup$ = 24,9	Condition vérifiée
			$\varepsilon t\ inf$ = 10,0	Condition vérifiée
Base en EME	7	$\varepsilon t, m$ =118,24	$\varepsilon t\ sup$ =10,0	Condition vérifiée
			$\varepsilon t\ inf$ = 5,3	Condition vérifiée
Fondation en matériaux recyclés améliorés au ciment 3%	25	$\sigma_{t,\ adm}$ = 0,604	σ_{Tsup} = 0,254	Condition vérifiée
			σ_{Tinf} = −0,508	Condition vérifiée
Plateforme 2 (Ancienne structure)	50	$Zadm$ = 437,23	Z = 52,7	Condition vérifiée
Plateforme 1 (Sol support ancienne structure)		$Zadm$ = 437,23	Z = 64,3	Condition vérifiée

Tableau 20: Vérification du dimensionnement de la variante de SOGEA-SATOM

II.3.6. Conclusion de l'étude

A la fin de notre étude structurale, nous voyons que les deux structures de renforcement sont acceptables, mais au vue du trafic limité à environ 500 poids lourds par jour et par sens pour une structure en EME, il est préférable de garder la structure de chaussée du CEBTP par rapport à la structure mixte de l'entreprise donc nous opterons pour notre première variante à savoir :

- 6 cm de Béton Bitumineux en couche de roulement
- 8 cm de Grave bitume en couche de base
- 25 cm de Matériaux recyclés améliorés au ciment (3%) en couche de fondation
- 50 cm de graveleux recyclés (nouvelle plateforme)
- L'ancienne plateforme

II.4. ETUDE HYDROLOGIQUE, HYDRAULIQUE ET DIMENTIONNEMENT STRUCTURAL DES OUVRAGES

II.4.1. ETUDE HYDROLOGIQUE

L'étude hydrologique a pour but principal le calcul des débits maximum (période de crue) afin de dimensionner les sections hydrauliques des ouvrages d'assainissement. L'estimation des bassins versants nous permet de déterminer le débit des eaux environnantes et de chaussée dont le ruissellement tend vers l'emprise de notre route.

Pour arriver à nos fins, nous utiliserons les outils suivants :

- Google Earth et
- Global Mapper, logiciel de Système d'Information Géographique (SIG)

II.4.1.1. Présentation des caractéristiques des bassins versants

Les paramètres physiques et géométriques de ces bassins ont été déterminés par le logiciel Global Mapper. Dans le cadre de notre travail, ces paramètres sont essentiellement :

- L'exutoire : à partir duquel on peut tracer la ligne de partage des eaux qui délimite le bassin versant ;
- Le périmètre : c'est le contour des surfaces des bassins versant ;
- La superficie en km², il s'agit de l'aire totale, incluant éventuellement ceux des sous bassins, drainé par l'écoulement et circonscrite par les ligne de partages des eaux ;

- La longueur hydraulique : la distance entre l'exutoire et le point le plus éloigné du bassin

- La pente moyenne des bassins versants en pourcentage (%) ;

- Les altitudes : ce sont les altitudes maximales et minimales des bassins ;

Bassins versants	Superficie (km^2)	Périmètre (km)	Longueur hydraulique (m)	Zmax (m)	Zmin (m)	Pente moyenne I (%)
BV_1	0.681	3.948	819	381	346	2.2
BV_2	18.676	21.912	7100	400	345	2.2
BV_3	0.314	2.936	376	374	358	2.11
BV_4	2.468	7.997	1800	382	348	2.04
BV_5	1.106	5.177	1140	374	340	2.47
BV_6	54.427	43.477	13450	420	339	2.19
BV_7	2.027	7.659	2190	390	350	2.06

Tableau 21: Caractéristiques des bassins versants obtenus

II.4.1.2. Présentation des méthodes d'évaluation de débits

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de débit dont l'utilisation est conditionnée par la superficie des bassins versants dont on veut faire l'évaluation du débit. Les plus fréquentes sont les suivantes :

- La méthode ORSTOM

La méthode ORSTOM ou méthode d'AUVRAY & RODIER (1976) est utilisée pour les bassins forestiers en Afrique tropicale de 10 km^2 à 2500 km^2 en théorie ; pour la zone sahélienne et la totalité des bassins d'une superficie inférieure à 1500 km^2 pour la zone tropicale sèche.

- La méthode CIEH

La méthode CIEH (C. PUECH et D. CHABI GONNI) pour les bassins de plus de 2 km^2 ;

- La méthode rationnelle

Cette méthode est utilisée pour les bassins de superficie inférieure à 4 km². Elle sera retenue en raison de sa simplicité et de son adaptation pour l'estimation de débit d'apport de bassins versants dont la superficie ne dépassant pas 4 km² et en tenant compte également de données disponibles.

II.4.1.3. Calculs des débits Projet

Dans le cadre de notre projet nous avons étudié 2 méthodes à savoir :

- Méthode rationnelle : pour les bassins dont la superficie est inférieure 4 km²

- La méthode ORSTOM : pour les bassins de plus de 4 km²

Conclusion partielle : Il ressort des résultats des tableaux 22 et 23 ci-dessous que nous comptons sept (07) bassins versants dont cinq calculés avec la méthode rationnelle et les deux autres avec la méthode ORSTOM avec des débits allant de 3.86 m^3/s à 59.70 m^3/s.

N° BV	Superficie (km²)	Longueur Hydr. (m)	Pente I (m/m)	Coefficient ruis. C	Temps de conc. Tc (min)	Montana		Intensité (mm/h)	Débit de Crue Q10 (m3/s)	Débit ruisselé (m3/s)	Débit de pointe Qp (m3/s)
						A	B				
BV1	0.681	819	0.022	0.3	14.81	570	0.67	93.64	5.31	0.42	5.73
BV3	0.314	376	0.0211	0.3	8.26	570	0.67	138.42	3.62	0.24	3.86
BV4	2.468	1800	0.0204	0.3	27.97	570	0.67	61.17	12.58	0.36	12.94
BV5	1.106	1140	0.0247	0.3	18.28	570	0.67	81.34	7.49	0.31	7.80
BV7	2.027	2190	0.0206	0.3	32.40	570	0.67	55.42	9.36	0.31	9.67

Tableau 22: Débits calculés selon la méthode rationnelle

N° BV	Superficie (km²)	Pente I (m/m)	Pan (mm)	Coefficient d'abattement	Kr10 (%)	P10 (mm)	Coeff. de pointe	Tps de base Tb10 (min)	Débit de crue Q10 (m3/s)	Débit ruisselé (m3/s)	Débit de pointe Qp (m3/s)
BV2	18.676	0.0220	1130.68	0.8987	33.4	137.36	2.6	460	43.52	0.8	44.32
BV6	54.427	0.0219	1130.68	0.89	36.7	137.36	2.6	1077.89	58.90	0.8	59.70

Tableau 23: Débits calculés selon la méthode ORSTOM

II.4.2. ETUDE HYDRAULIQUE

L'hydraulique routière couvre le rétablissement des écoulements naturels, l'assainissement des plateformes de chaussée, le drainage et la lutte contre la pollution routière. Cette dernière nous permettra de déterminer les sections des ouvrages hydrauliques capables d'évacuer les débits décennaux. On tient compte de plusieurs paramètres pour le choix de ces ouvrages dont les plus importants sont :

- La catégorie de route ;
- Les paramètres hydrauliques ;
- L'importance du débit à évacuer ;
- Les paramètres géométriques du lit

Le principe est de déterminer un débit d'ouvrage supérieur au débit à évacuer. La détermination de ce débit se fera avec la formule de Manning Strickler défini comme suit :

$$Q = K \times S_m \times {R_h}^{2/3} \times I^{1/2}$$

Avec :

- Q : Débit de crue (en m^3/s) ;
- K : Coefficient de rugosité qui dépend de la surface considérée (K = 67 pour les surfaces en Béton Armé)
- S_m : Section mouillée (en m^2) ;
- Rh : Rayon hydraulique = $\frac{S_m}{P_m}$ (en m)
- I : Pente (en m/m).

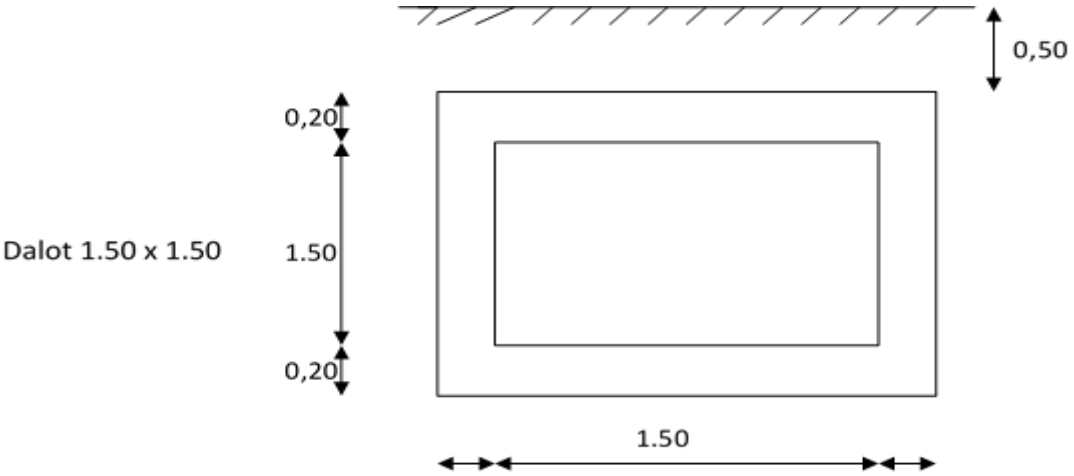
Identification	Sections			Paramètres	
	Dimensions				
BV N°	**n**	**B**	**D**	**q (m^3/s)**	**I (%)**
1	1	1,5	2	5,73	0,6
2	6	1,5	3	12,09	0,5
3	1	1,5	1,5	3,86	0,75
4	1	3	2	12,94	0,7
5	1	2	2	7,81	0,7
6	8	3	2,5	18,895	0,6
7	1	2	2	9,67	0,6

Tableau 24: Récapitulatif des sections des dalots transitant les débits

II.4.3. DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DES OUVRAGES HYDRAULIQUES

A l'aide des débits déterminés dans la partie précédente, nous dimensionnerons nos ouvrages afin de déterminer le ferraillage à mettre en œuvre pour la solidité, l'efficacité et la pérennité de ces derniers.

Nous déterminerons dans cette partie le ferraillage d'un dalot de dimension 150×150. Les études seront faites par bande d'un (01) mètre de dalot (b = 1 m).



II.4.3.1. Méthode de calculs

Les différents cas de charges suivants seront considérés pour le calcul des sollicitations dans les éléments de structure du cadre simple :

- Sous actions permanentes d'une part, et
- Sous surcharge d'exploitation d'autre part.

Pour chaque cas de charge, nous calculerons les moments fléchissant M aux appuis A, B, C, D, les moments en mi- travée et les efforts normaux N dans les différents éléments du dalot (piédroit gauche et droit ; tablier et radier) c'est à dire dans les éléments AB (piédroit gauche), BC (tablier), CD (piédroit droit), et AD (radier).

II.4.3.2. Résultats de calculs

Le tableau 2 suivant récapitule les différentes sollicitations dans chacun des éléments calculés et le tableau 23 fait le point des sections d'acier à utiliser dans le ferraillage :

Partie de l'ouvrage	Sollicitations KN.m/ml et KN/ml			
			ELU	ELS
TABLIER	Moment Fléchissant	Appui	-5.25	-3.92
		Travée	7.96	5.96
RADIER	Moment Fléchissant	Appui	5.89	4.41
		Travée	-7.41	-5.54
PIEDROIT	Moment Fléchissant	Appui	-5.03	-3.77
		Travée	3.04	2.77
	Effort normal		101.22	75.73

Tableau 25: Tableau récapitulatif des sollicitations du dalot

RECAPITULATIF DES FERRAILLAGES		
TABLIER	Inférieur	HA10, esp =15 cm
	Supérieur	HA10, esp = 12 cm
	Transversal	HA8, esp = 20 cm
	Appui	HA8, esp = 16 cm
PIEDROITS	Intérieur	HA10, esp =12 cm
	Extérieur	HA8, esp = 12 cm
	Transversal	HA8, esp = 20 cm
RADIER	Inférieur	HA8 esp =15 cm
	Supérieur	HA8, esp = 20 cm
	Transversal	HA8, esp = 20 cm
	Appui	HA10, esp = 14 cm

Tableau 26: Tableau récapitulatif du ferraillage du dalot

L'ANNEXE 4 présente les notes de calcul du dalot et le plan de ferraillage.

CHAPITRE III : SIGNALISATION ROUTIERE – ECLAIRAGE PUBLIC

III.1. Signalisation Routière

La signalisation routière désigne l'ensemble des signaux conventionnels implantés sur le domaine routier et destinés à assurer la sécurité des usagers de la route. Elle comporte deux grands ensembles : la signalisation routière horizontale, constituée des marquages au sol et des plots et la signalisation routière verticale, qui comprend les panneaux, les balises, les feux de signalisations, les bornes et les feux tricolores. Bien conçue et réalisée, elle réduit les causes d'accident et facilite la circulation.

III.1.1. Signalisation horizontale

La signalisation horizontale constitue une aide importante à la conduite. Elle permet de canaliser les flux de circulation, de préciser les règles de prescription, de matérialiser le stationnement et guider visuellement les usagers, en particulier la nuit grâce aux plots. Les marquages au sol sont constitués de lignes longitudinales et transversales continues ou discontinues selon le type de modulation. Dans le cas de notre projet, la signalisation horizontale sera constituée comme suit :

- Des marquages longitudinaux discontinus lignes d'axe et de rives de chaussée ;
- Des marquages transversaux continues lignes complétant les panneaux ‘‘stop’’ et discontinues ‘‘cédez le passage’’ ;
- La bande de passage pour piétons : positionnée suivant les points de fortes traversées de la route.

La largeur de chacune de ces lignes est définie par rapport à une largeur unité (u) et varie en fonction de type de routes. Pour notre route, la largeur de référence de la peinture pour marquage au sol est prise égale à 6 m (routes nationales et voies urbaines u= 6 m). Le tableau 24 suivant donne les caractéristiques des lignes utilisées :

Désignation de marquage	Type	Largeur	LONGUEUR du trait (en m)	INTERVALLE entre 2 traits successifs (en m)
Séparation de voies en section courante	Ligne T1	2u	3 m	10,00 m
Lignes de rives	Ligne T2	3u	3 m	3,50 m
Cédez le passage et Stop	Ligne T'2	0,5 m	0.5 m	0.50 m
Ligne de délimitation de bandes cyclables	Ligne T3	2u	3	1,33
Séparation de chaussée aux points singuliers	Ligne continue	0,5 m	_	_

Tableau 27: Tableau des caractéristiques des lignes de marquage

Les tableaux donnant les valeurs de **u** pour la largeur des bandes de signalisation horizontale ; les largeurs caractéristiques des différents types de marquage et les figures montrant les dispositions réglementaires des marquages sont en ANNEXE 6.

III.1.2. Signalisation verticale

Les panneaux de signalisation, les feux de circulation ainsi que les balises qui constituent la signalisation horizontale servent de complément à la signalisation verticale. Ces éléments sont en général à la limite de l'accotement à une distance suffisante du bord de la chaussée pour qu'ils ne présentent pas des risques pour la circulation. Ils seront placés à une hauteur minimum de 2,3 m au-dessus du niveau de sol pour ne pas gêner la circulation des piétons et pour tenir compte des véhicules qui peuvent les masquer.

Dans le cadre de ce projet, les panneaux utilisés pour la signalisation verticale sont :

- Le panneau AB3a (Cédez le passage) placé à l'approche du rond-point ;
- Le panneau AB4 (Stop) placé au niveau des amorces ;
- Le panneau AB25 (Carrefour à sens giratoire) placé à l'approche du rond-point ;
- Le panneau B14 (Limitation de vitesse) placé à l'entrée de la zone du projet ;
- Le panneau B21-1 (Obligation de tourner à droite avant le panneau) placé au niveau du rond-point ;
- Le panneau C20a (Passage pour piétons) placé à chaque traversée ;

- Le panneau D42b (Panneau de pré signalisation à sens giratoires) placé à l'approche du rond-point ;
- Le panneau J5 (Signalisation des têtes d'îlots directionnels à contournement par la droite) placé en tête des ilots séparateurs.

Le CCTP exige les dimensions suivantes pour les différentes formes de tête de panneaux :

- Disque : diamètre 85 cm (panneaux d'interdiction et de prescription) ;
- Carré : côté 70 cm (panneaux d'indication) ;
- Triangle : côté 100 cm (panneaux de danger) ;
- Octogone : double apothème 80 cm (panneaux stop)

Les différents panneaux utilisés pour la signalisation verticale sont présentés en ANNEXE 6

III.1. Eclairage Public

L'éclairage public doit permettre une très bonne visibilité des obstacles et singularités par les usagers la nuit et doit aussi permettre aux piétons de distinguer clairement les bordures de trottoirs, les véhicules et d'éviter les zones d'ombre. Nous proposons la mise en place de l'éclairage public seulement au niveau des agglomérations (villages traversés), car en règle générale les routes en rase campagne ne doivent pas être éclairées, même au niveau des carrefours comme nous le recommande le guide « ARP, SETRA » à la page 104.

- ***Matériel d'éclairage***

Nous utiliserons pour notre projet des candélabres en acier galvanisés à chaud thermolaqué d'un point de vue résistance à la corrosion, disponibilité sur le marché et d'esthétique.

Comme pour la plupart des projets au Bénin et en respectant les prescriptions du CCTP, nous utiliserons pour ce projet des lampes à incandescence qui offrent un confort visuel très appréciable et ont une durée de vie moyenne de 1000 heures.

- ***Hauteur des points d'éclairage***

Ce paramètre est fonction de la largeur de la chaussée et de l'intensité des lampadaires. Généralement, elle varie de 7,5 m à 12 m. Nous retiendrons comme hauteur de pointe d'éclairage 8 m.

- ***Distance entre les points d'éclairage***

Elle varie de 3 à 3,5 fois la hauteur des points d'éclairage au-dessus de la chaussée. Soit d la distance entre les points d'éclairage, on a :

d = 3 x 8 à 3,5 x 8, on a une valeur de d qui varie de 24 m à 28 m.

On retient 25 m comme distance entre points d'éclairage.

CHAPITRE IV : ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL ET SOCIAL ET ESTIMATION DU COUT DU PROJET

IV.1. ETUDE D'IMPACT ENVIRONNEMENTAL

Il s'agira pour nous de relever certains impacts qui peuvent etre causés par le projet du tronçon Parakou-Béroubouay.

Cette étude consiste à analyser le projet afin d'identifier, d'évaluer et de proposer des mesures d'atténuation des impacts du projet sur l'environnement.

Les travaux de réhabilitation de notre axe auront des impacts aussi bien positifs que négatifs sur les milieux biophysiques et socio-économiques.

IV.1.1. Cadre institutionnel, législatif et réglementaire

- Décret N° 2003-332 du 27 août 2003 : portant gestion des déchets solides en République du Bénin. Cette réglementation concerne les déchets solides produits en République du Bénin. Ainsi tout rejet de déchets solides dans un milieu récepteur doit être conforme aux normes prescrites dans ce décret.
- Décret N°2001-235 du 12 juillet 2001 portant organisation de la procédure d'étude d'impact sur l'environnement, ce décret fixe les conditions dans lesquelles se réalisent une étude d'impact et les modalités de sa réalisation.
- Le décret 2006-615 du 22 octobre 2006 portant interdiction du prélèvement du sable le long des plages et dans la zone du chenal comprise entre son embouchure et l'ancien pont de Cotonou qui, outre l'interdiction contenue dans son objet, stipule que « l'extraction du sable pour les travaux de construction ne peut se faire que sur des sites autorisés par l'Etat ». Tout contrevenant est puni selon les peines prévues dans la loi 2006-17 portant Code Minier et fiscalités minières en République du Bénin adopté par l'assemblée Nationale en sa séance du 07 juillet 2006. Ce texte règlemente les activités minières.
- L'arrêté interministériel no.040 MRPM/ MURHRFLEC/ MTTTATP/ MISP/ MEPN/ MEF/ MJDLH/ DC/SGM/CTREM/CTJ/DGM/SA du 15 juillet 2009 portant interdiction de l'utilisation du sable marin dans la construction des ouvrages de génie civil publics et privés. Son domaine d'interdiction couvre les bâtiments publics et privés, les ponts, les chaussées et tous autres ouvrages de génie civil.

- Le décret N° 2001-110 du 04 avril 2001, portant Normes de qualité de l'air :
  - Article 10

  L'émission de fumées épaisses ou excessives par tout véhicule à moteur est considérée hors norme.
  - Article 22

  L'exploitant de tout établissement rejetant des polluants dans l'atmosphère est tenu d'obtenir un permis d'émission auprès du Ministre chargé de l'environnement, après avis technique de l'Agence Béninoise pour l'Environnement.

IV.1.2. Impacts positifs

➢ ***Sur le milieu physique***

Le projet n'aura aucun impact positif significatif sur le milieu physique, en phase d'installation, de travaux préparatoires et d'exécution. Comme impact notable du projet sur le milieu physique en phase d'exploitation et d'entretien, on pourrait remarquer l'amélioration de la qualité du paysage au niveau des localités traversées.

➢ ***Sur le milieu biologique***

Le projet n'aura aucun impact positif significatif sur le milieu biologique lors des différentes phases du projet.

➢ ***Sur le milieu humain***

Les impacts potentiellement positifs du projet sur le milieu humain sont les suivantes :

- **Au niveau de la population et de la vie sociale** : source d'emplois temporaires pour les populations bénéficiaires du projet ;
- **Au niveau des activités économiques :** développement circonstanciel des activités commerciales autour de la base-vie ;
- **Au niveau de la santé et du cadre de vie** : réalisation d'un bilan de santé pré-embauche et assistance sanitaire apportée au personnel de l'entreprise ;
- **Au niveau du foncier** : libération des installations anarchiques ;
- **Au niveau de l'habitat et des équipements** : accroissement et renforcement du nombre des infrastructures de voirie d'assainissement des grandes localités traversées ;

- **Au niveau de la sécurité et de la circulation routière** : renforcement de la sécurité au niveau des villages riverains, réduction de la fréquence des actions des coupeurs de route ;
- **Au niveau de l'habitat et des équipements** : accès facile aux infrastructures urbaines, désenclavement de certains équipements peu fréquentés ;
- **Au niveau de la santé et du cadre de vie** : amélioration du cadre de vie.

IV.1.3. Impacts négatifs et mesures d'atténuation

Phases du projet	Sources d'impact	Impacts	Mesures d'atténuation
Installation de chantier	Passage des engins	• Perturbation acoustique et atmosphérique par le bruit des engins (nuisance sonore)	• Maintenir les machines et véhicules de transport en bon état afin de minimiser les émissions de gaz et les bruits ; • Le sol sera fréquemment arrosé pour éviter le soulèvement de poussière.
		• Perturbation de la faune et de la flore • Risques de contestations, de conflits et de spéculations foncières	• Les équipements seront éloignés de la végétation et les aires de coupe seront clairement définies ; • L'entreprise évitera les espaces agricoles pour l'installation de chantier

	Installation de la base du chantier	• Pollution des eaux de surface et souterraines par les déchets produits par le personnel et les huiles usagées des engins	• Installation de périmètre de protection autour des zones sensibles ; • Déviation des eaux de ruissellement hors de la zone de projet ; • Installation de bâches au niveau des aires de stockage des huiles ; • L'installation des latrines au niveau des bases des chantiers
Travaux préparatoires	Création des déviations	• Insécurité des usagers et des travailleurs • Pollution atmosphérique et insécurité routière lors de la création de déviation	• Port des EPI (baudriers, chaussures de sécurité, casques) ; • Présence de drapeautier ou réguler la circulation si nécessaire. • Arroser régulièrement les déviations ; • Entretenir périodiquement les déviations en y faisant passer la niveleuse ; • Signaler à 500 m en amont et en aval chaque déviation par des panneaux de signalisation temporaire adéquats.
	Passage et Travaux d'engins	• Perturbation de la flore	• Limiter le débroussaillage et le défrichage à l'emprise des travaux, au stricte nécessaire • Soumettre à l'autorisation de maitre d'œuvre, la coupe de tout arbre de plus de 25 cm de diamètre ; • Planter des arbres pour compenser les arbres abattus.

Exécution des travaux	Activités des populations riveraines	• Risques d'accident des engins sur la population autochtone	• Rubanier les fouilles et tranchées ; • Circonscrire la zone des travaux.
		• Pollution des eaux et des sols	• Rendre étanche les aires de manutention et d'entreposage et les fosses de vidange des huiles et de stockage de produit pétrolier ; • Recouvrir de bâche les aires de stockage des huiles usées.

Tableau 28: Impacts négatifs et mesures d'atténuation

IV.2. COUT ESTIMATIF DU PROJET

L'étude de l'avant métré permet de quantifier les parties d'ouvrage en vue de la réalisation du projet. Pour les différentes séries, le devis quantitatif s'effectuera suivant les postes :

- Installation de chantier ;
- Travaux préparatoires
- Terrassement ;
- Chaussée ;
- Revêtement
- Ouvrages d'art ;
- Sécurité et signalisations ;
- Mesures environnementales et social

Série	Poste	Montant HT	Pourcentage
000.	INSTALLATION DE CHANTIER	476 425 000,00	7,29
100	TRAVAUX PREPARATOIRES	234 558 000,00	2,06
200	TERRASSEMENTS	815 741 354,50	6,36
300	CHAUSSEE	1 587 128 942,32	8,98
400	REVETEMENT	6 319 112 104,00	55,36
500	OUVRAGES D'ART	1 130 080 844,00	17,29
600	SECURITE ET SIGNALISATION	86 373 794,00	1,32
700	MESURES ENVIRONNEMENTALES	87 500 000,00	1,34
Total		11 236 720 039	100

Tableau 29: Coût estimatif du Projet

Arrêté le présent devis à la somme **onze milliards deux cents trente-six millions sept cent vingt mille cinquante Francs (11 236 720 050) francs CFA.**

Conclusion

Au terme de notre étude dont l'objectif était de déterminer une structure de renforcement capable de résister au trafic pendant sa durée de vie tout en faisant ressortir un aménagement répondant les normes de conception géométrique en respectant les normes de sécurité et l'assainissement, nous avons retenu la structure de chaussée suivante :

- Couche de roulement en Béton Bitumineux d'épaisseur 6 cm
- Couche de base en Grave Bitume d'épaisseur 8 cm
- Couche de fondation en matériaux recyclés améliorés au ciment 3% d'épaisseur 25 cm

La structure proposée répond aux normes techniques en tenant compte de l'aspect économique et surtout de l'aspect durée (en comparaison avec la structure mixte de l'entreprise).

L'état des lieux des ouvrages a aussi révélé des ouvrages en bon état qui auront besoin de nettoyage et de curage tandis que les ouvrages en mauvais état ou n'arrivant plus à écouler les débits devront être remplacés. De ce fait nous avons obtenu les familles de dalots en remplacements de ceux endommagés (150 x 200, 150 x 300,150 x 150, 200 x 200, 300 x 200, 300 x 250).

L'étude des signalisations nous a permis d'avoir les différents marquages au sol ainsi que les panneaux de manière à mieux guider les usagers. L'éclairage public a ressorti l'implantation de candélabres en acier galvanisés dont bénéficierons les différentes populations au niveau des agglomérations. Les questions environnementales et sociales ont été abordées et des propositions de mesures ont été formulées.

Toutes les études menées dans le cadre de ce projet nous ont permis d'avoir une idée des quantités des différents matériaux et matériels entrant dans la réalisation du projet. Ces quantités nous ont permis de trouver après calcul un budget d'environ **onze milliards deux cents trente-six millions sept cent vingt mille cinquante Francs** (11 236 720 050) francs CFA pour la mise en œuvre du projet.

Recommandations et perspectives

Nous avons mené toutes ses études afin que la route assure ce pourquoi elle a été conçue. Cependant une infrastructure routière ne peut assurer toute sa fonctionnalité ni garantir sa pérennité sans entretiens. La sensibilisation de la population doit être faite pour éviter tout comportement non civique sur l'emprise du projet, des travaux de maintenances devraient aussi y être compris. Outre ces recommandations, il serait souhaitable au regard du fait que les ornières engendrées par des déformations permanentes sous l'effet conjugué du trafic souvent agressif, en conjonction de la qualité des prestations :

- ✓ d'approfondir d'avantage les dispositions qui sont en cours dans le cadre de faire respecter la limitation de la charge à l'essieu, sachant que l'essieu de référence considéré pour le dimensionnement des chaussées est de 13 tonnes au Bénin et que cette limite est loin d'être respectée ;
- ✓ de choisir le bitume approprié aux conditions climatiques de la zone pour réaliser les travaux ;
- ✓ d'étendre les campagnes d'investigations sur tout le réseau routier du Bénin, pour mieux ressortir les causes à l'origine de l'apparition précoce de l'orniérage sur les revêtements afin de doter d'une banque de données fiables pour le prévenir.

Il faut toutefois noter que le travail ne s'est pas déroulé sans difficultés. Les principales difficultés ont été la difficulté d'accès aux données pour mener à bien nos études (Soit confidentielles, soit introuvables).

Bibliographie

OUVRAGES ET ARTICLES

- **Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics CEBTP**, Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux, 1984
- **CEBTP–LCPC**, Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux, 1985
- **SETRA,** Aménagement des routes principales, 1994
- **Adamah Messan**, Cours BA1 (cours 2iE)
- **Adamah Messan**, Cours d'Ouvrage d'art, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 2013
- **Angelbert C. Biaou,** Cours d'hydraulique routière - Institut international d'ingénierie de l'eau et de l'environnement, 2013
- **Issoufou Tamboura**, Cours de route**,** Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), 2014
- **SETRA**, **Fascicule n°62-Titre I – Section I**, Règles techniques de conception et calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites BAEL 91 révisé 99, Avril 1999
- **Marc Combere,** Polycopié de cours de pathologies et entretien routier, 2018
- **Marc Combere,** Polycopié de cours de voiries, 2013

SITES INTERNET

- http://www.passerlecode.info/fiches/liste-des-panneaux-de-signalisation.pdf, consulté le 21/11/2019

ANNEXES

ANNEXES 68
ANNEXE 1 : Historique de la route Parakou-Béroubouay 69
ANNEXE 2 : ETUDE GEOMETRIQUE 71
ANNEXE 3 : ETUDE GEOTECHNIQUE ET DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSEE 73
ANNEXE 4 : ETUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE 122
ANNEXE 5 : DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DE DALOT 137
ANNEXE 6 : TABLEAU DES SIGNALISATIONS VERTICALES 161
ANNEXE 7 : COUT ESTIMATIF DU PROJET 162
ANNEXE 8 : PROFILS EN TRAVERS 168

ANNEXE 1 : Historique de la route Parakou-Béroubouay

Dans le cadre de la mise en œuvre de sa politique de développement des infrastructures routières le Gouvernement du Bénin a entrepris de réhabiliter la Route Nationale Inter-états N°2 tronçon Parakou-Béroubouay avec le soutien financier de l'Union Européenne. Il a alors fait procéder d'une part, à un appel à concurrence pour la sélection d'une entreprise devant exécuter les travaux et d'autre part, à une consultation pour retenir un bureau devant assurer les prestations de surveillance et de contrôle.

Au terme des procédures qui ont été engagées en 2009, L'entreprise Reynolds Construction Company (Nig) Ltd (RCC) et le bureau d'Ingénieurs Conseils TR-Engineering ont été retenus respectivement pour les travaux et le contrôle.

Les travaux ont été scindés en deux lots à savoir :

- **Lot 2**: PK 9 + 400 - PK 29+400
- **Lot 3**: PK 29+400 - PK 151+752

Les travaux ont démarré le 1er mars 2010 pour une durée contractuelle de 24 mois pour le lot 2 allant du PK 9+400 (Sortie de Parakou) au PK 109+400 (Bemberéké) et le 02 août 2010 pour une durée contractuelle de 18 mois pour le lot 3 Pk 109+400 à Pk 151+752 (Sortie Béroubouay).

Par suite des différends survenus dans l'exécution des travaux, le Maître d'Ouvrage, le Ministre de l'Economie et des Finances a procédé à la résiliation des deux marchés de l'Entreprise par lettre N°1700-cbis /MEF/DC/C-FED/AMV du 9 juillet 2013. Il s'en est suivi un arrêt des travaux.

A cette étape, le niveau d'exécution des travaux se présentait comme ci-après :

- **<u>Lot 2</u> : PK 9+400 au PK 109 + 400**
  Les travaux de chaussée et de revêtement sont arrêtés au niveau de la monocouche qui recouvre la couche de base en sol-ciment entre le PK 9+400 et le PK 29+400 tandis que entre les PK 29+400 et le PK 109+400 le revêtement en béton bitumineux est entièrement achevé exception faite de l'emprise du poste de pesage de Sirarou.

- **<u>Lot 3</u> : PK 109+400 au PK 151+752**

  Le revêtement de ce lot est entièrement achevé entre les PK 109+400 et le PK 151 + 752.

Pendant cet arrêt qui a duré quelques mois, des dégradations ont été observées sur la chaussée et tendent à constituer une gêne pour le confort et la sécurité des usagers. Il s'agit de nids de poules, de flaches, d'orniérages, de fluage et de ressuage de bitume. Certains talus sont également dégradés des suites d'avènements pluvieux ou d'accidents routiers.

Au regard de l'ampleur et de l'évolution des dégradations, il a été envisagé, conformément aux recommandations faites par la mission de contrôle TRE de procéder à l'exécution urgente d'un

lot de travaux constituant la tranche ferme d'une part et l'achèvement de l'ensemble des travaux dans le cadre d'une tranche conditionnelle d'autre part. Il s'agit de :

Phase 1 : Travaux de reprise urgents (tranche ferme)

A ce niveau, il est prévu en grands traits:

- l'exécution de point à temps bitume (6000 m²) sur la partie non encore revêtue de la route entre le PK 9+400 (sortie nord de Parakou) et PK 29+400 (poste de péage de Sirarou) et son revêtement par un enduit superficiel bicouche (20 km) avec la mise en place des signalisations horizontale et verticale.
- le traitement des zones les plus déformées par orniérage et ou fluage du revêtement entre le PK 30+000 et le PK 151+752. Quinze (15) kilomètres de route sont concernées par ce traitement de chaussée dans les localités de Ndali, Bembèrekè, Gamia et Béroubouay. Les travaux à réaliser sont : le rabotage de la chaussée existante, la mise en œuvre d'une couche d'accrochage, d'un enduit superficiel monocouche et la mise en place d'une signalisation d'urgence (temporaire).
- la réparation de deux talus situés aux PK 60+347 et 66+364, dégradés par les eaux pluviales.

Phase 2 : Renouvellement de la couche de roulement en béton bitumineux (Tranche conditionnelle)

La consistance des travaux est prévue pour être affermie en décembre 2014 au terme des investigations préalables qui devront être réalisées par l'Entreprise au cours de la tranche ferme.

Dans le cadre de la reprise des travaux de ces deux phases, le Maître d'Ouvrage, le Ministère de l'Economie, des Finances et des Politiques de Dénationalisation à travers la Cellule FED a procédé, au terme d'une procédure négociée, à la sélection de l'entreprise SOGEA-SATOM dont l'offre a été techniquement acceptée et classée moins-disant pour l'ensemble des deux phases.

ANNEXE 2 : ETUDE GEOMETRIQUE

1. Calcul des paramètres cinématique en fonction de la vitesse de référence

- **Distance de freinage (d0)**

C'est la distance que parcourt le véhicule pendant l'action de freinage, pour passer de la vitesse V à la vitesse nulle.

$$\frac{1}{2} m \times V^2 = F(V) \times mg \times d_0$$

Avec F(v) = coefficient de frottement longitudinal pneus/chaussée.

V (km/h)	40	60	80	100	120
F(v)	0,46	0,46	0,42	0,38	0,34

Tableau 30: coefficient de frottement longitudinal pneus/chaussée en fonction de Vr

$$d_0 = \frac{V^2}{2 \times F(V) \times g} = \frac{27{,}78^2}{2 \times 0.38 \times 10} \; Avec \; V = 100 \; \frac{km}{h} = 27{,}777 \; m/s$$

$\boldsymbol{d_0 = 101,52\ m}$

- **Distance d'arrêt en alignement droit (d1)**

A partir du moment où un conducteur, circulant à la vitesse V veut s'arrêter, il parcourra une distance d1 comprenant la distance réelle de freinage d0, augmentée d'une distance, au préalable, correspondant aux temps morts comprenant le temps physiologique de perception-réaction du conducteur (estimé à 1,5 s si V< 100 km/h et à 1,3 s si V> 100 km /h) et le temps mort mécanique ou temps réponse du système de freinage (estimé à 0,5 s).

$d_1 = d_0 + 0{,}55 \times V \; (m/s)$

$d_1 = 101{,}54 + 0{,}55 \times 27{,}78$

$\boldsymbol{d_1 = 116{,}81\ m}$

- **Distance d'arrêt en courbe (d2)**

Dans ce cas la distance d0 est majorée de 25% en courbe, l'action de freinage devant être moins énergétique pour éviter la perte de contrôle du véhicule.

$d_2 = 1{,}25 \times d_0 + 0{,}55 \times V\ (m/s)$

$d_2 = 1{,}25 \times 101{,}54 + 0{,}55 \times 27{,}78$

$\boldsymbol{d_2 = 142{,}18\ m}$

- **Distance de visibilité de dépassement**

  - **Distance de visibilité de dépassement minimal dd**

Cette distance correspond à une manœuvre de dépassement qui dure 7 à 8 s en supposant qu'un véhicule adverse puisse surgir en sens inverse à la même vitesse V.

Donc dd = double de la distance nécessaire au dépassement.

$d_d = 2 \times V\ (m/s) \times 7$

$d_d = 2 \times 27{,}78 \times 7$

$\boldsymbol{d_d = 388{,}89\ m}$

  - **Distance de visibilité de dépassement normal dD**

Cette distance est supérieure de 50% à dd et correspond à une manœuvre de dépassement qui dure de 11 à 12s.

$d_D = 1{,}5 \times d_d$

$d_D = 1{,}5 \times 311{,}11$

$\boldsymbol{d_D = 583,33\ m}$

Les éléments de l'axe en plan

En général, le tracé en plan d'une route est constitué d'une succession de courbes et d'alignements droits séparés ou pas par des raccordements progressifs. Il vise à assurer de bonnes conditions de sécurité et de confort tout en s'intégrant au mieux dans la topographie du site. Le tracé en plan comme le profil en long est prévu pour donner à la circulation :

- La sécurité et la rapidité

- Chercher le plus court chemin du point de vue technique et économique
- Répondre aux besoins de la plus grande majorité des personnes habitants les environs
- Garder toujours la fondation de la route au-dessus de la nappe phréatique
- En terrain plat, élever la route au-dessus du terrain naturel afin d'avoir un meilleur drainage et moins de risque d'inondation.
- Réduire au minimum les volumes des déblais et des remblais, mais toujours garder le volume de remblais sensiblement supérieur à celui des déblais ;
- Donner le plus grand rayon possible aux courbes horizontales afin de permettre une circulation rapide

ANNEXE 3 : ETUDE GEOTECHNIQUE ET DIMENSIONNEMENT DE CHAUSSEE

Tableau 31: Tableaux des mesures de déflexion

N°	PK SECTION	NIDS DE POULE						TOTAUX (m²)				CUMUL GENERAL
		Superficie (m²)	Nombre	Position			Nature	Localisé		Grande masse		
				Gauche	Axe	Droit		Partiel	Cumul	Partiel	Cumul	
1	**9+400**											
2	**9+400-9+550**	3	7	**X**	**X**		Localisé	3	3		0	3
4	**9+550-9+900**	2	4		X	X	Localisé	2	5		0	5
5	**9+920**	1	1		X		Localisé	1	6		0	6
6	**10+100 Poste Police Sortie Parakou**	6	3	X	X		Localisé	6	12		0	12
7	**10+120**	0,5	1		X		Localisé	0,5	12,5		0	12,5
8	**10+120-10+270**	8	Grande Masse	X	X	X	Grande Masse		12,5	8	8	20,5
9	**10+320**	1,5	3		X	X	Localisé	1,5	14		8	22
10	**10+510**	0,5	1			X	Localisé	0,5	14,5		8	22,5
11	**10 +600**	1,5	2	X		X	Localisé	1,5	16		8	24
12	**10+800**	0,5	1			X	Localisé	0,5	16,5		8	24,5
13	**11+000**	0,5	1			X	Localisé	0,5	17		8	25
14	**11+200**	3		X			Localisé	3	20		8	28
15	**11+275**	1,5	2	X			Localisé	1,5	21,5		8	29,5
16	**11+375**	0,5	1	X			Localisé	0,5	22		8	30
17	**11+500**	0,5	1	**Kpassangabou**		X	Localisé	0,5	22,5		8	30,5
18	**11+500 - 11+600**	8	10	**X**	X		Localisé	8	30,5		8	38,5
19	**11+800 - 12+000**	5	3		X		Localisé	5	35,5		8	43,5
20	**12+000-12+200**	6	7	X	X	X	Localisé	6	41,5		8	49,5

N°	PK SECTION	NIDS DE POULE						TOTAUX (m²)				CUMUL GENERAL
		Superficie (m²)	Nombre	Position			Nature	localisé		Grande masse		
				Gauche	Axe	Droit		Partiel	Cumul	Partiel	Cumul	
20	**12+250-12+500**	7	5		x	x	Localisé	7	48,5		8	56,5
21	**12+500-12+600**	4	2	X			Localisé	4	52,5		8	60,5
22	**12+500-12+600**	3	2			x	Localisé	3	55,5		8	63,5
23	**12+700-12+800**	12	10	X	x	x	Localisé	12	67,5		8	75,5
24	**12+900-13+050**	150	Grande Masse	X	x	x	Grande Masse	150	217,5	150	158	375,5
25	**13+050-13+150**	90	Grande Masse	X	x	x	Grande Masse	90	307,5	90	248	555,5
26	**13+200-13+350**	40	Grande Masse	X	x	x	Grande Masse	40	347,5	40	288	635,5
27	**13+250-13+450**	250	Grande Masse			x	Grande Masse	250	597,5	250	538	1135,5
29	**13+500-13+700**	300	Grande Masse		x	x	Grande Masse		597,5	300	838	1435,5
30	**13+800**	70	Grande Masse	X			Grande Masse		597,5	70	908	1505,5
31	**13+800-13+900**	30			x		localisé	30	627,5		908	1535,5
32	**13+900-14+000**		Erosion	Komiguéa			Erosion		627,5		908	1535,5
33	**14+000-**	1,5				x	localisé	1,5	629		908	1537
34	**14+000-14+200**	200	16				localisé	200	829		908	1737
35	**14+250-14+300**	3	2		x		localisé	3	832		908	1740
36	**14+300-14+400**	7	7	Zone Hôpital		x	localisé	7	839		908	1747
37	**14+500-14+600**	60	Grande Masse	BOKO	x		Grande Masse		839	60	968	1807
38	**14+650-14+700**	15	10		x		localisé	15	854		968	1822
39	**14+700-14+850**	14	14		x	x	localisé	14	868		968	1836
40	**14+850-15+100**	300	Grande Masse			x	Grande Masse		868	300	1268	2136

Tableau 31.2 : Relevé des dégradations du PK 12 + 200 au PK 15 + 100

N°	PK SECTION	NIDS DE POULE						TOTAUX (m²)				CUMUL GENERAL
		Superficie (m²)	Nombre	Position			Nature	localisé		Grande masse		
				Gauche	Axe	Droit		Partiel	Cumul	Partiel	Cumul	
41	**15+100-15+500**	300	Grande Masse	X		x	Grande Masse		868	300	1568	2436
42	**15+550**	1,5	3		X		Localisé	1,5	869,5		1568	2437,5
43	**15+550-15+800**	200	Grande Masse		X	x	Grande Masse		869,5	200	1768	2637,5
44	**15+800-16+000**	100	Grande Masse		X	x	Grande Masse		869,5	100	1868	2737,5
45	**16+100-16+200**	80	Grande Masse		X	x	Grande Masse		869,5	80	1948	2817,5
46	**16+300-16+400**	40	20			x	Localisé	40	909,5		1948	2857,5
47	**16+500**	1	1		x	x	Localisé	1	910,5		1948	2858,5
48	**16+600**	1,5	2		x		Localisé	1,5	912		1948	2860
49	**16+700-16+800**	10	14		x	x	Localisé	10	922		1948	2870
50	**16+950**	1	1		x		Localisé	1	923		1948	2871
51	**17+000-17+100**	15	17			X	Localisé	15	938		1948	2886
52	**17+150-17+300**	150	Grande Masse	X	x	X	Grande Masse		938	150	2098	3036
53	**17+300-17+550**	150	X	X			Localisé	150	1088		2098	3186
54	**17+550-17+800**	225		X	x		Localisé	225	1313		2098	3411
55	**17+800-17+900**	80	Grande Masse			X	Grande Masse		1313		2098	3411
56	**17+900-18+000**	60	Grande Masse			X	Grande Masse		1313	80	2178	3491
57	**18+050-18+500**	140	Grande Masse	Village BOKO		X	Grande Masse		1313	60	2238	3551
58	**18+500-18+ 700**	30	30		x	X	Localisé	30	1343	140	2378	3721
59	**18+800-19+200**	40	30		x	X	Localisé	40	1383		2378	3761
60	**19+200-19+400**	16	18		x	X	Localisé	16	1399		2378	3777

Tableau 31.3 : Relevé des dégradations du PK 15 + 100 au PK 15 + 500

PK SECTION	NIDS DE POULE / AFFAISSEMENT						TOTAUX (m²)				CUMUL GENERAL
	Superficie (m²)	Nombre	Position			Nature	Localisé		Grande masse		
			Gauche	Axe	Droit		Partiel	Cumul	Partiel	Cumul	
19+400-19+700	10	12	**Affaissement**			Localisé	10	1409		2378	3787
19+800-20+100	18	22		X	X	Localisé	18	1427		2378	3805
20+200-20+300	9	12	Village Boko	X	X	Localisé	9	1436		2378	3814
20+400- 21+200	25	18		X	X	Localisé	25	1461		2378	3839
21+200-21+300	8	9		X	X	Localisé	8	1469		2378	3847
21+300-21+400	10	6	X	X		Localisé	10	1479		2378	3857
21+400-21+500	6	7		X	X	Localisé	6	1485		2378	3863
21+500-21+700	20	13		x	X	Localisé	20	1505		2378	3883
21+800-21+900	25	22		x	X	Localisé	25	1530		2378	3908
22+000-22+200	100	Grande Masse	X	x	X	Grande Masse		1530	100	2478	4008
22+200	5	5			X	Localisé	5	1535		2478	4013
22+250-22+300	200	Grande Masse	X	x	X	Grande Masse		1535	100	2578	4113
22+400-22+600	40	30	X		X	Localisé	40	1575		2578	4153
22+700	1	1			X	Localisé	1	1576		2578	4154
22+900	0,5	1		x		Localisé	0,5	1576,5		2578	4154,5
23+000	16	20	X		X	Localisé	16	1592,5		2578	4170,5
23+100	6	5			X	Localisé	6	1598,5		2578	4176,5
23+200-23+300	16	18		x		Localisé	16	1614,5		2578	4192,5
23+500-23+600	15	19			X	Localisé	15	1629,5		2578	4207,5
23+700-23+850	20	12	X			Localisé	20	1649,5		2578	4227,5

Tableau 31.4 : Relevé des dégradations du PK 19+400 au PK 23 + 850

PK SECTION	NIDS DE POULE						TOTAUX (m²)				CUMUL GENERAL
	Superficie (m²)	Nombre	Position			Nature	Localisé		Grande masse		
			Gauche	Axe	Droit		Partiel	Cumul	Partiel	Cumul	
23+900	1	1			x	localisé	1	1650,5		2578	4228,5
23+900	1	1		x		localisé	1	1651,5		2578	4229,5
23+900-23+950	10	11		x	x	localisé	10	1661,5		2578	4239,5
24+000	1	1			x	localisé	1	1662,5		2578	4240,5
24+050-24+200	20	17			x	localisé	20	1682,5		2578	4260,5
24+400	0,5	1		x		localisé	0,5	1683		2578	4261
24+450	0,5	1		x		localisé	0,5	1683,5		2578	4261,5
24+600-24+700	10	8		x		localisé	10	1693,5		2578	4271,5
24+800-25+000	2,5	5	X			localisé	2,5	1696		2578	4274
25+300-25+400	8	4	**Mareborou**	x		localisé	8	1704		2578	4282
25+400	2	2			x	localisé	2	1706		2578	4284
25+500	4	1		x		localisé	4	1710		2578	4288
25+700	0,5	1		x		localisé	0,5	1710,5		2578	4288,5
25+700-26+000	25	30	**Mareborou**	x	x	localisé	25	1735,5		2578	4313,5
26+050	2	1		x		localisé	2	1737,5		2578	4315,5
26+100	2	2		x		localisé	2	1739,5		2578	4317,5
26+200	0,5	1			x	localisé	0,5	1740		2578	4318
26+200-26+400	25	18			x	localisé	25	1765		2578	4343
26+400-26+600	6	6				localisé	6	1771		2578	4349
26+650-26+700	8	6		x		localisé	8	1779		2578	4357

Tableau 31.5 : Relevé des dégradations du PK 23 + 850 au PK 26 + 700

PK SECTION	NIDS DE POULE						TOTAUX (m²)				CUMUL GENERAL
	Superficie (m²)	Nombre	Position			Nature	Localisé		Grande masse		
			Gauche	Axe	Droit		Partiel	Cumul	Partiel	Cumul	
26+700-27+100	70	40		x		Localisé	70	1849		2578	4427
27+150-27+300	20	20		x		Localisé	20	1869		2578	4447
27+300-27+500	30	20		x		Localisé	30	1899		2578	4477
27+550	1,5	1		x		Localisé	1,5	1900,5		2578	4478,5
27+600-27+700	20	13		x		Localisé	20	1920,5		2578	4498,5
27+400-27+900	22	10		x	X	Localisé	22	1942,5		2578	4520,5
28+100	0,5	1		x		Localisé	0,5	1943		2578	4521
28+200-28+400	250	Grande Masse			X	Grande Masse		1943	250	2828	4771
28+400-28+750	500	Grande Masse		x	X	Grande Masse		1943	500	3328	5271
28+800-28+900	150	Grande Masse				Grande Masse		1943	150	3478	5421
29+000-29+100	10	7		x	X	Localisé	10	1953		3478	5431
29+200	0,5	1	X			Localisé	0,5	1953,5		3478	5431,5
29+400	4	2			X	Localisé	4	1957,5		3478	5435,5
29+400	4	7		x	X	Localisé	4	**1961,5**		**3478**	**5439,5**
29+700	**Début planche d'essai BB**										

Tableau 31.6 : Relevé des dégradations du PK 26 + 700 au PK 29 + 700

PK SECTION	NIDS DE POULE SUR BETON BITUMINEUX					PK SECTION	ORNIERE et /ou FLUAGE						
	Superficie (m²)	Cumul (m²)	Position				Position		Gravité	Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m²)	Superficie Cumulée (m²)
			Gauche	Axe	Droit		Gauche	Droit					
29+700-29+800						29+700-29+800	Bonne tenue globale de la route sur l'ensemble des deux demi-chaussées	x	3	100	7	700	700
30+700	1	1			X	30+700					7	0	700
31+100	2	3			X	31+100					7	0	700
31+700	1	4			X	31+700					7	0	700
34+700	1	5			X	34+700					7	0	700
36+000	2	7		X		36+000					7	0	700
36+300	2	9			X	36+300		x			7	0	700
39+350 - 39+800		9				39+350-39+800		x	3	450	7	3150	3850
46+700 - 47+100		9				46+700-47+100		x	3	400	7	2800	6650
47+150 - 47+400		9				47+150-47+400		x	2		7	0	6650
48+000 - 48+200		9				48+000-48+200		x	2		7	0	6650
48+500 - 49+400		9				48+500-49+400		x	2 et 3	100	7	700	7350
50+100 - 50+400		9				50+100 - 50+400		x	3	300	7	2100	9450
50+600 - 50+900		9				50+600 - 50+900		x	1		7	0	9450
51+700 - 52+100		9				51+700 - 52+100		x	2		7	0	9450
52+200	4	13			X	52+200					7	0	9450

Tableau 31.7 : Relevé des dégradations du PK 29 + 700 au PK 52 + 200

PK SECTION	PK SECTION	NIDS DE POULE / RESSUAGE SUR BETON BITUMINEUX					PK SECTION	ORNIERE et /ou FLUAGE						
		Superficie (m²)	Cumul (m²)	Position				Position		Gravité	Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m²)	Superficie Cumulée (m²)
				Gauche	Axe	Droit		Gauche	Droit					
	52+250 - 52+300		13				52+250 - 52+300		x	3	50	7	350	9800
	52+800 - 52+900		13				52+800 - 52+900		x	2		7	0	9800
	53+100 -53+200		13				53+100 -53+200		x	3	100	7	700	10500
	53+500 - 53+700		13				53+500 - 53+700		x	3	200	7	1400	11900
	53+800 - 54+300		13				53+800 - 54+300		x	3	500	7	3500	15400
	55+300 - 55+700		13				55+300 - 55+700		x	3	400	7	2800	18200
	56+100	2	15		X		56+100					7	0	18200
	56+200 - 56+700		15				56+200 - 56+700		x	4	400	7	2800	21000
	56+700 - 56+900		15				56+700 - 56+900		x	2		7	0	21000
	56+900 - 60+100		15				56+900 - 60+100		x	2-3et 4	2000	7	14000	35000
Entrée N'dali	60+300 - 61+000		15				60+300 - 61+000		x	3	700	7	4900	39900
	61+100 - 61+300		15				61+100 - 61+300		x	2		7	0	39900
	61+300 - 62+300		15				61+300 - 62+300		x	2-3 et 4	800	7	5600	45500
Carref N'dali	62+300 - 62+500		15				62+300 - 62+500		Carref N'dali			7	0	45500
	62+500 - 63+100		15				62+500 - 63+100		x	1 et 2		7	0	45500
	63+800 - 64+ 000		15				63+800 - 64+ 000		x	2		7	0	45500
Sortie N'dali	64+050 - 64 + 300		15				64+050 - 64 + 300		x	3 et Ressuage	250	7	1750	47250
	64+400 - 65+900	1	16		X		64+400 - 65+900		x	1		7	0	47250

Tableau 31.8 : Relevé des dégradations du PK 52 + 200 au PK 65 + 900

Localité	PK SECTION	NIDS DE POULE / RESSUAGES SUR BETON BITUMINEUX					PK SECTION	ORNIERE et /ou FLUAGE						
		Superficie (m²)	Cumul (m²)	Position				Position		Gravité	Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m²)	Superficie Cumulée (m²)
				Gauche	Axe	Droit		Gauche	Droit					
Zone d'ouvrage	65+900 - 66+400		16				65+900 - 66+400		x	**Talus érodé**		7	0	47250
	66+400 - 66+700		16				66+400 - 66+700		x	3 et **Ressuage**	300	7	2100	49350
	66+700 - 67+900		16				66+700 - 67+900		x	1 et Ressuage		7	0	49350
	68+400 - 71+300		16				68+400 - 71+300		x	1 + **Ressuage**		7	0	49350
	71+500 - 72+400		16				71+500 - 72+400	x	x	2 + **ressuage**		7	0	49350
Ina	72+700 -74+000		16				72+700-74+000		x	3	1300	7	9100	58450

Tableau 31.9 : Relevé des dégradations du PK 65 + 900 au PK 74 + 700

PK SECTION	PK SECTION	NIDS DE POULE SUR /faïençages					PK SECTION	ORNIERE et /ou FLUAGE						
		Superficie (m²)	Cumul (m²)	Position				Position		Gravité	Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m²)	Superficie Cumulée (m²)
				Gauche	Axe	Droit		Gauche	Droit					
Ina	74+000 -74+300		16				74+000-74+300		X	1		7	0	58450
	75+700 -75+800		16				75+700-75+800		X	2		7	0	58450
	76+200	4	20			x	76+200					7	0	58450
	77+150	10	30	faïençages		x	77+150					7	0	58450
	77+300 - 77+400		30				77+300 - 77+400		X	3 et4	100	7	700	59150
	77+600 - 77+620		30				77+600 - 77+620		X	3	20	7	140	59290
zone critique	78+900 - 79+200	30	60			x	78+900 - 79+200					7	0	59290
	79+400 - 81+000	50	110			x	79+400 - 81+000					7	0	59290
	81+000 - 81+600	30	140			x	81+000 - 81+600		X	4	600	7	4200	63490
	81+700	4	144			x	81+700					7	0	63490
	81+800 - 81+900	4	148		X	x	81+800 - 81+900					7	0	63490
	82+000	6	154	X			82+000					7	0	63490
	82+200-82+400		154				82+200-82+400		X	4	200	7	1400	64890
	83+200	1,5	155,5			x	83+200					7	0	64890
	83+600	3	158,5			x	83+600					7	0	64890
	83+800 - 83+900		158,5				83+800 - 83+900		X	4	100	7	700	65590
	83+900 - 84+400		158,5				83+900 - 84+400		X	2; 3 et 4	250	7	1750	67340
	84+400 - 85+700		158,5				84+400 - 85+700		X	1		7	0	67340
DébGuéssou	85+700 - 86+100		158,5				85+700 - 86+100		X	2		7	0	67340
Fin Guéssou	87+140 - 88+000		158,5				87+140 - 88+000		X	2		7	0	67340

Tableau 31.10 : Relevé des dégradations du PK 74 +000 au PK 88 + 000

LOCALITES	PK SECTION	NIDS DE POULE / RESSUAGES SUR BETON BITUMINEUX					PK SECTION	ORNIERE et /ou FLUAGE						
		Superficie (m²)	Cumul (m²)	Position				Position		Gravité	Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m²)	Superficie Cumulée (m²)
				Gauche	Axe	Droit		Gauche	Droit					
	88+100	4	162,5			x	88+100					7	0	67340
	88+330	3	165,5	X		x	88+330					7	0	67340
	89+800	2	167,5			x	89+800					7	0	67340
	90+500	1	168,5			x	90+500					7	0	67340
	90+520	10	178,5			x	90+520		Ressuage			7	0	67340
Warankérou	91+700 - 91+800		178,5				91+700 - 91+800			2		7	0	67340
	93+100	4	182,5			x	93+100					7	0	67340
	93+800	6	188,5			x	93+800					7	0	67340
Warankérou	93+900	6	194,5			x	93+900					7	0	67340
	94+100	2	196,5		x		94+100					7	0	67340
	94+900	9	205,5			x	94+900					7	0	67340
	95+000	9	214,5			x	95+000					7	0	67340
	95+300	5	219,5		x		95+300					7	0	67340
	95+600	4	223,5			x	95+600					7	0	67340
	95+700-96+400		223,5				95+700-96+400		X	2		7	0	67340
	96+400	1,5	225			x	96+400					7	0	67340
	96+700 - 97+200	16	241			x	96+700 - 97+200					7	0	67340
	98+400	1,5	242,5			x	98+400					7	0	67340
	99+400 - 100+000		242,5				99+400 - 100+000		**Ressuage**			7	0	67340

Tableau 31.11: Relevé des dégradations du PK 88 + 100 au PK 100 + 000

LOCALITES	PK SECTION	NIDS DE POULE / FISSURES / RESSUAGES SUR BETON BITUMINEUX					PK SECTION	ORNIERE et /ou FLUAGE						
		Superficie (m²)	Cumul (m²)	Position				Position		Gravité	Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m²)	Superficie Cumulée (m²)
				Gauche	Axe	Droit		Gauche	Droit					
Gamarè	100+000-100+300		242,5				100+000-100+300		X	3	300	7	2100	69440
Gamarè Usine	100+500 - 102+200		242,5				100+500 -102+200		X	3	700	7	4900	74340
Gando	102+300-103+300		242,5				102+300-103+300		X	3	1000	7	7000	81340
	103+700-104+600		242,5				103+700-104+600		X	4	900	7	6300	87640
Gando	104+600-105+100		242,5		**Fissure longitudinale**		104+600-105+100			1		7	0	87640
	105+100-105+800		242,5				105+100-105+800		X	3	700	7	4900	92540
	106+200	2	244,5			x	106+200		faïençage			7	0	92540
Bembéréké	105+800-107+000		244,5				105+800-107+000		X	4	1200	7	8400	100940
	106+000-108+500		244,5				106+000-108+500		X	**Ressuage** 1 et 2		7	0	100940
Bembéréké	109+200-109+400		244,5				109+200-109+400		X			7	0	100940
	109+200 - 114+100		244,5				109+200 -114+100		X			7	0	100940
	114+100	2	246,5			x	114+100					7	0	100940
	115+100	5	251,5				115+100					7	0	100940
Pédarou	116+400 - 117+900		251,5				116+400 -117+900		X	3	1500	7	10500	111440
	118+400-118+900		251,5				118+400-118+900		X	2		7	0	111440
Baoura	119+400-121+000		251,5				119+400-121+000		x	3	900	7	6300	117740

Tableau 31.12 : Relevé des dégradations du PK 100 + 000 au PK 118 + 900

LOCALITES	PK SECTION	NIDS DE POULE/ AFFAISSEMENT SUR BETON BITUMINEUX					PK SECTION	ORNIERE et /ou FLUAGE						
		Superficie (m²)	Cumul (m²)	Position				Position		Gravité	Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m²)	Superficie Cumulée (m²)
				Gauche	Axe	Droit		Gauche	Droit					
	121+600	14	265,5			x	121+600			Bonne tenue globale de la route		7	0	117740
	123+000	6	271,5			x	123+000-					7	0	117740
	123+600	6	277,5			x	123+600					7	0	117740
	123+800-124+000	20	297,5			x	123+800-124+000					7	0	117740
	124+100	7	304,5			x	124+100					7	0	117740
	125+000	2	306,5			x	125+000					7	0	117740
DébGamia	125+400		306,5				125+400					7	0	117740
OuvGamia	126+800		306,5				126+800					7	0	117740
Fin Gamia	127+000- 131+400		306,5				127+000- 131+400		X	2 et 3	1000	7	7000	124740
	131+400-132+600		306,5	**Affaissement**			131+400-132+600		X	2 et 3	600	7	4200	128940
	132+000	1	307,5	X			132+000					7	0	128940
	134+400-134+700	12	319,5			x	134+400-134+700					7	0	128940
	135+700-135+800	2	321,5			x	135+700-135+800					7	0	128940

Tableau 31.13 : Relevé des dégradations du PK 121 + 600 au PK 135 + 800

LOCALITES	PK SECTION	NIDS DE POULE/ RESSUAGES SUR BETON BITUMINEUX					PK SECTION	ORNIERE et /ou FLUAGE						
		Superficie (m²)	Cumul (m²)	Position				Position		Gravité	Longueur (m)	Largeur (m)	Superficie (m²)	Superficie Cumulée (m²)
				Gauche	Axe	Droit		Gauche	Droit					
	136+300-137+400		321,5				136+300-137+400		X	2et 3	400	7	2800	131740
	137+900	1	322,5			x	137+900					7	0	131740
	138+400-138+900		322,5				138+400-138+900		x	2 et 3	500	7	3500	135240
	139+400	1	323,5			x	139+400					7	0	135240
	140+600	2	325,5			x	140+600					7	0	135240
Béroubouay	140+600-145+400		325,5				140+600-145+400		x	2,3 et Res*	2000	7	14000	149240
	145+500-146+500		325,5				145+500-146+500		x	2 et 3	500	7	3500	152740
	146+800-148+600		325,5				146+800-148+600		x	2 et Res*		7	0	152740
Fin	**148+600-151+752**													
		TOTAL	**325,5**							**TOTAL**	**21820**			**152 740**

Tableau 31.14 : Relevé des dégradations du PK 136 + 300 au PK 148 + 600

(*) Res = Ressuage

Identification des différentes sections du tronçon d'étude

- **Section 1** : PK9+400 – PK29+400 : Sortie Nord de Parakou – Poste de péage pesage de Sirarou

Figure 7: Zones de Grande Masse PK 12 au PK15

Figure 8: Zone de faïençage Pk 17

- **Section 2 : PK 29+400 – PK 29 + 700 : Péage de Sirarou**

  Zone du poste péage pesage de Sirarou

- **Section 3 : PK 29+700 – PK 29 + 800**

C'est une section dont la planche d'essai a été effectuée. Le constat fait est qu'il y a fluage accompagné des ornières moins importantes sur les 3/4 de la chaussée.

- **Section 4 : PK 29+800 – PK 50 + 000**

Dans cette section, la structure de chaussée est en bon état, pas de déformation, ni de fissuration et ni de nid de poule.

- **Section 5 : PK 50+000 – PK 120 + 000**

Sur cette section, les affaissements, les nids de poule, les ressuages et surtout les ornières sont très récurrentes et s'observent généralement sur le côté droit (la voie la plus chargée). Nous notons que cette section est largement affectée par un fluage qui entraine des ornières dont la profondeur est supérieure à 2.5 cm au moins et parfois supérieure à plus de 5 cm (Voir les photos ci-dessous). Vu l'ampleur du phénomène d'orniérage dans cette section, une étude du comportement de ce sol est nécessaire.

Figure 9: Zone du PK 81-82 : Dégradation avant Guéssou

Figure 10: PK 103-105 : Zone avant l'agglomération de Gando (Bembèrèkè)

- **<u>Section 6</u> : PK 120+000 – PK 126 + 800**

  Bonne tenue globale de la route sur toute la section. Cette zone est conforme à la section 4.

- **<u>Section 7</u> : PK 126+600 – PK 151 + 753**

  Sur cette section, les affaissements, les nids de poule, les ressuages et surtout les ornières sont très récurrentes et s'observent généralement sur le côté droit. Nous notons que cette section est largement affectée par un fluage qui entraine des ornières dont la profondeur est supérieur 2.5 cm au moins et parfois supérieure à plus de 5 cm. Cette section présente les mêmes pathologies que la section 5.

Figure 11: Effets du fluage et du ressuage sur la signalisation horizontale: Cas de GAMIA PK 130

Figure 12: Affaissement au droit d'un ouvrage

Proposition alternative au calcul du Coefficient d'agressivité par la Mission de contrôle TRE

La Mission de contrôle montre ici comment le coefficient d'agressivité peut être déterminé à partir du spectre des essieux pesés ou à défaut comment sur la base des textes réglementaires le coefficient d'agressivité peut être déterminé. Il s'agit d'une démarche scientifique connue de tous.

1- Considérons que le nombre d'essieu moyen par poids lourd est de 3 (cas général) et que le sens le plus chargé est Parakou-Béroubouay.

Dans le sens de Parakou-Béroubouay, nous aurons ce qui suit :

- Essieux de Poids Lourds : 5076 x 3 = 15 228
- Essieux de véhicules légers : (26 861 – 5076) x 2 = 43 570

Les essieux des poids lourds représentent [15 228/ (15 228 + 43 570)] x 100 = 25,90 % de l'ensemble. Alors la fréquence des essieux des poids lourds est donc de 25,90% au plus avec les résultats du comptage de l'Entreprise.

2- En supposant que dans cette population d'essieux, tous les essieux des poids lourds portent la charge maximale autorisée c'est-à-dire 11,50 tonnes (ce qui est impossible) et que les 74,10% restants appartiennent aux véhicules légers de l'ordre de 3 tonnes en charge, nous aurons ce qui suit : (Voir tableau ci-dessous)

Calcul du Coefficient d'Agressivité

Classe poids sur essieu (1)	Fréquence d'essieux f(%)	1 Equivalence chaussée souple (a')	2 Equivalence chaussée semi-rigide (a")	Agressivité respectives	
				Sur chaussée souple f x a'	Sur chaussée semi-rigide f x a"
1--2	4,00	0,000177	0,0000	0,000708	0

2--3	4,00	0,00137	0,0001	0,00548	0,0004
3--4	4,00	0,00525	0,0004	0,021	0,0016
4--5	4,00	0,0144	0,0017	0,0576	0,0068
5--6	5,00	0,0320	0,0057	0,16	0,0285
6--7	5,00	0,0625	0,0156	0,3125	0,078
7--8	5,00	0,111	0,0369	0,555	0,1845
8--9	5,00	0,183	0,0781	0,915	0,3905
9--10	5,00	0,285	0,152	1,425	0,76
10--11	5,00	0,426	0,278	2,13	1,39
11--12	30,00	0,612	0,479	18,36	14,37
12--13	24,00	0,855	0,790	20,52	18,96
	100,00				
	Pour les 100% d'essieux on aura			44,462288	36,1703
	L'agressivité d'un essieu est donc			0,44462288	0,361703
	Si un Pl comporte 3 essieux le Coefficient d'agressivité du PL type est			1,33386864	1,085109

Tableau 32: Calcul du coefficient d'agressivité par TRE

Nous avons considéré 30% (au lieu de 25,9%) d'essieux de 11,5 Tonnes et 24 % d'essieux de 12,5 tonnes en moyenne, c'est-à-dire que deux fois la totalité des essieux des camions en supposant que tous les essieux ont une charge de 11,5 ou 12,5 Tonnes ;

Malgré cette simulation qui n'est pas possible, nous n'avons que 1,08 comme agressivité du trafic.

C'est-à-dire que le respect des textes en vigueur permet de faire passer deux fois plus d'essieux de poids lourds sans que l'agressivité ne dépasse guère 1.

De ce calcul du coefficient, nous allons retenir comme **coefficient d'Agressivité Moyen des poids lourds (CAM) : 1,2** car l'absence de la campagne de pesage des essieux ne nous permet pas de calculer en toute objectivité ce dernier. Nous décidons donc de nous fier à la démarche de la mission de contrôle TR Engineering.

- **Etude du trafic**

L'étude du trafic a été réalisée par le Laboratoire du Bâtiment et des Travaux Publics (LBTP).

Les hypothèses suivant ont été émises pour l'étude du trafic :

TMJA à la date de comptage : 596 en 2014 obtenu les jours de trafic dense aux heures de pointe

Taux de croissance géométrique annuel : i = 5%,

Durée de service initiale de calcul : n = 15 ans,

Coefficient d'Agressivité Moyen des poids lourds (CAM) : 1,2

Prenons **2019** comme année de mise en service donc déduisons **TMJA à l'année** de mise en service.

Nous l'obtenons à partir de la formule des cas de croissance exceptionnelle du **« Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux » du CEBTP**

$$\boldsymbol{T1 = T0(1 + i)n-1}$$

Dans notre cas :

$$\boldsymbol{T2019 = T2014\ (1 + i)\ n-1}$$

Avec :

T2014 : TMJA en 2014 **T2019** : TMJA en 2019 **n** : Nombre d'années séparant la date de comptée de la date de mise en service

$\boldsymbol{\tau}$: Taux d'accroissement géométrique annuel

$T_{2019} = 596(1 + 0.055)^{5-1}$

$$\boldsymbol{T_{2019} = 706\ PL}$$

Donc **TMJA à la mise en service : 706 PL**

Etude du trafic en nombre d'essieux équivalents

Le trafic projeté sur toute la durée de service de l'ouvrage est un paramètre essentiel d'entrée dans l'abaque de dimensionnement du CEBTP. Pour le calcul des structures de chaussée, le trafic à prendre en compte doit finalement être exprimé par le nombre cumulé d'essieux standard (NES) qui passeront sur la voie la plus chargée de la chaussée.

L'estimation de ce nombre cumulé (NES), implique nécessairement de connaître le

TMJA en UPL, l'agressivité du poids lourds type, la durée de service de la route, le taux de croissance du trafic annuel et la répartition transversale sur la route.

La formule de calcul du NES est la suivante :

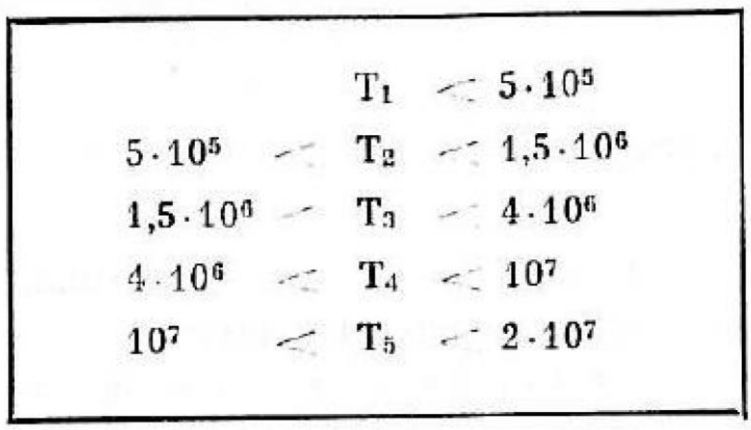
$$\text{NES} = \mathbf{365} \times \boldsymbol{A} \times \boldsymbol{TMJA} \times \boldsymbol{n} \frac{(\mathbf{1}+\boldsymbol{i})^{\boldsymbol{n}} - \mathbf{1}}{\boldsymbol{n} \times \boldsymbol{i}}$$

Avec :

- TMJA, le trafic moyen journalier annuel de l'année de base en UPL
- n, la durée de service de la route en année
- i, le taux de croissance annuelle par catégorie de véhicule.
- A, l'agressivité du poids lourds type.

NES **=6,18 × 1. 0E + 06 Essieux équivalents**

Conformément à la classification CEBTP nous verrons dans quelle tranche se situe notre valeur afin d'avoir la classe de notre trafic qui suit :



Ainsi nous nous retrouvons avec un trafic de **type T4.**

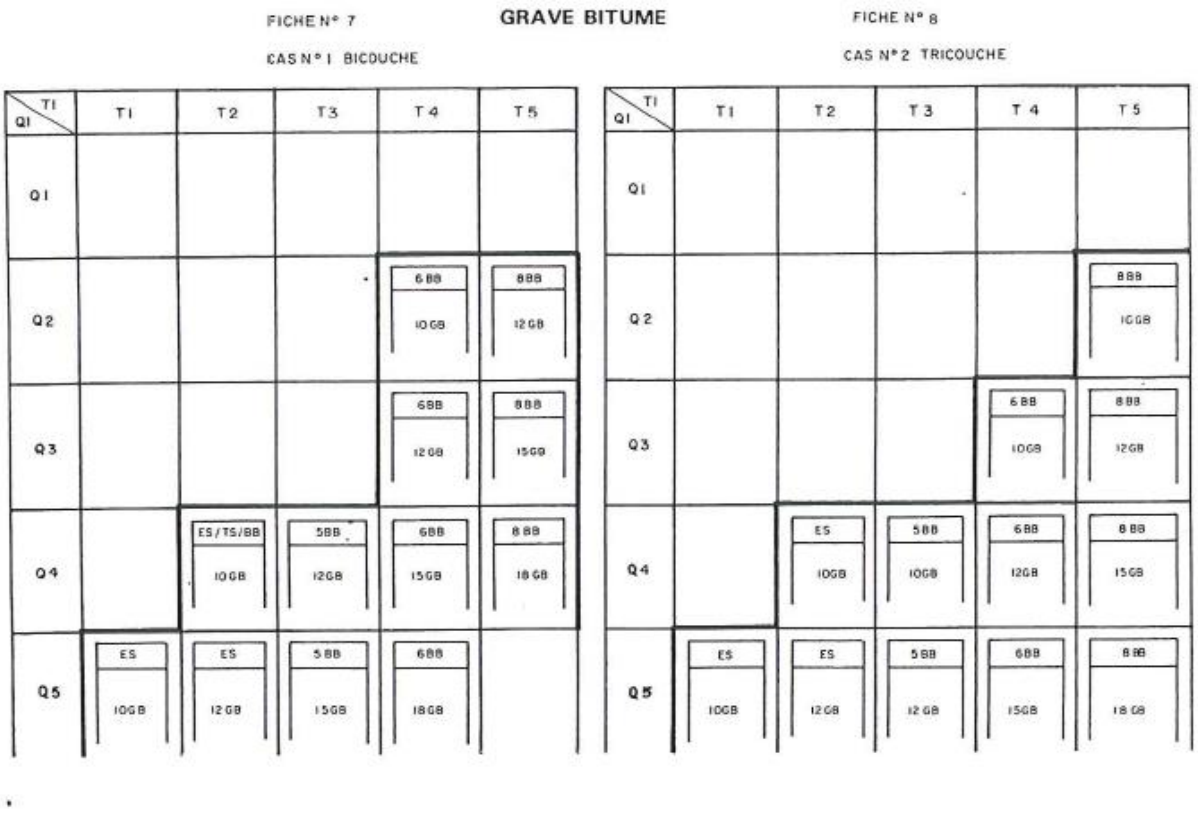


Figure 13: Choix de la structure en grave bitume (Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux)

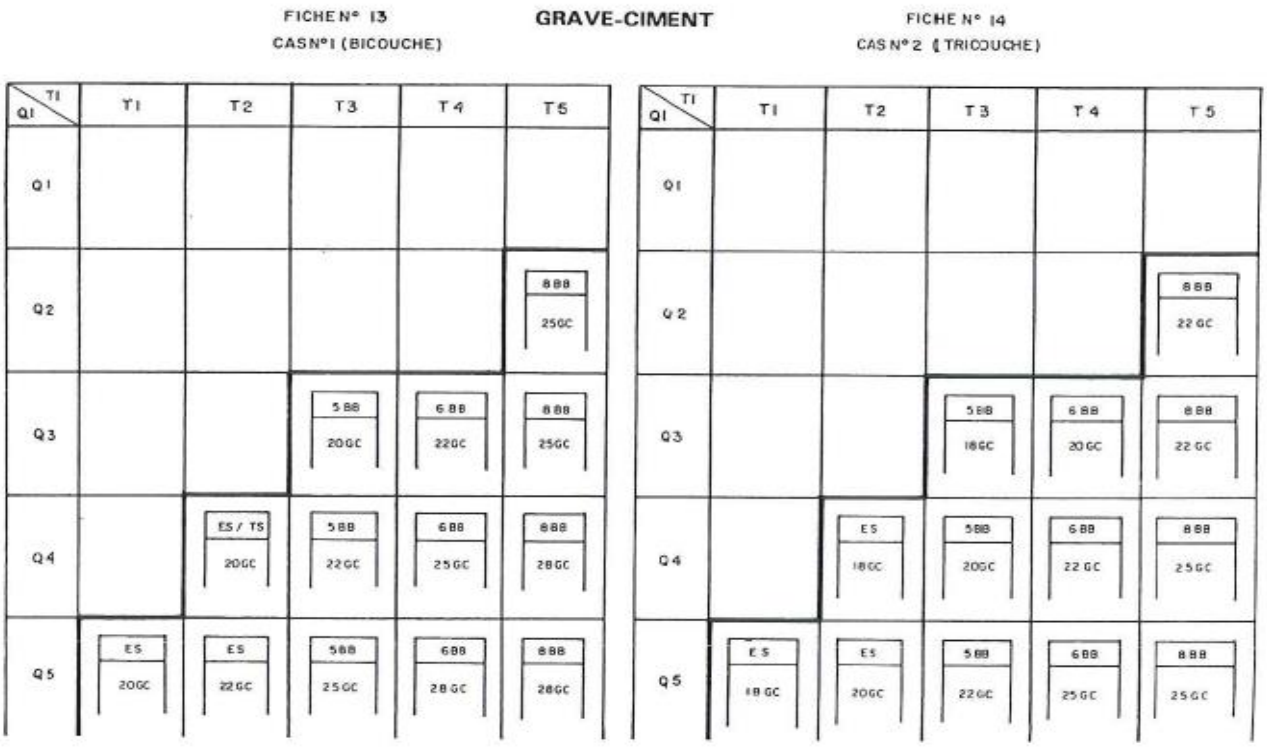


Figure 14: Choix de la structure en grave ciment (Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux)

Méthode du Centre de Recherches Routières (CRR) de Bruxelles

a. Principe de la méthode

L'évaluation d'une chaussée à revêtement hydrocarboné suivant la méthode du Centre de Recherches Routières de Bruxelles comporte les opérations suivantes :

- L'enquête ;
- l'examen visuel ;
- l'auscultation ;
- le diagnostic.

Elle doit aboutir à la formulation d'un diagnostic qui précise si la chaussée auscultée est adaptée ou non au trafic actuel et futur.

a.1. Enquête

Enquête doit rassembler les informations disponibles et qui peuvent faciliter la formulation du diagnostic, notamment :

- l'intensité et la composition de la circulation ;
- la coupe théorique de la chaussée ;
- la composition des matériaux mis en œuvre et, éventuellement, les résultats des essais de réception ;
- la date de mise en service ;
- les dates d'un enduisage ou d'un rechargement éventuel ;
- la nature et l'emplacement des travaux effectués par les tiers et affectant la chaussée.

a.2. Examen visuel

Le but de l'examen visuel est de localiser le tronçon considéré, de relever l'état du revêtement et des accotements et de formuler la première hypothèse au sujet des causes des dégradations éventuelles. Les informations rassemblées sont notées dans un carnet pour l'élaboration d'un schéma itinéraire. Ces informations permettent d'identifier les types de défauts observés et de caractériser le degré d'endommagement de la chaussée.

a.3. Auscultation

L'auscultation des chaussées à revêtement hydrocarboné, effectué dans le cadre de leur renforcement ou de leur réhabilitation, a pour but de fournir les données relatives à la portance et à sa variation le long du tracé. Le premier paramètre à relever est la déflexion mesurée en continue par le déflectographe LA CROIX.

La mesure de cette déflexion se fait sur l'axe de chacune des deux traces jumelées d'un essieu pesant 80 KN.

Afin de pourvoir caractériser la variation de la portance d'une chaussée, on calcule sa déflexion caractéristique par les formules suivantes :

$dc = \overline{d} + 2\sigma$; **[24]**

$$\overline{d} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} d_i \qquad et \qquad \sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i+1}^{n}\left(d_i - \overline{d}\right)^2}$$ **[24]**

Où

$\overline{d}$: déflexion moyenne

σ : écart type

di : valeurs individuelles de la déflexion

Dans le cas des chaussées peu endommagées, la valeur du rapport $\frac{\sigma}{\overline{d}}$ varie de **0,2** à **0,3.** En ce qui concerne des chaussées présentant des fissures, des faïençages et/ou des réparations généralisées, la valeur du rapport $\frac{\sigma}{\overline{d}}$ est supérieure à **0,3**.

Par ailleurs, il existe deux relations semi empiriques entre la déflexion caractéristique et le nombre de passages **N** de l'essieu standard de 80 KN conduisant à l'état critique de la route

$$d_c\left(1/100 mm\right) = \frac{13500}{N^{0,334}} \qquad Ou \qquad N = \frac{2{,}46x10^{12}}{d_c^3}$$

Le deuxième paramètre considéré comme important est la profondeur des ornières mesurées soit ponctuellement, soit en continue avec une règle de 1.20 m modèle AASHO.

Il existe, suivant cette méthode, une relation empirique entre la profondeur d'ornière moyenne $\overline{w}$ (relevée avec la règle de 1,20 m) et le nombre d'applications de l'essieu standard N' conduisant à l'état critique de la route. Elle se présente comme suit :

$\log\overline{w} = -1{,}08 + 0{,}27\log N'$ (r = 0,46)

En adoptant comme critère de la profondeur d'ornière l'exigence qu'après N applications d'essieu standard, la valeur de la contre-pente de l'ornière ne dépasse pas 2% dans les cas des routes primaires et d'autoroutes, et 3% dans le cas des routes secondaires ; on trouve à partir de la relation précédente :

$w = 12\left(\frac{N'}{N}\right)^{0,27}(mm)$ pour les routes primaires et autoroutes;

$w = 18\left(\frac{N'}{N}\right)^{0,27}(mm)$ pour les routes secondaires.

Avec :

w : profondeur d'ornière maximum admissible à la durée de service N' ;

$\overline{w}$: profondeur d'ornière moyenne ;

N : nombre d'applications de l'essieu qui doit conduire à une profondeur d'ornière de 12 mm pour les routes primaires et autoroute et de 18 mm pour les routes secondaires.

a.4. Diagnostic

Le but du diagnostic d'une chaussée à revêtement hydrocarboné est d'évaluer :

- ✓ la nécessité d'un élargissement ;
- ✓ la durée de vie résiduelle de la chaussée, c'est-à-dire le nombre d'essieux standard que la route peut encore supporter avant d'atteindre l'état critique ;
- ✓ la cause des dégradations éventuelles mettant en évidence le défaut résultant d'une faiblesse de la couche d'usure ou d'une couche de la structure entière ;

Avant de procéder au diagnostic concernant la structure, il est nécessaire d'évaluer l'intensité de la circulation actuelle et future et de la comparer à la capacité de la circulation de la chaussée

actuelle. Cette dernière est fonction du nombre et de la largeur des voies de circulation. Le cas échéant, il faut envisager en cas de nécessité, un élargissement réalisé en même temps qu'un renforcement. Le diagnostic relatif à la structure comporte trois phases à savoir :

❖ **Evaluation de la nécessité d'un élargissement**

On détermine en principe le nombre d'années nécessaires pour que l'intensité du trafic actuel J_0 atteigne la capacité C actuelle supposant un taux annuel d'accroissement de la circulation. On a donc :

$$J_0(1+t)^P = C \qquad \text{Ou} \qquad \frac{J_0}{C} = (1+t)^{-P} = S$$

Avec :

S : le degré saturation actuel ;

p : nombre d'années des services futurs avant d'atteindre la saturation complète de la route ;

J_0 : nombre journalier de véhicules toutes catégories dans les deux sens de circulation ;

C : capacité de la circulation.

Connaissant le degré de saturation actuelle tel que $\frac{J_0}{C} = S$, on détermine le nombre d'années de service futur **p** à l'aide de l'abaque N°01.

Les courbes représentatives correspondent aux taux actuels d'accroissement de la circulation.

t = 6% pour les routes primaires et autoroutes ;

t = 4% pour les routes secondaires.

Plus le degré de saturation est élevé, plus le nombre d'années de service futur est faible.

Si **S ≥ 1**, il y a nécessité d'élargissement de la chaussée.

Le résultat obtenu influence les décisions à prendre en matière de renforcement :

- lorsque la durée de service future est faible **(3 à 5 ans)**, il est parfois préférable d'opter pour une reconstruction complète de la chaussée que pour un renforcement combiné avec un élargissement ;

- lorsque la durée de service future est à peu près égale à la durée de la structure renforcée, on peut envisager un renforcement suivant le résultat du diagnostic.

✓ Abaque 4.1 : Variation du nombre d'années de service futur en fonction du degré de saturation

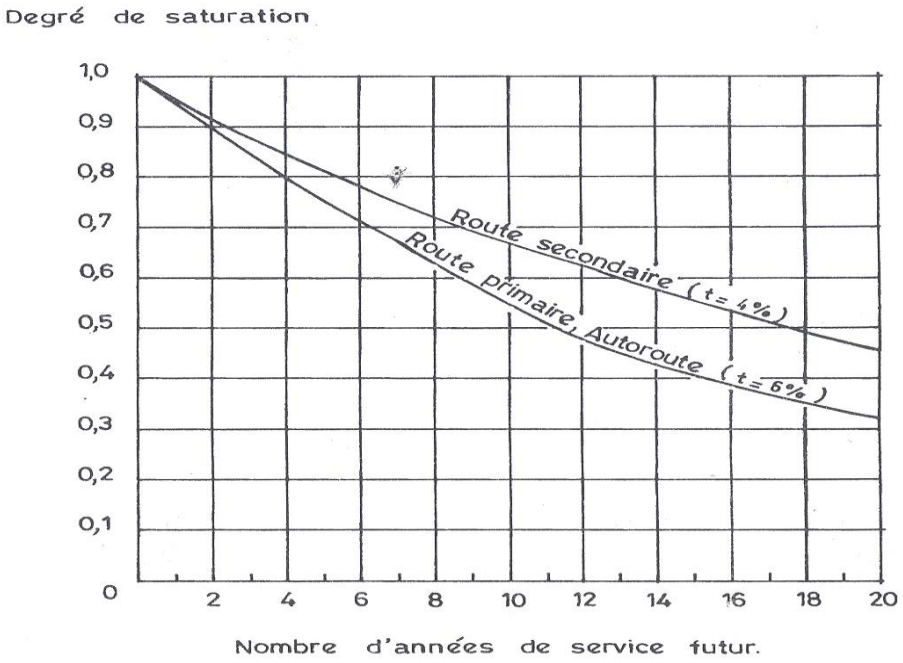


Figure 15: Variation du nombre d'années de service futur en fonction du degré de saturation

❖ **Evaluation de la durée de vie résiduelle**

Par définition la durée de vie résiduelle d'une chaussée est égale à la durée de vie escomptée diminuée de la durée de vie de service, exprimée en nombre d'essieux standard.

La durée de vie résiduelle s'exprime par : $n = N - N'$ où

N : la durée de vie escomptée ;

N' : la durée de service de la chaussée existante.

Pour les routes secondaires on a :

$N' = 532 \frac{(1+t)^p - 1}{t(1+t)^p} \times N_i$ (Essieux de 80 KN) ;

Pour les routes primaires et autoroutes on a :

$$N' = 625\frac{(1+t)^p - 1}{t(1+t)^p} \times N_i \qquad \text{(Essieux de 80 KN)}$$

Où :

t : taux annuel d'augmentation du trafic ;

P : nombre d'années de service de la structure actuelle ;

N_j : intensité de la circulation commerciale actuelle (1 sens de la circulation).

Lorsque la durée de vie résiduelle est négative, le tronçon ausculté a dépassé la durée de vie et les dégradations risquent de s'accélérer rapidement.

❖ **Evaluation de la cause des dégradations**

L'évaluation de la cause probable des dégradations comprend trois opérations :

- ✓ la caractéristique de l'état globale du tronçon ausculté ;
- ✓ l'évaluation de la portance résiduelle ;
- ✓ la formulation du diagnostic.

❖ **Caractéristique de l'état globale du tronçon ausculté**

L'état global d'un tronçon est caractérisé par le degré d'endommagement S qui est fonction de la longueur cumulée des frayées affectées par les fissurations ou réparations et par la profondeur d'ornière, compte tenu de la valeur du rapport $\frac{N'}{N}$. Il s'agit de :

❖ **Calculer la valeur du rapport** : $\frac{N'}{N}$

N' = durée de service (essieux standard de 80 KN)

N = durée de vie escomptée (essieux standard de 80 KN)

❖ **Calculer le degré d'endommagement du tronçon suivant la formule :**

$$S = \frac{0{,}5F + f + r}{L.v} * 100\%$$

Avec

F : longueur des frayées affectées par les fissures longitudinales (m),

f : longueur cumulée des frayées affectées par les faïençages (m),

r : longueur cumulée des frayées affectées par les réparations (ne sont pas retenues les réparations dues manifestement aux activités des tiers : pose de conduites souterraines par exemple)

L : longueur du tronçon ausculté (m),

v : nombre de voies de circulation soumises à l'examen visuel.

- **Evaluer l'état global du tronçon ausculté en utilisant l'abaque 4.2**

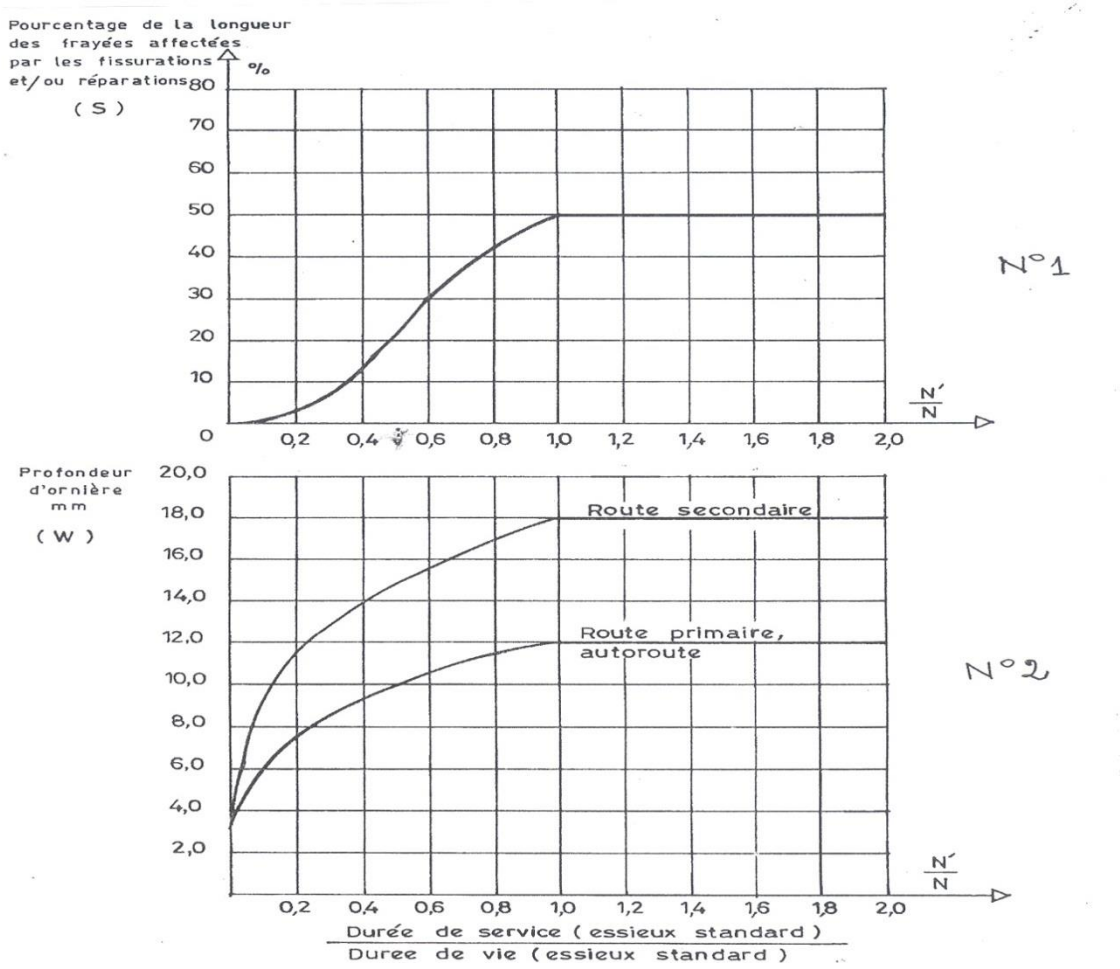


Figure 16: Abaque permettant de caractériser l'état global du tronçon ausculté

✓ **Interprétation de l'abaque**

Lorsque les deux points représentatifs sont situés en dessous des courbes limites ; l'état global du tronçon ausculté est à considérer comme **satisfaisant**.

Lorsqu'au moins un des points représentatifs est situé au-dessus des courbes limites, l'état global du tronçon ausculté est à considérer comme **non satisfaisant**.

La première courbe (N°1) représente l'évolution probable du degré d'endommagement S en fonction du rapport $\frac{N\prime}{N}$ **(avec un maximum admissible S = 50%)**.En construisant le point représentatif relatif au tronçon ausculté, c'est-à-dire la valeur du rapport $\frac{N\prime}{N}$ en abscisse et la profondeur d'ornière maximum en ordonnée, on note sa position par rapport à la courbe limite.

La deuxième courbe (N°2) représente l'évolution probable de la profondeur d'ornière avec un maximum admissible de 12 mm pour les routes primaires, autoroutes et 18 mm pour les routes secondaires. En construisant ce nouveau point également relatif au tronçon ausculté c'est-à-dire $\frac{N\prime}{N}$ en abscisse et la profondeur d'ornière maximum en ordonnée, on note sa position par rapport à l'une des courbes limites.

❖ **Evaluation de la portance résiduelle de la chaussée**

La portance résiduelle est évaluée à partir du rapport $\frac{N\prime}{N}$.

Si $\frac{N\prime}{N} < 1$, la portance résiduelle est considérée comme suffisante ;

Si $\frac{N'}{N} \geq 1$, la portance résiduelle est considérée comme insuffisante.

❖ **Formulation du diagnostic**

En considérant l'état global du tronçon ausculté et la portance résiduelle, on formule le diagnostic. Le tableau 4. 6 facilite cette tâche. Ce tableau permet la formulation d'un renforcement préventif. En résumé, les seuils critiques qui appellent des interventions s'expriment suivant la présente méthode par :

- le degré de saturation **S qui doit être inférieur à 1**. Dans le cas contraire la chaussée doit être élargie ;
- la durée de vie résiduelle n = N-N' qui doit être théoriquement supérieure à **0** et de préférence supérieure à **3 voire 5 ans** pour permettre la prise de décision ou bien $\frac{N'}{N} < 1$;
- le degré d'endommagement **S** de la chaussée doit rester en deçà de **50%**.

Tableau 33: Formulation d'un diagnostic

Etat global du tronçon	**Portance résiduelle** **Suffisante**	**Portance résiduelle** **Insuffisante**
Satisfaisant	**<u>Cause probable</u> :** a) la structure satisfait aux besoins de la circulation actuelle ; b) enduisage ou rechargement récent ❖ ***Mesures à prendre :*** - Inspection et examen visuels tous les 4 ans ; - Vérifier les dates et la nature de l'entretien	**<u>Cause probable</u> :** a) faible épaisseur et/ou faible rigidité des couches constituant la structure; b) faible portance du sol ; c) niveau phréatique proche du fond de coffre ; d) enduisage ou rechargement récent **<u>Mesures à prendre</u> :** - Inspection et examen visuel tous les 2 ans ; - détection du niveau phréatique ; - Identification du sol de la plate-forme, essai à la sonde de battage légère ; - Vérifier les dates et la nature de l'entretien **<u>Remède possible</u>** : Rechargement préventif
Non satisfaisant	**<u>Cause probable</u> :** a) l'épaisseur du revêtement hydrocarboné est insuffisante ;	**<u>Cause probable</u> :** Le dimensionnement de la structure ne satisfait pas aux besoins de la circulation actuelle.

	b) il s'agit d'une faiblesse des couches de la structure que la déflexion prise en compte seule ne peut identifier. ❖ **Mesures à prendre** : ❖ Analyse de la structure aux endroits jugés « bons » et « mauvais » afin de juger de l'état des matériaux et de l'épaisseur des couches. ❖ Essais de laboratoire sur prélèvements. ❖ **Remède possible** : Rechargement après enlèvement des parties endommagées.	**Mesures à prendre :** Analyse de la structure afin de juger de l'état des couches de fondation et de sous fondation. Identification du niveau phréatique et essai à la sonde de battage légère. **Remède possible** : Rechargement après enlèvement des parties endommagées, renforcement structurel ou reconstruction.

☛ **Choix des remèdes**

Tenant compte des résultats d'évaluation et du diagnostic rendu possible par la méthode du Centre de Recherches Routières de Bruxelles, les remèdes suivants sont à envisager :

- ✓ poursuite de l'entretien courant ;
- ✓ renforcement structurel ;
- ✓ reconstruction.

❖ **Poursuite de l'entretien courant** : une poursuite de l'entretien courant est envisagée lorsque la route satisfait aux conditions suivantes :

- ✓ état global satisfaisant ou présence des dégradations provenant essentiellement d'une faiblesse du revêtement ;
- ✓ portance suffisante.

❖ **Renforcement structurel :** cette solution est envisagée lorsque les causes des dégradations sont dues à la faiblesse d'une ou de plusieurs couches de la structure.

- **Reconstruction :** dans tous les cas où les conditions mentionnées aux deux (02) points précédents ne sont pas satisfaisantes, il y a lieu d'envisager une reconstruction ; donc un remplacement de la structure actuelle par une nouvelle structure qui peut assurer la durée de vie escomptée.

Caractéristiques des matériaux de viabilité

Fiche récapitulative des matériaux de la nouvelle plateforme

Emprunts	PK	Nature	GRANULOMETRIE										ATTERBERG		OPM		CBR	Class. HRB
			Tamisats (%)										LL	IP	ds	w	4j	
			31.5	25	20	10	5	2	1	0.4	0.2	0.08	%	%	T/m3	%	0.95	
Matériau place en	0+420	BB+ Graveleux ciment	100	99	95	93	70	43	36	28	21	16	37	13	2.17	8.5	76	A-2-7
Matériau place en	2+700	BB+ Graveleux ciment	100	97	95	87	67	44	35	24	18	12	36	13	2.06	10.5	86	A-2-7
Matériau place en	6+200	BB+ Graveleux ciment	100	98	97	89	75	48	40	29	20	13	28	10	2.04	10.8	74	A-2-7
Matériau place en	7+400	BB+ Graveleux ciment	99	94	91	82	68	49	39	25	18	12	30	09	2.08	8.30	31	A-2-7
Matériau place en	8+380	BB+ Graveleux ciment	100	99	93	83	62	39	32	23	16	10	38	10	2.10	7.50	96	A-2-7
Matériau place en	9+560	BB+ Graveleux ciment	100	99	94	87	65	39	32	23	16	10	38	11	2.08	7.80	93	A-2-7
MOYENNE													35	11	2.08	8.9	76	A-2-7

Dimensionnement des structures de renforcement

Le dimensionnement routier consiste à évaluer le niveau de sollicitation de la chaussée et à déterminer les épaisseurs à donner aux différentes couches afin de réduire les contraintes et les déformations à des valeurs admissibles pour un trafic donné. Ce type de dimensionnement prend en compte la méthodologie du Guide technique du LCPC-SETRA qui fait appel au programme de calcul de structure ALIZE. Ce dernier est basé sur la méthode de Burmister, calcule sous une charge circulaire, les contraintes et déformations en différents points dans un massif multicouches semi-infini, où chaque couche est homogène, isotrope à comportement élastique linéaire.

Ce faisant, la démarche suivie pour l'étude de dimensionnement consiste à :

- ✓ déterminer les limites admissibles des matériaux en fonction de leurs caractéristiques mécaniques propres (loi de fatigue du matériau) et du trafic ;
- ✓ Modéliser la structure existante en fonction de ses épaisseurs, des modules de rigidité des matériaux et de leur coefficient de Poisson ;
- ✓ Calculer sous charge de référence (13 tonnes), les contraintes et les déformations dans les différentes couches de matériaux ;
- ✓ Comparer les valeurs calculées par le modèle aux valeurs admissibles déterminées. De façon générale, les critères retenus pour le dimensionnement de chaussées sont au nombre de trois :
- ✓ **la déformation verticale des matériaux non traités et du sol support, notée ε_z** et exprimée sans unité, paramètre retenu pour les chaussées souples ;
- ✓ **la déformation horizontale exercée à la base des matériaux bitumineux, notée ε_t** et exprimée sans unité, paramètre retenu pour les chaussées en enrobés ;
- ✓ **la contrainte horizontale exercée à la base des matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH), noté σ_t** et exprimée en bars ; critère retenu pour les matériaux traités aux liants hydrauliques.

Calcul des sollicitations admissibles des différents matériaux

Ici il sera question de calculer à partir de la nature du matériau et des différents coefficients cités ci-dessous les différentes limites admissibles à travers les expressions suivantes :

- **La déformation horizontale exercée à la base des matériaux bitumineux**

$$\varepsilon_{tadm} = \varepsilon_6 \times \left(\frac{E_1}{E_2}\right)^{0,5} \times \left(\frac{NE}{10^6}\right)^{b} \times k_c \times k_r \times k_s$$

$(NE/10^6)^b$: coefficient lié au nombre d'essieux équivalents

- ✓ ε6 : l'élongation admissible pour une fréquence de 25 Hz et une température de 10°C
- ✓ E1 : le module du matériau à la température équivalente de 10°C
- ✓ E2 : le module du matériau à la température équivalente du milieu d'utilisation;
- ✓ NE : nombre d'essieux équivalents
- ✓ b : la pente de la droite de fatigue des matériaux
- ✓ kc : coefficient de salage destiné à ajuster les résultats du modèle de calcul ou comportement observé de chaussée du même type. Pour les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques, la valeur retenue est 1.5
- ✓ $Kr = 10^{-ub\delta}$: coefficient qui traduit l'approche probabiliste de la méthode
- ✓ ks : coefficient lié à la qualité de la plate-forme qui vaut 1/1,2 si PF1 ; 1/1 si PF2 et 1 pour PF3 et PF4.

- **La contrainte horizontale exercée à la base des matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH)**

$$\sigma_{tadm} = \sigma_t(\mathbf{NE}) \text{ x kr x kc x ks} \times \mathbf{kd}$$

- ✓ σ_t(NE) : contrainte pour laquelle la rupture par traction en flexion sur éprouvette de 360j est obtenue pour 10^6 cycles
- ✓ kd : coefficient introduit pour prendre en compte l'effet des discontinuités pour la couche de base, il prend pour valeur 1/1,25 pour les graves traités.

- **La déformation verticale des matériaux non traités et du sol support**

$\varepsilon_{zadm} = 2,8.10^{-2} \times NE^{-0,5}$ (Loi de tassement de Shell)

$\sigma_{zadm} = \frac{0,3 \times CBR}{1+0,7logNE}$ (Kerkhoven et Dormon)

Un rappel du tableau récapitulatif des différentes caractéristiques de nos matériaux :

Matériaux	e (cm)	CBR	CAM	Module de rigidité E (MPa)	Coefficient de Poisson	ε_6 (µm)	σ_6	Sh (cm)	1/b	SN	Kc	r (%)	u	c (cm^{-1})	ks	Kd
Béton bitumineux	6		2.2	2220	0,35	100	-	1	5	0,25	1,1	10	-1,28	0,02	1	
Grave Bitume 2	12	-	2.2	3420	0,35	80	-	1+0,3(e-10) =1	5	0,3	1,3	10	-1,28	0,02		
Sol ciment	25	-	2.2	12000	0,25	-	0.42	2,5	12	0,8	1,4	10	-1,28	0,02	1	1
Grave Latéritique Ciment	15	-	2.2	5000	0,25	-	0.21	2.5	10	0.8	1.4	10	-1.28	0.02	1	1
Grave Latéritique	18		2.2	280	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grave Latéritique argileuse	30		2.2	148	0.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grave Latéritique	-		2.2	100	0.35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Grave Non traitée	20	-	2.2	600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 34: Récapitulatif des différentes caractéristiques de nos matériaux

- **La déformation horizontale exercée par le Béton Bitumineux**

$$\boldsymbol{\varepsilon_{tadm} = \varepsilon_6 \times (\frac{E_1}{E_2})^{0,5} \times (\frac{NE}{10^6})^b \times k_C \times k_r \times k_s}$$

$$\varepsilon_{tadm} = 100 \times (\frac{7200}{2220})^{0,5} \times (\frac{6,18.10^6}{10^6})^{-\frac{1}{5}} \times 1,1 \times 10^{-ub\delta} \times 1$$

$$\varepsilon_{tadm} = 100 \times (\frac{7200}{2220})^{0,5} \times (\frac{6,18.10^6}{10^6})^{-\frac{1}{5}} \times 1,1 \times 10^{-1,28 \times \frac{1}{5} \times (\sqrt{(0,25)^2 + \left(\frac{0,02 \times 0,01}{-1/5}\right)^2})} \times 1$$

$$\boldsymbol{\varepsilon_{tadm} = 118,76.10^{-6}\ MPa}$$

- **La déformation horizontale exercée par la Grave Bitume**

$$\boldsymbol{\varepsilon_{tadm} = \varepsilon_6 \times (\frac{E_1}{E_2})^{0,5} \times (\frac{NE}{10^6})^b \times k_C \times k_r \times k_s}$$

$$\varepsilon_{tadm} = 80 \times (\frac{12300}{3420})^{0,5} \times (\frac{6,18.10^6}{10^6})^{-\frac{1}{5}} \times 1,3 \times 10^{-ub\delta} \times 1$$

$$\varepsilon_{tadm} = 80 \times (\frac{12300}{3420})^{0,5} \times (\frac{6,18.10^6}{10^6})^{-\frac{1}{5}} \times 1,3 \times 10^{-1,28 \times \frac{1}{5} \times (\sqrt{(0,25)^2 + \left(\frac{0,02 \times 0,01}{-1/5}\right)^2})} \times 1$$

$$\boldsymbol{\varepsilon_{tadm} = 118,24.10^{-6}\ MPa}$$

- **La contrainte horizontale exercée à la base des matériaux améliorés au ciment 3%**

$$\boldsymbol{\sigma_{tadm} = \sigma_i \times k_C \times k_r \times k_d \times k_S}$$

$$\sigma_{tadm} = 0,5 \times 1,4 \times 10^{-1,28 \times \frac{1}{5} \times (\sqrt{(0,25)^2 + \left(\frac{0,02 \times 0,01}{-1/5}\right)^2})} \times 1 \times 1$$

$$\boldsymbol{\sigma_{tadm} = 0,604\ MPa}$$

- **La déformation verticale des matériaux non traités et du sol support**

$\boldsymbol{\varepsilon_{zadm} = 2,8.10^{-2} \times NE^{-0,25}}$ (Loi de tassement de Shell)

$\varepsilon_{zadm} = 2,8.10^{-2} \times (6,18.10^6)^{-0,25}$ $\qquad$ $\boldsymbol{\varepsilon_{zadm} = 437,23.10^{-6}\ MPa}$

Un tableau regroupant toutes les limites absolues est présenté ci-dessous :

Désignation des matériaux	Coefficient de poisson ϑ	Coefficient d'agressivité CAM	Nombre d'essieux équivalents NE (13EET)	Contrainte de traction admissible σt, adm (Mpa)	Déformation de traction admissible εt, adm (10^{-6})	Déformation verticale admissible εz, adm (10^{-6})
Sol support	0,35	1,2	$6{,}18.10^{6}$			437,23
Autres matériaux non liés	0,35	1,2	$6{,}18.10^{6}$			437,23
Matériau recyclé au ciment (3%)	0,25	1,2	$6{,}18.10^{6}$	0,604		
Grave ciment	0,25	1,2	$6{,}18.10^{6}$	0,644		
Grave Bitume	0,35	1,2	$6{,}18.10^{6}$		118,24	
Béton bitumineux	0,35	1,2	$6{,}18.10^{6}$		118,76	

Tableau 35: Calcul des limites absolues

Nous passerons maintenant à la vérification sur Alizé.

Vérification sur Alizé

ALIZE LCPC permet de déterminer à partir d'un modèle multicouche, élastique et linéaire, les déformations et contraintes réellement observées au niveau de nos différentes couches, ensuite nous comparons ses valeurs à celles des déformations et contraintes admissibles. Il est possible d'ajuster les épaisseurs pour obtenir de meilleurs résultats Les hypothèses considérées sont les suivants :

- La structure d'une chaussée est déterminée par n couches d'épaisseurs finies (sauf la dernière), infinie en plan. ;

- Les matériaux ont un comportement élastique et linéaire ;
- Les contraintes sont des pressions ou des cisaillements. Chaque couche de chaussée est caractérisée par quatre paramètres de base ou les données à rentrer dans le modèle pour les différentes simulations sont :
  - L'épaisseur hi ;
  - Le module d'Young (Ei) ;
  - Le coefficient de poisson (ν) ;
  - Les types d'interface entre les couches (conditions de collage) : Ici toutes les couches utilisent **l'interface « collé »**

➢ **<u>Cas de la variante choisie à partir du guide CEBTP</u>**

Il s'agit de la structure suivante :

VARIANTE	COUCHE DE ROULEMENT	COUCHE DE BASE	COUCHE DE FONDATION	SOL SUPPORT
VARIANTE 1	6 cm BB	12 cm GB	25 cm MATERIAUX AMELIORES AU CIMENT 3%	ANCIENNE STRUCTURE

La modélisation sur Alizé donne les résultats suivants :

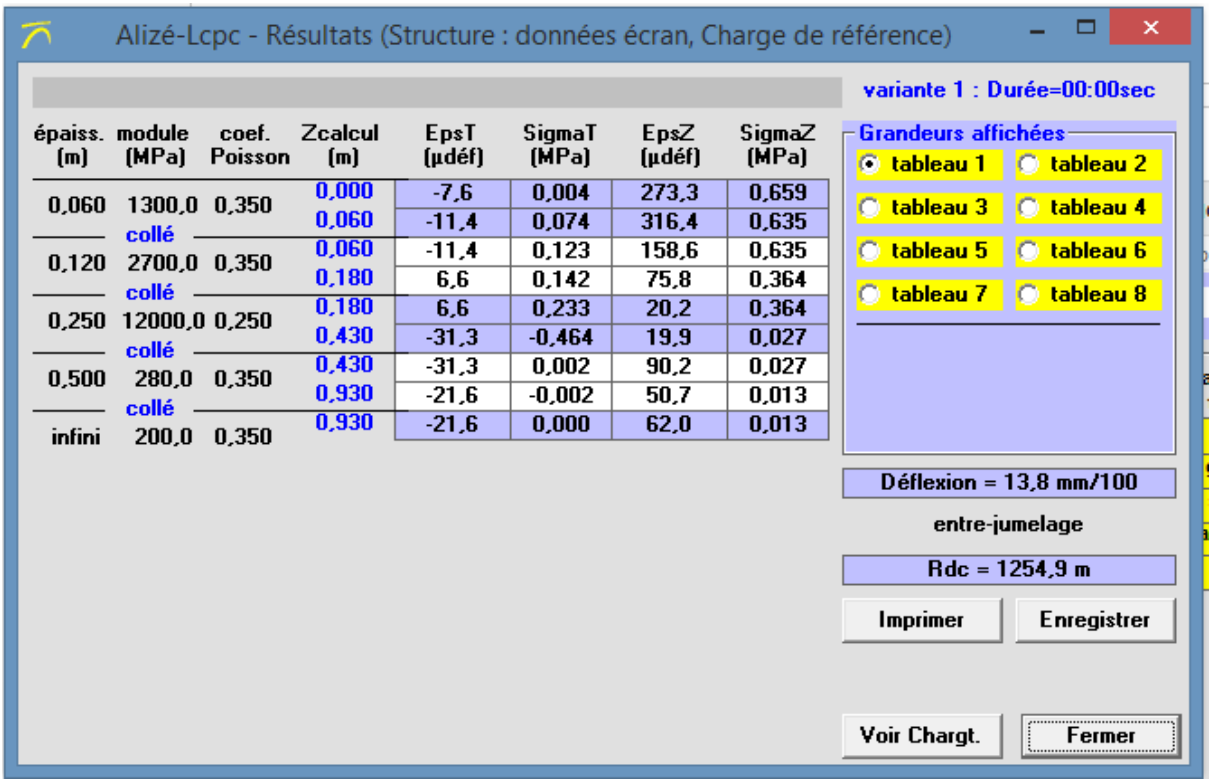


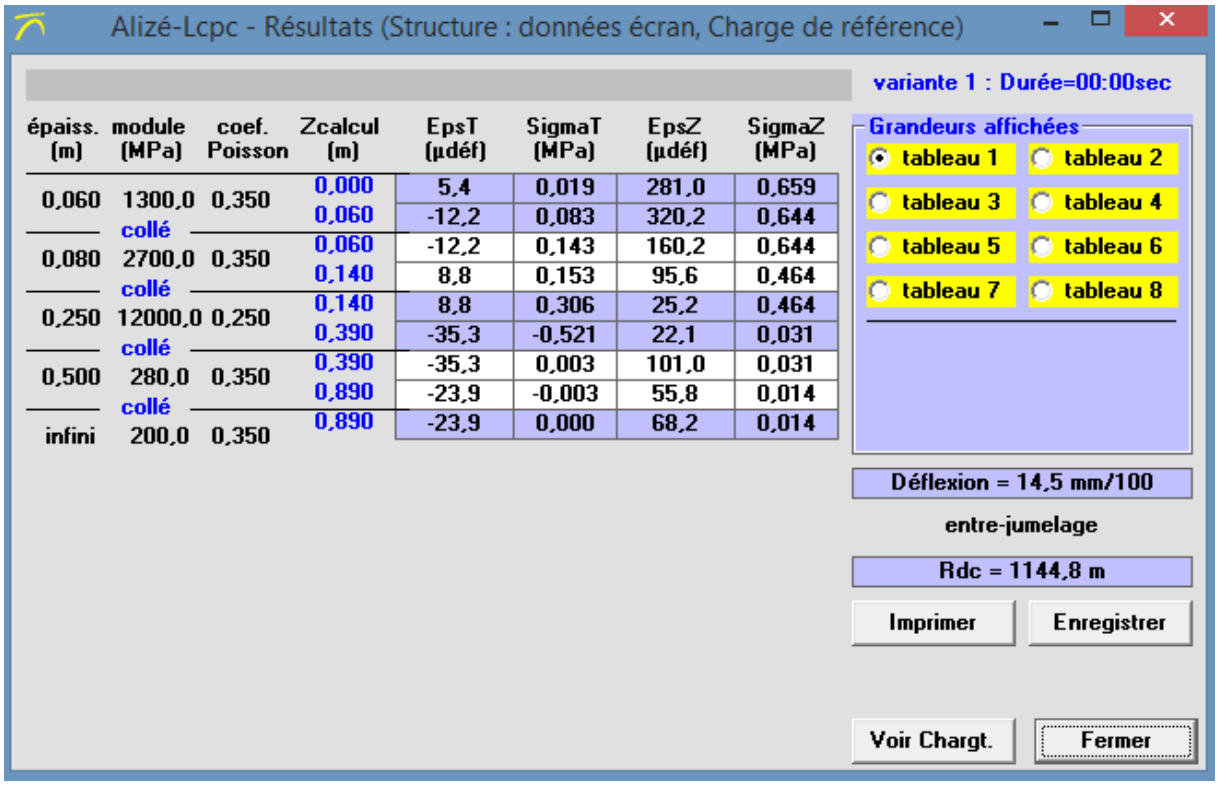
Figure 17: Modélisation Alizé de la variante choisie

Ce qui nous permet de tirer les conclusions suivantes

COUCHES	EPAISSEURS	VALEURS ADMISSIBLES (MPa)	VALEURS OBTENUES (MPa)	CONDITION
Roulement en BB	6	$\varepsilon t, adm$ =118,76	$\varepsilon t\ sup$ = -7,4	Condition vérifiée
			$\varepsilon t\ inf$ = -11.4	Condition vérifiée
Base en GB	12	$\varepsilon t, adm$ =118,24	$\varepsilon t\ sup$ =-11,4	Condition vérifiée
			$\varepsilon t\ inf$ = 6,6	Condition vérifiée
Fondation en matériaux recyclés améliorés au ciment 3%	25	$\sigma_{t,\ adm}$ = 0,604	σ_{Tsup} = 0,233	Condition vérifiée
			σ_{Tinf} = −0,464	Condition vérifiée
Plateforme 2 (Ancienne structure)	50	$Zadm$ = 437,23	Z = 50,7	Condition vérifiée

Plateforme 1 (Sol support ancienne structure)		$Zadm$ = 437,23	Z = 62,0	Condition vérifiée

Après avoir procédé à des variations automatiques des épaisseurs de la Grave Bitume, vérifions les contraintes et déformations pour une épaisseur de 8 cm.



épaiss. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,060	1300,0	0,350	0,000	5,4	0,019	281,0	0,659
			0,060	-12,2	0,083	320,2	0,644
	collé						
0,080	2700,0	0,350	0,060	-12,2	0,143	160,2	0,644
			0,140	8,8	0,153	95,6	0,464
	collé						
0,250	12000,0	0,250	0,140	8,8	0,306	25,2	0,464
			0,390	-35,3	-0,521	22,1	0,031
	collé						
0,500	280,0	0,350	0,390	-35,3	0,003	101,0	0,031
			0,890	-23,9	-0,003	55,8	0,014
	collé						
infini	200,0	0,350	0,890	-23,9	0,000	68,2	0,014

Ces résultats nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

COUCHES	EPAISSEURS	VALEURS ADMISSIBLES (MPa)	VALEURS OBTENUES (MPa)	CONDITION
Roulement en BB	6	εt, adm =118,76	εt sup = 5,4	Condition vérifiée
			εt inf = -12,2	Condition vérifiée
Base en GB	8	εt, adm =118,24	εt sup =-12,2	Condition vérifiée
			εt inf = 8,8	Condition vérifiée

Fondation en matériaux recyclés améliorés au ciment 3%	25	$\sigma_{t,\,adm}$ = 0,604	σ_{Tsup} = 0,306	Condition vérifiée
			σ_{Tinf} = −0,521	Condition vérifiée
Plateforme 2 (Ancienne structure)	50	$Zadm$ = 437,23	Z = 55,8	Condition vérifiée
Plateforme 1 (Sol support ancienne structure)		$Zadm$ = 437,23	Z = 68,2	Condition vérifiée

Les conditions sont toujours vérifiées et nous obtenons toujours une structure acceptable aussi bien techniquement qu'économiquement.

- **Cas de la variante choisie par l'entreprise SOGEA-SATOM**

La deuxième variante à vérifier est celle utilisée par l'entreprise qui a eu en charge la reprise des travaux à savoir :

- 5cm de Béton Bitumineux a Module Elevé en couche de roulement
- 7 cm de EME en couche de base
- 30 cm de Matériaux recyclés améliorés au ciment (3%) en couche de fondation

La synoptique des interventions retenues par l'entreprise SOGEA-SATOM est la suivante :

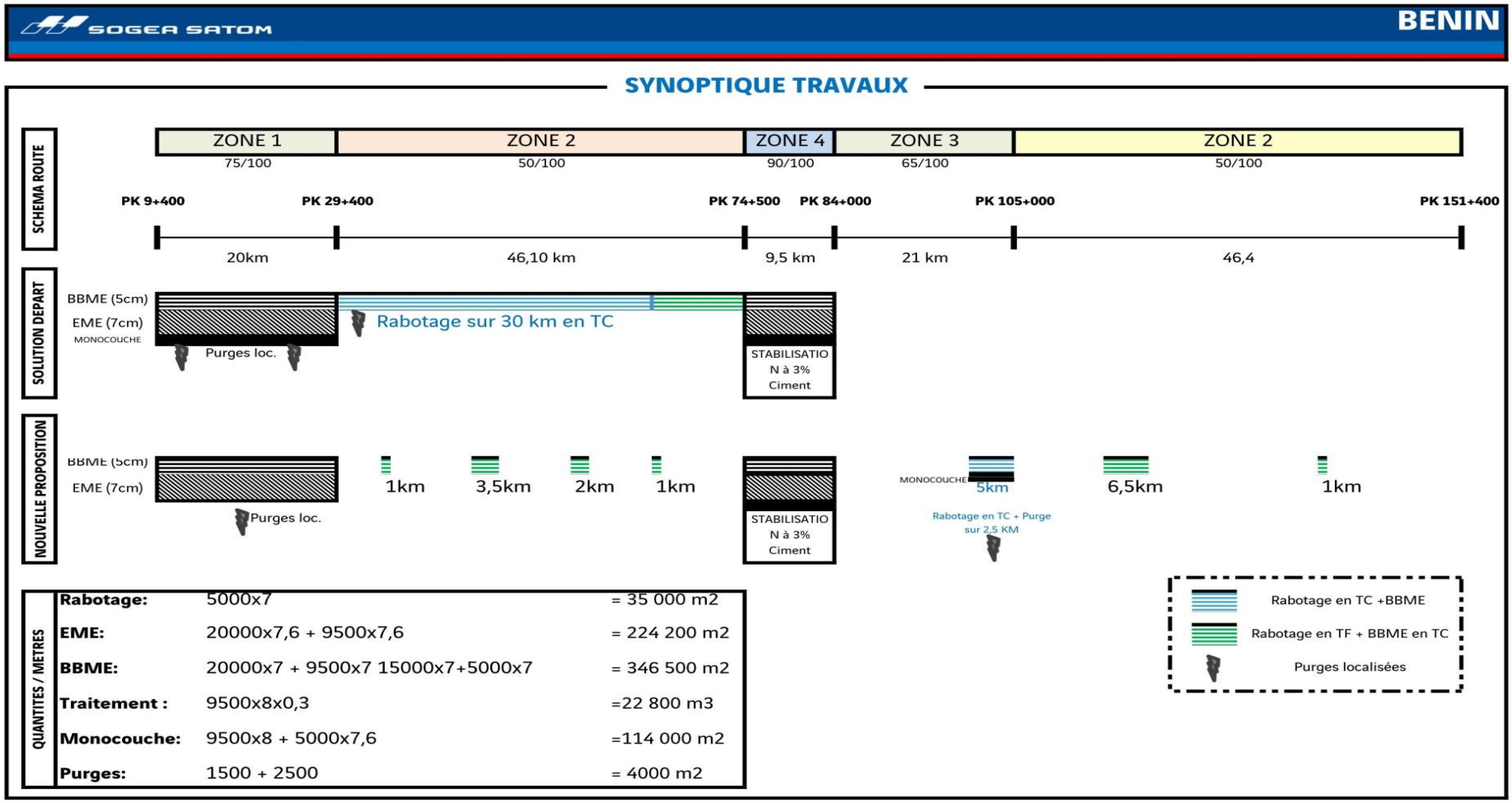
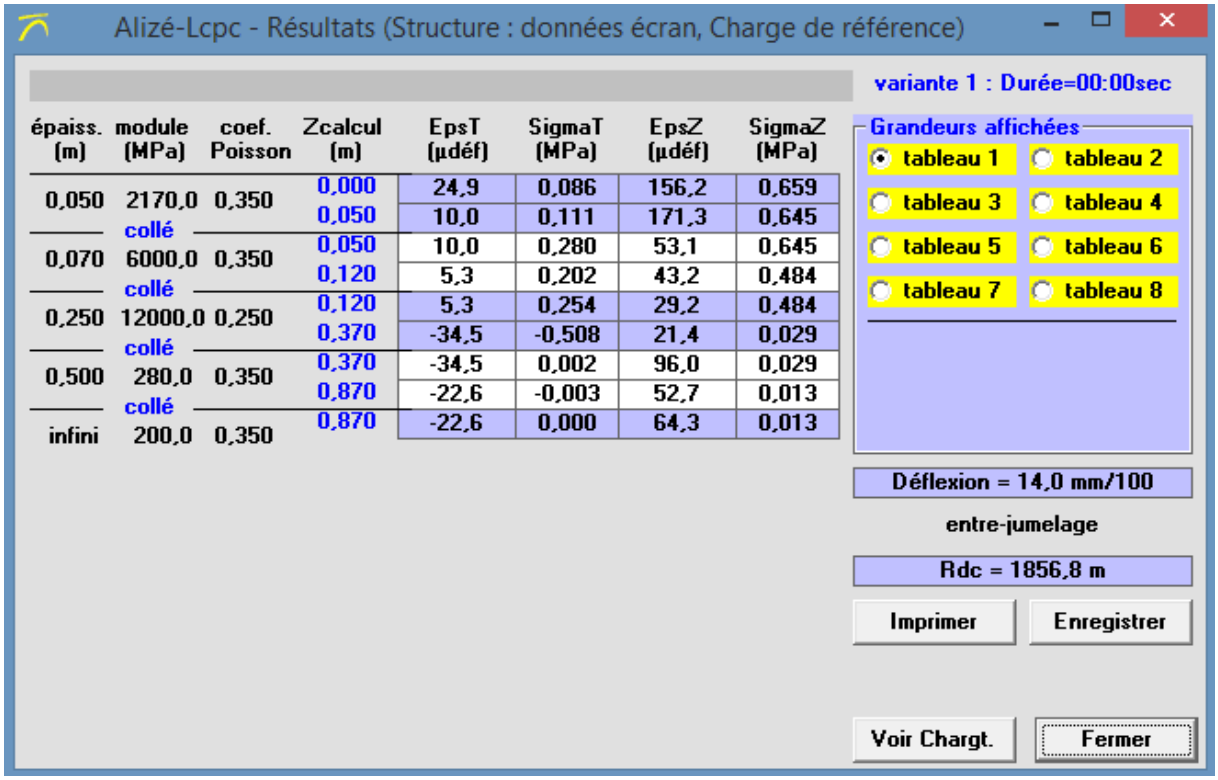


Figure 18: Synoptique des interventions retenues par SOGEA-SATOM pour la reprise des travaux

La modélisation sur Alizé nous donne les résultats suivants :



épaiss. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	2170,0	0,350	0,000	24,9	0,086	156,2	0,659
			0,050	10,0	0,111	171,3	0,645
	collé						
0,070	6000,0	0,350	0,050	10,0	0,280	53,1	0,645
			0,120	5,3	0,202	43,2	0,484
	collé						
0,250	12000,0	0,250	0,120	5,3	0,254	29,2	0,484
			0,370	-34,5	-0,508	21,4	0,029
	collé						
0,500	280,0	0,350	0,370	-34,5	0,002	96,0	0,029
			0,870	-22,6	-0,003	52,7	0,013
	collé						
infini	200,0	0,350	0,870	-22,6	0,000	64,3	0,013

Ce qui nous permet de tirer les conclusions suivantes :

COUCHES	EPAISSEURS	VALEURS ADMISSIBLES (MPa)	VALEURS OBTENUES (MPa)	CONDITION
Roulement en BBME	5	$\varepsilon t, adm$ =118,76	$\varepsilon t\ sup$ = 24,9	Condition vérifiée
			$\varepsilon t\ inf$ = 10,0	Condition vérifiée
Base en EME	7	$\varepsilon t, adm$ =118,24	$\varepsilon t\ sup$ =10,0	Condition vérifiée
			$\varepsilon t\ inf$ = 5,3	Condition vérifiée
Fondation en matériaux recyclés améliorés au ciment 3%	25	$\sigma_{t,\ adm}$ = 0,604	σ_{Tsup} = 0,254	Condition vérifiée
			σ_{Tinf} = −0,508	Condition vérifiée

Plateforme 2 (Ancienne structure)	50	$Zadm$ = 437,23	Z = 52,7	Condition vérifiée
Plateforme 1 (Sol support ancienne structure)		$Zadm$ = 437,23	Z = 64,3	Condition vérifiée

ANNEXE 4 : ETUDE HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE

ETUDE HYDROLOGIQUE

L'étude hydrologique met en évidence la détermination des débits de crue pour chaque bassin versant dont l'écoulement coupe notre projet. Il est cependant nécessaire de pouvoir délimiter ces bassins et trouver leurs caractéristiques. Nous utiliserons à cet effet :

- Google Earth
- Global Mapper un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) qui permet d'arriver à ces résultats.

La délimitation des bassins versants

Pour le tracé des limites d'un bassin versant, il faut au préalable :

- Repérer l'exutoire ;
- Repérer le réseau hydrographique ;
- Repérer les points hauts puis les courbes de niveau autour de ces points hauts;
- Tracer la ligne de partage des eaux en suivant les lignes de crête puis en rejoignant, l'exutoire par une ligne de plus grande pente perpendiculaire aux courbes de niveau (donné par le logiciel Global mapper)

Pour ce faire on importe le tracé de la zone obtenue par le logiciel Google Earth dans le logiciel Global Mapper. Ensuite, on fixe les spécifications suivantes :

- Le type de projection(UTM) pour la Côte d'Ivoire
- Le système géodésique de référence WGS 84.

Après avoir fixé les paramètres, la seconde étape consiste à charger le modèle numérique de terrain MNT. Le logiciel nous propose plusieurs modèles. Mais on utilisera **Le modèle "SRTM"** qui est libre et accessible au grand public. Il est fourni par la NASA. Une fois enregistrée nous générons le réseau des cours d'eaux. La délimitation des bassins versants et les sous bassins versants se fait sur le logiciel Global Mapper. La mesure ainsi que le calcul des paramètres des bassins versants sont obtenus par le même logiciel.

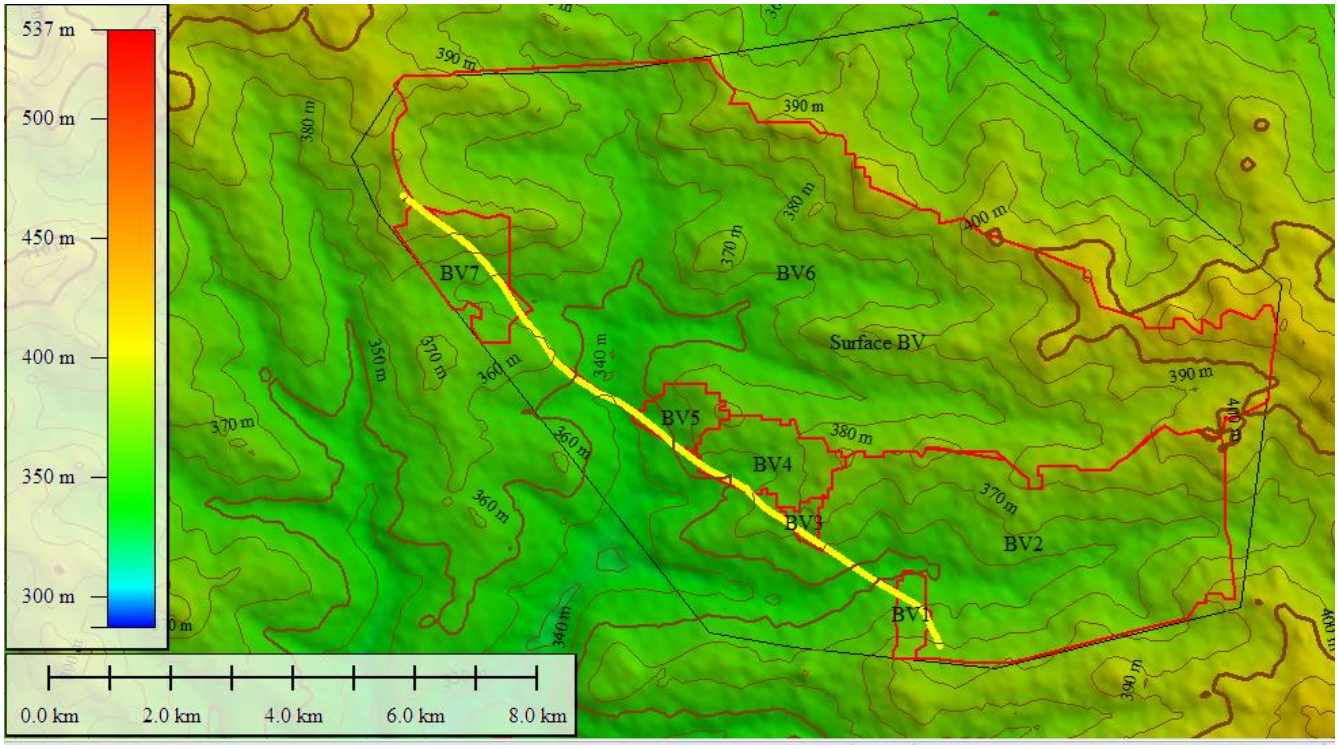


Figure 19: Délimitation des Bassins versants (Global Mapper)

Les caractéristiques des bassins versants

Les paramètres physiques et géométriques (Tableau) de ces bassins ont été déterminés par le logiciel Global Mapper. Pour notre projet, ces paramètres sont :

Bassins versants	Superficie (km²)	Périmètre (km)	Longueur hydraulique (m)	Zmax (m)	Zmin (m)	Pente moyenne I (%)	Pente critique Ic (%)
BV_1	0.681	3.948	819	381	346	2.2	4.69
BV_2	18.676	21.912	7100	400	345	2.2	5.41
BV_3	0.314	2.936	376	374	358	2.11	4.2
BV_4	2.468	7.997	1800	382	348	2.04	5
BV_5	1.106	5.177	1140	374	340	2.47	4.68
BV_6	54.427	43.477	13450	420	339	2.19	6.37
BV_7	2.027	7.659	2190	390	350	2.06	4.21

Tableau 36: Caractéristiques des bassins versants

Présentation des méthodes d'évaluation de débit

Toute étude d'un réseau d'assainissement nécessite à l'étape initiale la détermination des débits d'eaux pluviales à prendre en compte. Le problème d'évaluation des débits pluviaux dans les bassins versants a fait depuis longtemps l'objet de nombreuses études théoriques.

Ainsi plusieurs méthodes d'évaluation des débits pluviaux sont adoptées parmi lesquelles on peut citer (NGUYEN VAN, 1981) :

- La méthode rationnelle ;
- La méthode superficielle de Caquot ;
- La méthode du CIEH ;
- La méthode ORSTOM ;

Dans notre cas nous avons deux catégories de bassins

- Les bassins de superficies inférieures à 4 km²
- Et deux bassins de superficies supérieures à 4km²

Ainsi pour les bassins de superficies inférieures à 4 km² nous utiliserons **la méthode rationnelle** tandis que pour les bassins de superficies supérieures à 4km² nous utiliserons **la méthode ORSTOM.**

Calcul des débits selon la méthode rationnelle

La méthode rationnelle a été mise au point au milieu du XIX siècle. Cette formule utilise un modèle de transformation de la pluie, décrite par son intensité considérée comme uniforme dans le temps en un débit instantané maximal à l'exutoire. La formule de la méthode rationnelle qui donne le débit s'écrit :

$Q = K \times C \times I \times A$

Avec

- Q : débit à évacuer (m^3/s);
- K: facteur de conversion (K = 0,278 si la surface est en km²) ;
- C : coefficient de ruissellement et comme nous sommes dans une **zone engazonnée nous retenons C= 0.30**
- A : la superficie du bassin versant en km²;
- I : intensité de l'averse (mm/h).

Dans le cadre de ce projet, l'intensité I est déterminée par la relation empirique de Montana ($I = a \times Tc^{-b}$) en utilisant les paramètres pluviométriques a et b de la région d'étude pour une période de retour de dix 10 ans. Les paramètres de Montana pour notre zone d'étude (Région Nord) sont : **a = 570 et b = 0,67**

Tc est le temps de concentration en minute peut se calculer à l'aide de nombreuses formules dont celle de KIRPICH

Formule de KIRPICH :

$$T_c = \frac{1}{52} \times \frac{L^{0.77}}{p^{0.38}}$$

Où L désigne la distance en mètre entre l'exutoire et le point le plus éloigné du bassin ; p symbolise la pente du bassin.

Notre projet se trouvant dans une zone abritant de nombreuses auberges restaurants et les habitations riveraines ; nous allons donc de ce fait prévoir dans le dimensionnement de nos ouvrages, l'évacuation des eaux usées de ces complexes. Il nous déterminerons donc les débits de ces eaux usées.

- **Pour le BV4 par exemple**

$$T_C = \frac{1}{52} \times \frac{1800^{0.77}}{0.0204^{0.38}}$$

$\boldsymbol{T_c = 27,97}$ **minutes**

$I = a \times T_c^{-b}$

$I = 570 \times 27.97^{-0,67}$

$\underline{\boldsymbol{I = 61,17\ mm/h}}$

$Q = 0,278 \times 0,3 \times 2.25 \times 10^{-5} \times 2.468 \times 10^{6}$

$\underline{\boldsymbol{Q = 12.58\ m^3/s}}$

Les autres débits sont consignés dans le tableau suivant :

N° BV	Superficie (km²)	Longueur Hydr. (m)	Pente I (m/m)	Coefficient ruis. C	Temps de conc. Tc (min)	Montana		Intensité (mm/h)	Débit de Crue Q10 (m3/s)	Débit ruisselé (m3/s)	Débit de pointe Qp (m3/s)
						A	B				
BV1	0.681	819	0.022	0.3	14.81	570	0.67	93.64	5.31	0.42	5.73
BV3	0.314	376	0.0211	0.3	8.26	570	0.67	138.42	3.62	0.24	3.86
BV4	2.468	1800	0.0204	0.3	27.97	570	0.67	61.17	12.58	0.36	12.94
BV5	1.106	1140	0.0247	0.3	18.28	570	0.67	81.34	7.49	0.31	7.80
BV7	2.027	2190	0.0206	0.3	32.40	570	0.67	55.42	9.36	0.31	9.67

Tableau 37: Calcul des débits des bassins versants selon la méthode rationnelle

Calcul des débits selon la méthode ORSTOM

Cette méthode permet d'évaluer le débit de la crue décennale sur les bassins versants de la zone sahélienne et tropicale sèche. En Afrique de l'Ouest, pour les petits bassins versants de superficie inférieure à 200 km², les hydrologues de l'ORSTOM ont proposé de prendre pour référence de crue de projet la crue dite « décennale ». Le débit de pointe correspondant au ruissellement de la crue décennale peut être défini par la relation :

$$Q_{max10} = m \times \alpha_{10} \times K_{r10} \times \frac{A \times P_{10} \times S}{3.6 \times T_{b10}}$$

Avec :

- m : Coefficient de majoration d'écoulement prenant en compte le débit d'écoulement retardé estimé entre 1,03 et 1,15 au regard de la perméabilité et de la taille des bassins;
- α_{10} Coefficient de pointe (Dans notre cas 2.5) ;
- S : Superficie du bassin versant en km² ;
- P_{an} : Précipitation moyenne annuelle (mm) ;
- Kr_{10} : Coefficient de ruissellement décennal ;
- T_b : Temps de base (s) ;
- P_{10} : Pluie journalière décennale (mm) ;
- A : le coefficient d'abattement

Pour le BV 2 :

$$Q_{max10} = 1.15 \times 2.6 \times 0.334 \times \frac{0.8987 \times 0.13736 \times 18.67 \times 10^6}{3.6 \times 46000}$$

$\boldsymbol{Q_{max10}} = \mathbf{43,52\ m^3/s}$

N° BV	Superficie (km²)	Pente I (m/m)	Pan (mm)	Coefficient d'abattement	Kr10 (%)	P10 (mm)	Coeff. de pointe	Tps de base Tb10 (min)	Débit de crue Q10 (m3/s)	Débit ruisselé (m3/s)	Débit de pointe Qp (m3/s)
BV2	18.676	0.0220	1130.68	0.8987	33.4	137.36	2.6	460	43.52	0.8	44.32
BV7	54.427	0.0219	1130.68	0.89	36.7	137.36	2.6	1077.89	58.90	0.8	59.70

Tableau 38: Calcul des débits selon la méthode ORSTOM

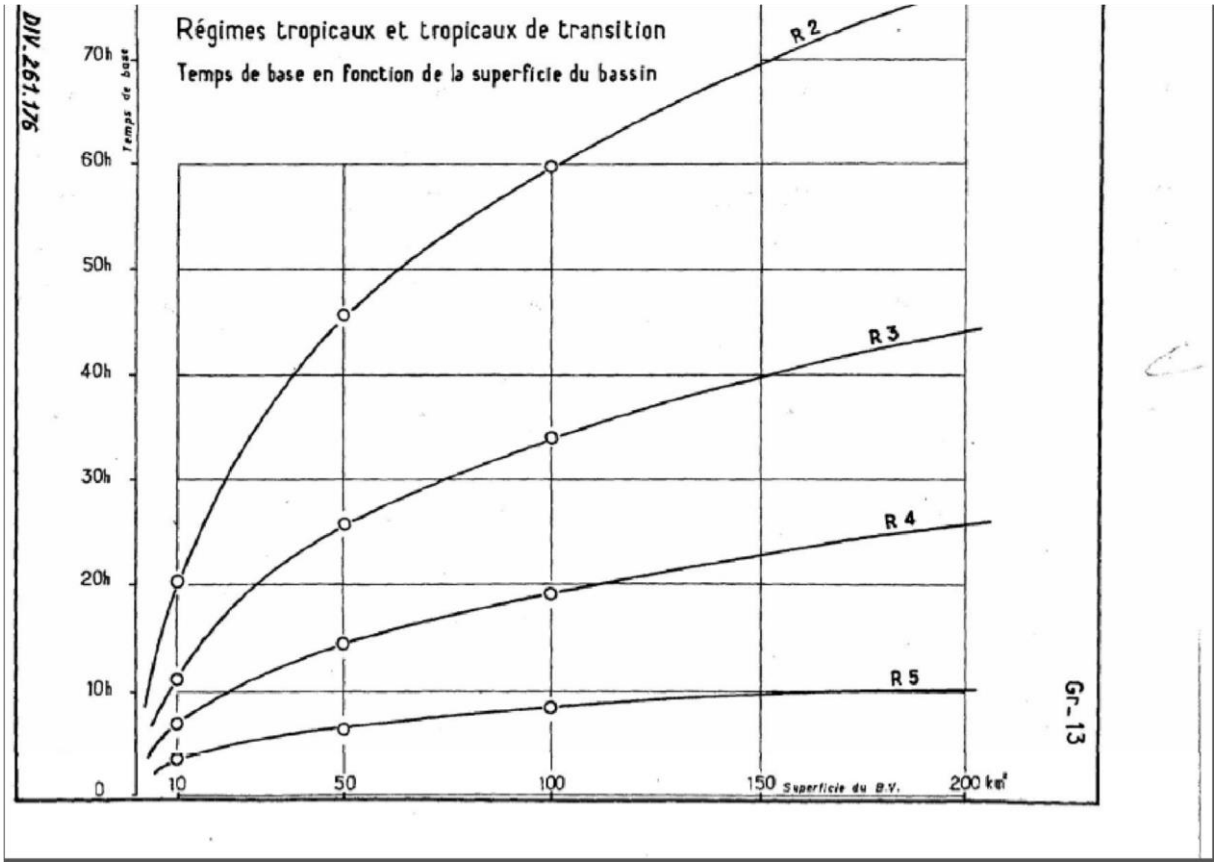
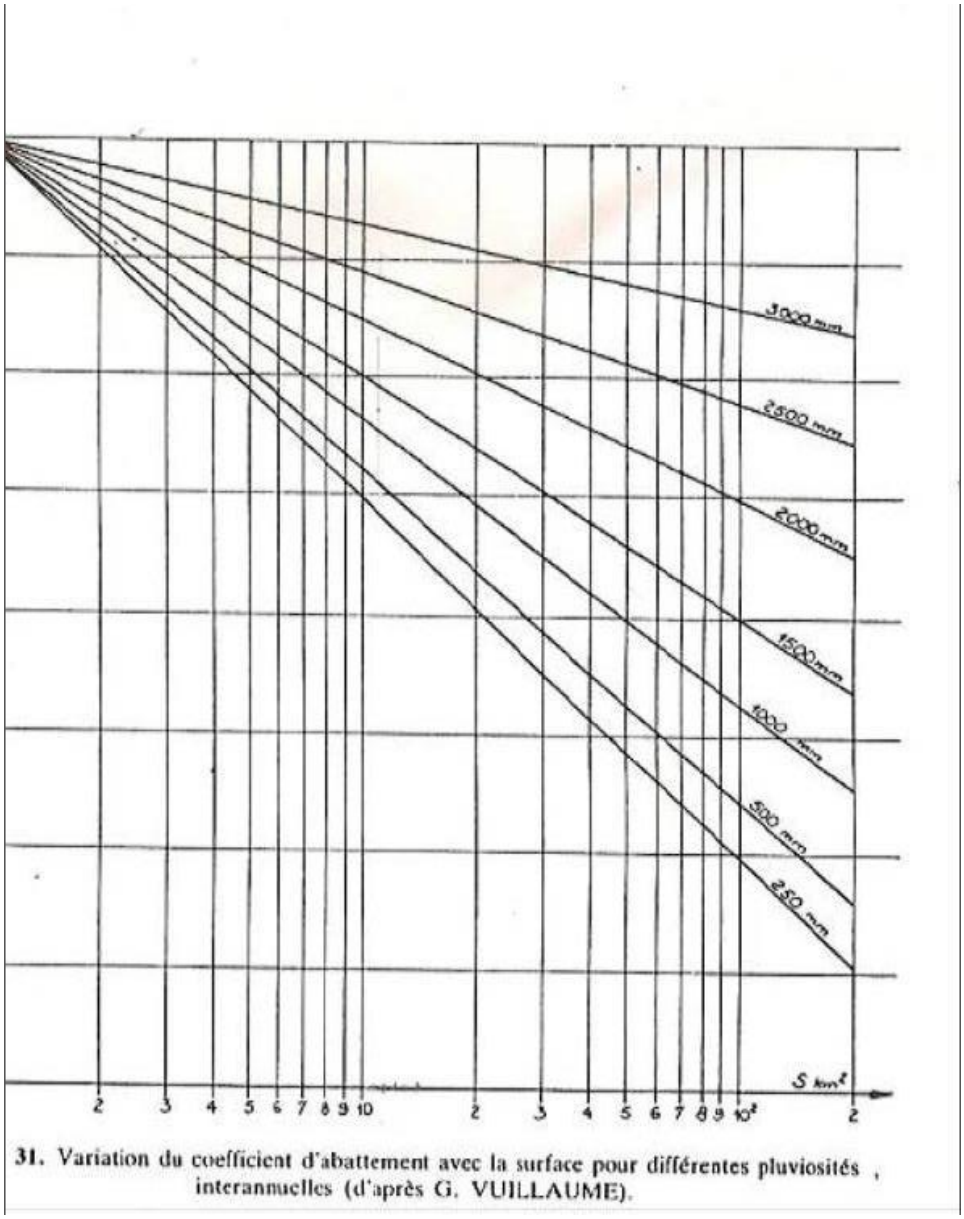


Figure 20: Abaque de détermination du temps de base en fonction de la superficie du bassin (ORSTOM)



31. Variation du coefficient d'abattement avec la surface pour différentes pluviosités interannuelles (d'après G. VUILLAUME).

Figure 21: Abaque de détermination du coefficient d'abattement (ORSTOM)

ETUDE HYDRAULIQUE

Calcul des sections des ouvrages

Les études hydrologiques et l'état des lieux ont permis de collecter des données sur les différents débits et les différents ouvrages en place. Ainsi, il sera question de déterminer les sections des ouvrages hydrauliques capables d'évacuer les débits décennaux, les comparer avec les sections existantes et voir si oui ou non il est nécessaire de remplacer ces ouvrages par de nouveaux ouvrages qui feront l'objet d'un dimensionnement structural avant leurs mises en place sur le terrain.

On tient compte de plusieurs paramètres pour le choix de ces ouvrages les plus importants sont:

- La catégorie de la route ;
- La topographie des lieux ;
- Le débit à évacuer ;
- La nature du sol en place

Le principe est de déterminer un débit d'ouvrage supérieur au débit à évacuer. La détermination de ce débit se fera avec la formule de Manning Strickler défini comme suit :

$Q = K \times Sm \times Rh2/3 \times I1/2$

Avec :

- Q : Débit de crue (en m^3/s) ;
- K : Coefficient de rugosité qui dépend de la surface considérée (K

= 67 pour les surfaces en Béton Armé)

- S_m : Section mouillée (en m^2) ;
- Rh : Rayon hydraulique = $\frac{S_m}{P_m}$ (en m)
- I : Pente (en m/m).

Les variables adimensionnelles étant :

$$H_1^* = \frac{H_1}{D}$$

$$Q^* = \frac{Q}{A\sqrt{2gD}} = \frac{Q}{BD\sqrt{2gD}}$$

Nous avons aussi les relations de la forme :

$H_1^* = F(Q^*)$ si $H_1^* \leq 1{,}25$

$H_1^* = G(Q^*)$ si $H_1^* > 1{,}25$

Les calculs d'un dalot se font à deux niveaux différents d'approximations successives. Connaissant Q on se donne une première valeur de la Hauteur D admissible pour le dalot, compte tenu des caractéristiques géométriques du projet au droit de l'ouvrage. On se fixe alors une largeur D tel que la vitesse moyenne $V = Q/D$ne dépasse pas 3 m/s.

Les valeurs B, D et Q étant connues on calcul $Q^* = Q/A\sqrt{2gD}$

L'abaque de la figure suivante donne la valeur de H_1^* en fonction de Q^*dont on vérifiera la compatibilité avec le projet.

On recommencera le cas échéant en faisant varier la valeur de la largeur B.

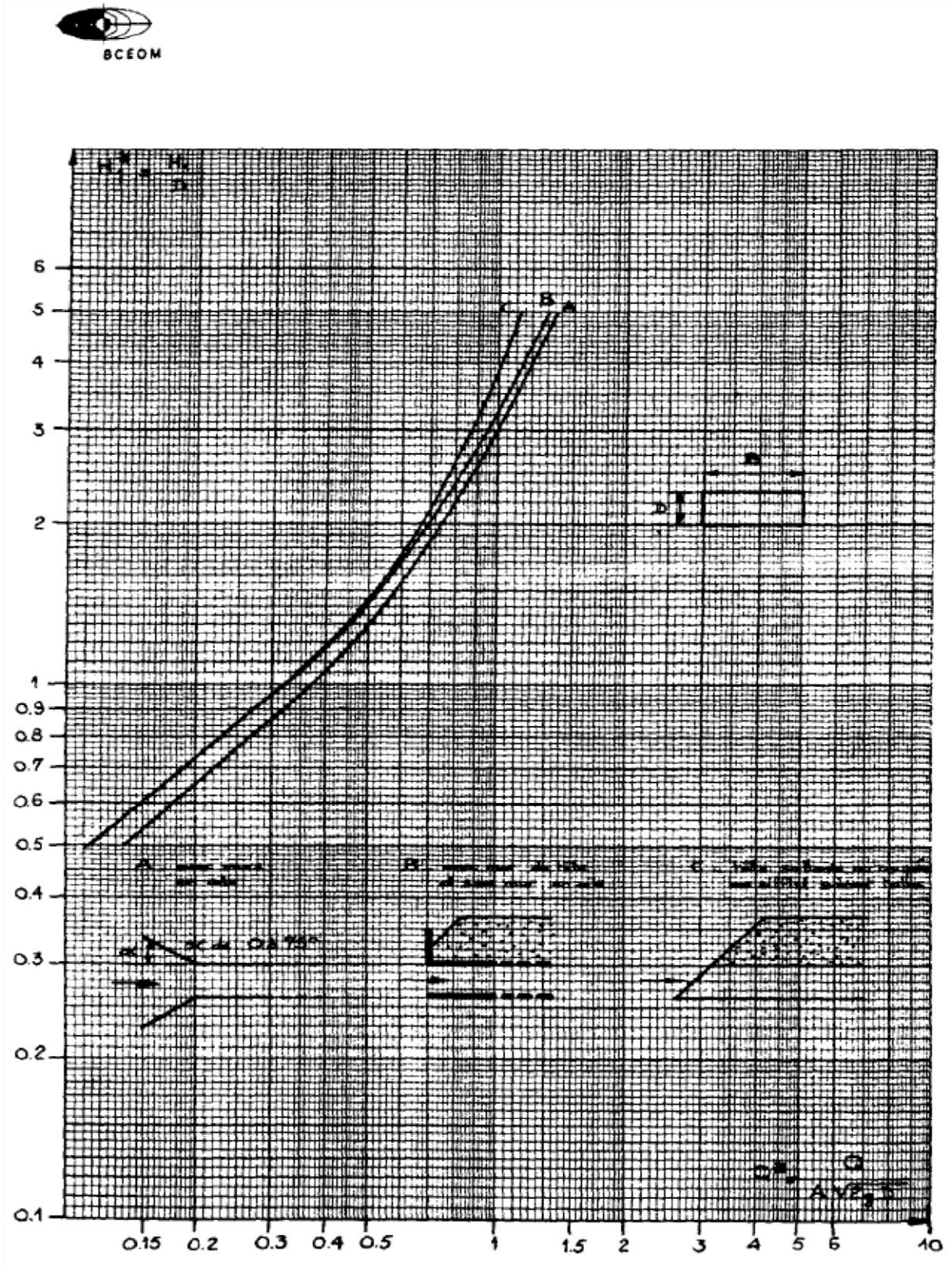


Figure 22: Abaque de détermination de H*=F (Q*) (BCEOM)

Pente longitudinale des dalots

Les calculs précédents supposent que les ouvrages sont capables d'évacuer le débit critique correspondant à la profondeur d'eau H_1 amont.

Pour cela, il faut que la pente longitudinale des ouvrages soit au moins égale à la pente critique. L'écoulement de l'eau à travers l'ouvrage se fait ainsi en régime torrentiel. On est ainsi assuré qu'il ne se forme, après la section critique à l'entrée, un ressaut hydraulique empêchant l'évacuation normale des eaux. D'autre part, la vitesse d'écoulement d'eau dans l'ouvrage sera largement suffisante. En règle générale pour empêcher le dépôt des particules solides

Pente critique pour un dalot

- Dans un dalot nous avons :

$S = By$

$P = B + 2y$

$$R_H = \frac{By}{B + 2y}$$

- En posant $X = y/B$, nous obtiendrons :

$$\frac{I_c}{g/K^2B^{1/3}} = I_c^* = x\left(2 + \frac{1}{x}\right)^{4/3}$$

$$\frac{Q}{\sqrt{gB^5}} = Q^* = x^{3/2}$$

- Connaissant le débit Q et la largeur B on calcule donc

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gB^5}}$$

Après itération pour avoir la valeur de x pour laquelle $\frac{Q}{\sqrt{gB^5}} - x^{3/2} = 0$

On calcule $I_c^* = x\left(2 + \frac{1}{x}\right)^{4/3}$

Pour ensuite avoir $I_c = \frac{I_c^* \times g}{K^2 B^{1/3}}$

Alors on fait le choix de notre pente longitudinale de sorte que $I \geq I_c$

Calcul de la vitesse

La pente de l'ouvrage étant fixée en fonction de la pente critique précédemment calculé, de la topographie au point de franchissement de la géométrie du projet en ce point, il convient de calculer la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau dans l'ouvrage afin de vérifier

- D'une part si la vitesse calculée ne dépasse pas la vitesse maximale admissible (3 m/s)
- D'autre part si elle reste suffisante pour éviter les dépôts de particules solides dans l'ouvrage

Les vitesses minimales à respecter selon le diamètre des matériaux solides susceptibles de se déposer dans l'ouvrage sont les suivantes :

Sables fins (< 0.05 mm) : 0.4 à 0.5 m/s

Graviers fins (< 5 mm) : 0.5 à 0.7 m/s

Gros graviers (5 mm à 15 mm) : 0.7 à 0.9 m/s

Cailloux (15 mm à 30 mm) : 1.00 à 1.20 m/s

Gros cailloux (30 mm à 100 mm) : 1.50 à 1.80 m/s

Vitesse dans un dalot à sortie libre

Ici les variables adimensionnelles ont les expressions suivantes :

- En posant $X = y/B$ on a aussi :

$$Q^* = \frac{Q}{KI^{1/2}B^{8/3}} = \frac{x^{5/3}}{(1+2x)^{2/3}}$$

$$V^* = \frac{V}{KI^{1/2}B^{8/3}} = \frac{x^{2/3}}{(1+2x)^{2/3}}$$

- Nous calculons en premier lieu

$$Q^* = \frac{Q}{KI^{1/2}B^{8/3}}$$

- Ensuite après itération on trouve la valeur de x pour que $\frac{Q}{K1^{1/2}\times B^{8/3}} - \frac{x^{\frac{5}{3}}}{(1+2x)^{\frac{2}{3}}} = 0$

On calcule :

$$V^* = \frac{x^{2/3}}{(1+2x)^{2/3}}$$

- Et on finit par obtenir la vitesse à travers :

$V = KI1/2 \times B8/3 \times V*$

- On vérifie à la fin si $\boldsymbol{V \leq V_{max}} = \mathbf{3}\ \boldsymbol{m/s}$

➢ **Exemple de Dimensionnement**

Prenons comme exemple le BV 3

$\boldsymbol{Q}$ **= 3.85** $\boldsymbol{m^3/s}$

Prenons B= 1.5 m et D= 1.5 m

Calculons la valeur adimensionnelle Q^*

$$Q^* = \frac{Q}{A\sqrt{2gD}} = \frac{Q}{BD\sqrt{2gD}}$$

$$Q^* = \frac{3.85}{1.5 \times 1.5 \times \sqrt{2 \times 9.81 \times 1.5}}$$

$Q^* = 0.479$

On obtient sur l'abaque $H_1^* = F(Q^*)$

$H_1^* = 0.61$

On calcule la Hauteur minimale H_1

$H_1 = H_1^* \times D$

$H_1 = 0.61 \times 1.5$

$\boldsymbol{H_1}$ **=** $\mathbf{0.915}\ \boldsymbol{m}$ **qui est inférieure à la hauteur** $\boldsymbol{D}$ **=** $\mathbf{1.50}\ \boldsymbol{m}$

Calcul de la pente critique

$$\frac{I_c}{g/K^2B^{1/3}} = I_c^* = x\left(2+\frac{1}{x}\right)^{4/3}$$

$$\frac{Q}{\sqrt{gB^5}} = Q^* = x^{3/2}$$

Connaissant le débit Q et la largeur B on calcule

$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{gB^5}} = \frac{3.85}{\sqrt{9.81\times1.5^5}}$$

Q^* = 0.678

Après itération on obtient x = 0.330 pour laquelle $\frac{Q}{\sqrt{gB^5}} - x^{3/2} = 0$

On calcule $I_c^* = 0.330 \times (2+\frac{1}{0.330})^{4/3}$

$I_c^* = 2.84$

On a notre pente critique $I_c = \frac{2.84\times9.81}{67^2\times1.5^{1/3}}$

I_c = 0.005 m/m

On choisit donc comme pente longitudinale $\boldsymbol{I}$ = $\mathbf{0.006}$ $\boldsymbol{m/m}$

Vitesse dans un dalot à sortie libre

- Nous calculons tout d'abord :

$$Q^* = \frac{Q}{KI^{1/2}B^{8/3}}$$

$$Q^* = \frac{5.85}{67\times0.006^{1/2}\times1.5^{8/3}}$$

$\boldsymbol{Q^*}$ **= 0.382**

Après itération on trouve comme valeur $\boldsymbol{x}$ **= 0.299** pour laquelle $\frac{Q}{KI^{1/2}B^{8/3}} - \frac{x^{5/3}}{(1+2x)^{2/3}} = 0$

- On calcule :

$$V^* = \frac{0.299^{2/3}}{(1 + 2 \times 0.299)^{2/3}}$$

$\boldsymbol{V^* = 0.327}$

- Et on finit par obtenir la vitesse à travers :

$V = 67 \times 0.006^{1/2} \times 1.5^{8/3} \times 0.327$

$\boldsymbol{V = 2.22\ m/s}$

- On vérifie et on se rend compte que $\boldsymbol{V < V_{max} = 3\ m/s}$

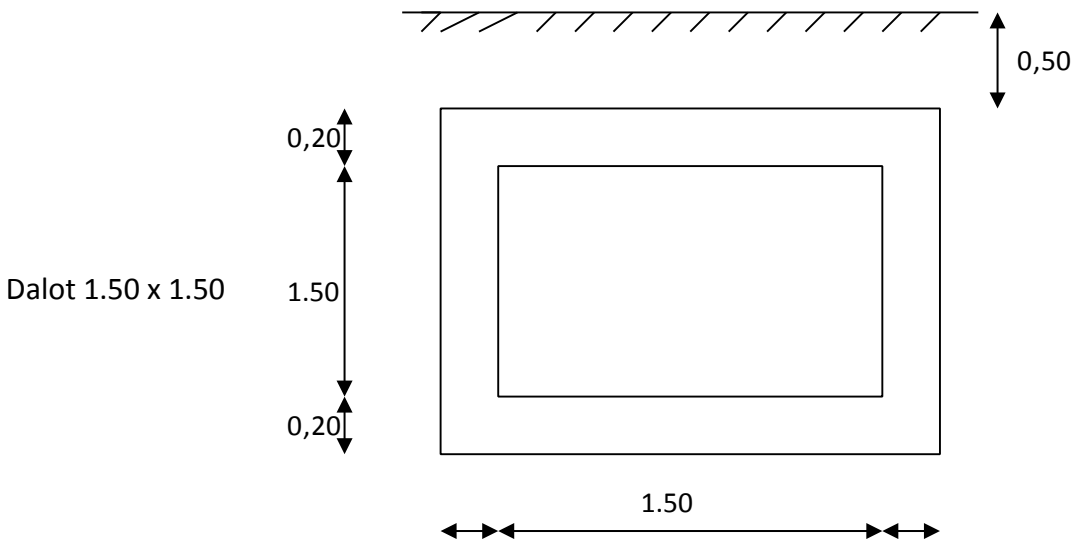
Conclusion : La section 1,5 m x 1,5 m est acceptable pour le dalot du BV3

Dans le tableau suivant se trouve les résultats de calcul de sections.

Identification	Sections			Paramètres	
	Dimensions				
BV N°	**n**	**B**	**D**	**q (m^3/s)**	**I (%)**
1	1	1,5	2	5,73	0,6
2	6	1,5	3	12,09	0,5
3	1	1,5	1,5	3,86	0,75
4	1	3	2	12,94	0,7
5	1	2	2	7,81	0,7
6	8	3	2,5	18,895	0,6
7	1	2	2	9,67	0,6

Tableau 39 : Sections des ouvrages hydrauliques

ANNEXE 5 : DIMENSIONNEMENT STRUCTURAL DE DALOT



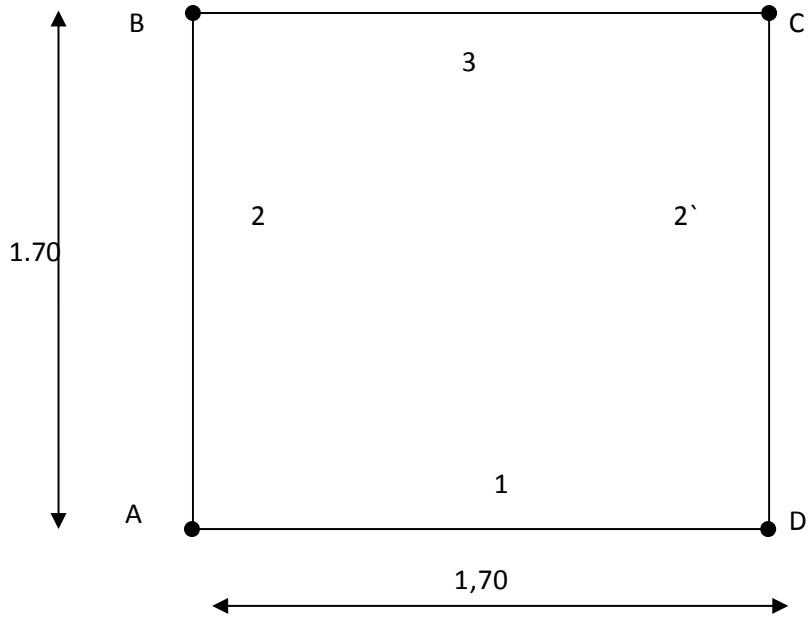


Schéma statique

$$L = 1{,}50 + 2 \times \frac{0{,}20}{2} = 1{,}70$$

$$h = 1{,}50 + 2 \times \frac{0{,}20}{2} = 1{,}70$$

I. CALCUL DES SOLLICITATIONS

1. Calcul des constantes

$$J_1 = J_2 = J_3 = \frac{BH^3}{12} = \frac{1{,}50 \times 0{,}20^3}{12} = 0{,}001m^4$$

$$k_1 = \frac{J_3}{J_1} = 1{,}00 \qquad k_2 = \frac{J_3}{J_2} \times \frac{h}{L} = 1 \times \frac{1.70}{1.70} = 1{,}00$$

$$K1 = 2k2 + 3 = \mathbf{5} \qquad K2 = 3k1 + 2k2 = \mathbf{5}$$

$$K3 = 3k2 + 1 - \frac{k1}{5} = \mathbf{3.8} \qquad K4 = \frac{6k_1}{5} + 3k_2 = \frac{6 \times 1}{5} + 3 \times 1 = \mathbf{4.20}$$

$F_1 = K_1 K_2 - k_2 = 5^2 - 1^2 =$ **24**

$F_2 = 1 + k_1 + 6\ k2 = 1+1+6 \times 1 =$ **8**

2. Déterminations des charges et des efforts

- Tablier :

Poids mort : 0,20 x 1,50 x 2,50 = 0,75 t/ml

Remblai : 0,50 x 1,5 x 2,00 = 1,50 t/ml

Poids total = 2,25 t/ml

- *Moment sur les appuis : détermination des inconnues hyperstatiques*

$$M_A = -\frac{P \times L^2}{4F_1}(k_1 \times K1 - k_2) = -\frac{2{,}25 \times (1{,}70)^2}{4 \times 24}(1 \times 5 - 1) = -0{,}27\ t.m$$

M_D = M_A = - 0,27 t.m M_B = M_C=M_A=M_D = - 0,27 t.m

- *Détermination des Moments à mi portée*

$$M_{BC}\ (Tablier) = \frac{P \times L^2}{8} - \frac{P \times L^2}{4F_1}\ (\ k_1 \times K1 - k_2) = \frac{2{,}25 \times (1{,}70)^2}{8} - 0{,}27 = 0{,}542\ t.m$$

M_{AD} (Radier) = M_{BC} = 0,542 t.m

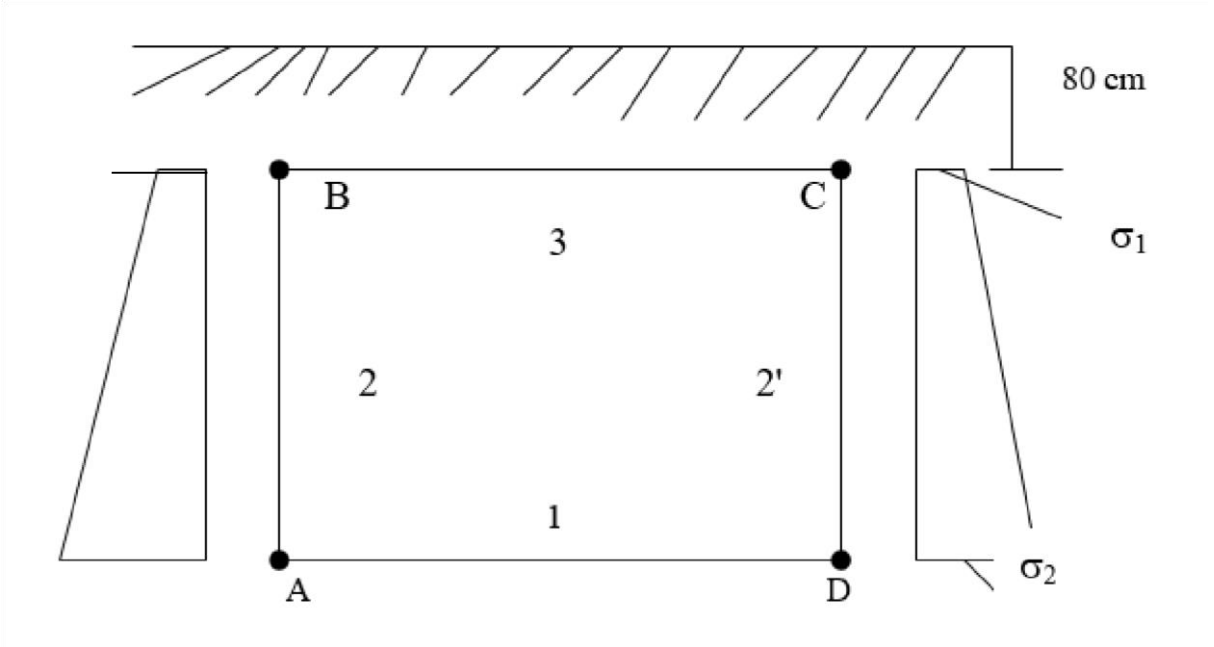
M_{AB} (Pied droit) = MA = -0,27 t.m

- *Détermination des efforts normaux*

$$N_1 = N_3 = \frac{M_B - M_A}{h} = 0 \qquad N_1 = N_2' = \frac{PL}{2} = \frac{2{,}25 \times 1{,}70}{2} = \mathbf{1,91\ t}$$

N_1 = N_3 = 0 et **N_2 = N'_2= 1.91 t**

➢ Poussée des terres



σ_1 = 0,333 x2 x 0,5 = 0,333 t/m²

σ_2 = 0,333 x 2 x 2,2 = 1,465 t/m^2

$\Delta\sigma$ = 1,465 - 0.333 = 1.13 t/m^2

➢ *Moment sur les appuis : détermination des inconnues hyperstatiques*

$$M_A = -\frac{k_2\,(k_2+3)}{4\times F_1}\,\sigma_1\times h^2 - \frac{k_2\,(3k_2+8)}{20\times F_1}\times\Delta\sigma_1\times h^2$$

$$M_A = -\frac{1\,(1+3)}{4\times 24}\times 0{,}333\times(1{,}70)^2 - \frac{1\,(3\times 1+8)}{20\times 24}\times 1{,}13\times(1{,}70)^2$$

M_A = - 0.115 t m

$M_D = M_A$ = - 0,115 t.m

$$M_B = -\frac{k_2\,(3k_1+k_2)}{4\times F_1}\,\sigma_1\times h^2 - \frac{k_2\,(7k_1+8+2k_2)}{20\times F_1}\times\Delta\sigma_1\times h^2$$

$$M_B = -\frac{1\,(3\times 1+1)}{4\times 24}\times 0{,}333\times(1{,}70)^2 - \frac{1\,(7\times 1+8+2\times 1)}{20\times 24}\times\ 1{,}13\times(1{,}70)^2$$

M_B = - 0.101 t.m

M_C= M_B = - 0,101 t.m

- *Détermination des Moments à mi portée*

$$M_{AB}(\,Piédroit) = \frac{1}{8}\times\sigma_1\times h^2\times\frac{\Delta\sigma_1 h^2}{9\sqrt{3}} + \frac{M_A+M_B}{2}$$

$$M_{AB}(\,Piédroit) = \frac{1}{8}\times 0{,}333\times(1{,}70)^2\times\frac{1{,}13\times(1{,}70)^2}{9\sqrt{3}} + \frac{-0{,}115-0{,}101}{2} = \mathbf{0,56\ \boldsymbol{t.m}}$$

M_{AB} (Pied droit) = 0,560 t.m

M_{AD} (Radier) = M_A = - 0, 115 t.m

M_{BC} (Tablier) = M_c = - 0,101 t.m

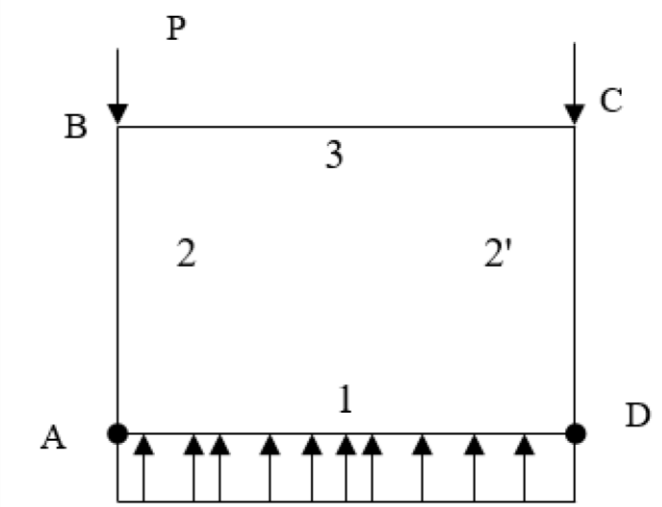
- *Détermination des efforts normaux*

$$N_1 = \frac{(\sigma_1+2\times\sigma_2)\times h}{6} + \frac{M_B-M_A}{h} = \frac{3{,}245\times 1{,}7}{6} + \frac{-0{,}101+0{,}115}{1{,}7} = 0{,}927\ t.m$$

$$N_1 = \frac{(2\times\sigma_1+\sigma_2)\times h}{6} + \frac{M_A-M_B}{h} = \frac{2{,}122\times 1{,}7}{6} + \frac{-0{,}115+0{,}101}{1{,}7} = 0{,}593\ t.m$$

N2 = N'2 = 0

- **Poids mort pied droit**



P = 2,5 × (E1×h) = 2,5 × (0.2 × 1.7)

P = 0,85 t/ml

$$\sigma = \frac{2 \times 0{,}85}{1{,}70} = 1\ t/m^2$$

- Moment sur les appuis : détermination des inconnues hyperstatiques

$$M_A = \frac{-PLk_1K_1}{2F_1} = \frac{-0{,}85 \times 1{,}70 \times 1 \times 5}{2 \times 24} = -0{,}150\ t.m$$

M_D= M_A = - 0,150 t.m

$$M_B = \frac{PLk_1k_2}{2F_1} = \frac{0{,}85 \times 1{,}70 \times 1 \times 1}{2 \times 24} = 0{,}03\ t.m$$

M_C= M_B = 0,03 t.m

➢ *Détermination des Moments à mi portée*

$$M_{AB}(\,Piédroit) = -\frac{(M_A + M_B)}{2} = \frac{-0{,}03 + 0{,}150}{2} = +0{,}06\ t.m$$

$$M_{AD}\ (Radier) = \frac{\sigma L^2}{8} + M_A = \frac{1 \times (1{,}70)^2}{8} - 0{,}150 = 0{,}211\ t.m$$

M_{BC} (Tablier) = M_B = 0,03 t.m

➢ *Détermination des efforts normaux*

$$N_1 = \frac{3\mathrm{PL}\times \mathrm{k}_1\,(1+\mathrm{k}_2)}{2\ \mathrm{h}\ \mathrm{F}_1} = \frac{3\times 0{,}85\times 1{,}70\times(1+1)}{2\times 1{,}70\times 24} = 0{,}106\ t$$

N_3 = - N_1 = - 0,106 t

N_2 = - N'_2 = P = 0,85 t

➢ Surcharges routières

➢ Charges de type B_c

On considère la charge BC

On considère 2 essieux arrières de 13 t chacun soit Q = 26 t reparties sur (1.70 x 5) m² de surface.

Coefficient bc = 1.1

$$q = \frac{26 \times 1{,}1}{1{,}70 \times 5{,}00} = 3{,}36\ t/m^2$$

Coefficient de majoration dynamique

$$\delta = 1 + \frac{0,4}{1+0,2L} + \frac{0,6}{1+\frac{4G}{S}} = 1 + \frac{0,40}{1+0,2 \times 7.4} + \frac{0,6}{1+4\times\frac{28,30}{52,8}} = 1.46$$

Avec :

L = (lr ; l) = max (7.4 ; 1.7)= 7,4m

G = l× Ptab = 1,7×2,25×7,4 = 28,305 t

S = n ×qr ×CBC = 8×60×1. 1 = 52,8 t

D'où **Q (δ) = 3.47 x 1,46 x 1,1 = 5,57 t/m²**

- *Moment sur les appuis : détermination des inconnues hyperstatiques*

$$M_A = -\frac{Q(\delta)L^2}{4F_1}(k_1 \times K_1 - k_2) = -\frac{5,57\times1.7^2}{4\times24}(1 \times 5 - 1)$$

M_A =-0.670 t.m

M_A= M_B =M_C =M_D = - 0.670 t.m

- *Détermination des Moments à mi portée*

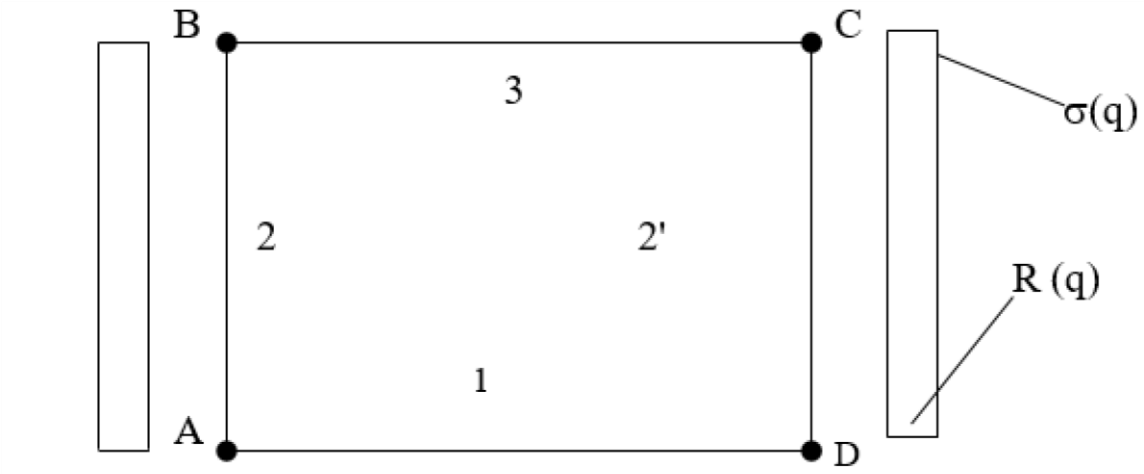
$$M_{BC} = \frac{1}{8} \times Q(\delta) \times L^2 + M_B = \frac{1}{8} \times 5,57 \times (1,70)^2 + (-0,670) = 1,34\ t.m$$

M_{AD} = M_{BC} = 1.34 t.m

- *Détermination des efforts normaux*

$$N_1 = N_3 = 0 \qquad N_2 = N_2' = \frac{Q(\delta)}{2} = \frac{5,57 \times 1,70}{2} = 4,73\ t$$

- Surcharges routières sur remblai



σ (q) = 0,333 x1 = 0,333 t/m^2

R(q) = σ (q) x h = 0,333 x 1.70 = 0,56 t/ m^2

- *Moment sur les appuis : détermination des inconnues hyperstatiques*

$$M_A = -\frac{\sigma 1 h^2 [\mathrm{k2}(\mathrm{k2}+3)] \times \sigma(\mathrm{q})}{4\, F_1\, \sigma_1}$$

$$M_A = -\frac{0{,}333 \times (1{,}70)^2 \times [1(1+3)] \times 0{,}333}{4 \times 24 \times 0{,}333} = -0{,}040\ t.m$$

M_D = M_B = M_C = M_A = - 0,040 t.m

➢ *Détermination des Moments à mi portée*

$$M_{AB} = \frac{1}{8}\sigma(q)\,h^2 + M_A = \frac{1}{8} \times 0{,}333 \times (1.70)^2 - 0{,}040 = 0{,}080 \text{ t.m}$$

$M_{DC} = M_{AB} = 0{,}080$ t.m

$M_{BC} = M_{AD} = M_A = -\,0{,}040$ t.m

➢ *Détermination des efforts normaux*

$$N_1 = N_3 = \frac{\sigma(q)\,h}{2} + \frac{M_B - M_C}{h} = \frac{0{,}333 \times 1.70}{2} + 0 = 0{,}28 \text{ t.m}$$

N2 = N'2 = 0

➢ Effort de freinage

On considère 2 essieux porteurs de 13 t soit 26 t

$$F = \frac{26}{6} = 4{,}33 \text{ t}$$

Coefficient de majoration dynamique

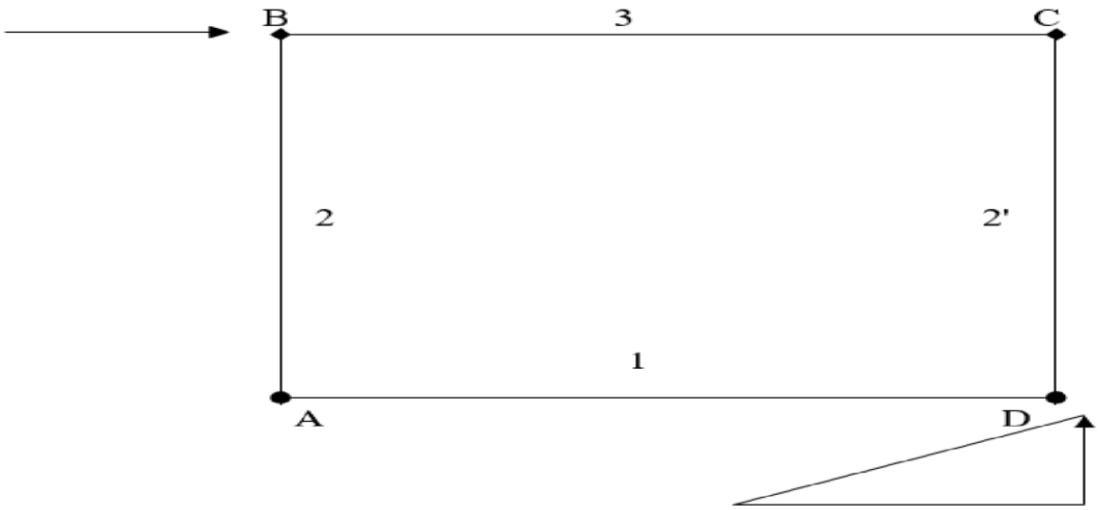
$$\boldsymbol{\delta = 1 + \frac{0,40}{1 + 0,2L} + \frac{0,6}{1 + \frac{4G}{S}} = 1 + \frac{0,40}{1 + (0,2 \times 1,70)} + \frac{0,6}{1 + \frac{4 \times 13,68}{26}} = 1,52}$$

Avec :

L= 1,70m G= 13.68 t S = 26 t

Donc :

F = 4,33 x 1,52 = 6.12 t



- *Détermination des Moments à mi portée*

$$M_A = -\frac{F\,h}{2\,F2} \times K_3 = -\frac{6.12 \times 1.70}{2 \times 8} \times 3{,}8 = -2.47 \text{ t.m}$$

$M_D = M_A = -2.47$ t.m

$$M_B = \frac{Fh}{2\,F2} \times K_4 = \frac{6.12 \times 1.70}{2x\,8} \times 4.2 = 2.73 \text{ t.m}$$

$M_C = -M_B = -2.73$ t.m

➢ *Détermination des Moments à mi portée*

$\boldsymbol{M_{BC} = M_{AD} = 0}$

$$M_{AB} = \frac{M_A + M_B}{2} = \frac{-2.47 + 2.73}{2} = \mathbf{0{,}13\ t.m}$$

➢ *Détermination des efforts normaux*

$$N_1 = \pm \frac{F}{2} = \pm \frac{6.12}{2} = \pm 3{,}06\ t \qquad \mathbf{N_3 = 3{,}06\ t}$$

$$N_2 = -\frac{F\ h \times K_4}{L \times F2} = -\frac{6.12 \times 1.70 \times 4.2}{1.70 \times 8} = -3.21\ t$$

$\boldsymbol{N_2' = -N_2 = 3{,}21\ t}$

Le tableau suivant donne le récapitulatif de nos calculs :

		Moments en (t.ml)							Efforts en tonne			
		MA	M(A-B)	MB	M(B-C)	MC	M(A-D)	MD	N1	N2	N'2	N3
Tablier	1	-0,27	-0,27	-0,27	0,542	-0,27	0,542	-0,27	0	1,91	1,91	0
Piedroits	2	-0,15	0,06	0,03	0,03	0,03	0,211	-0,15	0,106	0,85	-0,85	-0,106
Poussée des terres	3	-0,115	0,221	-0,101	-0,101	-0,101	-0,115	-0,115	0,927	0	0	0,593
Charge B	4	-0,67	-0,67	-0,67	1,34	-0,67	1,34	-0,67	0	4,73	4,73	0
Surcharge sur remblais	5	-0,04	0,08	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	-0,04	0,028	0	0	0,028
Freinage	6	-2,47	0,13	-2,73	0	-2,73	0	-2,47	3,06	3,21	3,21	3,06
G	1+2+3	-0,535	0,011	-0,341	0,471	-0,341	0,638	-0,535	1,033	2,76	1,06	0,487
Q	4+5+6	-3,18	-0,46	-3,44	1,3	-3,44	1,3	-3,18	3,088	7,94	7,94	3,088

Tableau 40: Récapitulatif du calcul des sollicitations

II. DETERMINATION DES ARMATURES

- **Tablier**

Caractéristiques de la section b = 1,00 m h = 0,20 m d = 0,9h = 0,18 m d' = 0,1 h= 0.02 m

F_{c28} = 25 MPa F_e = 400 MPa

Fsu = 348 MPa F_{bu} = 14 ,17 MPa

- Armatures à mi- travée BC (lit inférieur)

  - **A l'état limite ultime (ELU)**

M_u = 1,35 x G + 1,6 x Q

M_u = 1,35 x (0.471) + 1,6 x (1.3) = 2.72 t.m

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times d^2 \times F_{bu}}$$

$$\mu_u = \frac{2{,}72 \times 10^{-2}}{1 \times 0{,}18^2 \times 14{,}17}$$

μ_u = 0,059

$\mu_u <$ 0,186 Donc pivot A pas d'aciers comprimés

$$\alpha_u = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2\mu_u}\right) = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.059}\right) = 0{,}07$$

$z_u = d\ (1 - 0{,}4\alpha_u) = 0{,}18(1 - 0{,}4 \times 0{,}07) = 0{,}174\ m$

$$A_{st} = \frac{Mu}{z_u \times \sigma_s} = \frac{2{,}72 \times 10^{-2}}{0{,}174 \times 347{,}83} = 4{,}49\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1{,}9 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 4{,}12\ cm^2$$

$A_{st} > A_{stmin}$ Donc la section d'acier retenue est $\boldsymbol{A_{st}}$ **= 4,49** $\boldsymbol{cm^2}$

- **A l'état limite de service (ELS)**

$M_{ser} = G + 1{,}2S = 0.471 + 1{,}2 \times 1{,}3 = 2{,}03\ t.m$

$$\overline{\alpha_{ser}} = \frac{n \times \overline{\sigma_{bc}}}{n \times \overline{\sigma_{bc}} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 201{,}63} = 0{,}527$$

$y_{ser} = \overline{\overline{\alpha_{ser}}} \times d = 0{,}527 \times 0{,}18 = 0{,}095\ m$

$$z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0{,}18 - \frac{0{,}095}{3} = 0{,}148\ m$$

$$M_{serb} = \frac{bd^2}{2} \times \overline{\sigma_{bc}} \times \overline{\alpha_{ser}} \left(1 - \frac{\overline{\alpha_{ser}}}{3}\right) = \frac{1 \times 0{,}18^2}{2} \times 15 \times 0{,}527 \left(1 - \frac{0{,}527}{3}\right)$$

$$M_{serb} = 10{,}55\ t.m$$

$M_{ser} < M_{serb}$ donc pas d'aciers comprimés

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{z_{ser} \times \sigma_s} = \frac{2{,}03 \times 10^{-2}}{0{,}148 \times 201{,}63} = 6{,}7\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 2{,}17\ cm^2$$

$A_{st} > A_{stmin}$ Donc la section d'acier retenue est $A_{st} = 6{,}7\ cm^2$

$\boldsymbol{A_{st} = max\ (A_{st}}$ à $\boldsymbol{l'ELU}$; $\boldsymbol{A_{st}}$ à $\boldsymbol{l'ELS)} = \boldsymbol{6,7\ cm^2}$

- Armatures aux abouts B et C (lit supérieur)

M_u = 1,35 x G + 1,6 x Q

M_u = 1,35 x (0,341) + 1,6 x (3,44) = -5,96 t.m

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times d^2 \times F_{bu}}$$

$$\mu_u = \frac{5{,}96 \times 10^{-2}}{1 \times 0{,}18^2 \times 14{,}17}$$

$\mu_u = 0{,}129$

$\mu_u < 0{,}186$ Donc pivot A pas d'aciers comprimés

$$\alpha_u = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2\mu_u}\right) = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0{,}129}\right) = 0{,}068$$

$z_u = d\ (1 - 0{,}4\alpha_u) = 0{,}18(1 - 0{,}4 \times 0{,}068) = 0{,}175\ m$

$$A_{st} = \frac{Mu}{z_u \times \sigma_s} = \frac{5{,}96 \times 10^{-2}}{0{,}175 \times 347{,}83} = 4.79\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1.1 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 2{,}39\ cm^2$$

$A_{st} > A_{stmin}$ Donc la section d'acier retenue est $A_{st} = 4{,}79\ cm^2$

– **A l'état limite de service (ELS)**

$M_{ser} = G + 1{,}2S = 0.341 + 1{,}2 \times 3{,}44 = 4{,}46\ t.m$

$$\overline{\alpha_{ser}} = \frac{n \times \overline{\sigma_{bc}}}{n \times \overline{\sigma_{bc}} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 201{,}63} = 0{,}527$$

$y_{ser} = \overline{\alpha_{ser}} \times d = 0{,}527 \times 0{,}18 = 0{,}095\ m$

$$z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0{,}18 - \frac{0{,}095}{3} = 0{,}148\ m$$

$$M_{serb} = \frac{bd^2}{2} \times \overline{\sigma_{bc}} \times \overline{\alpha_{ser}} \left(1 - \frac{\overline{\alpha_{ser}}}{3}\right) = \frac{1.1 \times 0{,}18^2}{2} \times 15 \times 0{,}527 \left(1 - \frac{0{,}527}{3}\right)$$

$$M_{serb} = 11{,}61\ t.m$$

$M_{ser} < M_{serb}$ donc pas d'aciers comprimés

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{z_{ser} \times \sigma_s} = \frac{4{,}46 \times 10^{-2}}{0{,}148 \times 201{,}63} = 6{,}9\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1.1 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 2{,}39\ cm^2$$

$A_{st} > A_{stmin}$ Donc la section d'acier retenue est $A_{st} = 6{,}9\ cm^2$

$\boldsymbol{A_{st} = max\ (A_{st}}$ à $\boldsymbol{l'ELU}$; $\boldsymbol{A_{st}}$ à $\boldsymbol{l'ELS}) = \mathbf{6,9}\ \boldsymbol{cm^2}$

- **Radier**

b = 1.00m ; h = 0,20 m ; d = 0,9h = 0,18 m ; d'=0,1h = 0,02 m ;

Fb=14.17 MPa ; Fsu=348 MPa

- Lit inférieur

  - **A l'état limite ultime (ELU)**

Mu = 1,35 x G + 1,6 x Q

Mu = 1,35 x (0.638) + 1,6 x (1.3) = 2,94 t.m

$$\mu_u = \frac{2{,}94 \times 10^{-2}}{b \times d^2 \times F_{bu}}$$

$$\mu_u = \frac{2{,}94 \times 10^{-2}}{1 \times 0{,}18^2 \times 14{,}17}$$

μ_u = 0,064

μ_u < 0,186 Donc pivot A pas d'aciers comprimés

$$\alpha_u = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2\mu_u}\right) = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.064}\right) = 0{,}083$$

$zu = d\,(1 - 0{,}4\alpha u) = 0{,}18(1 - 0{,}4 \times 0{,}083) = 0{,}174\ m$

$$A_{st} = \frac{Mu}{z_u \times \sigma_s} = \frac{2{,}94 \times 10^{-2}}{0{,}174 \times 347{,}83} = 4{,}85\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 2{,}17\ cm^2$$

$Ast > Astmin$ Donc la section d'acier retenue est Ast = 4,85 $cm2$

– **A l'état limite de service (ELS)**

$M_{ser} = G + 1{,}2S = 0.638 + 1{,}2 \times 1{,}3 = 2{,}19\ t.m$

$$\overline{\alpha_{ser}} = \frac{n \times \overline{\sigma_{bc}}}{n \times \overline{\sigma_{bc}} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 201{,}63} = 0{,}527$$

$y_{ser} = \overline{\alpha_{ser}} \times d = 0{,}527 \times 0{,}18 = 0{,}095\ m$

$$z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0{,}18 - \frac{0{,}095}{3} = 0{,}148\ m$$

$$M_{serb} = \frac{bd^2}{2} \times \overline{\sigma_{bc}} \times \overline{\alpha_{ser}} \left(1 - \frac{\overline{\alpha_{ser}}}{3}\right) = \frac{1.1 \times 0{,}18^2}{2} \times 15 \times 0{,}527 \left(1 - \frac{0{,}527}{3}\right)$$

$$M_{serb} = 11{,}61\ t.m$$

$M_{ser} < M_{serb}$ donc pas d'aciers comprimés

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{z_{ser} \times \sigma_s} = \frac{2{,}19 \times 10^{-2}}{0{,}148 \times 201{,}63} = 7{,}34\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 2{,}39\ cm^2$$

$A_{st} > A_{stmin}$ Donc la section d'acier retenue est $A_{st} = 7{,}34\ cm^2$

$\boldsymbol{A_{st} = max\ (A_{st}\ à\ l'ELU;\ A_{st}\ à\ l'ELS) = 7,34\ cm^2}$

- Lit supérieur

  - **A l'état limite ultime (ELU)**

M_u = 1,35 x G + 1,6 x Q

M_u = 1,35 x (0.535) + 1,6 x (3.18) = 5,81 t.m

$$\mu_u = \frac{M_u}{b \times d^2 \times F_{bu}}$$

$$\mu_u = \frac{5{,}81 \times 10^{-2}}{1 \times 0{,}18^2 \times 14{,}17}$$

μ_u = 0,064

μ_u < 0,186 Donc pivot A pas d'aciers comprimés

$$\alpha_u = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2\mu_u}\right) = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.064}\right) = 0{,}083$$

$$z_u = d(1 - 0{,}4\alpha_u) = 0{,}18(1 - 0{,}4 \times 0{,}083) = 0{,}174\ m$$

$$A_{st} = \frac{Mu}{z_u \times \sigma_s} = \frac{2{,}94 \times 10^{-2}}{0{,}174 \times 347{,}83} = 4{,}85\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 2{,}17\ cm^2$$

$A_{st} > A_{stmin}$ Donc la section d'acier retenue est A_{st} = 4,85 cm^2

- **A l'état limite de service (ELS)**

$M_{ser} = G + 1{,}2S = 0.535 + 1{,}2 \times 3{,}18 = 4{,}35\ t.m$

$$\overline{\alpha_{ser}} = \frac{n \times \overline{\sigma_{bc}}}{n \times \overline{\sigma_{bc}} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 201{,}63} = 0{,}527$$

$y_{ser} = \overline{\overline{\alpha_{ser}}} \times d = 0{,}527 \times 0{,}18 = 0{,}095\ m$

$$z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0{,}18 - \frac{0{,}095}{3} = 0{,}148\ m$$

$$M_{serb} = \frac{bd^2}{2} \times \overline{\sigma_{bc}} \times \overline{\alpha_{ser}} \left(1 - \frac{\overline{\alpha_{ser}}}{3}\right) = \frac{1 \times 0{,}18^2}{2} \times 15 \times 0{,}527 \left(1 - \frac{0{,}527}{3}\right)$$

$$M_{serb} = 10{,}5\ t.m$$

$M_{ser} < M_{serb}$ donc pas d'aciers comprimés

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{z_{ser} \times \sigma_s} = \frac{4{,}35 \times 10^{-2}}{0{,}148 \times 201{,}63} = 10{,}35\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1.1 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 2{,}39\ cm^2$$

$A_{st} > A_{stmin}$ Donc la section d'acier retenue est $A_{st} = 10{,}35\ cm^2$

$\boldsymbol{A_{st}} = \boldsymbol{max}\ (\boldsymbol{A_{st}}$ à $\boldsymbol{l'ELU}$; $\boldsymbol{A_{st}}$ à $\boldsymbol{l'ELS}) = \mathbf{10, 35}\ \boldsymbol{cm^2}$

- **Piédroit**

Les piédroits seront dimensionnés en flexion composée

b = 1,00 m H = 0,20 m d = 0,18 m

F_{c28} = 25 MPa F_e = 400 MPa F_{tj} = 2,1 MPA

F_{su} = 348 MPa F_{bu} = 14,17 MPa

- **A l'état limite ultime (ELU)**

M_u = 1,35 x G + 1,6 x Q

M_u = 1,35 x (0.638) + 1,6 x (-1.3) = -1,21 t.m

$N_u = 1{,}35 \times 2{,}76 + 1{,}6 \times 7{,}94 = 16{,}43\ t$

$$e_1 = \frac{M_u}{N_u} = \frac{-1{,}21}{16{,}43} = 0.07m$$

$$e_1 = d - \frac{h}{2} = 0{,}08\ m$$

$M = M_u + N_u \times e_2 = 1{,}21 + (16{,}43 \times 0{,}08) = 2{,}52\ t.m$

$$\mu_u = \frac{M_u \times 10^{-2}}{b \times d^2 \times F_{bu}}$$

$$\mu_u = \frac{1{,}21 \times 10^{-2}}{1 \times 0{,}18^2 \times 14{,}17}$$

$\mu_u = 0{,}064$

μ_u < 0,186 Donc pivot A pas d'aciers comprimés

$$\alpha_u = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2\mu_u}\right) = 1{,}25\left(1 - \sqrt{1 - 2 \times 0.064}\right) = 0{,}083$$

$z_u = d(1 - 0{,}4\alpha_u) = 0{,}18(1 - 0{,}4 \times 0{,}083) = 0{,}174\ m$

$$A_{st} = \frac{Mu}{z_u \times \sigma_s} = \frac{1{,}21 \times 10^{-2}}{0{,}174 \times 347{,}83} = 4{,}85\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 2{,}17\ cm^2$$

$A_{st} > A_{stmin}$ Donc la section d'acier retenue est $A_{st} = 4{,}85\ cm^2$

- **A l'état limite de service (ELS)**

$M_{ser} = G + 1{,}2S = 0.638 + 1{,}2 \times (-1{,}3) = 0{,}922\ t.m$

$N_{ser} = 2{,}76 + 1{,}2 \times 7{,}94 = 12{,}28\ t$

$$e_1 = \frac{M_u}{N_u} = \frac{0{,}922}{12{,}28} = 0.07m$$

$$e_1 = d - \frac{h}{2} = 0{,}08\ m$$

$$\overline{\alpha_{ser}} = \frac{n \times \overline{\sigma_{bc}}}{n \times \overline{\sigma_{bc}} + \sigma_{st}} = \frac{15 \times 15}{15 \times 15 + 201{,}63} = 0{,}527$$

$y_{ser} = \overline{\overline{\alpha_{ser}}} \times d = 0{,}527 \times 0{,}18 = 0{,}095\ m$

$$z_{ser} = d - \frac{y_{ser}}{3} = 0{,}18 - \frac{0{,}095}{3} = 0{,}148\ m$$

$$M_{serb} = \frac{bd^2}{2} \times \overline{\sigma_{bc}} \times \overline{\alpha_{ser}} \left(1 - \frac{\overline{\alpha_{ser}}}{3}\right) = \frac{1 \times 0{,}18^2}{2} \times 15 \times 0{,}527 \left(1 - \frac{0{,}527}{3}\right)$$

$M_{serb} = 10{,}5\ t.m$

$M_{ser} < M_{serb}$ donc pas d'aciers comprimés

$$A_{st} = \frac{M_{ser}}{z_{ser} \times \sigma_s} = \frac{0{,}922 \times 10^{-2}}{0{,}148 \times 201{,}63} = 3{,}08\ cm^2$$

Condition de non fragilité

$$A_{stmin} = 0{,}23 \times b_0 \times d \times \frac{f_{t28}}{f_e} = 0{,}23 \times 1.1 \times 0{,}18 \times \frac{2{,}1}{400} = 2{,}39\ cm^2$$

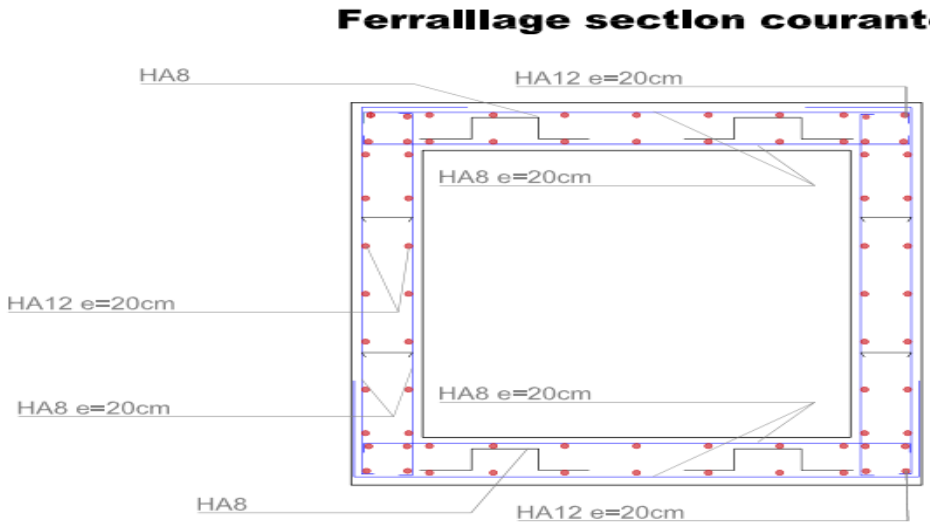
$A_{st} > A_{stmin}$ Donc la section d'acier retenue est $A_{st} = 3{,}08\ cm^2$

$\boldsymbol{A_{st} = max\ (A_{st}}$ à $\boldsymbol{l'ELU}$; $\boldsymbol{A_{st}}$ à $\boldsymbol{l'ELS)} = \mathbf{4,\ 85\ cm^2}$

Le tableau suivant récapitule les sections d'acier pour l'ensemble du ferraillage du dalot:

RECAPITULATIF DES FERRAILLAGES		
TABLIER	Inférieur	HA12, esp = 20 cm
	Supérieur	HA12, esp = 20 cm
	Transversal	HA8, esp = 20 cm
PIEDROITS	Intérieur	HA12, esp = 20 cm
	Extérieur	HA12, esp = 20 cm
	Transversal	HA8, esp = 20 cm
RADIER	Inférieur	HA12 esp = 20 cm
	Supérieur	HA8, esp = 20 cm
	Transversal	HA8, esp = 20 cm

Tableau 41: Récapitulatif des ferraillages du dalot



ANNEXE 6 : TABLEAU DES SIGNALISATIONS VERTICALES

Panneaux/Types	Description	Nombre
AB4	Panneau « STOP », Arrêt aux amorces et aux intersections	5
	Arrêt à l'intersection, annonce le panneau AB4	1
A1a	Virage à droite	1
A1b	Virage à gauche	1
B14	Limitation de vitesse	4
B33	Fin de limitation de vitesse	4

EB10	Entrée d'agglomération	4
EB20	Sortie d'agglomération	4
C20a	Passage pour piéton	4
A13a	Panneaux de position indiquant un endroit traversé par les enfants	4

ANNEXE 7 : COUT ESTIMATIF DU PROJET

N°	Désignations	Unités	Quantités	P.U. (F CFA)	Montant (HT) F CFA
000 : INSTALLATION DE CHANTIER					
001	Installations générales de chantier	Ft	1	361 375 000	361 375 000
002	Repliement des installations de chantier	Ft	1	99 562 500	99 562 500
003	Sécurité et sureté des installations	Ft	1	15 487 500	15 487 500
Sous total 000					476 425 000
100 : TRAVAUX PREPARATOIRES					
101	Déforestage et débroussaillage avec essouchement	m²	70 000	186	23 020 000
102	Décapage de la terre végétale	m²	55 000	208	21 440 000

103	Abattage et dessouchage d'arbres de circonférence supérieure à 1m	U	26	60 500	1 573 000
104	Démolition d'ouvrages existants	m²	90	10 000	900 000
105	Scarification de la route existante	m²	63 000	1 081	108 103 000
106	Purge de mauvais sol	m3	26 348	1 500	39 522 000
Sous total 100					234 558 000
200 : TERRASSEMENTS					
201	Déblais	m3	10 128	2 500	25 319 700
202	Remblai d'emprunt	m3	18 146	6 500	217 951 555
203	Mise en forme et compactage de la plateforme	m²	102 100	2 081	512 470 100

204	Plus-value de transport des matériaux de déblai ou remblai pour des distances supérieures à 5 Km	m3×Km	300 000	200	60 000 000
Sous total 200					815 741 355
300 : CHAUSSEE					
301	Couche de base	m 3	-	15 165	-
302	Couche de fondation	m 3	36 372	13 668	497 128 942
304	Plus-value de transport des matériaux pour couche de chaussée sur une distance supérieure à 5 Km	m3×Km	300 000	300	90 000 000
Sous total 300					1 587 128 942

400 : REVETEMENT					
401	Fourniture et mise en œuvre de l'imprégnation (y compris bitume)	m 3	3 082	1 172	3 612 104
402a	Mise en œuvre de béton bitumineux	m 2	102 100	21 000	2 144 100 000
402b	Mise en œuvre de la Grave Bitume	m 2	102 100	14 000	1 429 400 000
404	Plus-value de transport des matériaux pour revêtement sur une distance supérieure à 5 Km	m3×Km	200 000	210	42 000 000
Sous total 400					6 319 112 104
500 : D RAINAGE, ASSAINISSEMENT ET PRO TECTION					
501	Fossé triangulaire en terre	Ml	8 000	1 087	8 696 000
502	Dalots cadre en béton arme (y compris armature: ratios = 110kg/m3) (02)	Ml	72	6 370 000	458 640 000

503	Caniveaux				-
503a	Caniveau 0,80 m x 0,60 m en béton armé	Ml	2 000	-	-
503b	Dallette de traversés sur caniveau	Ml	2 000	-	-
504	Protection				-
504a	Bordure de Type T2 CS2	Ml	2 800	19 669	55 073 200
504b	Bordure de Type P1	Ml	-	19 669	-
504c	Bordure de Type I2	Ml	-	19 669	-

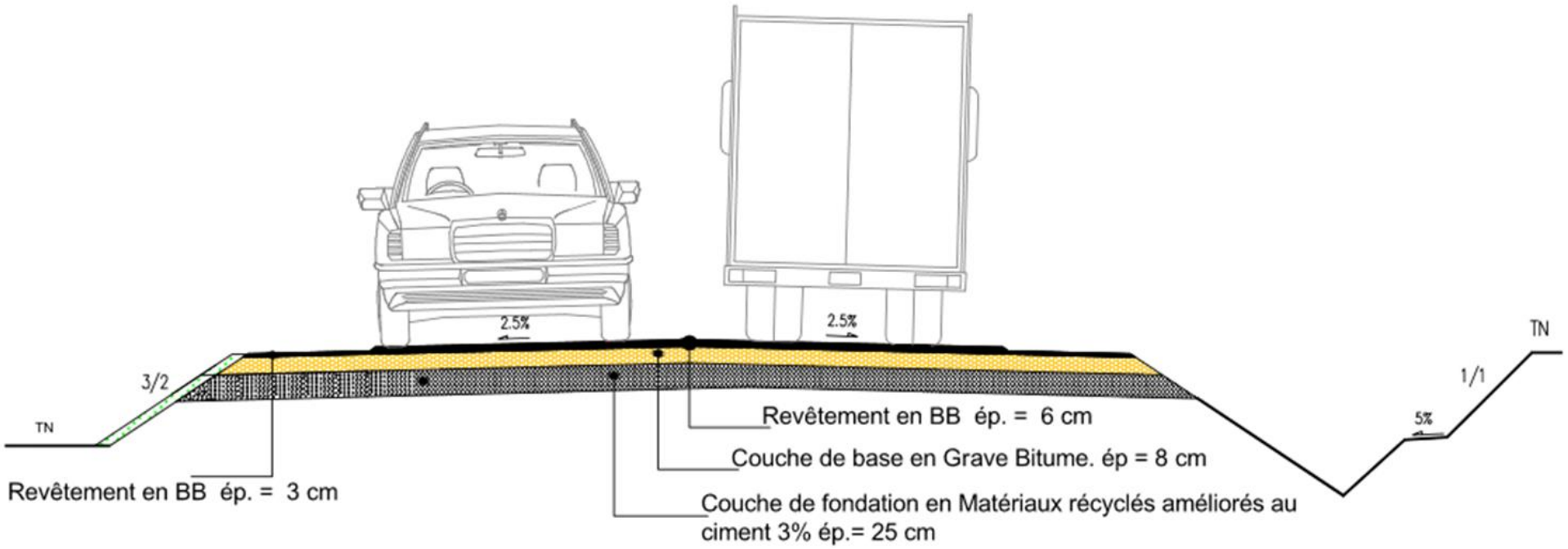
504d	Descente d'eau (y compris le dispositif d'entonnement et fixation au sol)	Ml	10 000	60 011	600 110 000
504e	Fourniture et mise en œuvre des gabions	m3	36	44 079	1 586 844
504f	Fourniture et mise en œuvre de perré maçonné	m²	130	37 000	4 810 000
504g	Fourniture et mise en œuvre d'enrochements	m 3	28	41 600	1 164 800
Sous total 500					1 130 080 844
600 : SECURITE ET SIGNALISATION					
601	Glissière de sécurité	Ml	2 500	21 749	54 372 500
602	Signalisation horizontale				-
602a	Bande de peinture blanche rétro réfléchissante continue d'axe (T3) ou discontinue (T1) d'épaisseur 12 cm	Ml	7 000	1 060	7 420 000
602b	Bande de peinture blanche rétro réfléchissante discontinue de rive de Type T2 d'épaisseur 12 cm	Ml	13 205	1 134	14 974 470
602c	Marquages spéciaux	m²	58	8 234	477 572
603	Signalisation verticale				-
603a	Fourniture et pose de Panneaux de type A	U	6	276 644	1 659 864

603b	Fourniture et pose de Panneaux de type "stop" ; AB4; B et C	U	17	276 644	4 702 948
603c	Fourniture et panneaux directionnel type D, E et EB	U	10	276 644	2 766 440
Sous total 600					86 373 794
700 : M ESURES ENVIRONNEMENTALES					
701	Gestion environnementale des travaux				
701a	Information et sensibilisation des travailleurs, des usagers et des riverains	Ft	1	20 000 000	20 000 000
701b	Suivi et surveillance environnemental du chantier	Ft	1	35 000 000	35 000 000
701c	Aménagements, équipements et services pour la sécurité des travailleurs	Ft	1	10 000 000	10 000 000
702	Aménagements à caractère environnemental et social		1		-
702a	Aménagement des gites et carrières	Ha	30	750 000	22 500 000

Sous total 700	87 500 000
TOTAL GENERAL EN F CFA HT HD	6 536 920 039

Tableau 42: Etude du coût estimatif du Projet

ANNEXE 8 : PROFILS EN TRAVERS



FIN DE L'ETUDE