



**ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A
BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME :
« TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME-PORTO NOVO (10KM)
ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO
NOVO, BENIN »**

**MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME D'INGÉNIEUR 2iE
AVEC GRADE DE
MASTER
SPÉCIALITÉ : GÉNIE CIVIL - BÂTIMENT ET TRAVAUX PUBLICS**

Présenté et soutenu publiquement le 22/01/2025 par :
ACAKPO Philippe Francis Akouété Joël (2022 0205)

Encadrant 2iE : **Maître-Assistant Philbert NSHIMIYIMANA (Enseignant-Chercheur à 2iE)**

Maître de stage : **Ing. Doris GNONLONFIN AYIKPE (Ingénieur Qualité à PORTEO-BTP Bénin)**

Jury d'évaluation du stage :

Président : **Dr. Diop MAMADOU**

Membres et correcteurs : **Dr. Césaire HEMA**

M. Mamadou Pousga Junior KABORE

Promotion [2024/2025]

CITATION

« Cela semble impossible jusqu'à ce qu'on le fasse »

Nelson MANDELA

DÉDICACES

A ma famille,

Particulièrement ma mère ADOUHOUEKONOU Flora ; mon père ACAKPO Claude, mes frères ASSOGBA Nelson, ASSOGBA David, ASSOGBA Fructueux et ACAKPO Josué ; qui ont toujours su faire montre d'une foi, d'un soutien et d'un amour indéfectible envers moi.

Que ce travail soit le tremplin vers l'aboutissement de vos vœux les plus chers.

Que la grâce de Dieu repose toujours sur vous.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements vont tout d'abord vers le Créateur, le Premier ingénieur de l'univers, sans l'aide de qui ce travail n'aurait pas été possible, et qui n'a jamais manqué d'étendre ses grâces dans ma vie.

Je tiens à adresser mes remerciements et ma profonde gratitude à :

- **L'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE)** pour la formation de qualité et les compétences que j'ai acquises durant mon cursus ;
- Mon Directeur de Mémoire, **Dr Philbert NSHIMIYIMANA**, pour sa disponibilité et ses remarques pertinentes ;
- **PORTEO BTP BENIN** à travers le Directeur de Projet, **M. Joseph AHONDOKPE**, pour cette opportunité qu'il m'a offerte en me permettant d'effectuer mon stage de fin d'études sur le projet dont il est le responsable.
- Mon maître de stage, **Ing Doris GNONLONFIN AYIKPE** et son assistant **M. Paul AHOUE TOHOU** pour leur disponibilité, leurs conseils, suggestions et commentaires qui ont été le fil conducteur de ce travail mais également pour leur dévouement et leur pédagogie tant sur les questions d'ordre théorique que pratique.
- **À toute ma famille et à la famille OKECHUKWU**, pour ce grand soutien spirituel et moral à mon égard.
- **A Péleg EMASSE et Majorie BAGBONON** ; collègues de stage, pour leur accompagnement
- **A l'Ing Roger DANVI**, pour sa disponibilité et son accompagnement
- **A l'Ing Rodolphe AMOUSSOU**, le Chef Labo pour ses éclaircissements et à tout le personnel de PORTEO BTP BENIN

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur l'analyse technique et analyse du cycle de vie d'une chaussée à base de grave améliorée au ciment et au bitume dans le cadre des « travaux de dédoublement de la route Sèmè - Porto Novo (10km) et construction d'un nouveau pont sur la lagune de Porto Novo » ; la capitale du Bénin. Réalisée en trois étapes, il s'agira d'abord d'effectuer une analyse structurale (dimensionnement), une analyse du cycle de vie (ACV) et une analyse financière (évaluation des coûts). L'analyse structurale a consisté à collecter préalablement des données ayant servi au dimensionnement de la chaussée du projet et fournies par la structure d'accueil (PORTEO BTP BENIN qui est l'entreprise réalisant les travaux). Ensuite, la structure de la chaussée proposée par l'entreprise a été considérée comme variante témoin. Elle est composée de 15cm de GNT, de 25cm de GTC, de 16cm de GB et de 6cm de BB. A partir de cette structure d'autres variantes de chaussées ont été dimensionnées à l'aide de la méthode française de dimensionnement et en utilisant le logiciel Alizé LCPC. Il s'agit de la variante 2 (V2) composée de 40cm de GTC, de 10cm de GB et de 8cm de BB ; et de la variante 3 (V3) composée de 35cm de GTC, de 14cm de GB et de 6cm de BB. L'ACV a consisté dans un premier temps à définir les activités entrant dans les différentes phases de vie des ouvrages. Puis les différents flux (matériaux utilisés, émissions de CO₂ et autres) observés durant les phases de vie des trois variantes ont été quantifiés. Ces quantités nous ont permis d'évaluer les indicateurs environnementaux définis par la norme NF P 01-010 (consommation des ressources énergétiques, pollution de l'air, consommation d'eau, épuisement des ressources, destruction de la couche d'ozone, production de déchets, formation d'ozone photochimique, acidification atmosphérique, changement climatique et pollution de l'eau) en multipliant les valeurs obtenues par les facteurs d'émissions fournis par les bases de données Diogen et Ecoinvent. L'évaluation de ces indicateurs a permis de constater que les valeurs des indicateurs d'impacts des variantes V2 et V3 sont plus faibles que celles de la variante V1. Compte tenu des valeurs d'impacts plus favorables de la variante V2, elle a été retenue comme moins polluante que V3 et V1. L'étude s'est achevée par une analyse financière qui a consisté à comparer les coûts de réalisation des trois variantes. De cette analyse, il ressort que les variantes V2 et V3 sont moins coûteuses que la variante V1 respectivement de 10,79% et 9,49%. Au final, notre étude nous a permis de conclure que la variante V2 est la chaussée produisant le moins d'impact sur l'environnement et la moins coûteuse.

Mots clés :

- Etude technique
- Analyse du cycle de vie
- Impacts environnementaux
- GNT améliorés
- Structure de chaussée

ABSTRACT

This study focuses on the technical and life cycle assessment aspect of a road pavement consisting of a layer of gravel stabilized by cement and bitumen within the framework of a project involving the “making of the Sèmè-Porto Novo road (10 km) into a dual carriageway and the construction of a new bridge over the Porto Novo lagoon” with Porto Novo the capital of Benin. Made in three steps, the work will be to realise a structural analysis, a life cycle assessment and a financial analysis. To realize the structural analysis, we firstly collect the using data provided by the project’s design, supplied by the hosting organization (PORTEO BTP BENIN, the company carrying out the work). The pavement structure proposed by the company was considered as the reference variant. It is made up of 15 cm of GNT, 25 cm of GTC, 16 cm of GB, and 6 cm of BB. Based on this structure, other pavement variants were designed using the French design method and the Alizé LCPC software. These include variant 2 (V2) composed of 40 cm of GTC, 10 cm of GB, and 8 cm of BB; and variant 3 (V3) composed of 35 cm of GTC, 14 cm of GB, and 6 cm of BB. A life cycle analysis (LCA) was performed on these three variants. The LCA first involved defining the activities involved in the different phases of the pavement's life. Then, the various flows (materials used, CO2 emissions, etc.) observed during the life phases of the selected pavement variants were quantified. These quantities allowed us to assess the environmental indicators defined by the NF P 01-010 (energy resources consumption, air pollution, water consumption, resource depletion, ozone depletion, waste production, photochemical ozone formation, atmospheric acidification, climate change and water pollution) by multiplying the quantities obtained with the emission factors defined by Diogen and Ecoinvent databases. The evaluation of these indicators revealed that the values of the impact indicators of variants V2 and V3 are lower than those of variant V1. V2 was selected as less polluting than V3 and V1 because of the more favorable values of variant it gives. The evaluation of these indicators led to the conclusion that variants V2 and V3 are less polluting, respectively, by 4.687% and 2.549% compared to variant V1. The study concluded with a financial analysis comparing the costs of the three variants. This analysis revealed that variants V2 and V3 are less costly than variant V1, respectively, by 10.79% and 9.49%. Ultimately, our study concluded that variant V2 is the pavement with the least environmental impact and the lowest cost.

Keywords :

- Structural analysis
- Life Cycle assessment
- Environmental Impacts
- GNT stabilization
- Pavement structure

SOMMAIRE

CITATION	i
DÉDICACES.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
RÉSUMÉ	iv
ABSTRACT	v
SOMMAIRE.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES ANNEXES	ix
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATION	x
I. INTRODUCTION	1
II. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ETUDE	2
III. APPROCHE METHODOLOGIQUE GENERALE DE L'ETUDE	8
IV. ETUDE TECHNIQUE DES VARIANTES DE CHAUSSEE	10
V. ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES VARIANTES DE CHAUSSEE	21
VI. ETUDE FINANCIERE DES VARIANTES DE CHAUSSEE	46
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	48
BIBLIOGRAPHIE.....	49
ANNEXES.....	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Récapitulatif des modules des matériaux	14
Tableau 2 : Récapitulation des valeurs admissibles obtenues	16
Tableau 3 : Epaisseurs des couches de la variante V1 (variante du projet) et proposition des épaisseurs des variantes V2 et V3	16
Tableau 4 : Résultats des contraintes et déformations pour les variantes V1, V2 et V3.....	18
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des épaisseurs retenues des couches des variantes	20
Tableau 6 : Synthèse des principaux outils d'évaluation environnementale globale	22
Tableau 7: Volumes des matériaux à transporter par m ³	33
Tableau 8 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour 1 tonne de matériau	33
Tableau 9 : Récapitulatif des valeurs des indicateurs durant la phase d'extraction	34
Tableau 10: Valeurs des indicateurs environnementaux pour 1 tonne de matériau bitumineux produit	34
Tableau 11 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de production des matériaux bitumineux	35
Tableau 12 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de transport.....	36
Tableau 13 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de mise en œuvre.....	37
Tableau 14 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de fin de vie	38
Tableau 15 : Valeurs des indicateurs durant toute la durée de vie de chaque variante	39
Tableau 16 : Evaluation des impacts par rapport à la variante du projet.....	39
Tableau 17 : Système de notation.....	44
Tableau 18 : Résultats des notations appliqués à notre étude.....	45
Tableau 19 : Cout de réalisation des différentes variantes étudiées	46
Tableau 20 : Ecart relatifs des coûts	47

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la structure d'accueil (Latitude 2°23'46.9''E et Longitude, 6.21'13.94''N)	3
Figure 2 : Cadre illustrant la zone du projet allant de Sème vers Porto-Novo	5
Figure 3 : Précipitation moyenne mensuelles du département de l'Ouémé	6
Figure 4 : Température moyennes mensuelles du département de l'Ouémé.....	6
Figure 5 : Organigramme synthétique de l'étude	9
Figure 6 : Hypothèses de calculs pour les couches de plateforme, de fondation et de base.....	15
Figure 7 : Hypothèses de calculs pour les couches en bitume.....	15
Figure 8 : Valeur des sollicitations de la variante projet V1	17
Figure 9 : Valeur des sollicitations de la variante V2.....	17
Figure 10: Valeur des sollicitations de la variante V3.....	17
Figure 11 : Valeur des sollicitations de la variante V3 après itération de la couche de GB.....	18
Figure 12: Valeur des sollicitations de la variante V2 pour 6cm de BB	19
Figure 13 : Valeur des sollicitations de la variante V3 pour 6cm de BB	20
Figure 14 : Cycle de vie d'un produit.....	26
Figure 15 : Phase de l'analyse du cycle de vie	28
Figure 16 : Représentation schématique du cycle de vie de la chaussée.....	32
Figure 17 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase d'extraction	40
Figure 18 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase de transformation	41
Figure 19 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase de trnsport	41
Figure 20 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase de mise en oeuvre.....	42
Figure 21 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase de fin de vie.....	42
Figure 22 : Graphique des valeurs des indicateurs sur l'ensemble du cycle de vie	43

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE 1 : DIMENSIONNEMENT.....	51
Annexe 1.1 : Charge de référence utilisé par le logiciel Alizé LCPC	51
Annexe 1.2 : Jumelage des roues.....	51
Annexe 1.3 : Comparaison des valeurs des contraintes de la variante V3 pour la structure de 6cm de BB et la structure de 8cm de BB	52
ANNEXE 2 : ANALYSE DY CYCLE DE VIE	53
Annexe 2.1 : Quantification des matériaux à mettre en œuvre	53
Annexe 2.2 : Valeur des indicateurs matériaux durant la phase d'extraction	55
Annexe 2.3 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la mise en œuvre du béton bitumineux	56
Annexe 2.4 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la mise en œuvre de la GB.....	57
Annexe 2.5 : Quantités d'éléments émis durant la phase de transport due à la combustion du diesel (Ecoinvent 3.5)	57
Annexe 2.6 : Coefficients de pondération (Ecoinvent 3.5)	59
Annexe 2.7 : Energie consommée et CO ₂ émis durant la phase de transport carrière à la centrale	61
Annexe 2.8 : Energie consommée en MJ et CO ₂ émis en kg eq.CO ₂ durant la phase de transport de la centrale au chantier et de la carrière au chantier.....	62
Annexe 2.10 : Energie consommée en MJ et CO ₂ émis en kg eq.CO ₂ durant le compactage.....	64
Annexe 2.12: Energie consommée et CO ₂ émis durant la phase de démolition et/ou recyclage	69
ANNEXE 3 : RESULTATS DES ESSAIS FAIT SUR LES MATERIAUX AU LABORATOIRE PAR L'ENTREPRISE PORTEO BTP BENIN.....	70
Annexe 3.1 : Identification complète de matériaux GNT	70
Annexe 3.2 : Identification complète de matétiaux – GNT amélioré au ciment	71
Annexe 3.3 : Contrôle du dosage en ciment.....	72
Annexe 3.4 : Mesure de la teneur en eau in-situ	73
Annexe 3.5 : Imprégnation, accrochage et contrôle du dosage en liant	74
ANNEXE 4 : MISE EN OEUVRE DE LA CHAUSSEE	75
Annexe 4.1 : Collectes de données sur le projet.....	75
Annexe 4.2 : Malaxage de la couche de GNT crue par la niveleuse	75
Annexe 4.3 : Mise en œuvre de la couche de GNT améliorée au ciment.....	76
Annexe 4.4 : Emission de poussière due à l'épandage du ciment	76
Annexe 4.5 : Malaxage du matériau traité au ciment à l'aide d'une recycleuse	77
Annexe 4.6 : Application de l'émulsion	77
Annexe 4.7 : Mise en œuvre de la couche de GB.....	78
Annexe 4.8 : Contrôle des épaisseurs de chaussées exécutées	78

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATION

ACV	: Analyse du Cycle de Vie
ADEME	: Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie
BB :	: Béton bitumineux
CAM	: Coefficient d'Agressivité Moyen
CBR	: Californien Bearing Ratio
CEBTP	: Centre Expérimental de Recherches et d'Etudes en Bâtiment et Travaux
dm³	: Décimètre cube
EPE	: Evaluation de la Performance Environnementale
GB :	: Grave Bitume
GTA	: Grave Non Traité amélioré
GTC	: Grave Non Traité crue
GNT :	: Grave Non Traité
GWP	: Global Warming Potentials
ISO	: International Organization for Standardization
Kg	: Kilogramme
Km	: Kilomètre
L	: Litre
LCPC	: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
m²	: mètre carré
m³	: mètre cube
MIPS	: Material Input Per Unit of Service
OCDE	: Organisation for Economic Co-operation and Development
ONU	: Organisation des nations Unies
PL	: Poids Lourd
PST	: Partie Supérieure de Terrassement
SETRA	: Services d'Etude Technique des Routes et Autoroutes
T	: Tonnes
t/m³	: Masse volumique
TMJA	: Trafic Moyen Journalier Annuel
VL	: Véhicule Léger

I. INTRODUCTION

L'un des axes de développement du continent africain passe par la construction d'ouvrages routiers. Ces ouvrages doivent respecter des conformités réglementaires locales et internationales. Aussi, les acteurs de la construction se doivent de tenir compte des défis environnementaux. Ils se doivent de pouvoir réaliser des ouvrages respectant les normes de sécurité et de résistances prédéfinies tout en s'alignant aux exigences du développement durable. Il est impératif que les entreprises de travaux routiers intègrent dans leurs pratiques le respect de l'environnement, car construire sans préserver, c'est hypothéquer l'avenir de notre planète. Dans son livre, 'L'Homme re-naturé' (Pelt, 1977), Jean-Marie Pelt explore la relation entre l'homme et la nature et souligne l'importance de la préservation de l'environnement dans tous les aspects de l'activité humaine. Cela s'applique également au génie civil.

Il est donc important de définir des indicateurs environnementaux avec lesquels travailler pour y parvenir. Pour évaluer les différents impacts environnementaux induits par le secteur de la construction, des outils d'évaluation sont nécessaires. Ils s'appuient sur un ensemble de connaissances relatives à l'Écologie Industrielle. Parmi ces méthodes, l'Analyse de Cycle de Vie s'est imposée depuis plusieurs années comme une approche analytique intéressante pour évaluer les impacts environnementaux d'un produit. Les bases de données d'inventaire du cycle de vie qui regroupent les caractéristiques environnementales de produits, biens et services, documentent un certain nombre de substances (consommées ou émises dans l'environnement). Elle est centrée en construction routière sur les matériaux entrant dans la réalisation de la chaussée (Lee and Inaba, 2004).

Le traitement des sols au liant hydraulique a permis de réduire les quantités de matériaux utilisées et d'en améliorer leur performance (Collection Technique Cimbéton., 2009). Le projet sur lequel porte notre étude fait recours à cette méthode de réalisation. Cependant, l'utilisation et la production de ciment contribue fortement à la production de CO₂ qui contamine l'environnement et aggrave le changement climatique (Mohamad et al., 2022). C'est donc face à ce problème que notre étude a porté sur l'analyse du cycle de vie d'une chaussée routière traitée au ciment et au bitume. Cette étude s'intitule : **Analyse technique et analyse du cycle de vie d'une chaussée à base de grave amélioré au ciment et au bitume : « travaux de dédoublement de la route Sèmè-Porto Novo (10km) et construction d'un nouveau pont sur la lagune de Porto Novo Bénin ».**

L'objectif général de cette étude est de comparer différents types de chaussées pouvant être réalisées sur le tronçon SEME – PORTO-NOVO et produisant le moins d'impact sur l'environnement tout en abordant le volet qualité-coût. Afin d'y parvenir, il s'agira de :

- proposer des variantes de chaussée sur la base de la variante proposée par le projet ;
- faire une étude d'impact environnementale des variantes de chaussée par la méthode Analyse du Cycle de Vie ;
- faire une évaluation des coûts des différentes variantes

II. PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL ET DE LA ZONE D'ETUDE

2.1. Présentation de la structure d'accueil

Le Groupe PORTEO, dont le siège social est basé en Côte d'Ivoire est un conglomérat dont les sociétés interviennent sur toute la chaîne de valeur du secteur des infrastructures et de la construction. A travers les activités de ses sociétés regroupées en 4 pôles (Aménagement et Service, Construction, Industrie et Routes), le Groupe répond efficacement aux besoins de ses partenaires sur des sujets très diversifiés. Engagé auprès des dirigeants pour bâtir les États, le Groupe participe activement à la création de la richesse des États à travers le développement. Le Groupe PORTEO est présent en Côte d'Ivoire, au Bénin, et au Togo et s'appuie sur plus de 8 000 collaborateurs, issus de 23 nationalités différentes.

Depuis sa création en 2012, PORTEO BTP contribue à bâtir auprès des États, des infrastructures durables, innovantes et conformes aux standards internationaux les plus exigeants. Avec un chiffre d'affaires de près de 200 milliards de FCFA (310 millions d'euros) et d'un effectif de plus de 5 000 collaborateurs, PORTEO BTP dispose de plus de 1 430 engins de chantier et a réalisé plus de 2 000 kilomètres de projets routiers, contribuant au développement économique de la sous-région ouest-africaine.

Au fil d'une décennie d'activités, cette entreprise a su se démarquer en participant activement au développement économique et social des régions où elle est implantée. L'excellence dont elle fait preuve de même que la qualité et son engagement dans la réalisation de ses ouvrages lui ont permis, pour la troisième année consécutive, d'être reconnue par l'État ivoirien dans le Top Trois des Meilleures Entreprises œuvrant dans le secteur des Routes et des Ouvrages d'Art de Côte d'Ivoire.

Installé également au Bénin, PORTEO-BTP est située à Cotonou – immeuble PORTEO, Les Cocotiers HI 3 AVENUE Jen Paul II, Route de l'aéroport – 01 BP 9138.

Web : <http://porteo-btp.com> / Tel : +229 21313149 / +229 69444777

La figure 1 ci-dessous présente la localisation des locaux de PORTEO BTP au Bénin.

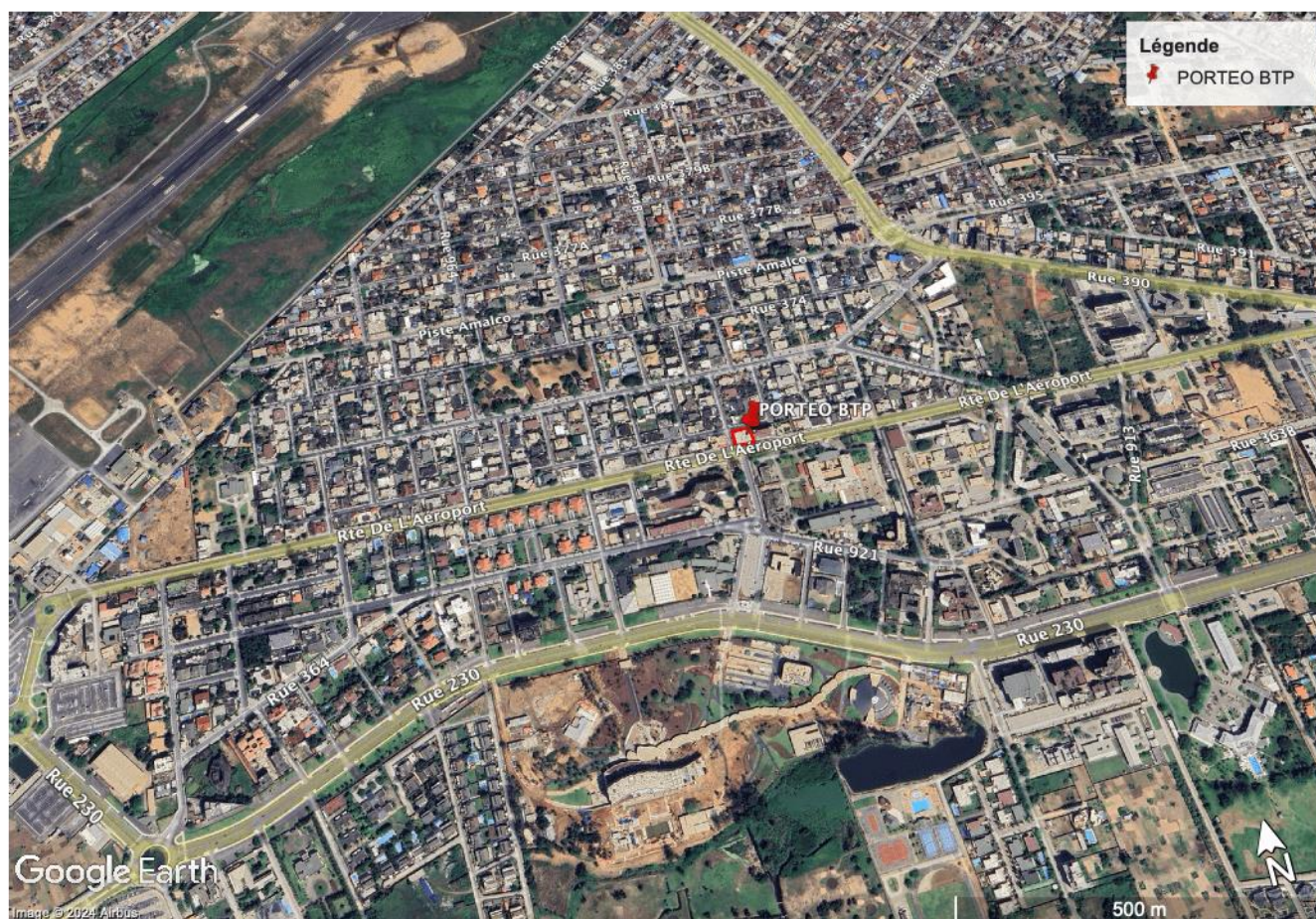


Figure 1 : Localisation de la structure d'accueil (Latitude 2°23'46.9''E et Longitude, 6.21°13.94''N)

2.2. Présentation de la zone du projet :

2.2.1. Contexte et justification du projet

Dans l'optique d'assurer le développement du pays, le gouvernement béninois a mis sur pied un programme d'action du gouvernement PAD. Ce programme reparti sur trois volets est appliqué et suivi de manière rigoureuse. Les résultats du premier volet de ce programme (entre 2016 et 2022), ont permis d'entamer le second volet qui s'étendra de 2022 à 2026 durant laquelle il s'agira pour le gouvernement béninois de :

- Relancer l'économie avec des investissements massifs dans les secteurs porteurs de croissance
- S'assurer d'une bonne gestion des finances publiques
- Mettre en place des infrastructures de base indispensables au développement socioéconomique
- Reconstruire l'école béninoise
- Valoriser l'art, la culture et l'artisanat

Parmi les nombreuses infrastructures qui seront réalisées durant cette phase, nous retrouvons les travaux de dédoublement de la route Sèmè - Porto Novo (10 km) et la construction d'un nouveau pont sur la lagune de Porto Novo. La réalisation de cet ouvrage contribuera à réduire la pression sur le réseau routier avec des impacts positifs sur le temps du trajet, le cout du transport et les effets sur l'environnement. Les objectifs visés par ce projet sont notamment de :

- Faciliter la circulation et améliorer la sécurité routière entre les villes de Cotonou et de Porto-Novo
- Promouvoir le commerce local et améliorer les conditions de vie des populations de la localité
- Améliorer les performances du corridor Abidjan- Lagos

2.2.2. Présentation de la zone du projet

La zone du projet est située dans le département de l'Ouémé, au Sud du Bénin sur la côte Atlantique. Le tronçon du projet est long de 10Km et relie la localité de Sèmè à la ville de Porto Novo comme le présente la figure 2 ci-dessous.

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

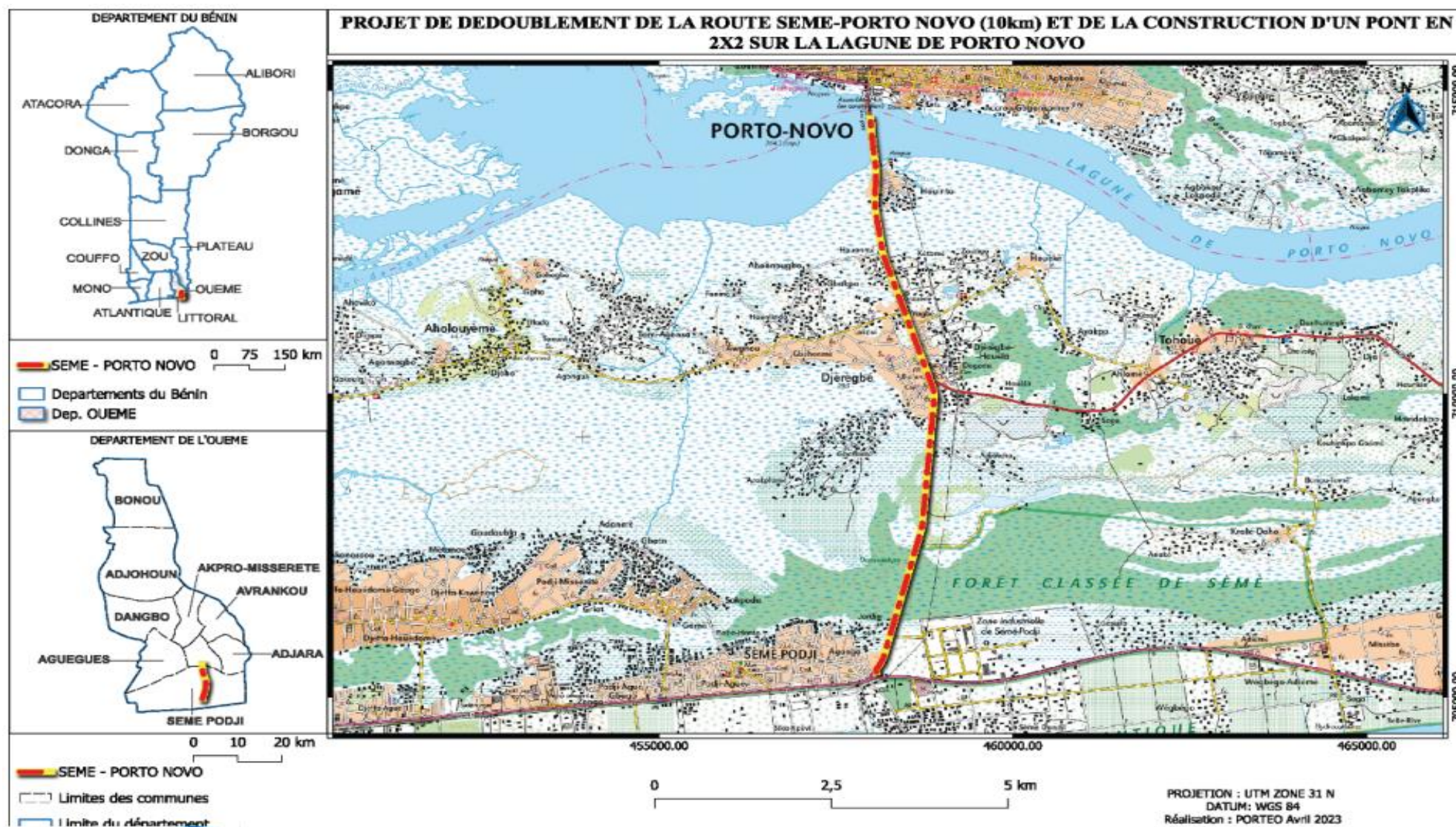


Figure 2 : Cadre illustrant la zone du projet allant de Sème vers Porto-Novo

Source : Présentation du projet PORTEO BTP BJ07

2.3. Caractéristiques physiques de la zone du projet

Les informations tirées du rapport hydraulique et hydrologique du projet de dédoublement de la route Sèmè-Porto Novo (10 Km) et construction d'un nouveau pont sur la lagune de Porto Novo nous ont permis de retenir pour la caractérisation du milieu les données suivantes :

2.3.1. Régime climatique

La zone du projet s'étale sur le bassin de l'Ouémé. Le climat qui règne est de type subéquatorial avec quatre (4) saisons d'inégale répartition dont deux saisons sèches et deux saisons pluvieuses.

Le plateau de Porto Novo reste une zone bien arrosée avec des précipitation importantes.

Les figure 3 et 4 présentent respectivement les précipitations et les températures mensuelles du département de l'Ouémé.

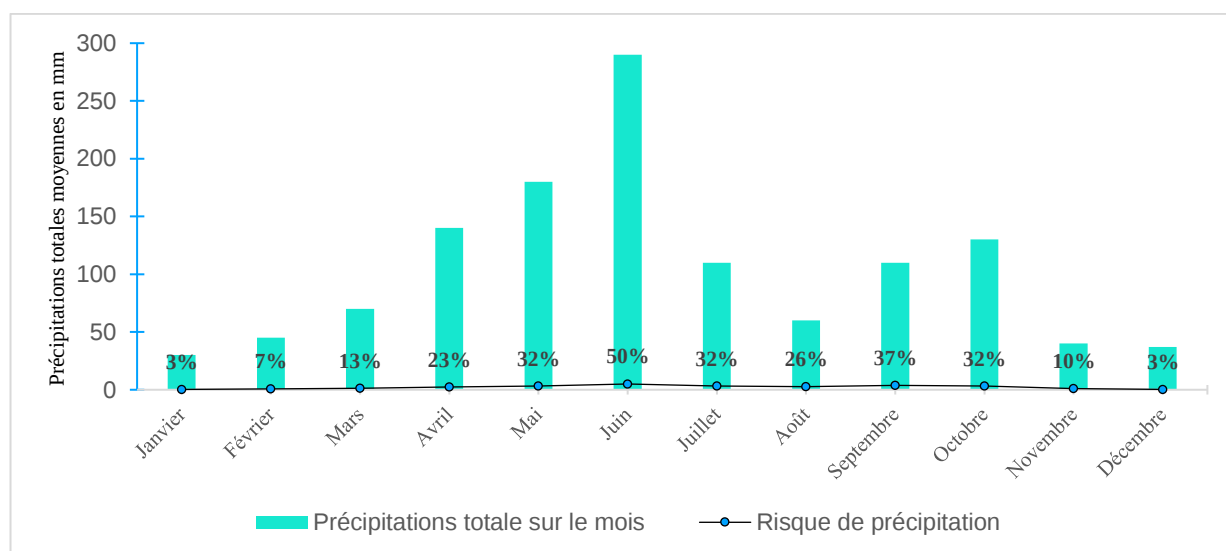


Figure 3 : Précipitation moyenne mensuelles du département de l'Ouémé

Source : Rapport d'études hydraulique et hydrologique du projet - PORTEO BTP BJ07

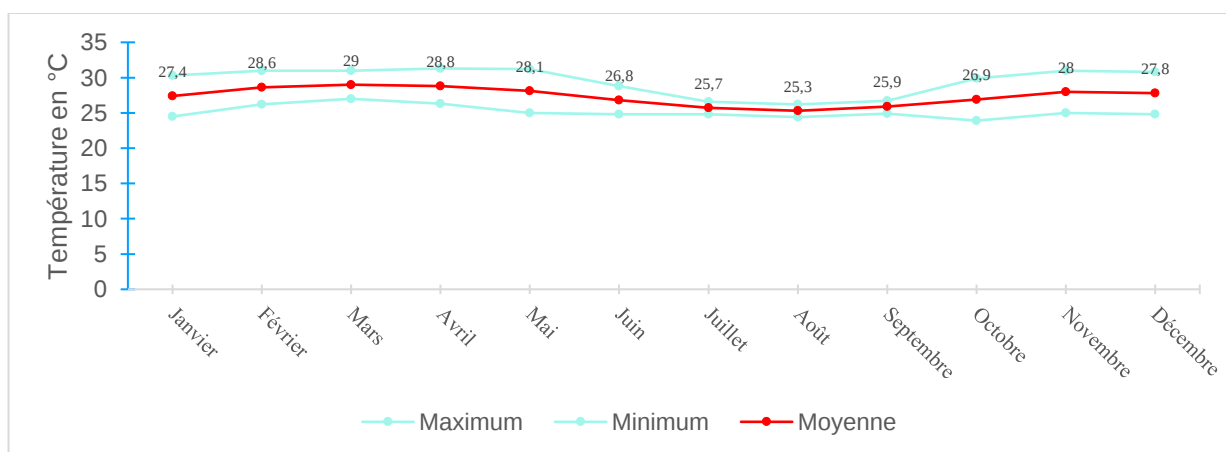


Figure 4 : Température moyennes mensuelles du département de l'Ouémé

Source : Rapport d'études hydraulique et hydrologique du projet - PORTEO BTP BJ07

2.3.2. Végétation de la zone du projet

La végétation est dominée :

- Dans la zone sableuse par un tapis herbacé faiblement enraciné, de vastes cocoteraies, quelques ilots de palmerais naturelles ou plantées, des essences naturelles ont fait place aux essences importées telles que le fila, l'eucalyptus, et l'acacia qui pour la plupart sont des domaines appartenant à l'Etat (Direction des Eaux et Forêts ou Direction de la Recherche Agronomique) ;
- Dans les zones basses par des forêts marécageuses à raffia (*Raphia sudanaia*) dans lesquelles subsistent encore quelques espèces telles que *Acrostichum arum*, *Ficus consensus*, *Symphonia globalisera*, *Raphia* espèces menacées de disparition du fait de la pression exercée par les populations riveraines ;
- Dans les zones marécageuses par quelques bouquets d'*Andropogon gayanus*, des pieds isolés de rôniers (*Borassus aethiopum*) et de cyperaceae. C'est aussi le domaine réservé à la canne à sucre et à quelques essences aquatiques dont l'une est localement appelée « afléma ».

2.3.3. Sol de la zone de projet

Du fait de son relief, la zone du projet ne dispose que de sols résultants essentiellement du lessivage ou de la sédimentation. Ils sont pour la plupart hydromorphes et très pauvres en éléments nutritifs et en matériaux organiques. On distingue :

- Les sols hydromorphes peu évolués et donc pauvres, formés sur sable marin
- Les sols lessivés à tendance podzolique formés sur le quaternaire
- Les sols pseudo-gley formés sur des matériaux sabla-argileux

Très peu de sols sont favorables ou marginalement aptes à la production vivrière. Par contre, ils sont apparemment favorables aux palmiers à huile, cocotiers et canne à sucre qui s'y développent bien.

2.3.4. Relief

La zone du projet est située sur la plaine côtière encastrée dans un complexe de plans d'eau (océan Atlantique, lagune de Porto Novo, fleuve Ouémé et lac Nokoué). Le relief très bas varie entre 3 et 8m environ d'altitude. Il est majoritairement composé de marécages, de sables fins inaptes aux activités agricoles.

2.3.5. Etats des lieux

La zone du projet abrite un ouvrage routier et un pont préexistant. La chaussée préexistante est composée de 18cm de GNT en couche de fondation, 17cm de GNT en couche de base et 7cm de BB en revêtement.

Etant donnée que le dimensionnement du pont était toujours en cours lors de notre stage, nous n'avons pas eu de données sur ce dernier. Notre étude a donc porté essentiellement sur la chaussée routière.

III. APPROCHE METHODOLOGIQUE GENERALE DE L'ETUDE

L'objectif général de cette étude est de réaliser une analyse du cycle de vie de chaussées composées de couche de GNT amélioré au ciment. Plus spécifiquement, il s'agit de comparer différentes chaussées traitées au ciment, pouvant être réalisées sur le tronçon SEME – PORTO-NOVO et produisant le moins d'impact sur l'environnement. L'étude se fera en trois étapes :

➤ Proposer des variantes de structures de chaussées

Pour la bonne réalisation de cette étape, il faudra :

- Récouter les données de dimensionnement de la chaussées existantes auprès des topographes et des géotechniciens de l'entreprise,
- Faire de la recherche documentaire sur la méthode de dimensionnement utilisée sur ce projet
- Proposer des variantes du projet en se basant sur la méthode utilisée par le projet et vérifier les calculs

➤ Etude de l'impact environnemental des variantes proposées

Pour la bonne réalisation de cette étape, il faudra :

- Faire une recherche bibliographique sur les méthodes et outils utilisés pour une étude d'impact environnemental d'un projet
- Faire une comparaison des principaux outils d'évaluation d'impact environnemental utilisés
- Définir les indicateurs à étudier pour l'outil retenu
- Evaluer les impacts environnementaux des variantes de chaussées prédéfinies à l'aide de l'outil choisi

➤ Réalisation d'une étude financière

Pour la bonne réalisation de cette étape il faudra :

- Calculer le coût de réalisation de chaque variante en se basant les coûts définis par le projet
- Comparer les coûts obtenus et faire une interprétation

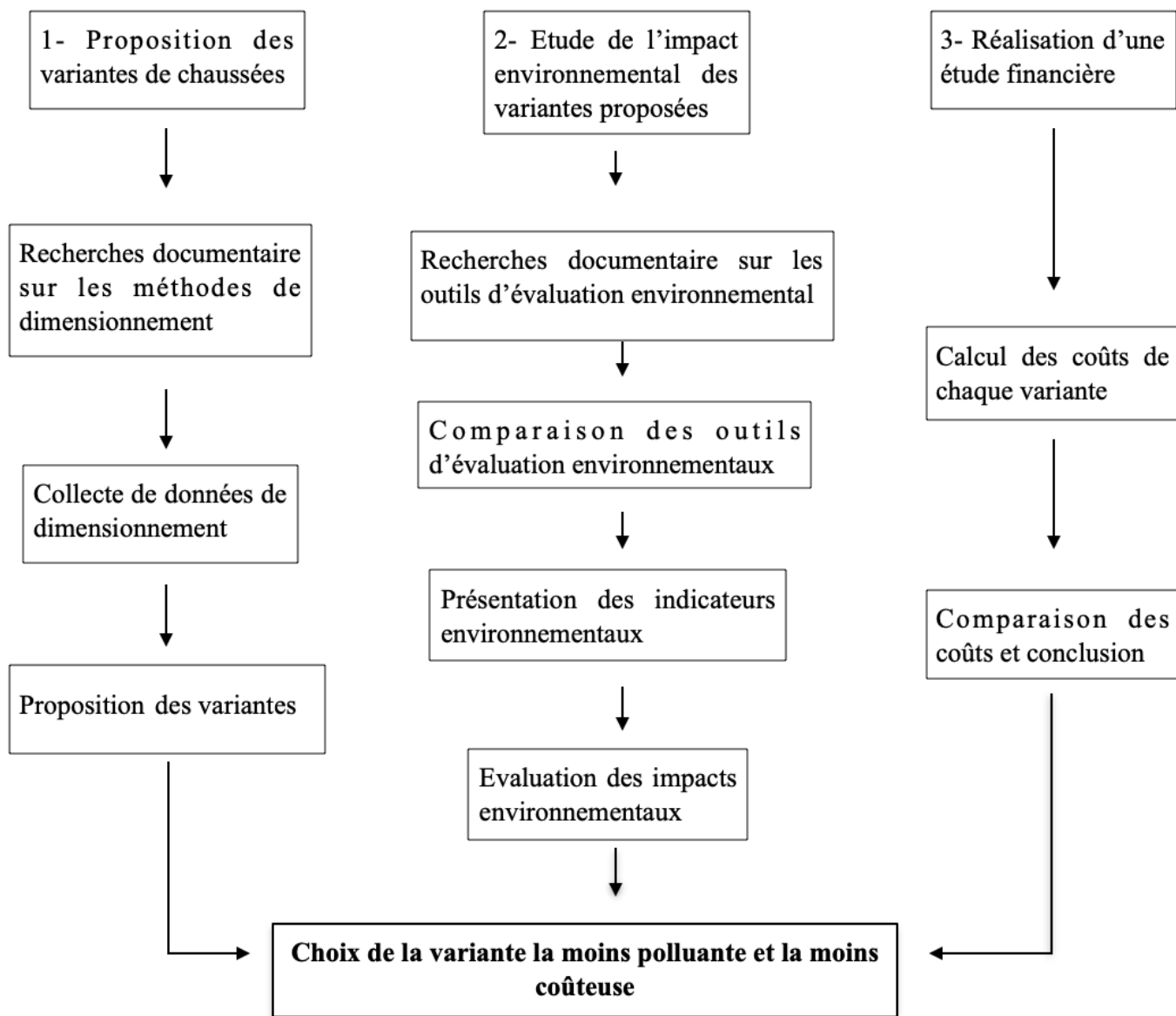


Figure 5 : Organigramme synthétique de l'étude

IV. ETUDE TECHNIQUE DES VARIANTES DE CHAUSSEE

Introduction

Sous l'effet des sollicitations externes (environnementales, conditions de chargements, etc.), les structures de chaussées sont soumises à des phénomènes complexes (mécaniques, thermiques, physiques et chimiques) qui apparaissent sous formes de déformations et engendrent des désagréments sur les chaussées. Le but du dimensionnement des chaussées est de concevoir une structure capable de supporter un type de trafic pour une durée de vie définie.

Différentes méthodes de dimensionnement ont été développées à cet effet ; regroupées en deux familles. Il s'agit de la méthode empirique (approche dérivée des études expérimentales sur les performances des chaussées) et de la méthode théorique ou méthodes dites « rationnelles » (approche basée sur l'étude théorique du comportement des chaussées).

4.1. Généralités et méthodes de dimensionnement

Dans cette rubrique il sera question d'énoncer l'existence de différentes méthodes de dimensionnement. Cependant les forces et les faiblesses de ces différentes méthodes ne seront pas abordées car il ne s'agit pas ici d'une comparaison des différentes méthodes de dimensionnement entre elles. Parmi les méthodes de dimensionnements qui existent, nous pouvons citer :

4.1.1. L'approche empirique :

Devant la complexité des problèmes observés, les méthodes de dimensionnement développées sont basées sur des règles empiriques tirées de l'observation du comportement en service des structures de chaussée ou de sections expérimentales. Cette méthode présente des limites qui sont d'autant plus visibles que de nouveaux types de structures et des matériaux plus performants se développent et que le trafic est en constante augmentation. Parmi les méthodes de dimensionnement empirique, nous retrouvons :

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

La méthode dite CBR (California Bearing Ratio) se base sur l'essai CBR. Ce dernier consiste à poinçonner un échantillon du sol support en compactant les éprouvettes de 90% à 100% de l'optimum Proctor modifié (OPM) sur une épaisseur d'au moins 15cm (Parey and Leger, 1971).

L'épaisseur totale du corps de chaussée, à mettre en œuvre, est évaluée comme suit :

$$e = \frac{100 + [75 + 50 \log(N/10)]\sqrt{P}}{(CBR) + 5}$$

avec :

e : Épaisseur équivalente

I_{CBR} : Indice de portance Californien (%).

P = poids de la roue maximale en tonnes (6,5 tonnes)

N = Nombre de véhicules de plus de 3 tonnes par jours

- **La méthode d'aménagement des routes revêtus à l'aide du catalogue du CEBTP :**

La méthode utilisée est celle du Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux du CEBTP. Ce guide comporte un catalogue de structures de chaussée qui est un tableau à double entrée trafic-sol qui permet de déterminer l'épaisseur des différentes couches. Il met à la disposition des ingénieurs projeteurs des structures pré-calculées et testées par l'expérience (CEBTP, 1984).

- **La méthode de dimensionnement [AASHTO] :**

La méthode américaine de dimensionnement des chaussées AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) est basée sur une analyse empirique des résultats des essais de l'AASHTO Road test réalisés à la fin des années 1950 sur plus de 500 sections tests de chaussées. A l'heure actuelle, bien que la dernière version du guide de dimensionnement date de fin 2002, la version de 1993 reste encore la plus utilisée.

Dans cette version de 1993, aussi bien pour les chaussées souples que rigides, le dimensionnement se fait à l'aide d'équations de régression traduites sous forme d'abaques et de formules permettant de choisir l'épaisseur de la chaussée en fonction du trafic cumulé considéré et la dégradation de la qualité d'usage de la route. La notion de qualité d'usage de la route est définie par l'indice PSI (Present Service ability Index) qui varie de zéro (chaussée impossible à circuler) à six (chaussée en parfait état). Cette échelle a été déterminée sur la base des dégradations de la chaussée et de leurs effets perçus par les usagers. Les données de trafic sont converties en nombre cumulé d'essieux standards W18. Pour une structure de chaussée choisie, un nombre structurel SN (Structural Number) est calculé et comparé à sa valeur minimale. Cette valeur minimale correspond à la somme pondérée des épaisseurs des différentes couches, et tient compte de la nature des matériaux et des conditions de drainage de chaque couche (AASHTO, 1993). Cette méthode permet :

- d'établir des lois d'équivalence entre essieux de charges différentes,
- de relier statistiquement les déflexions à la structure de la chaussée,
- de définir un indice de qualité de service des chaussées PSI (*ou* Present Service ability Index) ou indice de viabilité et un indice d'épaisseur pouvant s'exprimer par une forme linéaire des épaisseurs des différentes couches.

4.1.2. L'approche théorique :

L'approche théorique s'intéresse en premier lieu à établir un modèle de chaussée qui reproduit au mieux le fonctionnement mécanique et l'état de contrainte de la structure sous l'effet d'un chargement donné (trafic). Il s'agit d'une branche particulière de la mécanique des Milieux Continus, dite « mécanique des chaussées ». La première étape dans cette approche est d'établir expérimentalement, les lois de comportement des matériaux et d'en déduire leurs caractéristiques mécaniques qui seront utilisées dans la formulation mathématique du problème posé. Une seconde étape du modèle mécanique a pour but de déterminer les contraintes et les déformations dans les matériaux de chaussées et le sol support, ces dernières sont alors comparées aux contraintes et déformations admissibles. Comme méthode de dimensionnement rationnelles, nous avons :

La méthode française de dimensionnement [LCPC – SETRA] :

Les fondements de la méthode de dimensionnement des chaussées ont été dégagés dès le début des années 1970. Dans la démarche adoptée, la détermination des épaisseurs des différentes couches de chaussée ainsi que leurs caractéristiques mécaniques des matériaux relèvent, soit d'une approche expérimentale empirique, soit de calculs de vérification (méthode rationnelle). Par opposition aux modèles empiriques, ces méthodes rationnelles font appel à l'utilisation combinée de modèles mécaniques et de données expérimentales. C'est par le biais de modèles de calculs qu'est vérifié le dimensionnement de la structure vis-à-vis des critères de durabilité.

D'un point de vue mécanique, la démarche de la méthode française de dimensionnement peut être scindée en deux étapes. Dans une première étape, il convient de calculer, sous l'effet de l'essieu standard de référence de 130 KN, la réponse d'une structure de chaussée choisie à priori (type de structure, matériaux et épaisseurs des couches constitutives). Ce calcul repose sur l'évaluation, sous l'effet d'une charge circulaire appliquée à la surface d'un massif multicouche, les champs de contraintes maximales dans les couches de matériaux et de sol. Dans ce calcul, la charge appliquée symbolise l'action de l'essieu de référence, et le modèle semi-analytique de Burmister, développé aux Etats-Unis en 1943, est utilisé pour obtenir la réponse mécanique. Dans une seconde étape, il s'agit de calculer les valeurs de sollicitations admissibles des matériaux de la structure, en fonction de leur localisation dans la structure, de leurs modes de dégradation (rupture par fatigue des couches en matériaux liés et orniérage du sol et des couches en matériaux non liés), et du trafic cumulé (nombre de poids lourds) devant circuler sur la chaussée pendant sa durée de vie sur une plate-forme.

La structure convient si les sollicitations induites par le passage de l'essieu de référence restent inférieures ou égales aux sollicitations admissibles pour chaque couche. Le choix de la structure finale se fait par calculs itératifs. Le calcul des valeurs admissibles s'appuie sur le comportement en fatigue des matériaux liés, traduisant la rupture d'une éprouvette en laboratoire pour l'application d'un grand nombre de

cycles de sollicitations, et sur le caractère plastique des matériaux non liés, expliquant l'apparition de déformation permanente (LCPC SETRA, 1994).

Conformément au projet en cours, il sera utilisé la méthode rationnelle française de dimensionnement pour nos calculs qui se feront grâce au logiciel ALIZE LCPC. Le logiciel Alizé-LCPC met en œuvre la méthode rationnelle de dimensionnement des structures de chaussées développée par le LCPC et le SÉTRA (LCPC SETRA, 1994).

La procédure utilisée pour l'utilisation du logiciel est :

- Insérer les paramètres de dimensionnement pour le calcul des valeurs admissibles (données relatives au trafic et au matériau)
- Insérer les données relatives à la structure de chaussée (module de Young, le coefficient de poisson, les conditions d'interfaces entre les couches) avec des épaisseurs de départ.
- Calculer et vérifier l'écart entre les valeurs des déformations, contraintes obtenues au niveau des différentes couches et les valeurs admissibles afin d'optimiser sur les épaisseurs.

4.2. Paramètres de dimensionnement

Les paramètres d'introduction dans le logiciel Alizé LCPC sont :

- L'épaisseur h de chaque couche
- Le module de Young E de chaque couche
- Le coefficient de poisson de chaque couche
- Le type d'interface entre les différentes couches (type de collage)
- Le module de Young E des matériaux peut être obtenu grâce à la relation suivante : $E = k * CBR$
- Le LCPC retient une valeur moyenne de $k = 5$ pour les matériaux non améliorés.
- Au niveau du sol support, le module E a été obtenu en multipliant k par le CBR le plus bas obtenu lors des sondages.
- Le coefficient de poisson ν est pris égal à 0,35 et les interfaces des couches sont collées.

Les données du trafic pour le dimensionnement se basent sur le projet portant sur les travaux de dédoublement de la route Sèmè Porto Novo (10Km) et construction d'un nouveau pont sur la lagune de Porto Novo.

- Le trafic moyen journalier annuel (TMJA) est de 803 PL/jour. Cette classe de trafic correspond à la classe T0 selon la classe du trafic du SETRA LCPC.
- La durée de service prise est 20 ans.
- Le risque de calcul est égal à 5%.

- Le taux d'accroissement est géométrique et est égal à 3%.
- Le coefficient d'agressivité moyen (CAM) est 2,49.
- La température est 30°C.
- Les interfaces entre les couches sont collées.
- La plateforme support de chaussée est de type PF2 de module E = 80MPa.

Les hypothèses de dimensionnements dans le cadre de cette étude sont également issues du projet en cours de réalisation. Les matériaux utilisés sont la grave non traitée provenant de la carrière de Dan (Bénin), du ciment NOCIBE CPJ35 et du bitume approvisionné à Abomey (Bénin) depuis le Togo.

Les valeurs des modules des matériaux considérés pour le dimensionnement sont présentées dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1 : Récapitulatif des modules des matériaux

Matériaux	Module E (MPa)
BB	2970
Grave Bitume	3520
GNT amélioré au ciment (GTC)	800
GNT	200
PST	80

Source : Note technique dimensionnement structure de chaussée route Sèmè Porto-Novo (9,5 MK)

Des hypothèses d'étude complémentaire pour le calcul des contraintes réelles dues au trafic par le logiciel Alizé sont présentées dans les annexes 1.1 et 1.2. qui présentent respectivement les charges de référence utilisées par le logiciel Alizé LCPC et le jumelage des roues.

Les calculs réalisés par le logiciel Alizée-LCPC sont :

- Pour la déformation admissible des matériaux granulaires non liés

$$\epsilon_{adm} = 12\,000 \times (NE)^{-0,222} \text{ (car trafic } T > T3)$$

Avec NE, le nombre équivalent d'essieux de référence correspondant au trafic poids lourds cumulé sur la durée initiale de calcul retenue (20ans).

- Pour la déformation admissible des matériaux bitumineux :

$$\epsilon_{adm} = \epsilon_6 (10^\circ\text{C} ; 25\text{Hz}) \times k\Phi \times (NE/10^6)^b \times k_r \times k_s \times k_c$$

Les coefficients k tiennent compte respectivement du risque, de la qualité de portance du support et du calage.

Les figures 6 et 7 présentent respectivement les hypothèses de calculs pour les couches de plateforme, de fondation et de base et les hypothèses de calculs pour les couches en bitume.

Trafic PL cumulé : données

- ☒ Moyenne journalière annuelle (MJA) : 803
- ☒ Taux accroissement géométrique (%) : 3
- ☐ Taux accroissement arithmétique (%) : 3,62
- ☒ Durée de service (années) : 20
- ☐ Trafic cumulé PL : 7,8756E+6

Valeurs admissibles : données

matériau type : gnt et sol (sol trafics moyen et fort)

coefficient CAM : 2,49

trafic cumulé NE : 1,9610E+7

Coefficient A : 12000

pente b : -0,222

Aide

- CAM : Guide lcpc-sétra 94
- CAM : Catalogue 1998
- Risques : Guide lcpc-sétra 94
- Risques : Catalogue 1998
- Structures catalogue 98

EpsilonZ admissible = 288,6 µdéf

Mémoriser

1-EpsiZ= 288,6

Calculer EpsiZ admissible

Calcul inverse NE = f(EpsiZ)

Bibliothèque des matériaux **Imprimer** **Enregistrer**

Pour modifier les valeurs standard : cliquer sur "gnt et sol"

effacer=dbl click **Fermer**

Figure 6 : Hypothèses de calculs pour les couches de plateforme, de fondation et de base

Trafic PL cumulé : données

- ☒ Moyenne journalière annuelle (MJA) : 803
- ☒ Taux accroissement géométrique (%) : 3
- ☐ Taux accroissement arithmétique (%) : 3,62
- ☒ Durée de service (années) : 20
- ☐ Trafic cumulé PL : 7,8756E+6

Valeurs admissibles : données

matériau type : bitumineux

coefficient CAM : 2,49

risque (%) : 5,0

trafic cumulé NE : 1,9610E+7

Epsilon6 (µdéf) : 100

-1/b : 5

Aide

- CAM : Guide lcpc-sétra 94
- CAM : Catalogue 1998
- Risques : Guide lcpc-sétra 94
- Risques : Catalogue 1998
- Structures catalogue 98

EpsilonT admissible = 107,7 µdéf

Mémoriser

2-EpsiZ= 288,6

3-EpsiT= 107,7

4-EpsiT= 107,7

Calculer EpsiT admissible

Calcul inverse NE = f(EpsiT)

Calcul inverse Risk = f(EpsiT)

Bibliothèque des matériaux **Imprimer** **Enregistrer**

effacer=dbl click **Fermer**

Figure 7 : Hypothèses de calculs pour les couches en bitume

Le calcul des valeurs admissibles nous a permis d'obtenir les valeurs admissibles suivantes :

- Pour le sol, les couches non liées et celles traitées, la contrainte admissible est $\epsilon_z = 288,6 \mu\text{déf}$ comme l'indique la figure 6.
- Pour les couches bitumineuses, la contrainte admissible est $\epsilon_t = 107,7 \mu\text{déf}$ comme l'indique la figure 7.

Les résultats des déformations admissibles pour chaque couche obtenue du logiciel Alizée-LCPC sont regroupées dans le tableau 2 ci-dessous.

Tableau 2 : Récapitulation des valeurs admissibles obtenues

Matériaux	Module E (MPa)
BB	107,7
Grave Bitume	107,7
GNT amélioré au ciment (GTC)	288,6
GNT	288,6
PST	288,6

4.3. Choix et dimensionnement des variantes

Le dimensionnement sera réalisé par la méthode française de dimensionnement à l'aide du logiciel ALIZE LCPC. La première variante (V1) est celle proposée par le projet en cours d'exécution. Elle est composée de 15cm de GNT, de 25cm de GTC, de 16cm de GB et de 6cm de BB.

En se basant sur les exigences du SETRA LCPC nous proposerons deux nouvelles variantes de chaussées. Pour la variante 2 (V2), nous aurons 40cm de GTC, 10cm de GB et 8cm de BB. Pour la variante 3 (V3), nous aurons 35cm de GTC, 10cm de GB et 8cm de BB. Le tableau 2 ci-dessous récapitule les épaisseurs des variantes proposées et les figures 8, 9 et 10 les valeurs des déformations observées.

Tableau 3 : Epaisseurs des couches de la variante V1 (variante du projet) et proposition des épaisseurs des variantes V2 et V3

Couches	V1	V2	V3
BB	6	8	8
GB	16	10	10
GTC	25	40	35
GNT	15	-	-

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (μ déf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μ déf)	SigmaZ (MPa)
0,060	2970,0	0,350	0,000	25,9	0,225	22,8	0,659
	collé		0,060	12,7	0,245	104,9	0,593
0,080	3520,0	0,350	0,060	12,7	0,284	85,4	0,593
	collé		0,140	-33,7	-0,012	87,3	0,318
0,080	3520,0	0,350	0,140	-33,7	-0,012	87,3	0,318
	collé		0,220	-89,3	-0,367	102,9	0,132
0,250	800,0	0,350	0,220	-89,3	-0,031	182,5	0,132
	collé		0,470	-110,4	-0,112	130,2	0,030
0,150	200,0	0,350	0,470	-110,4	-0,016	200,7	0,030
	collé		0,620	-109,2	-0,022	171,1	0,020
infini	80,0	0,350	0,620	-109,2	-0,002	263,1	0,020

Grandeurs affichées

☒ tableau 1 ☐ tableau 2

☐ tableau 3 ☐ tableau 4

☐ tableau 5 ☐ tableau 6

☐ tableau 7 ☐ tableau 8

Déflexion = 36,9 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 575,5 m

Figure 8 : Valeur des sollicitations de la variante projet V1

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (μ déf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μ déf)	SigmaZ (MPa)
0,080	2970,0	0,350	0,000	15,2	0,198	16,4	0,659
	collé		0,080	-3,6	0,159	110,5	0,516
0,100	3520,0	0,350	0,080	-3,6	0,179	93,6	0,516
	collé		0,180	-95,5	-0,369	119,1	0,191
0,200	800,0	0,350	0,180	-95,5	-0,006	233,8	0,191
	collé		0,380	-67,4	-0,043	109,7	0,062
0,200	800,0	0,350	0,380	-67,4	-0,043	109,7	0,062
	collé		0,580	-105,4	-0,113	120,3	0,020
infini	80,0	0,350	0,580	-105,4	-0,001	263,5	0,020

Grandeurs affichées

☒ tableau 1 ☐ tableau 2

☐ tableau 3 ☐ tableau 4

☐ tableau 5 ☐ tableau 6

☐ tableau 7 ☐ tableau 8

Déflexion = 35,8 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 503,6 m

Figure 9 : Valeur des sollicitations de la variante V2

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (μ déf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μ déf)	SigmaZ (MPa)
0,080	2970,0	0,350	0,000	20,2	0,221	11,2	0,659
	collé		0,080	-2,4	0,166	108,7	0,515
0,100	3520,0	0,350	0,080	-2,4	0,187	91,8	0,515
	collé		0,180	-98,3	-0,385	121,2	0,187
0,350	800,0	0,350	0,180	-98,3	-0,011	233,7	0,187
	collé		0,530	-120,6	-0,129	136,2	0,023
infini	80,0	0,350	0,530	-120,6	-0,002	299,9	0,023

Grandeurs affichées

☒ tableau 1 ☐ tableau 2

☐ tableau 3 ☐ tableau 4

☐ tableau 5 ☐ tableau 6

☐ tableau 7 ☐ tableau 8

Déflexion = 37,9 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 489,5 m

Figure 10: Valeur des sollicitations de la variante V3

L'allongement à la base du béton bitumineux, de la grave bitume et la déformation verticale à la surface de la couche de base, de la couche de fondation et de la plate-forme support de chaussée sont obtenus avec Alizé-LCPC. Après prise en compte des hypothèses et données énumérées ci-dessus, la modélisation sur Alizé nous donne les valeurs des sollicitations regroupées dans le tableau 4 ci-dessous :

Tableau 4 : Résultats des contraintes et déformations pour les variantes V1, V2 et V3

Couches	V1	V2	V3	Valeurs admissibles
BB	12,7	-3,60	-2,4	107,7
GB	89,3	-95,5	-98,3	107,7
GTC	182,5	233,8	233,7	288,6
GNT	200,7	-	-	288,6
PST	263,1	263,5	299,9	288,6

Du tableau 4, on constate que les sollicitations observées au niveau des différentes couches des variantes V1 et V2 sont inférieures aux valeurs admissibles calculées. Les épaisseurs des variantes V1 et V2 sont donc vérifiées. Par contre la valeur de la déformation verticale au-dessus de la plateforme de la variante V3 est supérieure à la valeur admissible. Donc les épaisseurs proposées pour la variante V3 seront redéfini. On procédera par itération en augmentant les épaisseurs des couches comme le propose le guide de dimensionnement des structures de chaussées du SETRA LCPC (LCPC SETRA, 1994).

Afin de maintenir une seule couche en GTC, seules les épaisseurs des couches bitumineuses varieront. D'autre part, la réalisation des couches en BB sont plus couteuses que celle en GB. Donc afin de réduire les coûts de réalisation, nous proposons de faire varier les épaisseurs de la couche de GB de la variante V3. En augmentant la couche de GB de 2cm, les sollicitations obtenues sont inférieures aux valeurs admissibles. Donc la variante V3 composée de 8cm de BB, 12cm de GB et 35cm de GTC est vérifiée (voir figure 11 ci-dessous).

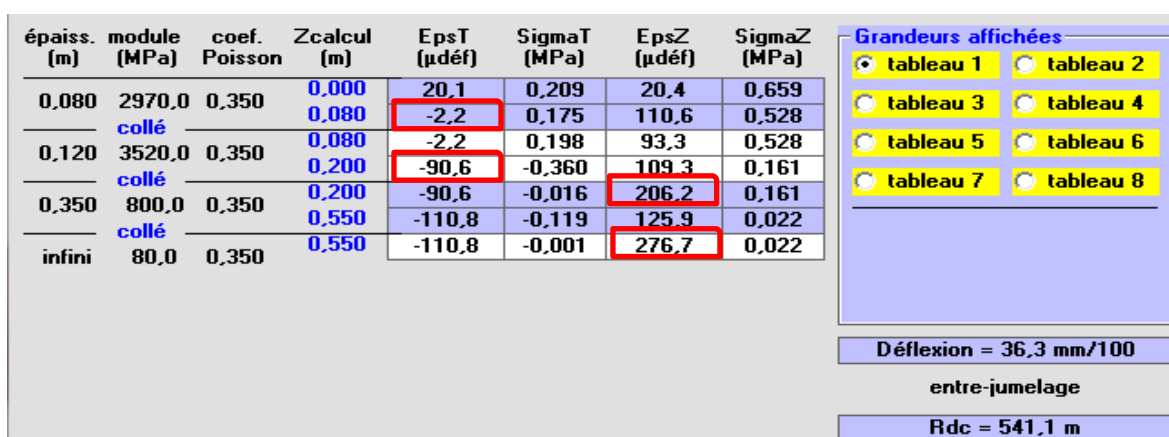


Figure 11 : Valeur des sollicitations de la variante V3 après itération de la couche de GB

Toutefois, nous remarquons que l'épaisseur de BB proposée par l'entreprise (6cm) est inférieure à la valeur que propose le SETRA LCPC (8cm) pour une couche de BB en matériau de type EB14 BBME 1. Cette diminution d'épaisseur peut être due à une volonté de réduire les couts de réalisation.

Pour confirmer cette hypothèse, nous proposons de vérifier le dimensionnement des variantes V2 et V3 en prenant l'épaisseur de la couche en BB = 6cm.

- Dans le cas de la variante V2, en prenant BB = 6cm, les sollicitations restent inférieures aux contraintes admissibles comme le montre la figure 12.

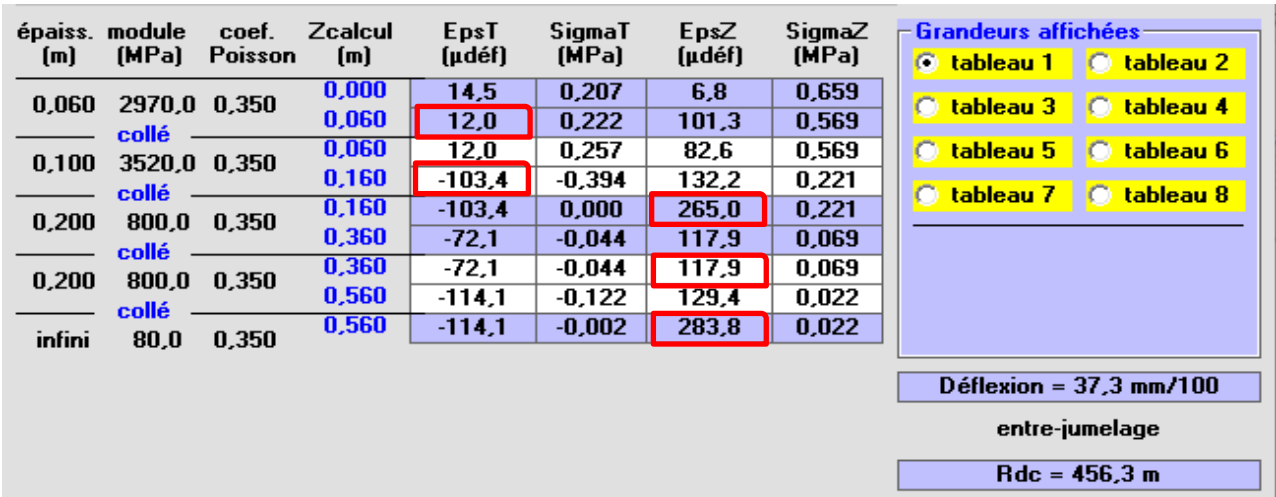


Figure 12: Valeur des sollicitations de la variante V2 pour 6cm de BB

Cependant la valeur de déformation à la surface de la plateforme est de 283,8μdéf ce qui est proche de la valeur admissible calculée qui est 288,6μdéf. Par contre une épaisseur de 8 cm de BB induit une sollicitation de 263,5μdéf (figure 9) une valeur distante de la valeur admissible de 25,1μdéf. Pour des raisons de sécurité, nous opterons pour une épaisseur de 8cm en couche de BB.

La structure retenue pour la variante V2 est donc 8cm de BB, 10cm de GB et 40cm de GTC.

- Dans le cas de la variante V3, en prenant BB = 6cm, la valeur de déformation à la surface de la plateforme devient supérieure à la valeur admissible. (298,9μdéf > 288,6μdéf). La structure composée de 6cm de BB,12cm de GB et 35cm de GTC n'est pas vérifiée. On se propose donc de procéder par itération comme précédemment. En augmentant la couche de GB de 2cm on observe que les sollicitations induites passent sous les seuils des valeurs admissibles. Donc la variante V3 composée de 6cm de BB, 14cm de GB et de 35cm de GTC est vérifiée comme le montre la figure 13 ci-dessous.

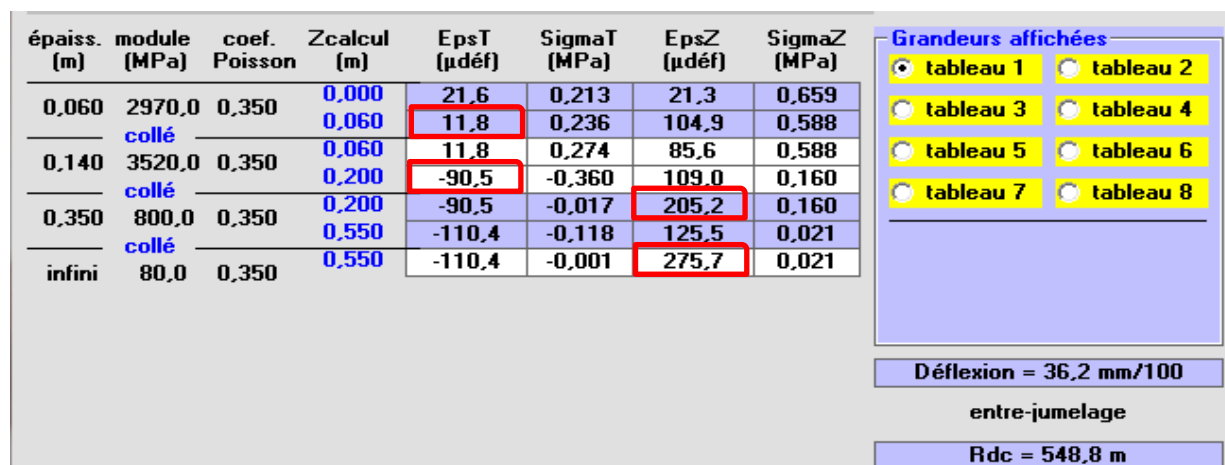


Figure 13 : Valeur des sollicitations de la variante V3 pour 6cm de BB

D'autre part, les sollicitations induites, dans le cas de la structure de 8cm de BB, 12cm de GB et 35cm de GTC sont sensiblement égales aux sollicitations induisent dans le cas de la structure de 6cm de BB, 14cm de Gb et 35cm de GTC comme le montre le tableau de l'annexe 1.3. Dans ce cas alors, on choisira la structure la moins couteuse en bitume sachant que le béton bitumineux est plus couteux que la grave bitumineuse.

La structure retenue pour la variante V3 est donc 6cm de BB, 14cm de GB et 35cm de GTC.

Le tableau 5 ci-dessous regroupe les épaisseurs retenues pour les couches des différentes variantes.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des épaisseurs retenues des couches des variantes

Couches	V1	V2	V3
BB	6	8	6
GB	16	10	14
GTC	25	40	35
GNT	15	-	-

Conclusion

Les structures de chaussées sont dimensionnées par l'application de la méthode française de dimensionnement des chaussées suivant le code de calcul Alizé32 du LCPC par l'approche mécaniste-empirique. Les épaisseurs des couches de la chaussée de la variante V1 (variante projet proposée par l'entreprise) sont 6cm de BB, 16cm de GB, 25cm de GTC et 15cm de GNT. Deux variantes de structures de chaussée ont été dimensionnées selon cette même méthode d'épaisseurs 8cm de BB, 10cm de GB et 40cm de GTC pour la variante V2 et 6cm de BB, 14 cm de GB et 35cm de GTC pour la variante V3. Les vérifications montrent que les valeurs des sollicitations obtenues au niveau de chacune des couches sont inférieures aux valeurs admissibles calculées.

V. ANALYSE DU CYCLE DE VIE DES VARIANTES DE CHAUSSEE

Introduction :

Il existe une diversité d'outils pouvant être utilisés pour l'évaluation des impacts environnementaux, d'un produit, d'un projet et même d'une organisation selon son orientation. Il s'agit alors pour nous de faire le choix qui nous permettra d'utiliser l'outil d'évaluation le mieux adapté pour notre étude. L'outil retenu sera présenté puis mise en application en comparant les variantes retenues dans le chapitre précédent (IV. DIMENSIONNEMENT).

5.1. Comparaison et choix de l'outil d'évaluation

Le tableau 4 ci-dessous ressort les caractéristiques de certains outils d'évaluations environnementale les plus utilisés.

Tableau 6 : Synthèse des principaux outils d'évaluation environnementale globale

Outils d'évalua- tion	Principales caracté- ristiques	Impacts environ- nementaux pris en compte	Principaux Avantages	Limites principales	Domaines d'application	Disponibilités (exemples de référé- nces)
Etude d'impact réglementaire	Etude de l'interaction entre un sous-système localisé et l'environne- ment	Impacts locaux : Bruit, odeur, toxicité...	- Cibles identifiées (environ- nement local), analyse de son état initial - Aspect financier abordé - Mesures compensatoires ex- plicitées - Communication des résul- tats au public (enquête publi- que)	- Non prise en compte de l'ensemble du cycle de vie - Non prise en compte des im- pacts à l'échelle planétaire	Système ou projet	Loi 76-663 du 19 juil- let 1976 relative aux ICPE (obligatoire dans les dossiers d'autorisation d'ins- tallation d'une ICPE) Et décret d'applica- tion du 12 octobre 1977
Analyse de cycle de vie	Evaluation d'un sys- tème comprenant l'en- semble des activités as- sociées à un produit, ou à un service, depuis l'extraction des ma- tières premières jusqu'à l'élimination des dé- chets.	- Augmentation de l'effet de serre - Prélèvement des ressources - Destruction de la couche d'ozone stra- tosphérique - Acidification - Eutrophisation - Pollution photo- chimique - Ecotoxicité aquati- que/terrestre - Toxicité humaine - Odeur - Bruit	- Prise en compte de l'en- semble du cycle de vie - Recherche d'impacts envi- ronnementaux pris en compte - Exhaustivité en termes d'im- pacts	- Difficulté de généraliser les résultats - Difficulté d'accès aux don- nées (bases de données assez coûteuses) - Difficulté d'interprétation des résultats	Produit ou procédé	- Normes ISO 14040 au 14043 - [Marc Janin, 2000] - [Rousseaux, 1993]

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

MIPS (Material Input Per Unit of Service)	Evaluation de la consommation de matière d'un produit par unité de service : un bilan de matières	Prélèvement des ressources	-Evaluation de la consommation de ressources d'un produit en liaison avec le service rendu. -Présentation des résultats sous la forme d'un score unique ce qui facilite les comparaisons et la communication.	- Prise en compte uniquement des consommations de ressources sans tenir compte des pollutions. - Simplification des impacts (un seul critère final) qui peut occulter la complexité des écosystèmes étudiés et de leurs impacts.	Produit ou service.	- Wuppertal Institut (2005). 43 - [Marc Janin, 2000]
EPE (Evaluation de la Performance Environnementale)	Elle donne des lignes directrices concernant la conception et l'utilisation de l'évaluation de la performance environnementale au sein d'un organisme.	Au choix de l'entreprise mettant en place l'évaluation	- Explicite comment identifier des indicateurs environnementaux qui renseignent clairement sur la performance d'un SME, sur celle des activités de production ainsi que sur l'état de l'environnement avec lequel l'entreprise est en interaction. - Lien entre l'évaluation et action de réduction des impacts - Le processus inclut un dialogue avec toutes les parties intéressées et une communication transparente.	- La norme n'établit aucun niveau de performance environnementale. - Elle n'est pas destinée à être utilisée comme norme de spécification à des fins de certification ou d'enregistrements ni pour définir toute autre exigence de conformité d'un système de management environnemental.	Organisation	Norme ISO 14031
Bilan carbone	Estimation des émissions de gaz à effet de serre d'une activité, directes et indirectes.	Augmentation de l'effet de serre	- Evaluation globale en matière d'émissions de gaz à effet de serre. - Prise en compte à la fois de l'ensemble des activités de l'organisation étudiée et des activités induites par cette organisation	- Il s'agit d'un bilan carbone, qui ne concerne que les émissions de gaz à effet de serre et non les autres impacts d'une entité sur l'environnement. - Les facteurs d'émission sont des approximations et	- Organisation - Territoire	Bilan Carbone [ADEME, 2007]

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOU-
BLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

				reflètent une situation en per- pétuel changement, ils ont vocation à changer en perma- nence.		
Empreinte Eco- logique	Mesurer la superficie nécessaire à une popu- lation sur un territoire pour fournir de façon soutenable les res- sources dont elle a be- soin pour son mode de vie : Représentation de la surface de terre et d'eau biologiquement productive nécessaire pour produire les res- sources consommées et assimiler les déchets générés par une popula- tion donnée.	- Augmentation de l'effet de serre - Prélèvement des ressources natu- relles principale- ment biologiques - Consommation de l'espace, notam- ment l'occupation des sols par les in- frastructures...	- Excellent outil de com-mu- nication et de sensibilisation. - Prise en compte de l'en- semble des cycles de vie. - Prise en compte des princi- paux impacts environnemen- taux - Présentation des résultats sous la forme d'un score unique ce qui facilite les com- paraisons et la communica- tion.	- Les coefficients de transfert n'ont pas été déterminés pour les aspects environnemen- taux suivants : la toxicité des rejets et l'énergie nucléaire. - Inexistence d'une base de données officielle sur les données d'énergie incorporée des différents matériaux con- sidérés ce qui rend difficile la comparaison entre des études différentes (l'un des objectifs de ce travail de thèse). - Simplification des impacts (un seul critère final) qui peut occulter la complexité des écosystèmes étudiés et de leurs impacts	- Territoire - Organisation (méthode en cours de stabi- lisation)	Les standards : Eco- logical Footprint Standards 2006 - Global Footprint Network 47 - Ecological Foot- print haring nature's interest [Chambers et al, 2000] - Notre empreinte écologique [Wacker- nagel et Rees, 1996]

Source : L'empreinte écologique : Proposition d'un modèle synthétique de représentation des empreintes à l'échelle " Micro " d'une organisation ou d'un
projet - (El Bouazzaoui, 2013)

L'objectif est d'évaluer l'impact sur l'environnement de la réalisation de 1km d'une chaussée composée de couches traitées au ciment et au bitumine. Du fait qu'il s'agisse de l'évaluation d'un produit et non d'une organisation ou d'un territoire, notre choix se portera entre les outils : Etude d'impact réglementaire, Analyse de cycle de vie et MIPS (Material Input Per Unit of Service).

L'outil MIPS ne prend pas en compte les pollutions émises lors de la réalisation du produit ou de son utilisation tandis que notre étude vise à faire ressortir toutes les émissions observées aux différentes étapes de vie de l'ouvrage. Le choix se porte donc sur les outils Etude d'impact réglementaire et Analyse de cycle de vie.

L'analyse du cycle de vie contrairement à l'étude d'impact réglementaire prend en compte plus d'impact environnementaux pour l'évaluation. D'où notre choix définitif se portera sur l'outil analyse du cycle de vie pour notre étude.

5.2. Généralité sur l'outil retenu

5.2.1. Définition et objectifs de l'Analyse du Cycle de Vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) tire son origine de l'expression anglaise « Life Circle Assessment » qui pourrait se traduire littéralement par « Évaluation du cycle de vie ». La norme ISO 14 040 définit l'ACV comme étant une « compilation et une évaluation des intrants, des extrants et des impacts environnementaux potentiels d'un système de produit au cours de son cycle de vie » (**Indian Standards ISO 14044, 2009; ISO 14040, 1997**). Cette méthodologie est utilisée classiquement pour comparer divers produits et services lors de leur conception, afin d'identifier les éléments principaux responsables des pollutions et impacts environnementaux. Elle est essentiellement fondée sur l'évaluation de la circulation de flux de matières et d'énergie entre différents éléments d'un système, ainsi qu'entre l'intérieur et l'extérieur d'un système (**Harvey et al., 2016**).

En d'autres termes, l'ACV permet d'évaluer les flux d'éléments (matières, énergies ...) entrant et sortant afin de quantifier et de comparer les impacts sur l'environnement que pourrait avoir un produit à toutes les différentes étapes de sa vie (de la naissance à la tombe).

L'ACV des chaussées a pour objectif principal d'évaluer et de comparer les impacts environnementaux qui découlent du cycle de vie des chaussées afin de choisir les conceptions structurelles qui engendrent un impact environnemental minimal ou/et de montrer les processus les plus néfastes afin de réduire leurs impacts (**Bryce, 2008**).

L'image 14 ci-dessous présente le cycle de vie d'un produit suivant l'ACV.

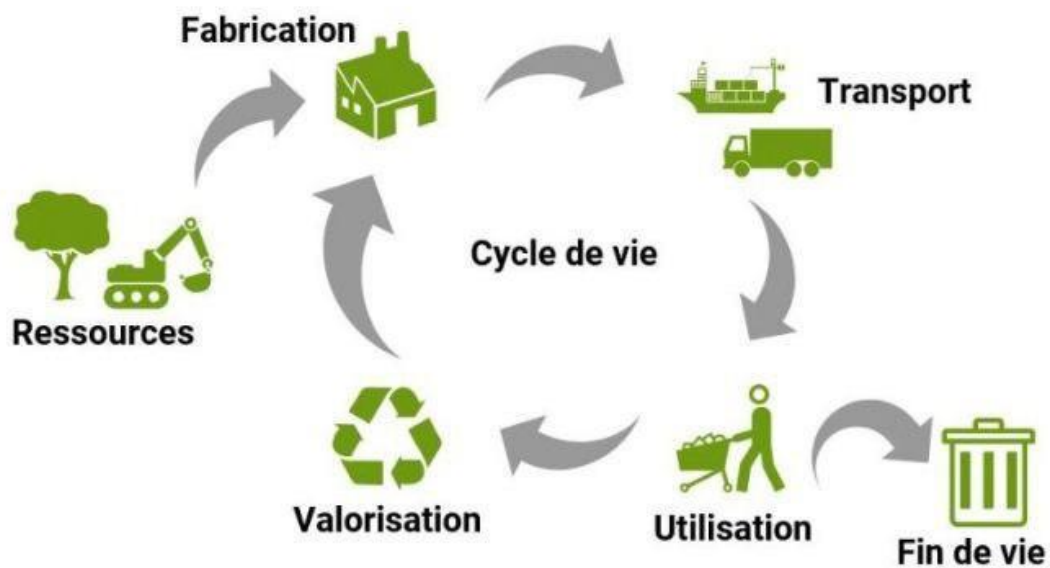


Figure 14 : Cycle de vie d'un produit

Source : Analyse du cycle de vie d'un dérivé du pétrole (plastique) l'aide au logiciel SimaPro

5.2.2. Différentes étapes d'une ACV

L'ACV d'un produit se réalise sur 4 étapes que sont :

- Définition des objectifs et du champ de l'étude
- Analyse de l'inventaire du cycle de vie
- Evaluation des impacts du cycle de vie
- Interprétation

5.2.2.1. Phase I de l'ACV : Définition des objectifs et du champ de l'étude

Il s'agit à cette étape de définir les frontières du système étudié, les flux de références et de définir l'unité fonctionnelle (UF) qui sert de base d'évaluation (**Feraille et al., 2022**).

L'unité fonctionnelle : « est la mesure de la performance des sortants fonctionnels du système de produits. L'objectif d'une unité fonctionnelle est de fournir une référence à laquelle les entrants et les sortants sont liés. Une référence qui est nécessaire pour assurer la comparabilité des résultats d'une analyse du cycle de vie » (**BS EN ISO 14041, 1998; ISO 14040, 1997**). L'unité fonctionnelle est donc une valeur définie et mesurable, permettant de comparer les différents résultats obtenus. L'unité fonctionnelle doit être représentative et doit satisfaire la fonction principale du système étudié car sa définition permettra de réaliser l'étude comparative. L'unité fonctionnelle représente la quantification de la fonction étudiée, tandis que les flux de référence représentent la quantité de produit requise pour remplir la fonction exprimée par l'unité fonctionnelle.

La délimitation des frontières de l'étude permet d'analyser l'étendue et la gravité des critères environnementaux considérés (**Jullien et al., 2014**). Elle comprend :

- toutes les activités pertinentes à l'atteinte des objectifs de l'étude, donc nécessaires à la réalisation de la fonction étudiée ;
- tous les processus et flux contribuant notablement à l'impact environnemental potentiel.

5.2.2.2. Phase II de l'ACV : Analyse de l'Inventaire du Cycle de Vie

L'analyse de l'inventaire implique la compilation et la quantification des entrants et des sortants d'un système de produit données durant son cycle de vie (**BS EN ISO 14041, 1998; Lee and Inaba, 2004**). Cette étape permet de recenser et de quantifier l'ensemble des flux de consommations (les matériaux, les substances, la quantité d'énergie...) et de rejets (les émissions gaz, productions de déchets...) intervenant dans la réalisation du produit pour lequel l'étude est réalisée.

La norme NF P 01-010, "Qualité environnementale des produits de construction - Déclaration environnementale et sanitaire des produits de construction", établit les bases communes pour la délivrance d'une information objective tant sur le plan qualitatif que quantitatif sur les matériaux et les produits. Elle permet de mettre à disposition des maîtres d'œuvre et des concepteurs qui souhaitent prendre en compte des critères environnementaux dans leur projet, une information objective et consensuelle sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des produits (**Collection Technique Cimbéton., 2010**). La norme NF P 01-010 divise le cycle de vie d'un produit de construction en 5 étapes :

- Etape 1 : La fabrication du produit : extraction, préparation et transport des matières premières. Cette étape se termine à la sortie du produit de l'usine.
- Etape 2 : Le transport du produit de l'usine de production jusqu'au chantier.
- Etape 3 : La mise en œuvre du produit au sein de l'ouvrage.
- Etape 4 : La vie en œuvre pendant laquelle le produit assure sa fonction. Cette étape couvre toute la durée de vie typique du produit.
- Etape 5 : La fin de vie de l'ouvrage.

5.2.2.3. Phase III de l'ACV : Évaluation des impacts du cycle de vie

Elle vise à comprendre et évaluer l'ampleur et l'importance de l'impact environnemental d'un système de produit au cours de son cycle de vie (**BS EN ISO 14042, 2000**). Elle consiste à traduire les flux élémentaires recensés en impacts sur l'environnement à l'aide d'indicateurs, quantitatifs dans la mesure du possible.

On rappelle qu'un impact sur l'environnement peut être positif ou négatif. Cette étape est nécessaire afin de synthétiser les multiples valeurs de flux recensées en un nombre plus réduit de données, censées représenter les effets sur l'environnement.

5.2.2.4. Phase IV de l'ACV : Interprétation

La méthodologie ACV comprend enfin une étape d'interprétation et d'analyse des variabilités et des incertitudes. En effet, une analyse complète des incertitudes, incluant des investigations plus poussées, est indispensable avant de pouvoir généraliser les résultats et prendre le recul nécessaire (**ISO 14043, 2000**).

La figure 15 ci-dessous illustre le chevauchement de ces différentes phases.

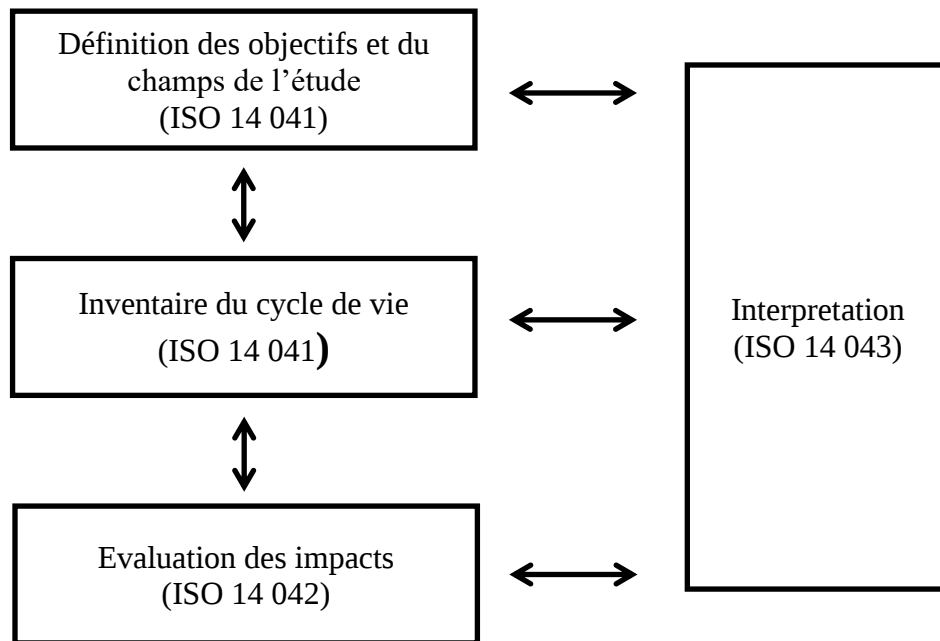


Figure 15 : Phase de l'analyse du cycle de vie

Source : International Standard ISO 14 040

5.2.3. Les limites de l'Analyse du Cycle de Vie

La démarche d'Analyse du Cycle de Vie a quelques limites liées :

- à la pertinence du choix des indicateurs pour des ouvrages de Génie Civil,
- au choix des frontières du système (parfois subjectif), de l'unité fonctionnelle, des sources de données et des catégories d'impacts,
- au choix des modèles de calculs et d'évaluation des impacts (les modèles ne sont pas toujours disponibles),

- aux précisions sur l'évaluation des flux de matières et d'énergies et aux variabilités des données du cycle de vie,
- aux accessibilités, disponibilités et qualités des données environnementales sur de nombreux matériaux de construction ou de matériels de chantier (la difficulté liée au manque de données est un problème récurrent et délicat lors d'une étude ACV),
- aux précisions sur la transcription des flux en impact environnemental et sur l'agrégation des impacts,
- aux précisions sur les règles d'imputation, de coupure ou d'exclusion de certains flux, aux précisions sur la durée de la période d'analyse et sur les évolutions possibles des techniques d'entretien et de maintenance des ouvrages et de recyclage et valorisation des matériaux d'ici plusieurs décennies.

5.3. Définition des indicateurs environnementaux

A chaque étape de la vie d'un produit, des bilans de matières, d'énergie et d'émissions de polluants sont réalisés et évalués grâce à des indicateurs environnementaux. Ces indicateurs varient selon le type d'activités à réaliser mais également de celui qui réalise l'ACV. C'est le cas par exemple de l'OCDE, AGRIBALISE, la Commission Européenne ou plusieurs autres institutions qui proposent différents indicateurs de pollution à évaluer lors de la réalisation d'une ACV selon le produit à évaluer.

Cependant, les indicateurs les plus utilisés pour l'ACV d'une chaussée routière sont ceux préconisés par la norme NF EN 17472 qui intègre ceux de la norme NF EN 15804+A1. La norme NF P 01-010 considère 10 impacts environnementaux. Ils sont jugés pertinents vis-à-vis de la qualité environnementale des ouvrages et font l'objet d'un large consensus parmi les experts en environnement de la communauté scientifique. Ils permettent d'évaluer la contribution environnementale de l'ouvrage tout au long de son cycle de vie (Bryce, 2008). Il s'agit de :

- **La consommation des ressources énergétiques** : Cet indicateur de flux est exprimé en MJ. Il exprime la quantité d'énergies non renouvelables utilisées pour la mise à disposition, le transport, l'utilisation ou encore la fin de vie des différents éléments en cycle de vie. Il représente la somme de toutes les sources d'énergie puisées dans les réserves naturelles telles que le gaz naturel, le pétrole, le charbon, le minerai d'uranium, la biomasse et l'énergie hydraulique
- **L'épuisement des ressources** : Cet indicateur évalue la quantité de minéraux et de carburants fossiles en fonction des réserves disponibles et de leur consommation actuelle. Il s'exprime en kg équivalent antimoine (kg éq. Sb)
- **La consommation d'eau** : Cet indicateur correspond aux prélèvements d'eau (toutes sources confondues) dans le milieu naturel, il prend en compte les consommations d'eau nécessaires, en particulier aux différentes étapes de production, transport et mise en œuvre des produits. Il est exprimé en litre (L).

- **La production de déchets** : Cet indicateur vise à évaluer la quantité de déchets (solide, radioactif, dangereux ou non) générés sur le cycle de vie de l'ouvrage étudié. L'unité retenue est le kg.
- **Le changement climatique (augmentation de l'effet de serre)** : Cet indicateur évalue l'intensité d'émission de CO₂ dû à une activité. Il Cet indicateur permet de quantifier la contribution de l'ouvrage à l'augmentation de la teneur en Gaz à Effet de Serre dans l'atmosphère. Il est exprimé en kg équivalent de dioxyde de carbone (kg éq. CO₂).
- **Acidification atmosphérique** : L'acidification atmosphérique entraine des pluies acides ayant des conséquences indésirables sur la faune et la flore. Les pluies acides sont causées par les combustions qui produisent du dioxyde de soufre (SO₂) et des oxydes d'azote (NO_x) et par l'ammoniac gazeux (NH₃) d'origine agricole. On détermine les émissions de chaque substance et on lui applique un coefficient qui représente son potentiel d'acidification. L'acidification atmosphérique est calculée en kilogramme équivalent de SO₂ (Kg SO₂-Eq).
- **Pollution de l'air** : Cet indicateur évalue l'accroissement de la pollution de l'air. Pour notre étude, nous calculerons la quantité de particule fine émise dans l'air. L'unité de calcul est le kilogramme de PM10 équivalent (kg PM10-Eq).
- **Pollution de l'eau** : L'indicateur utilisé pour quantifier l'impact sur les écosystèmes aquatiques exprime le potentiel d'écotoxicité dans l'eau douce que génère un produit considéré sur l'ensemble de son cycle de vie. Il donne des indications sur l'acidification aquatique et l'eutrophisation. L'unité considéré pour cet indicateur est le kilogrammes 1,4 diclorobenzène équivalent (Kg 1,4-DCB-eq).
- **Destruction de la couche d'ozone stratosphérique** : Cet indicateur représente les émissions dans l'air de gaz participant à la destruction de la couche d'ozone. La couche d'ozone bloque une partie des rayons ultraviolet du soleil. Sa destruction augmente les risques de cancers comme ceux de la peau. L'unité de calcul est le trichlorofluorométhane équivalent (CFC-11-Eq).
- **Formation d'ozone photochimique (Smog)** : L'ozone photochimique aussi appelé smog est la formation d'ozone dans la troposphère (basse altitude). L'ozone photochimique cause des problèmes pour la santé humaine notamment au niveau respiratoire. Sous l'effet du rayonnement solaire et d'une température élevée, l'oxygène au contact d'oxydes d'azote et d'hydrocarbures produit de l'ozone. L'unité de calcul pour cette étude est le kilogramme équivalent de composés organiques volatiles non méthanique (kg NMVOC-Eq).

5.4. Application de l'ACV au projet

5.4.1. Phase I de l'ACV : Définition des objectifs et du champ de l'étude

Objectifs de l'étude

L'objectif de cette étude est de faire le bilan de l'Analyse du Cycle de Vie sur un kilomètre de chaussée afin de comparer les variantes de structure de chaussée bitumineuse retenu dans la partie III dimensionnement.

L'unité fonctionnelle défini pour cette étude est la construction de 1km (préconisée par la norme NF EN 15804) de chaussée routière constituée de matériaux traités au ciment et de matériaux traités au bitume, pouvant assurer la circulation de véhicule sur une période de 20 ans (préconisée par le SETRA LCPC pour les chaussées des pays tropicaux).

Champ de l'étude

Les systèmes étudiés comprennent : l'extraction des matières premières (carrières) ; la transformation (usines d'enrobés) ; le transport ; la mise en œuvre ainsi que l'élimination ou le recyclage des matériaux en fin de vie.

Les frontières de l'étude se limiteront au système représenté plus haut. En d'autres termes, seuls les flux entrants et sortants dans ce système seront considérés et évalués. De même seront évalués uniquement pour notre étude les indicateurs environnementaux listés précédemment.

5.4.2. Paramètres du projet

Les paramètres retenus pour cette étude sont les dimensions de la route et des distances d'approvisionnement en matériaux. Compte tenu des études géotechniques qui se poursuivent sur la chaussée existante, notre étude portera uniquement sur la partie dédoublement. Les paramètres sont :

- Dimension de la chaussée:
 - Longueur : **1000 m**
 - Largeur : **12,5 m**
- Les distances d'approvisionnement par poste sont fixées pour la chaussée :
 - distance entre la carrière d'extraction du bitume (France) et la raffinerie bitume (Togo) = **5741 km**
 - distance entre la raffinerie bitume (Togo) et la centrale (Abomey) = **201 km** ;
 - distance entre la carrière d'extraction des granulats (Dan) et la centrale (Abomey) = **31 km** ;
 - distance entre la centrale d'enrobé (Abomey) et la base du chantier (Porto Novo) = **168 km** ;
 - distance entre la carrière d'extraction des granulats (Dan) et la base du chantier (Porto Novo) = **190 km** ;
 - distance entre la base et le chantier = **1 km** ;

La surface de répardage de l'émulsion est de Longueur x largeur = 1 000 x 12,5 = 13 500 m²

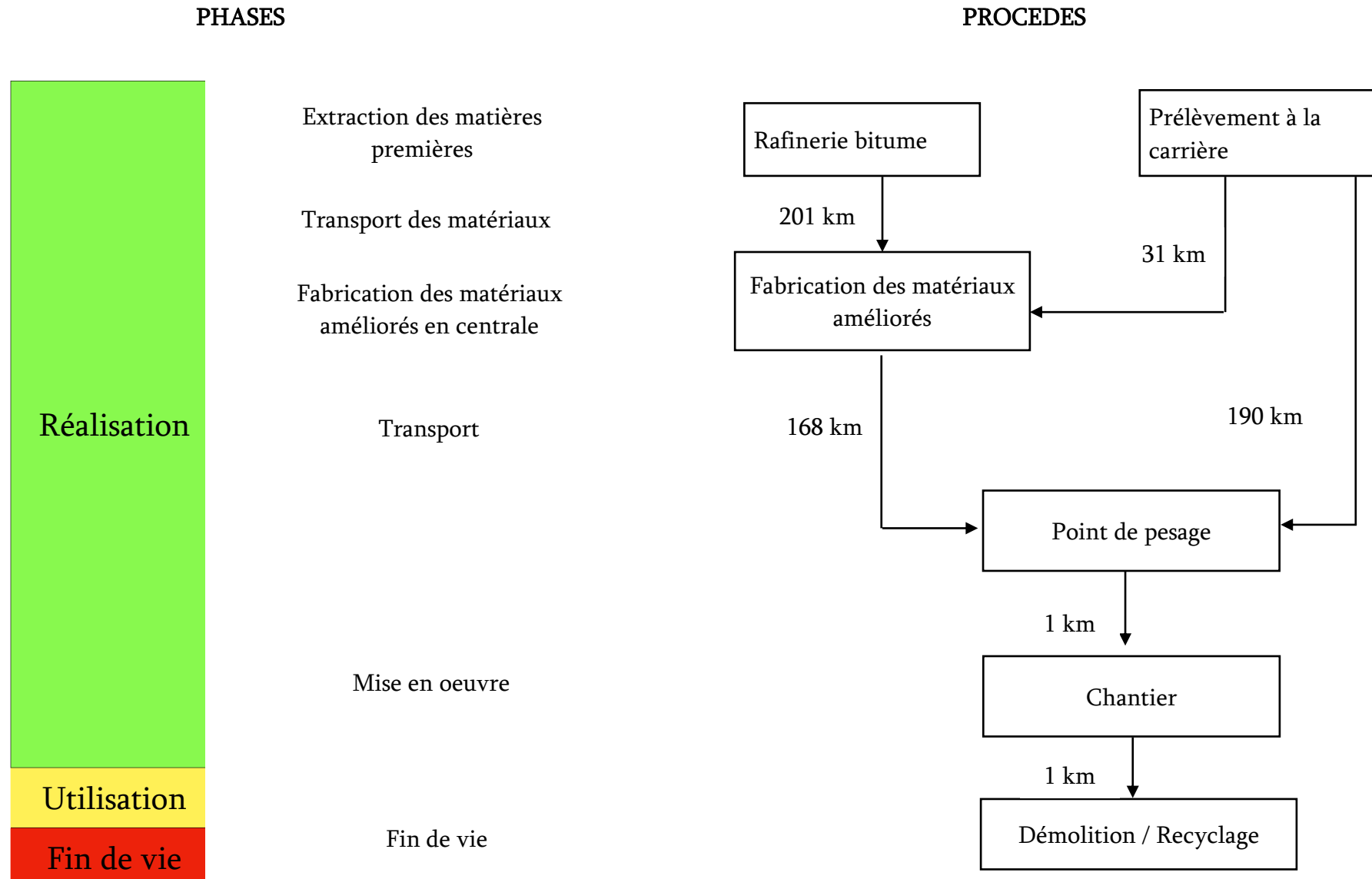


Figure 16 : Représentation schématique du cycle de vie de la chaussée

5.4.3. Analyse de l'Inventaire

5.4.3.1. Quantité des matériaux utilisés pour les différentes variantes

La détermination des volumes de matériaux à utiliser pour la réalisation d'1km de chaussée se ferait en multipliant les volumes de chaque couche obtenue lors du dimensionnement des variantes par leur coefficient de foisonnement respectif. Les détails des calculs sont présentés dans l'annexe 2.1. Le tableau 7 ci-dessous récapitule les volumes des matériaux à transporter.

Tableau 7: Volumes des matériaux à transporter par m³

Couches	V1	V2	V3
BB	900	1200	900
GB	2400	1500	2100
GNT améliorée au ciment (GTC)	4062,50	6500	5687,50
GNT crue	2437,50	-	-

5.4.3.2 Phase d'extraction des matériaux

L'analyse de cycle de vie consiste à collecter les données spécifiques à chaque étape de ce cycle : consommation d'énergie, émissions atmosphériques, rejets liquides et déchets solides. Ces données permettent de déterminer l'inventaire complet des ressources prélevées, des polluants émis et des déchets générés. Les résultats de cet inventaire sont ensuite traduits en termes d'indicateurs exprimant les impacts sur l'environnement (**Collection Technique Cimbéton., 2010**). Le tableau 8 ci-dessous présente les valeurs des indicateurs environnementaux pour 1 tonne des différents matériaux provenant de la base de données diogen.

Tableau 8 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour 1 tonne de matériau

Indicateurs	Bitume	Granulats	Ciment
Acidification atmosphérique (Kg SO₂-Eq)	6,85	0,03	1,01
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	8,57E-04	4,56E-07	2,13E-05
Production de déchets (kg)	81,576	2,567	34,125
Consommation en eau (L)	228,16	15,36	15,8
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	24447,2	71,2	54,9
Consommation des ressources énergétique (MJ)	57464,64	71,44	371,7
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	3,57E-02	7,84E-03	0,00417
Changement climatique (kg éq. CO₂).	908,36	3,56	547
Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	5,067	0,027	1,12
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	1,50E-03	7,24E-05	4,48E-05

La méthodologie de calcul d'émission des indicateurs pour la phase d'extraction des matériaux se fait en multipliant la masse du constituant par l'émission pour 1t de chaque constituant afin d'obtenir l'émission par matériau. L'émission totale est obtenue par la somme des émissions par matériau.

Les résultats des calculs des valeurs des indicateurs pour chaque variante sont résumés dans l'annexe 2.3. Le tableau 9 ci-dessous récapitule les résultats obtenus pour chaque variante.

Tableau 9 : Récapitulatif des valeurs des indicateurs durant la phase d'extraction

Indicateurs	V1	V2	V3
Acidification atmosphérique (Kg SO₂-Eq)	1 441,53	1 297,36	1 372,92
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	0,14	0,12	0,13
Production de déchets (kg)	39 895,70	38 109,63	38 560,56
Consommation en eau (L)	179 305,32	164 216,67	167 095,67
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	4 451 753,97	3 743 912,81	4 085 669,63
Consommation des ressources énergétiques (MJ)	9 599 729,43	8 012 139,72	8 810 531,14
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	13,22	12,00	12,41
Changement climatique (kg éq. CO₂).	229 232,85	235 554,98	237 183,79
Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	1 148,75	1 061,75	1 110,07
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	0,91	0,82	0,84

5.4.4. Phase de productions des mélanges

Les constituants de base (granulats et bitume) sont mélangés dans une centrale d'enrobage. Les indicateurs pour la production des mélanges (Béton Bitumineux BB et Grave Bitume GB) sont évalués dans le tableau 10 ci-après pour une tonne de mélange en sortie de centrale en prenant en compte les pourcentages des différents constituants de base.

Tableau 10: Valeurs des indicateurs environnementaux pour 1 tonne de matériau bitumineux produit

Désignations	Béton bitumineux	Grave Bitume
Bitume	4,80 %	4,40 %
Granulats	95,20 %	95,60 %
Acidification atmosphérique (Kg SO₂-Eq)	0,36	0,33
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	4,20E-05	3,8E-05
Production de déchets (kg)	6,34	6,03
Consommation en eau (L)	25,57	24,72
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	1241,25	1143,74

Consommation des ressources énergétique (MJ)	2826,31	2596,74
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	2,46E-03	2,32E-03
Changement climatique (kg éq. CO2).	46,99	43,37
Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	0,27	0,25
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	4,05E-04	3,71E-04

La méthodologie de calcul d'émission des indicateurs pour la phase de production des mélanges (Béton Bitumineux et Grave Bitumineuse) consiste à multiplier la masse du constituant par l'émission pour 1t de chaque constituant ainsi on obtient l'émission par matériau. L'émission totale est obtenue par la somme des émissions par matériau pour chaque variante. Les calculs sont présentés dans les annexes 2.3 et 2.4.

Les résultats de la phase de production des matériaux bitumineux sont présentés dans le tableau 11.

Tableau 11 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de production des matériaux bitumineux

Indicateurs	V1	V2	V3
Acidification atmosphérique (Kg SO₂-Eq)	2784,54	2309,88	2536,98
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	0,32	0,27	0,29
Production de déchets (kg)	50572,01	41743,41	46039,20
Consommation en eau (L)	205881,60	169435,20	187339,20
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	9655272,00	8012784,00	8797464,00
Consommation des ressources énergétique (MJ)	21939650,40	18216718,80	19992094,80
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	19,45	16,08	17,71
Changement climatique (kg éq. CO2).	365955,60	303613,20	333427,20
Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	2097,63	1739,61	1911,06
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	3,12	2,61	2,86

5.4.5. Phase de transport

La base de données Diogèn prend en compte uniquement la phase extraction des matériaux pour une ACV. Afin de quantifier les émissions pour les phases suivantes de notre étude, nous utiliserons la méthode des équivalences. Dans le cadre de la norme NF P 01-010, la méthode consiste à quantifier les indicateurs de flux par catégorie d'impact par la formule suivante (**Collection Technique Cimbéton., 2010**) :

$$I_{catj} = \text{SOMME} (A_{icatj} \times C_{icatj} \times M_i) \text{ (Collection Technique Cimbéton., 2010)}$$

Avec :

I catj : Indicateur du flux i pour la catégorie d'impact j

Aicatj : Coefficient de pondération du flux i à la catégorie d'impact j

Cicatj : Contribution du flux i à la catégorie d'impact j

Mi : Masse du flux i

Pour obtenir les indicateurs correspondant au transport des constituants de base et des mélanges, les hypothèses suivantes ont été retenues :

- Les trajets des matériaux se feront conformément à la représentation schématique (faite précédemment) selon les distances évaluées
- Le transport des matériaux se fera par des camion bennes de 12 roues de capacité 19,32m³

Notons que : **1L de diesel (gasoil) = 42,7 MJ/L = 3,24 kg éq. CO₂/L (Schemid and Knorr, 2012)**

Les matériaux acheminés des carrières sont pesés sur le pont bascule de la base puis sont acheminés sur le chantier pour utilisation. On prendra la distance entre le chantier et la base égale à 1km.

Le calcul de la consommation d'énergie et de l'émission du GWP100 pour la phase de transport des constituants de base et des mélanges pour chaque variante est détaillé dans l'Annexe. Le tableau de l'annexe présente les consommations d'énergie et les productions de GWP100 pour la phase de transport de chaque variante.

Les valeurs des facteurs d'émissions et des coefficients de pondération sont directement tirées de la base de données "Ecoinvent 3.5" pour la localisation "Global". Les valeurs sont récapitulées dans les annexes 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 et 2.9.

Il faut préciser que pour notre étude, nous ne prendrons pas en compte les produits chimiques utilisés, et donc, les émissions de produits chimiques ne seront pas prises en compte lors de la phase de transport, de mise en œuvre et de recyclage. Cela aura pour conséquence d'avoir l'indicateur "destruction de la couche d'ozone = 0". Egalement les déchets dus à l'usure des pneus et des huiles causés par les activités de maintenances et d'entretien ne seront pas pris en compte. Il en est de même pour les eaux utilisées pour les activités de nettoyages et d'entretien.

Le tableau 12 récapitule les valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de transport.

Tableau 12 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de transport

Indicateurs	V1	V2	V3
Acidification atmosphérique (Kg SO₂-Eq)	5 080 368,34	4 767 072,97	4 745 931,13
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	0	0	0
Production de déchets (kg)	0	0	0

Consommation en eau (L)	0	0	0
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	2 031 393,01	1 906 121,38	1 897 667,79
Consommation des ressources énergétique (MJ)	30 426 373,28	30 223 313,43	30 089 273,86
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	4 969,88	4 663,40	4 642,71
Changement climatique (kg éq. CO2).	2 308 699,05	2 293 291,23	2 283 120,55
Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	9 148 695,54	8 584 515,21	8 546 443,11
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	0	0	0

5.4.6. Phase de mise en œuvre

Les engins utilisés lors de la mise en œuvre de la chaussée sont :

- Camion benne ;
- Camion citerne ;
- Recycleuse ;
- Niveleuse ;
- Epandeuse de ciment ;
- Compacteur VT2 (vibrant tandem) pour les enrobés ;
- Compacteur VM2 (vibrant monocylindre) pour les matériaux granulaires ;
- Finisseur.

Afin d'évaluer la consommation énergétique et l'émission du GWP100 des engins lors de la mise en œuvre de la chaussée, nous allons déterminer la consommation du combustible de chaque engin. Les détails des calculs sont présentés dans les annexes 2.10 et 2.11.

Le tableau 13 ci-dessous présente les résultats obtenus.

Tableau 13 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de mise en œuvre

Indicateurs	V1	V2	V3
Acidification atmosphérique (Kg SO2-Eq)	17 055,38	10 456,66	15 862,85
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	0	0	0
Production de déchets (kg)	1 175 953,87	1 098 344,25	1 040 953,87
Consommation en eau (L)	659 880,00	669 240,00	701 085,00
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	6819,62	4 181,11	6 342,78
Consommation des ressources énergétique (MJ)	190 855,03	111 389,52	179 923,15
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	16,68	10,23	15,52
Changement climatique (kg éq. CO2).	14 674,47	8 612,86	13 813,20

Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	30564,52	18830,30	28 565,72
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	0	0	0

5.4.7. Indicateurs pour la phase d'utilisation

Les impacts environnementaux de la phase d'exploitation ne dépendent pas de la structure de chaussée mais du trafic qui y circule. En effet le produit évalué est une chaussée. Elle est amovible et ne peut donc être déplacée. Cependant, étant donné que son rôle final est d'assurer la circulation, les impacts environnementaux qui seront engendrés seront dus au trafic. De ce fait, pour notre étude nous ne prendrons pas en compte la phase d'utilisation.

5.4.8. Indicateurs pour la phase de fin de vie

En fin de vie, on fait l'hypothèse qu'après démolition, tous les matériaux constitutifs seront transportés sur 1 km afin d'être recyclés pour d'autres ouvrages mais 60% seront réutilisés après traitement. Les détails des calculs sont présentés dans l'Annexe 2.12.

Le tableau 14 ci-dessous récapitule les valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de fin de vie des variantes étudiées.

Tableau 14 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la phase de fin de vie

Indicateurs	V1	V2	V3
Acidification atmosphérique (Kg SO₂-Eq)	7 184,90	6 746,45	6 364,57
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	0	0	0
Production de déchets (kg)	9 407 631,00	8 786 754,00	8 327 631,00
Consommation en eau (L)	0	0	0
Pollution de l'air (kg PM₁₀-Eq)	2 872,89	2 697,58	2 544,88
Consommation des ressources énergétique (MJ)	42992,04	40368,51	38083,50
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	7,03	6,60	6,23
Changement climatique (kg éq. CO₂).	3627,12	3405,78	3213,00
Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	12 938,52	12 148,96	11 461,29
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	0	0	0

5.4.9. Évaluation des impacts du cycle de vie

Pour obtenir les valeurs finales des indicateurs pour l'ensemble du cycle de vie des variantes, il faudra faire la somme des valeurs obtenues à chaque étape de notre étude.

Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau 15 ci-dessous qui récapitule les valeurs des indicateurs durant toute la durée de vie de chaque variante.

Tableau 15 : Valeurs des indicateurs durant toute la durée de vie de chaque variante

Indicateurs	V1	V2	V3
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	0,46	0,38	0,42
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	40,045	3,42	3,70
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	5 026,27	4 708,30	4 694,59
Consommation en eau (L)	17049,47	16721,32	17566,05
Changement climatique (kg éq. CO2).	2 922 189,09	2 844 478,05	2 870 758,74
Acidification atmosphérique (Kg SO2-Eq)	5 108 835,68	4 787 883,33	4 772 068,46
Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	9 195 444,96	8 618 295,83	8 589 491,25
Production de déchets (kg)	10 674 052,59	9 964 951,29	9 453 184,63
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	16 148 111,49	13 669 696,89	14 789 689,09
Consommation des ressources énergétique (MJ)	62 199 600,18	56 603 929,18	59 109 906,45

Afin d'évaluer les impacts des différentes variantes entre elles, nous avons calculé les écarts entre les variantes proposées (V2 et V3) et la variante projet (V1). Les écarts relatifs entre les différentes variantes se calculent par la formule suivante :

$$\text{Ecart \%} = \left(\frac{\text{indicateur vi} - \text{indicateur v1}}{\text{indicateur v1}} \right) \times 100$$

Le tableau 16 présente les écarts des variantes V2 et V3 par rapport à la variante V1.

Tableau 16 : Evaluation des impacts par rapport à la variante du projet

Indicateurs	V2	V3
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	-16,88 %	-8,66 %
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	-15,23 %	-8,45 %
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	-6,33 %	-6,60 %
Consommation en eau (L)	-1,92 %	3,03 %
Changement climatique (kg éq. CO2).	-2,66 %	-1,76 %

Acidification atmosphérique (Kg SO2-Eq)	-6,28 %	-6,59 %
Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	-6,28 %	-6,59 %
Production de déchets (kg)	-6,64 %	-11,44 %
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	-15,35 %	-8,41 %
Consommation des ressources énergétique (MJ)	-9,00 %	-4,97 %

5.5. Interprétation

La dernière étape d'une analyse de cycle de vie consiste à faire l'interprétation des résultats obtenus lors des calculs afin de déterminer pour quelle phase du cycle de vie les indicateurs sont les plus importants. Rappelons que notre étude vise à déterminer entre les différentes variantes étudiées celle qui aura le moins d'impact sur l'environnement. Pour notre étude alors, l'interprétation se limitera à une comparaison entre les valeurs des indicateurs calculées pour les différentes variantes.

Le figure 17 ci-dessous traduit les valeurs obtenues du tableau 9 pour la phase d'extraction sous forme de graphique.

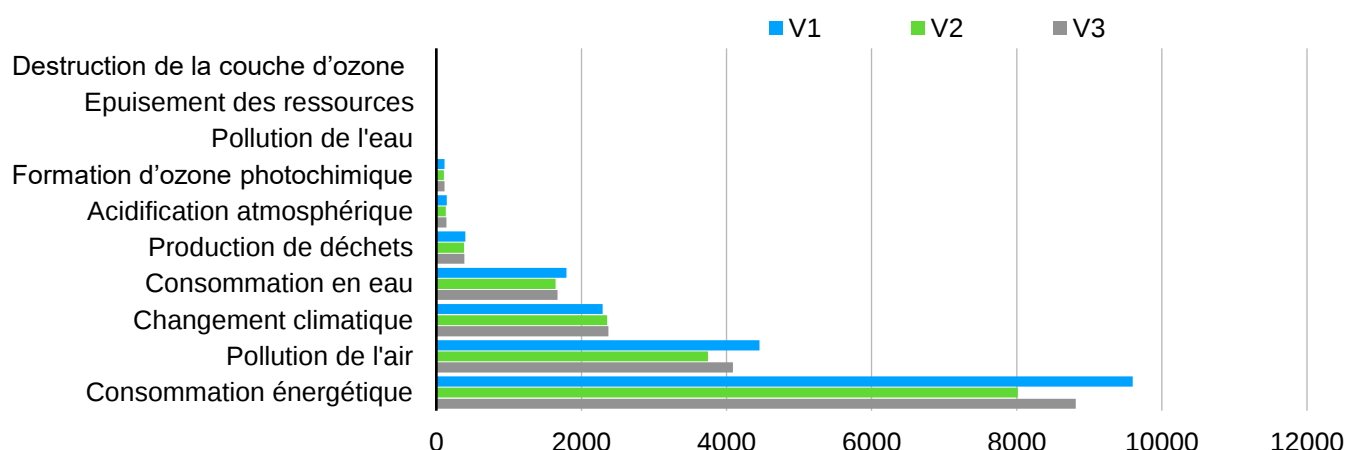


Figure 17 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase d'extraction

De la figure 17, on constate que pour tous les indicateurs étudiés en dehors de l'indicateur changement climatique, les valeurs obtenus sont moins élevées pour la variante V2 que pour les variantes V1 et V3. Par conséquent, de manière globale, pour la phase d'extraction la variante V2 est plus favorable que les variantes V1 e V3.

Le figure 18 ci-dessous traduit les valeurs obtenues du tableau 11 pour la phase de transformation sous forme de graphique.

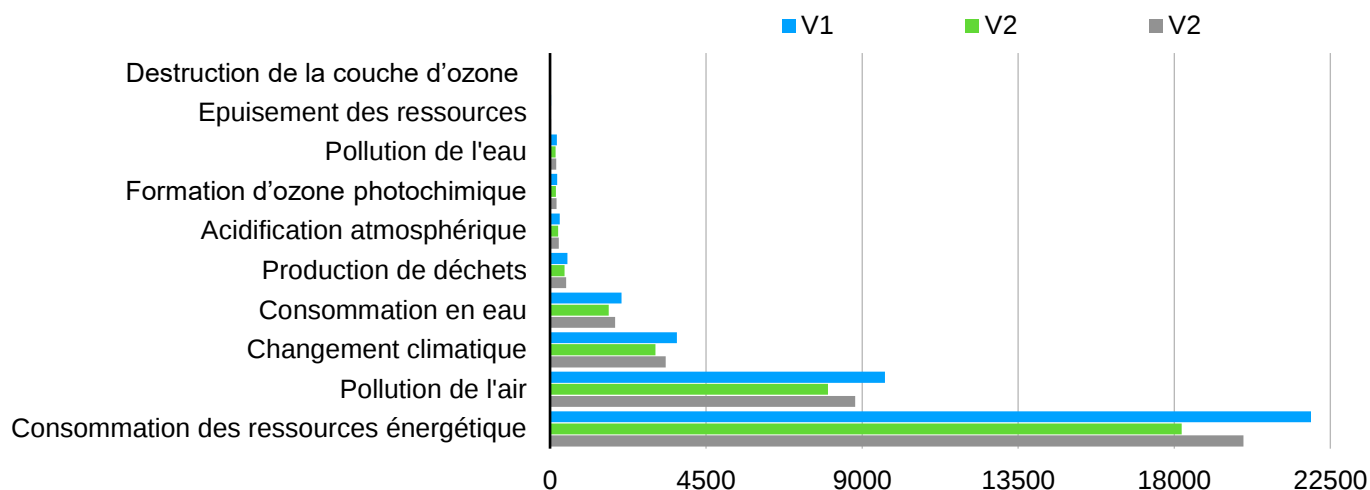


Figure 18 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase de transformation

De la figure 18, on constate que pour tous les indicateurs étudiés, les valeurs obtenus sont moins élevées pour la variante V2 que pour les variantes V1 et V3. Par conséquent, pour la phase de transformation la variante V2 est plus favorable que les variantes V1 e V3.

Le figure 19 ci-dessous traduit les valeurs obtenues du tableau 12 pour la phase de transport sous forme de graphique.

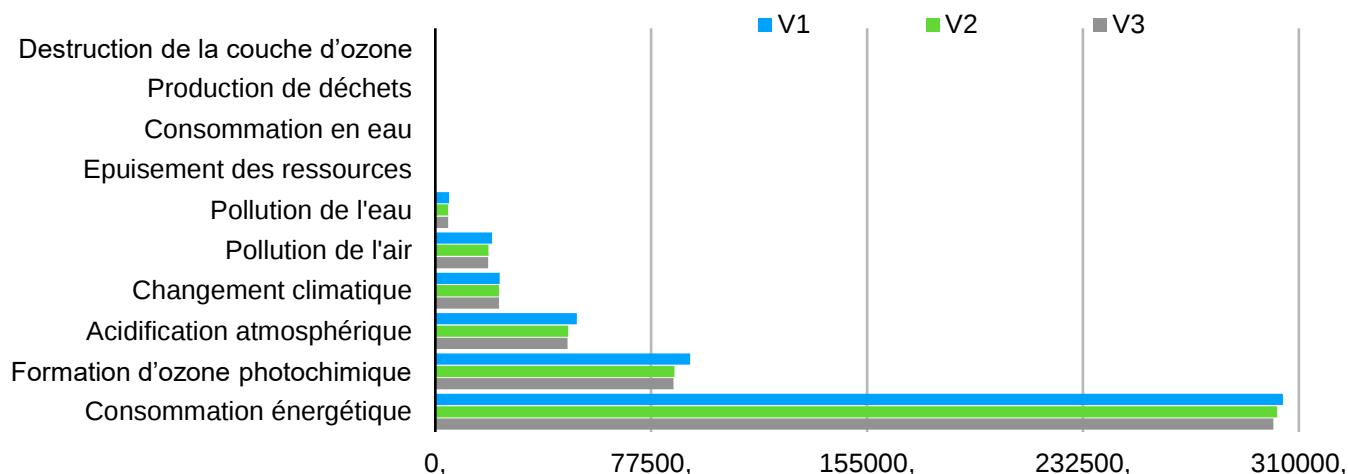


Figure 19 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase de trnsport

De la figure 19, on constate que pour tous les indicateurs étudiés, les valeurs obtenus sont moins élevées pour la variante V3 que pour les variantes V1 et V2. Par conséquent, pour la phase de transformation la variante V3 est plus favorable que les variantes V1 e V2.

Le figure 20 ci-dessous traduit les valeurs obtenues du tableau 13 pour la phase de mise en oeuvre sous forme de graphique.

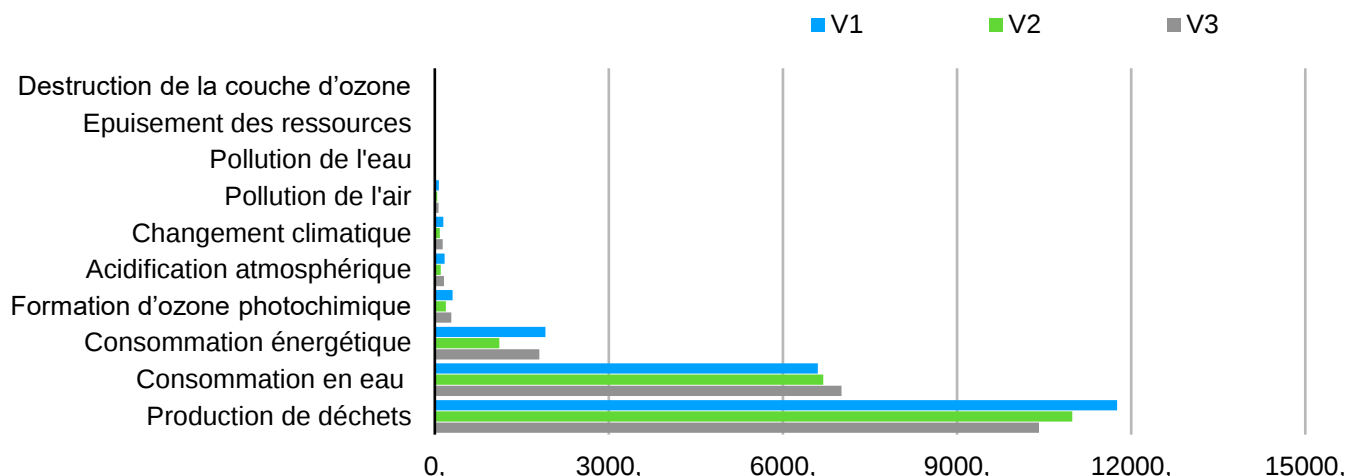


Figure 20 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase de mise en oeuvre

De la figure 20, on constate que pour l'indicateur production de déchets, la valeur obtenue pour la variante V3 est inférieure à ceux des variantes V1 et V2. Pour l'indicateur consommation en eau la valeur obtenue pour la variante V1 est inférieure à celles de variantes V2 et V3. Cependant, pour les autres indicateurs étudiés, les valeurs obtenus sont moins élevées pour la variante V2 que pour les variantes V1 et V3. Par conséquent, de manière globale, pour la phase de transformation la variante V2 est plus favorable que les variantes V1 e V3 compte tenu du nombre d'indicateurs pour lesquels les valeurs obtenues sont les plus faibles.

Le figure 21 ci-dessous traduit les valeurs obtenues du tableau 14 pour la phase de fin de vie sous forme de graphique.

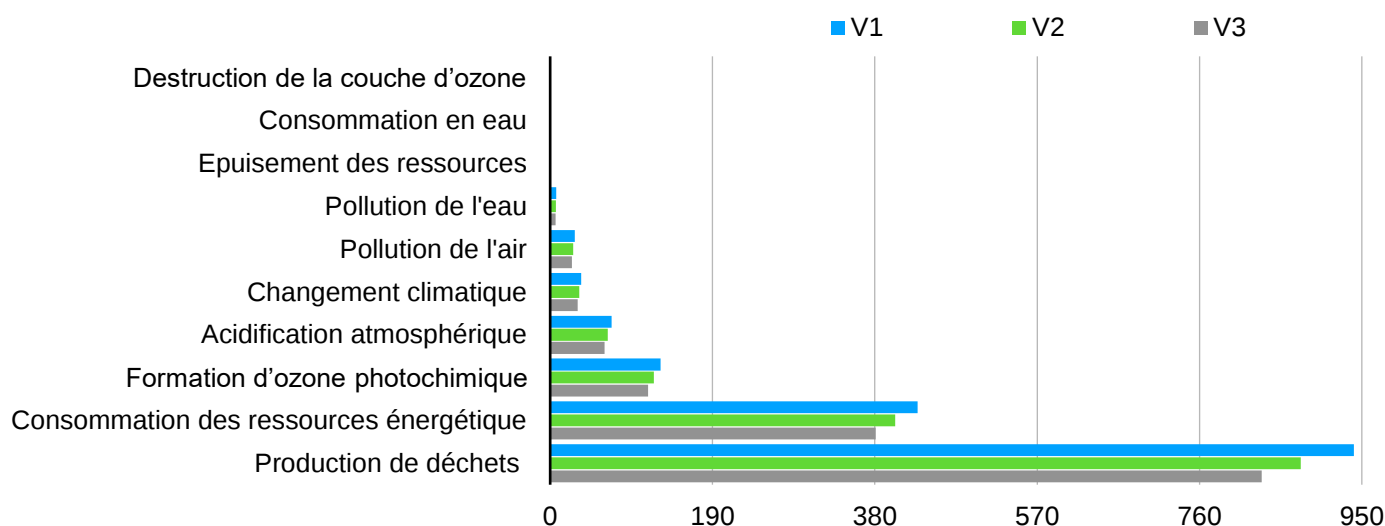


Figure 21 : Graphique des valeurs des indicateurs pour la phase de fin de vie

De la figure 21, on constate que pour tous les indicateurs étudiés, les valeurs obtenus sont moins élevées pour la variante V3 que pour les variantes V1 et V2. Par conséquent, pour la phase de fin de vie la variante V3 est plus favorable que les variantes V1 e V2.

La figure 22 ci-dessous présente le graphique des valeurs des indicateurs sur l'ensemble du cycle de vie.

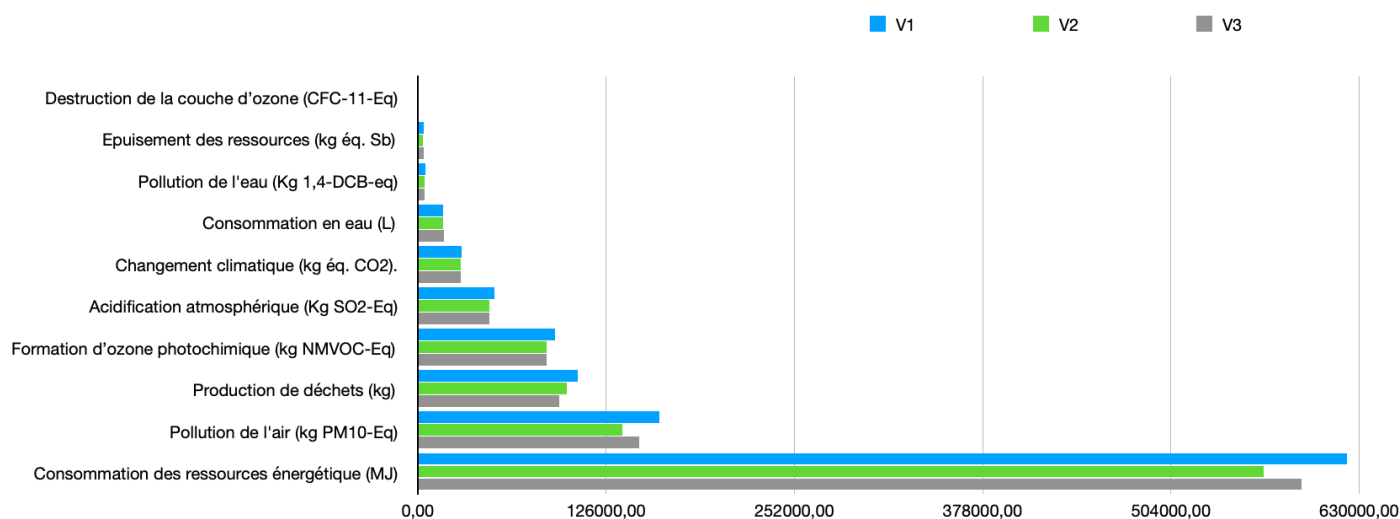


Figure 22 : Graphique des valeurs des indicateurs sur l'ensemble du cycle de vie

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur consommation des ressources énergétiques pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V3 est supérieure à celle de V2. Par conséquent, la réalisation de V2 demandera moins de ressources énergétiques que V1 et V3.

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur pollution de l'air pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V3 est supérieure à celle de V2. Par conséquent, la réalisation de V2 engendrera moins de pollution de l'air que V1 et V3.

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur production de déchets pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V2 est supérieure à celle de V3. Par conséquent, la réalisation de V3 produira moins de déchets que V1 et V2.

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur formation d'ozone photochimique (smog) pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V2 est supérieure à celle de V3. Par conséquent, la réalisation de V3 produira moins de smog que V1 et V2.

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur acidification atmosphérique pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V2 est supérieure à celle de V3. Par conséquent, la réalisation de V3 produira moins d'acidification atmosphérique que V1 et V2.

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur changement climatique pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V2 est supérieure à celle de V3. Par conséquent, la réalisation de V3 produira moins de changement climatique que V1 et V2.

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur consommation d'eau pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V3 est supérieure à celle de V2. Par conséquent, la réalisation de V2 consommera moins d'eau que V1 et V3.

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur pollution de l'eau pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V3 est supérieure à celle de V2. Par conséquent, la réalisation de V2 engendrera moins de pollution d'eau que V1 et V3.

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur épuisement des ressources (ressources fossile) pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V3 est supérieure à celle de V2. Par conséquent, la réalisation de V2 demandera moins de ressources que V1 et V3.

Sur l'ensemble du cycle de vie, la valeur de l'indicateur destruction de la couche d'ozone pour la variante V1 est supérieure aux valeurs des variantes V2 et V3. De même, la valeur de la variante V3 est supérieure à celle de V2. Par conséquent, la réalisation de V2 produira moins de destruction de la couche d'ozone que V1 et V3.

De tout ce qui précède, il ressort que la variante V2 est plus favorable à l'environnement pour les indicateurs consommation des ressources énergétiques, pollution de l'air, consommation d'eau, épuisement des ressources, destruction de la couche d'ozone. De même, la variante V3 est plus favorable à l'environnement pour les indicateurs production de déchets, formation d'ozone photochimique, acidification atmosphérique, changement climatique et pollution de l'eau. Cependant, les écarts entre les valeurs des indicateurs formation d'ozone photochimique, acidification atmosphérique, et pollution de l'eau sont inférieurs à 0,5% entre V2 et V3. De ce fait, V3 est réellement plus favorable pour l'indicateur production de déchet et V2 est plus favorable pour les autres indicateurs.

Pour étayer ce constat, nous proposons dans le tableau 17 un système de notation des écarts précédemment observés dans le tableau 16.

Tableau 17 : Système de notation.

Intervalles des écarts	0 à -5	-5,01 à -10	-10,01 à -15	-15,01 à 20
Score attribué	1	2	3	4

Les scores proposés iront de 1 (la valeur la plus faible) à 4 (la valeur la plus élevée) pour chaque intervalle évoluant par ordre décroissant. En d'autres termes, plus l'écart est faible, plus le score est élevé. Et donc, plus le score d'un indicateur est élevé, plus la variante étudiée est favorable pour ce dernier.

En appliquant le système de notation défini précédemment, on obtient les scores de chaque variante en fonction des scores des indicateurs récapitulés dans le tableau 18.

Tableau 18 : Résultats des notations appliqués à notre étude

Indicateurs	V2	V3
Destruction de la couche d'ozone	4	2
Epuisement des ressources	4	2
Pollution de l'eau	2	2
Consommation en eau	1	1
Changement climatique	1	1
Acidification atmosphérique	2	2
Formation d'ozone photochimique	2	2
Production de déchets	2	3
Pollution de l'air	3	2
Consommation des ressources énergétique	2	2
Score	23	19

Du tableau 18, on observe que le score obtenu pour la variante V2 est supérieure à celle obtenu pour la variante V3 (23 > 19).

Par conséquent, la variante V2 sera retenu comme la variante la plus favorable pour l'environnement.

Conclusion

En sommes un bilan par analyse de cycle de vie a été effectué sur une portion de route d'un kilomètre. La méthodologie employée a consisté à quantifier les matériaux et composants, puis les substances puisées et émises dans l'environnement, en considérant des indicateurs de base issus de la base de données Diogène 2023 et Ecoinvent. Les résultats des calculs ont montré que les valeurs des indicateurs d'impacts des variantes V2 et V3 sont toutes inférieures à celle de la variante V1. Les variantes V2 et V3 sont donc plus favorables à l'environnement que la variante V1 selon les valeurs obtenues pour les différents indicateurs environnementaux. Compte tenu de certaines valeurs proches obtenues pour certains indicateurs entre les variantes V2 et V3, la variante V3 a été retenue comme la plus favorable à l'environnement pour 1 seul indicateur environnemental de manière pertinente contrairement à la variante V2. De plus étant donné que la variante V2 avait un score plus élevé que V3, V2 a été retenu comme la variante la plus favorable pour l'environnement. La variante V2 est donc la moins polluante.

VI.ETUDE FINANCIERE DES VARIANTES DE CHAUSSEE

Cette rubrique consiste à comparer les couts des différentes variantes afin de ressortir la moins couteuse pour l'entreprise. Nous nous sommes référés aux prix du marché pour la réalisation d'une unité de matériaux pour calculer les couts des variantes. Le tableau 16 ci-dessous présente les couts de réalisation des différentes variantes étudiées.

Tableau 19 : Couts de réalisation des différentes variantes étudiées

Va- riante	Désignation	Unité	Quantités	Prix uni- taires HT	Montant HT	Montant total HT
V1	Fourniture et mise en œuvre de béton bitumineux en couche de revêtement	m ³	900,00	258 250,00	232 425 000,00	1 176 080 618,75
	Couche d'accrochage a l'émulsion de bitume 35/50 dopé	m ²	6,75	850,00	5 737,50	
	Fourniture et mise en œuvre de GB	m ³	2 400,00	235 150,00	564 360 000,00	
	Couche d'imprégnation au bitume fluidifié	m ²	3,38	1 400,00	4 725,00	
	Fourniture et mise en œuvre de ciment pour amélioration de la couche de fondation en 0/31,5	T	101,56	175 000,00	17 773 437,50	
	Fourniture et mise en œuvre de GNT 0/31,5 en couche de fondation	m ³	6 398,44	56 500,00	361 511 718,75	
V2	Fourniture et mise en œuvre de béton bitumineux en couche de revêtement	m ³	1 200,00	258 250,00	309 900 000,00	1 049 138 843,75
	Couche d'accrochage a l'émulsion de bitume 35/50 dopé	m ²	3,38	850,00	2 868,75	
	Fourniture et mise en œuvre de GB	m ³	1 500,00	235 150,00	352 725 000,00	
	Couche d'imprégnation au bitume fluidifié	m ²	3,38	1 400,00	4 725,00	
	Fourniture et mise en œuvre de ciment pour amélioration de la couche de fondation en 0/31,5	T	162,50	175 000,00	28 437 500,00	
	Fourniture et mise en œuvre de GNT 0/31,5 en couche de fondation	m ³	6 337,50	56 500,00	358 068 750,00	
V3	Fourniture et mise en œuvre de béton bitumineux en couche de revêtement	m ³	900,00	258 250,00	232 425 000,00	1 064 443 431,25
	Couche d'accrochage a l'émulsion de bitume 35/50 dopé	m ²	6,75	850,00	5 737,50	
	Fourniture et mise en œuvre de GB	m ³	2 100,00	235 150,00	493 815 000,00	
	Couche d'imprégnation au bitume fluidifié	m ²	3,38	1 400,00	4 725,00	

Fourniture et mise en œuvre de ciment pour amélioration de la couche de fondation en 0/31,5	T	142,19	175 000,00	24 882 812,50	
Fourniture et mise en œuvre de GNT 0/31,5 en couche de fondation	m ³	5 545,31	56 500,00	313 310 156,25	

Les coûts évalués ici prennent uniquement en compte la structure de la chaussée étudiée (de la couche de fondation au revêtement). D'autre part, la comparaison des coûts se fera en considérant la variante V1 (variante du projet) comme référence.

Les écarts relatifs entre les différentes variantes se calculent par la formule suivante :

$$Ecart \% = \left(\frac{Montant\ vi - Montant\ v1}{Montant\ v1} \right) \times 100$$

Tableau 20 : Ecart relatifs des coûts

Variante	V1	V2	V3
Coûts %	0	-10,79	-9,49

Du tableau 20, on constate que la variante V2 est moins coûteuse que la variante V1 de 10,79% soit une différence de 126 941 775 FCFA. De même, la variante V3 est moins coûteuse que la variante V1 de 9,49% soit une différence de 111 637 187,5 FCFA.

Conclusion :

En se basant sur les prix définis par le marché pour chaque quantité de matériaux, nous avons évalué, le coût auquel pourrait revenir la réalisation des trois (3) variantes proposées. Il a été constaté que la variante V2 permet de réduire les coûts de 10,79% et la variante V3 de 9,49% par rapport au coût de la variante projet (V1). De la variante la moins coûteuse à la plus coûteuse, nous avons donc V2, V3 et V1.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Dans l'optique de préserver l'environnement lors d'un projet de construction routier, il est primordial d'évaluer les contributions en termes d'impact environnemental lors des différentes phases du cycle de vie des chaussées. C'est dans ce contexte qu'une analyse technique et une analyse du cycle de vie (ACV) a été effectuée sur 1km de route composée d'une couche en GNT, une couche en GNT amélioré au ciment, une couche en grave bitume et une couche en béton bitumineux. La première partie de l'étude a consisté à proposer des variantes de chaussées en se basant sur la méthode rationnelle de dimensionnement des chaussées (logiciel Alizé32 du LCPC). Trois variantes d'épaisseurs différentes ont été retenues. Les épaisseurs des couches de chaussées obtenues sont : Nous avons pour la variante V1 (variante proposée par l'entreprise) 15cm de GNT crue et 25cm de GNT amélioré en couche de fondation, 16cm de GB en couche de base et 6cm de BB en couche de roulement. Pour la variante V2, nous avons 40cm de GNT amélioré au ciment en couche de fondation, 10cm de GB en couche de base et 6cm de BB en couche de roulement. Pour la variante V3, nous avons 35cm de GNT amélioré au ciment en couche de fondation, 16cm de GB en couche de base et 6cm de BB en couche de roulement. Par la suite, l'application de l'Analyse du Cycle de Vie a consisté à évaluer les quantités de flux intervenant dans la réalisation de chaque variante à toutes les différentes étapes de leur vie grâce à des indicateurs environnementaux tirés des bases de données Diogen et Ecoivent. Il a été observé que les valeurs des indicateurs d'impacts pour les variantes V2 et V3 sont inférieures à celle de la variante V1. Le choix s'est porté sur la variante V2 compte tenu des valeurs plus favorables en comparaison de celles de la variante V3. Le dernier volet a consisté à évaluer les coûts qu'engendrerait la réalisation de chaque variante. Sur la base de ces calculs, une comparaison a été faite pour déterminer la variante la moins coûteuse. Il a été observé que les variantes V2 et V3 sont moins coûteuses respectivement de 10,79% et de 9,49% par rapport à la variante projet (V1).

Il ressort donc de cette étude que la variante pouvant combiner très bien réduction de pollution et réduction des coûts est la variante V2.

Au terme de ce travail, les perceptives qui se dégagent sont :

- Disposer d'une base de données environnementales spécifiques pour le Bénin et pour les pays tropicaux
- Elargir cette étude sur d'autres indicateurs environnementaux

BIBLIOGRAPHIE

- AASHTO, 1993. AASHTO guide for design of pavement structures.
- Bryce, J.M., 2008. Developing Sustainable Transportation Infrastructure.
- BS EN ISO 14041, 1998. Environmental management - Life cycle assessment - Goal and scope definition and inventory analysis.
- BS EN ISO 14042, 2000. Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle impact assessment.
- CEBTP, 1984. Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux.pdf.
- Collection Technique Cimbéton., 2010. Analyse du cycle de vie d'un pont en béton : Exemple d'application pour un pont courant.
- Collection Technique Cimbéton., 2009. Terrassements et assises de chaussées : Traitement des sols aux liants hydrauliques.
- El Bouazzaoui, I., 2013. L'empreinte écologique : Proposition d'un modèle synthétique de représentation des empreintes à l'échelle " Micro " d'une organisation ou d'un projet Ibtiissam El Bouazzaoui .pdf.
- Feraille, A., Desbois, T., Saadé, M., 2022. L'ACV dans le domaine de la construction : le cas du matériau béton 40.
- Harvey, J., Meijer, J., Ozer, H., Al-Quadi, I., Saboori, A., Kebdall, A., 2016. Pavement Life Cycle Assessment Framework.
- Indian Standards ISO 14044, 2009. Environmental Management-Life Cycle Assessment-Requirements and Guidelines.
- ISO 14040, 1997. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework.
- ISO 14043, 2000. Environmental management - Life cycle assessment - Life cycle interpretation.
- Jullien, A., Moneron, P., Ventura, A., Legret, M., Demare, D., 2014. Analyse de Cycle de Vie appliquée à un chantier d'entretien routier sur la RN 76. Evaluation technique et environnementale d'une couche de liaison d'enrobé bitumineux pour différents taux de recyclage. Chapitre 2: Déroulement de l'étude.
- LCPC SETRA, 1994. Conception et dimensionnement des structures de chaussee.
- Lee, K.-M., Inaba, A., 2004. Life Cycle Assessment Best Practices of ISO 14040 Series.
- Mohamad, N., Muthusamy, khairunisa, Embong, R., Kusbiantoro, A., Hashim, H., 2022. Environmental impact of cement production and Solutions.
- Parey, Leger, 1971. Le dimensionnement des chaussées (2e Partie) : Méthode de Dimensionnement-Renforcement.
- Pelt, J.-M., 1977. L'homme re-naturé.
- Schemid, M., Knorr, W., 2012. Guide on calculating GHG emissions for freight forwarding and logistics services.pdf.

ANNEXES

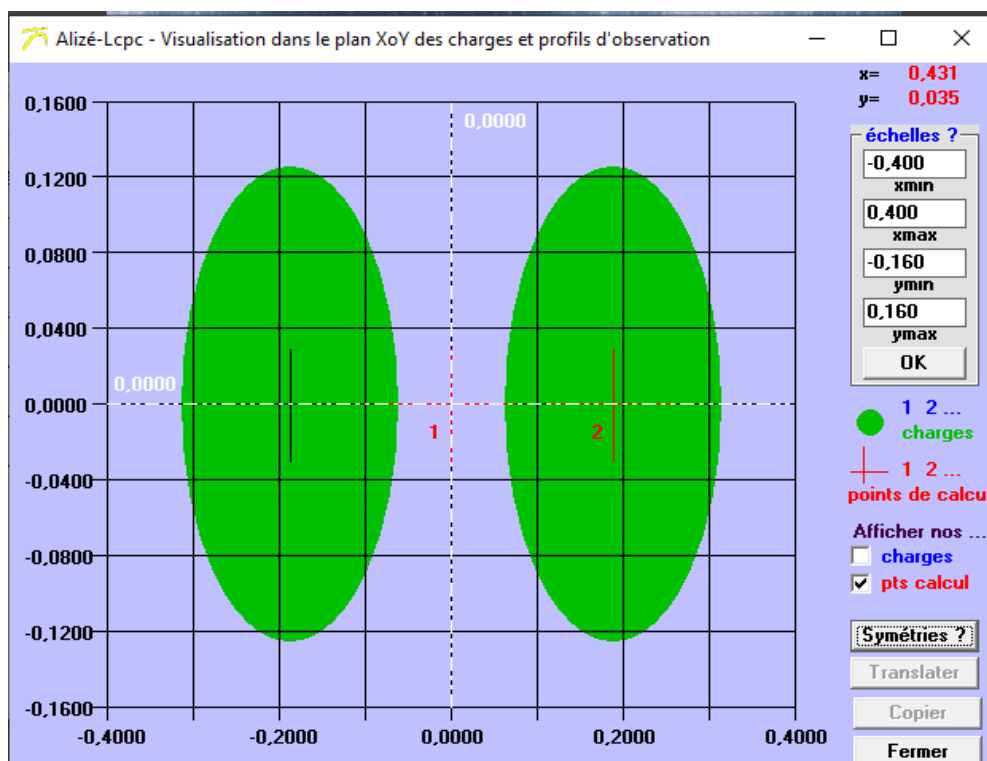
ANNEXE 1 : DIMENSIONNEMENT

Calcul des contraintes réels dues au trafic par le logiciel Alizé

Hypothèses d'étude

- Chargement : jumelage standard français
- Essieux de référence : 13 t
- Pression verticale : 0,6620 MPa
- Rayon : 0,125 m
- Entraxe roues : 0,3750 m

Annexe 1.1 : Charge de référence utilisé par le logiciel Alizé LCPC



Annexe 1.2 : Jumelage des roues

Annexe 1.3 : Comparaison des valeurs des contraintes de la variante V3 pour la structure de 6cm de BB et la structure de 8cm de BB

Couches	V3-6cm	V3-8cm	Valeurs admissibles	Conclusion
BB	11,8	-2,2	107,7	Ok
GB	-90,5	-90,6	107,7	Ok
GNT Amélioré	205,2	206,2	288,6	Ok
PST	275,7	276,7	288,6	Ok

ANNEXE 2 : ANALYSE DY CYCLE DE VIE

Annexe 2.1 : Quantification des matériaux à mettre en œuvre

Variantes	Matériaux		Volume de la couche à réaliser	Coefficient de foisonnement	Volume total à transporter par couche	Densité du mélange (t/m³)	Masse du mélange (t)	Proportion dans le mélange	Volume à transporter par matériaux (m³)	Masse de chaque matériau (t)
V1 (projet)	BB	Bitume	750,00	1,20	900,00	2,50	2 250,00	4,80 %	43,20	108,00
		GNT						95,20 %	856,80	2 142,00
	Emulsion 250g/m²	Bitume	3,38	1,00	3,38	1,02	3,44	60,00 %	2,03	2,07
		Eau						40,00 %	1,35	1,38
	GB couche 2	Bitume	1 000,00	1,20	1 200,00	2,50	3 000,00	4,40 %	52,80	132,00
		GNT						95,60 %	1 147,20	2 868,00
	Emulsion 250g/m²	Bitume	3,38	1,00	3,38	1,02	3,44	60,00 %	2,03	2,07
		Eau						40,00 %	1,35	1,38
	GB couche 1	Bitume	1 000,00	1,20	1 200,00	2,50	3 000,00	4,40 %	52,80	132,00
		GNT						95,60 %	1 147,20	2 868,00
	Emulsion 250g/m²	Bitume	3,38	1,00	3,38	1,02	3,44	60,00 %	2,03	2,07
		Eau						40,00 %	1,35	1,38
	GTC	Ciment	3 125,00	1,30	4 062,50	2,34	9 506,25	2,50 %	101,56	237,66
		GNT						93,10 %	3 782,19	8 850,32
		Eau						4,40 %	178,75	418,28
	GNT crue		1 875,00	1,30	2 437,50	2,36	5 752,50	95,80 %	2 335,13	5 510,90
	Eau							4,20 %	102,38	241,61
V2	BB	Bitume	1 000,00	1,20	1 200,00	2,50	3 000,00	4,80 %	57,60	144,00
		GNT						95,20 %	1 142,40	2 856,00
	Emulsion 250g/m²	Bitume	3,38	1,00	3,38	1,02	3,44	60,00 %	2,03	2,07
		Eau						40,00 %	1,35	1,38
	GB	Bitume	1 250,00	1,20	1 500,00	2,50	3 750,00	4,40 %	66,00	165,00
		GNT						95,60 %	1 434,00	3 585,00
	Emulsion 250g/m²	Bitume	3,38	1,00	3,38	1,02	3,44	60,00 %	2,03	2,07
		Eau						40,00 %	1,35	1,38

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

	GTC	Ciment	2 500,00	1,30	3 250,00	2,34	7 605,00	2,50 %	81,25	190,13
		GNT						93,10 %	3 025,75	7 080,26
		Eau						4,40 %	143,00	334,62
	GTC	Ciment	2 500,00	1,30	3 250,00	2,34	7 605,00	2,50 %	81,25	190,13
		GNT						93,10 %	3 025,75	7 080,26
		Eau						4,40 %	143,00	334,62
V3	BB	Bitume	750,00	1,20	900,00	2,50	2 250,00	4,80 %	43,20	108,00
		GNT						95,20 %	856,80	2 142,00
	Emulsion 250g/m²	Bitume	3,38	1,00	3,38	1,02	3,44	60,00 %	2,03	2,07
		Eau						40,00 %	1,35	1,38
	GB couche 2	Bitume	875,00	1,20	1 050,00	2,50	2 625,00	4,40 %	46,20	115,50
		GNT						95,60 %	1 003,80	2 509,50
	Emulsion 250g/m²	Bitume	3,38	1,00	3,38	1,02	3,44	60,00 %	2,03	2,07
		Eau						40,00 %	1,35	1,38
	GB couche 2	Bitume	875,00	1,20	1 050,00	2,50	2 625,00	4,40 %	46,20	115,50
		GNT						95,60 %	1 003,80	2 509,50
	Emulsion 250g/m²	Bitume	3,38	1,00	3,38	1,02	3,44	60,00 %	2,03	2,07
		Eau						40,00 %	1,35	1,38
	GTC	Ciment	4 375,00	1,30	5 687,50	2,34	13 308,75	2,50 %	142,19	332,72
		GNT						93,10 %	5 295,06	12 390,45
		Eau						4,40 %	250,25	585,59

Formule de calcul :

Volume de la couche à réaliser : $V1 = \text{Longueur} \times \text{Largeur} \times \text{Epaisseur} = 1000 \times 13.5 \times \text{Epaisseur de la couche}$

Volume total à transporter : $V2 = V1 \times \text{Coefficient de foisonnement}$

Masse du mélange : $M1 = V2 \times \text{Densité du mélange}$

Volume à transporter par matériau : $V3 = V2 \times \text{Proportion dans le mélange}$

Masse de chaque matériau : $M2 = M1 \times \text{Proportion dans le mélange}$

Annexe 2.2 : Valeur des indicateurs matériaux durant la phase d'extraction

Variantes	Indicateurs	Bitume	GNT	Ciment	TOTAL
V1	Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	1 060,89375	278,05538	102,57813	1 441,52725
	Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	0,13277	0,00423	0,00216	0,13916
	Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	12 634,05203	23 795,78250	3 465,87109	39 895,70562
	Consommation en eau (L)	35 336,28000	142 364,35200	1 604,68750	179 305,31950
	Changement climatique (kg éq. CO2).	3 786 260,10000	659 918,09000	5 575,78125	4 451 753,97125
	Acidification atmosphérique (Kg SO2-Eq)	8 899 836,12000	662 142,53300	37 750,78125	9 599 729,43425
	Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	5,52904	7,26651	0,42352	13,21907
	Production de déchets (kg)	140 682,25500	32 995,90450	55 554,68750	229 232,84700
	Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	784,75163	250,24984	113,75000	1 148,75146
	Consommation des ressources énergétique (MJ)	0,23293	0,67104	0,00455	0,90852
V2	Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	874,40250	258,83700	164,12500	1 297,36450
	Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	0,10943	0,00393	0,00346	0,11683
	Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	10 413,15087	22 151,08755	5 545,39375	38 109,63217
	Consommation en eau (L)	29 124,62400	132 524,54400	2 567,50000	164 216,66800
	Changement climatique (kg éq. CO2).	3 120 685,08000	614 306,48000	8 921,25000	3 743 912,81000
	Acidification atmosphérique (Kg SO2-Eq)	7 335 361,29600	616 377,17600	60 401,25000	8 012 139,72200
	Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	4,55711	6,76427	0,67763	11,99900
	Production de déchets (kg)	115 952,15400	30 715,32400	88 887,50000	235 554,97800
	Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	646,80255	232,95330	182,00000	1 061,75585
	Consommation des ressources énergétique (MJ)	0,19199	0,62466	0,00728	0,82393

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

V3	Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	970,47375	258,83700	143,60938	1 372,92013
	Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	0,12146	0,00393	0,00303	0,12842
	Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	11 557,25147	22 151,08755	4 852,21953	38 560,55854
	Consommation en eau (L)	32 324,56800	132 524,54400	2 246,56250	167 095,67450
	Changement climatique (kg éq. CO2).	3 463 557,06000	614 306,48000	7 806,09375	4 085 669,63375
	Acidification atmosphérique (Kg SO2-Eq)	8 141 302,87200	616 377,17600	52 851,09375	8 810 531,14175
	Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	5,05780	6,76427	0,59292	12,41499
	Production de déchets (kg)	128 691,90300	30 715,32400	77 776,56250	237 183,78950
	Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	717,86723	232,95330	159,25000	1 110,07053
	Consommation des ressources énergétique (MJ)	0,21308	0,62466	0,00637	0,84411

Annexe 2.3 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la mise en œuvre du béton bitumineux

Indicateurs	V1	V2	V3
Acidification atmosphérique (Kg SO2-Eq)	804,060	1072,080	804,060
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	0,094	0,125	0,094
Production de déchets (kg)	14309,512	19079,349	14309,512
Consommation en eau (L)	57542,400	76723,200	57542,400
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	2792808,000	3723744,000	2792808,000
Consommation des ressources énergétique (MJ)	6359205,600	8478940,800	6359205,600
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	5,535	7,380	5,535
Changement climatique (kg éq. CO2).	105728,400	140971,200	105728,400

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	605,070	806,760	605,070
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	0,911	1,215	0,911

Annexe 2.4 : Valeurs des indicateurs environnementaux pour la mise en œuvre de la GB

Indicateurs	V1	V2	V2
Acidification atmosphérique (Kg SO2-Eq)	1980,480	1237,800	1732,920
Destruction de la couche d'ozone (CFC-11-Eq)	0,229	0,143	0,200
Production de déchets (kg)	36262,496	22664,060	31729,684
Consommation en eau (L)	148339,200	92712,000	129796,800
Pollution de l'air (kg PM10-Eq)	6862464,000	4289040,000	6004656,000
Consommation des ressources énergétique (MJ)	15580444,800	9737778,000	13632889,200
Pollution de l'eau (Kg 1,4-DCB-eq)	13,920	8,700	12,180
Changement climatique (kg éq. CO2).	260227,200	162642,000	227698,800
Formation d'ozone photochimique (kg NMVOC-Eq)	1492,560	932,850	1305,990
Epuisement des ressources (kg éq. Sb)	2,226	1,391	1,948

Annexe 2.5 : Quantités d'éléments émis durant la phase de transport due à la combustion du diesel (Ecoinvent 3.5)

Eléments émis	Quantité
Acetaldehyde	0,01
Acetone	0,01

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Arsenic	0,02
Benzene	0,03
Butane	0,005
Cadmium	0,000005
Chloroforme	0,0001
Chrome	0,000002
Ethylbenzen	0,01
Formaldehyde	0,02
Hexane	0,01
Manganese	0,00003
Mercure	0,00002
Methylethylcetone	0,01
Monoxyde de carbone (CO)	1,5
Nickel	0,00005
NOx	12
Pentane	0,01
Plomb	0,00003
PM10	0,05
SOx	0,015
Styrene	0,003
Toluene	0,02

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Trichloroethulene	0,0001
Vanadium	0,00005
Xylene	0,015
Zink	0,00002

Annexe 2.6 : Coefficients de ponderation (Ecoinvent 3.5)

Eléments émis	Acidification atmosphérique (Kg SO2-Eq)	Production de déchets (kg)	Pollution de l'air (kg PM10- Eq)	Pollution de l'eau (Kg 1,4- DCB-eq/kg)	Formation d'ozone photochimique ou Smog (kg éq.NMVOC)
Acetaldehyde	0	0	0	0	0
Acetone	0	0	0	0,00099	0
Arsenic	0	0	0	0,20167	0
Benzene	0	0	0	0,06824	0
Butane	0	0	0	0	0,59459
Cadmium	0	0	0	0,47212	0
Chloroforme	0	0	0	0,00018	0,03885
Chrome	0	0	0	0,01020	0
Dioxyde de carbone (CO2)	0	0	0	0	0
Ethylbenzen	0	0	0	0,0000216	1,23311
Formaldehyde	0	0	0	0,00519	0
Hexane	0	0	0	0,000000082867	0,81419
Manganese	0	0	0	0,01112	0
Mercure	0	0	0	3,29139	0

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLE-
MENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Methylethylcetone	0	0	0	0	0,63007
Carbon monoxide, fossil (CO)	0	0	0	0	0,0456081081081
Nickel	0	0	0	2,91737	0
Nitrogen oxides (NOx)	0,56	0	0,22	0	1
Pentane	0	0	0	0,00000834	0,66723
Plomb	0	0	0	0,00482	0
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	0	0	1	0	0
Sox (dioxyde de soufre)	1	0	0,2	0	0,0810810810811
Styrene	0	0	0	0,0001044	0,23986
Toluene	0	0	0	0,0000118	1,07601
Trichloroethulene	0	0	0	0,0000263983	0,54899
Vanadium	0	0	0	3,57335	0
Xylene	0	0	0	0,000008687	0
Zink	0	0	0	0,22125	0

Annexe 2.7 : Energie consommée et CO₂ émis durant la phase de transport carrière à la centrale

Variante	Matériaux	Volume à transporter (m ³)	Volume à transporter par voyage	Nombre total de voyage	Distance parcourue (Km)	Consommation au 100km	Consommation totale du combustible (l)	Emission GWP100 par matériaux	Consommation d'énergie par matériaux	Emission GWP100 totale (kg eq.CO ₂)	Consommation d'énergie total (MJ)
V1	Bitume	154,88	50,00	4,00	201,00	35,00	562,80	1 823,47	24 031,56	13 353,98	175 992,32
	Gramulats	3 151,20	19,32	164,00	31,00	35,00	3 558,80	11 530,51	151 960,76		
V2	Bitume	127,65	50,00	3,00	201,00	35,00	422,10	1 367,60	18 023,67	10 788,88	142 186,73
	Gramulats	2 576,40	19,32	134,00	31,00	35,00	2 907,80	9 421,27	124 163,06		
V3	Bitume	141,68	50,00	3,00	201,00	35,00	422,10	1 367,60	18 023,67	11 843,50	156 085,58
	Gramulats	2 864,40	19,32	149,00	31,00	35,00	3 233,30	10 475,89	138 061,91		

Formule de calcul :

Volume à transporter : V1

Volume à transporter par voyage : V2

Nombre total de voyage : $N = \frac{V1}{V2}$

Distance parcourue : D

Consommation totale du combustible : $C = 2N \times D \times \frac{35}{100}$ avec 35/100 la consommation en carburant d'un camion (35L pour 100KM)

Emission GWP100 par matériaux : $E_{GWP100} = 3,24 \times C$

Consommation d'énergie par matériaux : $E_{Energie} = 42,7 \times C$

Emission totale (Kg.CO₂) : $E_{GWP100-TOTAL} = \sum E_{GWP100}$

Consommation d'énergie total (MJ) : $E_{Energie-TOTAL} = \sum E_{Energie}$

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Annexe 2.8 : Energie consommée en MJ et CO₂ émis en kg eq.CO₂ durant la phase de transport de la centrale au chantier et de la carrière au chantier

Variante	Matériaux	Volume à transporter (m ³)	Volume à transporter par voyage	Nombre total de voyage	Distance parcourue	Durée d'un voyage (min)	Consommation totale du combustible (l)	Emission GWP100 par matériaux	Consommation d'énergie par matériaux	Emission GWP100 totale (kg eq.CO ₂)	Consommation d'énergie total (MJ)
V1	Gramulats	6 117,31	19,32	317,00	190,00	35,00	42 161,00	136 601,64	1 800 274,70	202 917,96	2 674 258,30
	Béton Bitumineux	900,00	19,32	47,00	168,00	35,00	5 527,20	17 908,13	236 011,44		
	Grave Bitume	2 400,00	19,32	125,00	168,00	35,00	14 700,00	47 628,00	627 690,00		
	Ciment	101,56	30,00	4,00	101,00	20,00	161,60	523,58	6 900,32		
	Eau	281,13	30,00	10,00	3,00	20,00	12,00	38,88	512,40		
	Emulsion	10,13	15,00	1,00	168,00	20,00	67,20	217,73	2 869,44		
V2	Gramulats	6 051,50	19,32	314,00	190,00	35,00	41 762,00	135 308,88	1 783 237,40	190 075,25	2 505 004,04
	Béton Bitumineux	1 200,00	19,32	63,00	168,00	35,00	7 408,80	24 004,51	316 355,76		
	Grave Bitume	1 500,00	19,32	78,00	168,00	35,00	9 172,80	29 719,87	391 678,56		
	Ciment	162,50	30,00	6,00	101,00	20,00	242,40	785,38	10 350,48		
	Eau	286,00	30,00	10,00	3,00	20,00	12,00	38,88	512,40		
	Emulsion	6,75	15,00	1,00	168,00	20,00	67,20	217,73	2 869,44		
V3	Gramulats	5 295,06	19,32	275,00	190,00	35,00	36 575,00	118 503,00	1 561 752,50	178 849,94	2 357 065,62
	Béton Bitumineux	900,00	19,32	47,00	168,00	35,00	5 527,20	17 908,13	236 011,44		
	Grave Bitume	2 100,00	19,32	109,00	168,00	35,00	12 818,40	41 531,62	547 345,68		
	Ciment	142,19	30,00	5,00	101,00	20,00	202,00	654,48	8 625,40		

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

	Eau	250,25	30,00	9,00	3,00	20,00	10,80	34,99	461,16		
	Emulsion	10,13	15,00	1,00	168,00	20,00	67,20	217,73	2 869,44		

Formule de calcul : (Même formules que celles de l'annexe 2.5)

Annexe 2.9 : Energie consommée en MJ et CO₂ émis en kg eq.CO₂ durant la phase de transport du bitume par voie marine

Variante	Matériaux	Volume à transporter (m³)	Volume à transporter par voyage	Nombre total de voyage	Distance parcourue	Consommation aux 12 noeuds	Consommation totale du combustible (l)	Emission totale (kg CO ₂)	Consommation d'énergie total (MJ)
V1	Bitume	154,88	16 500,00	1,00	5 741,00	1 250,00	645 810,84	2 092 427,11	27 576 122,66
V2	Bitume	127,65	16 500,00	1,00	5 741,00	1 250,00	645 810,84	2 092 427,11	27 576 122,66
V3	Bitume	141,68	16 500,00	1,00	5 741,00	1 250,00	645 810,84	2 092 427,11	27 576 122,66

Formule de calcul : (Même formules que celles de l'annexe 2.3)

1noeud = 1,852 km

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Annexe 2.10 : Energie consommée en MJ et CO₂ émis en kg eq.CO₂ durant le compactage

Va- riantes	Matériaux	Engins	L	NB	E	NP	VC (m/h)	Y _d après n passes	k1	k2	Q (t/h)	Q. à comp.	T. de comp. (h)	CH (l/h)	CT	CGWP 100 /mat	Con. éner/mat	GWP100 Total	Con. d'énergie total
V1	BB	Pneumatique	2	7	0,06	6	6 000	2,50	0,80	0,96	231,34	900,00	3,89	11,60	45,13	153,44	1 818,71	1 915,43	22 703,50
		Vibrant	2	7		6	4 000	2,50	0,80	0,88	154,22		5,84	11,60	67,69	230,16	2 728,06		
	GB 2	Pneumatique	2	7	0,08	6	6 000	2,50	0,80	0,96	308,45	1 200,0	3,89	11,60	45,13	153,44	1 818,71		
		Vibrant	2	7		6	4 000	2,50	0,80	0,88	205,63	0	5,84	11,60	67,69	230,16	2 728,06		
	GB 1	Pneumatique	2	7	0,08	6	6 000	2,50	0,80	0,96	308,45	1 200,0	3,89	11,60	45,13	153,44	1 818,71		
		Vibrant	2	7		6	4 000	2,50	0,80	0,88	205,63	0	5,84	11,60	67,69	230,16	2 728,06		
	GTC	Pneumatique	2	7	0,25	4	5 000	2,50	0,80	0,96	1 204,88	4 062,5	3,37	11,60	39,11	132,98	1 576,21		
		Vibrant	2	7		4	4 000	2,50	0,80	0,88	963,90	0	4,21	11,60	48,89	166,23	1 970,26		
	GNT crue	Pneumatique	2	7	0,15	3	2 500	2,50	0,80	0,96	481,95	2 437,5	5,06	11,60	58,67	199,47	2 364,32		
		Vibrant	2	7		4	2 500	2,50	0,80	0,88	361,46	0	6,74	11,60	78,22	265,96	3 152,42		
V2	BB	Pneumatique	2	7	0,08	6	6 000	2,50	0,80	0,96	308,45	1 200,0	3,89	11,60	45,13	153,44	1 818,71	1 598,32	18 944,85
		Vibrant	2	7		6	4 000	2,50	0,80	0,88	205,63	0	5,84	11,60	67,69	230,16	2 728,06		
	GB	Pneumatique	2	7	0,10	6	6 000	2,50	0,80	0,96	385,56	1 500,0	3,89	11,60	45,13	153,44	1 818,71		
		Vibrant	2	7		6	4 000	2,50	0,80	0,88	257,04	0	5,84	11,60	67,69	230,16	2 728,06		
	GTC 2	Pneumatique	2	7	0,20	4	5 000	2,50	0,80	0,96	963,90	3 250,0	3,37	11,60	39,11	132,98	1 576,21		
		Vibrant	2	7		4	4 000	2,50	0,80	0,88	771,12	0	4,21	11,60	48,89	166,23	1 970,26		
	GTC 1	Pneumatique	2	7	0,20	4	2 500	2,50	0,80	0,96	481,95	3 250,0	6,74	11,60	78,22	265,96	3 152,42		
		Vibrant	2	7		4	2 500	2,50	0,80	0,88	481,95	0	6,74	11,60	78,22	265,96	3 152,42		

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

V3	BB	Pneumatique	2	7	0,06	6	6 000	2,50	0,80	0,96	231,34	900,00	3,89	11,60	45,13	153,44	1 818,71	1 599,60	18 960,00
		Vibrant	2	7		6	4 000	2,50	0,80	0,88	154,22		5,84	11,60	67,69	230,16	2 728,06		
	GB 2	Pneumatique	2	7	0,07	6	6 000	2,50	0,80	0,96	269,89	1 050,0	3,89	11,60	45,13	153,44	1 818,71		
		Vibrant	2	7		6	4 000	2,50	0,80	0,88	179,93	0	5,84	11,60	67,69	230,16	2 728,06		
	GB 1	Pneumatique	2	7	0,07	6	6 000	2,50	0,80	0,96	269,89	1 050,0	3,89	11,60	45,13	153,44	1 818,71		
		Vibrant	2	7		6	4 000	2,50	0,80	0,88	179,93	0	5,84	11,60	67,69	230,16	2 728,06		
	GNT améliorée	Pneumatique	2	7	0,35	6	5 000	2,50	0,80	0,96	1 124,55	5 687,5	5,06	11,60	58,67	199,47	2 364,32		
		Vibrant	2	7		6	4 000	2,50	0,80	0,88	899,64	0	6,32	11,60	73,33	249,34	2 955,40		

Définition des abréviations

E = Épaisseur

NP = Nombre de passe

L = Largeur de compactage

NB = Nombre de bandes

VC = Vitesse du compacteur

Q. à comp. = Quantité à compacter

T. de comp. = Temps de compactage

CH = Consommation horaire de carburant

CT = Consommation totale de carburant

Con. éner/mat = Consomatine d'énergie par matériaux

GWP100 émi/mat

Con. d'énergie total = Consommation d'énergie total

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Formule de calcul :

Pneumatique : Compacteur pneumatique

Vibrant : Compacteur vibrant

Nombre de bande : $N = \frac{\text{Largeur de la chaussée}}{\text{Largeur de compactage}}$

$Q = \left(\frac{\text{Largeur de compactage} \times \text{Epaisseur} \times \text{Vitesse du compacteur} \times \text{yd}}{\text{Nombre de passe}} \right) \times K1 \times K2$

$K2 = \frac{\text{Largeur de la chaussée}}{\text{Largeur de compactage} \times \text{Nombre de bandes}}$

Temps de compactage $T = \frac{Q}{\text{Quantité à compacter}}$

Consommation totale de carburant : $C = \text{Temps de compactage} \times \text{Consommation horaire de carburant}$

Annexe 2.11: Energie consommée en MJ et CO₂ émis en kg eq.CO₂ par les engins de mise en œuvre

Va- riantes	Matériaux	Engins	Volume matériaux	Surface	V (m/min)	L	E	R (m3/h ou m2/h)	T. trav. (h)	CH (l/h)	CT (l)	GWP100 émi/mat	Con. éner/mat	Emission totale GWP100	Con. d'énergie total
V1	BB	Finisseur	900,00	-	3	4,50	0,06	48,60	18,52	20,00	370,37	2 400,00	31 629,63	12 759,04	168 151,53
		Camion bouille	1 208,17	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		
	GB 1	Finisseur	1 200,00	-	3	4,50	0,08	64,80	18,52	20,00	370,37	2 400,00	31 629,63		
		Camion bouille	3,25	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		
	GB 2	Finisseur	1 200,00	-	3	4,50	0,08	64,80	18,52	20,00	370,37	2 400,00	31 629,63		
		Camion bouille	3,25	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		
		Recycleur	4 062,50	-	10	2,40	0,25	360,00	11,28	20,00	225,69	1 462,50	19 274,31		

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

	GNT améliorée	Niveleuse	4 062,50	-	10	3,17	0,25	475,50	8,54	25,00	213,59	1 384,07	18 240,67		
		Epandeuse ciment	101,56	13 500	25	2,40	-	3 600,00	3,75	12,00	45,00	291,60	3 843,00		
		Camion bouille	4,30	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		
	GNT crue	Niveleuse	2 437,50	-	10	3,17	0,15	285,30	8,54	25,00	213,59	1 384,07	18 240,67		
V2	BB	Finisseur	1 200,00	-	3	4,50	0,06	48,60	24,69	20,00	493,83	3 200,00	42 172,84	7 014,54	92 444,67
		Camion bouille	1 208,17	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		
	GB	Finisseur	1 500,00	-	3	4,50	0,10	81,00	18,52	20,00	370,37	2 400,00	31 629,63		
		Camion bouille	3,25	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		
	GNT améliorée 2	Recycleur	3 250,00	-	10	2,40	20,00	28 800,00	0,11	20,00	2,26	14,63	192,74		
		Niveleuse	3 250,00	-	10	3,17	20,00	38 040,00	0,09	25,00	2,14	13,84	182,41		
		Epandeuse ciment	81,25	13 500	25	2,40	-	3 600,00	3,75	12,00	45,00	291,60	3 843,00		
		Camion bouille	4,30	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		
	GNT améliorée 1	Recycleur	3 250,00	-	10	2,40	20,00	28 800,00	0,11	20,00	2,26	14,63	192,74		
		Niveleuse	2 500,00	-	10	3,17	20,00	38 040,00	0,07	25,00	1,64	10,65	140,31		
		Epandeuse ciment	81,25	13 500	25	2,40	-	3 600,00	3,75	12,00	45,00	291,60	3 843,00		
V3	BB	Finisseur	900,00	-	3	4,50	0,06	48,60	18,52	20,00	370,37	2 400,00	31 629,63	12 213,60	160 963,15
		Camion bouille	1 208,17	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

	GB 1	Finisseur	1 050,00	-	3	4,50	0,08	64,80	16,20	20,00	324,07	2 100,00	27 675,93		
		Camion bouille	3,25	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		
	GB 2	Finisseur	1 050,00	-	3	4,50	0,08	64,80	18,52	20,00	370,37	2 400,00	31 629,63		
		Camion bouille	3,25	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		
	GNT améliorée	Recycleur	5 687,50	-	10	2,40	0,25	360,00	15,80	20,00	315,97	2 047,50	26 984,03		
		Niveleuse	5 687,50	-	10	3,17	0,25	475,50	11,96	25,00	299,03	1 937,70	25 536,93		
		Epandeuse ciment	142,19	13 500	25	2,40	-	3 600,00	3,75	12,00	45,00	291,60	3 843,00		
		Camion bouille	4,30	13 500	15	4,50	-	4 050,00	3,33	12,00	40,00	259,20	3 416,00		

Définition des abréviations

V = Vitesse

E = épaisseur des couches

T. trav = Temps de travail

CH = Consommation horaire de carburant

CT = Consommation totale de carburant

L = Largeur de travail

R = Rendement

Con. éner/mat = Consomatin d'énergie par matériaux

Con. d'énergie total = Consommation d'énergie total

GWP100 émi/mat = Emission de CO2 par matériaux

Annexe 2.12: Energie consommée et CO₂ émis durant la phase de démolition et/ou recyclage

Vari- antes	Matériaux	Volume à transporter (m ³)	Volume à transporter par voyage	Nombre total de voyage	Distance parcourue (Km)	Consommation des engins	Consommation totale de com- bustible (l)	Emission GWP100 par maté- riaux	Consommation d'énergie par matériaux	Emission totale (kg CO ₂)	Consommation d'énergie total (MJ)
V1	Raboteuse	9 800,00	19,32	508,000	1	70	711,200	2418,080	28661,360	3627,120	42992,040
	Camion	9 800,00	19,32	508,000	1	35	355,600	1209,040	14330,680		
V2	Raboteuse	9 200,00	19,32	477,000	1	70	667,800	2270,520	26912,340	3405,780	40368,510
	Camion	9 200,00	19,32	477,000	1	35	333,900	1135,260	13456,170		
V3	Raboteuse	8 687,50	19,32	450,000	1	70	630,000	2142,000	25389,000	3213,000	38083,500
	Camion	8 687,50	19,32	450,000	1	35	315,000	1071,000	12694,500		

Formule de calcul :

$$\text{Nombre total de voyage : } N = \frac{\text{Volume à transporter}}{\text{Volume à transporter par voyage}}$$

$$\text{Durée du transport en heure : } D = \frac{2 \times \text{Nombre total de voyage} \times \text{Durée d'un voyage}}{60}$$

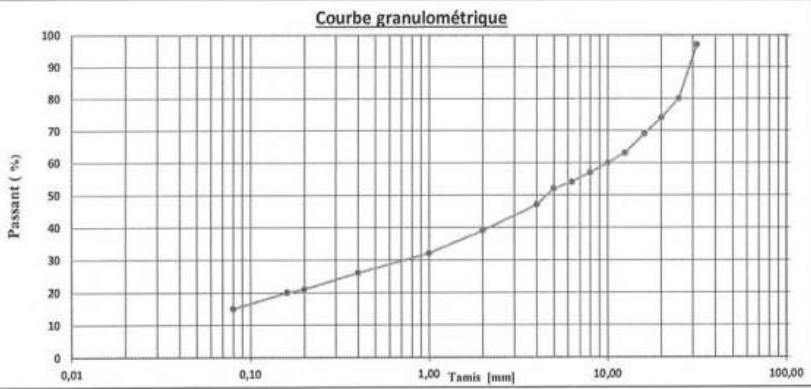
ANNEXE 3 : RESULTATS DES ESSAIS FAIT SUR LES MATERIAUX AU LABORATOIRE PAR L'ENTREPRISE PORTEO BTP BENIN

Entreprise 	Mission de contrôle 	TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME-PORTO NOVO (10KM) ET DE CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO-NOVO	DATE 21/07/2023
		IDENTIFICATION COMPLETE DE MATERIAUX	

Nature du matériau : <u>GNT 0/31,5</u>	Méthode utilisée : <u>-</u>	Lieu de prélèvement : <u>PK0+150-PK0+250 chaussée pleine côté dédoublement</u>
Provenance : <u>Gravel de DAN</u>		
Couche : <u>Planche d'essai couche de fondation</u>		Date de prélèvement : <u>12/12/2023</u>

DETERMINATION DE LA DISTRIBUTION GRANULOMETRIQUE DES PARTICULES SOLIDES (NF EN ISO17892-4)																
Refus cumulé (g)	180	1217	1544	1830	2210	2390	2579	2755	2878	3123	3634	4029	4395	4681	4787	5064
Refus cumulé (%)	3	20	26	31	37	40	43	46	48	53	61	68	74	79	80	85
Passant cumulé (%)	97	80	74	69	63	60	57	54	52	47	39	32	26	21	20	15
Tamais AFNOR (mm)	31,5	25,0	20,0	16,0	12,5	10,0	8,0	6,3	5,00	4,00	2,00	1,00	0,400	0,200	0,16	0,080

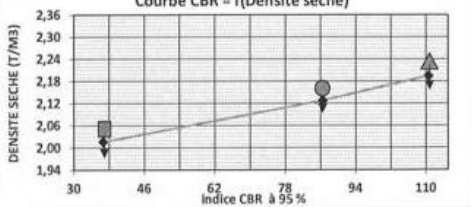
CLASSIFICATION GTR							
Classification GTR	Appellation Géotechnique	%<80µ	ES (%)	MB	WL (%)	IP (%)	MD (%)
-	-	15	59	0,8	-	-	-



Courbe granulométrique

ESSAI PROCTOR (NF P 94-093)	
Teneur en eau (W%)	Densité sèche (t/m3)
1,7	2,10
3,7	2,20
5,5	2,24
7,3	2,21
9,7	2,11
W _{opt} sur 0/20 (%)	5,7
γ _{opt} sur 0/20 (t/m3)	2,24
W _{opt} sur 0/31,5 (%)	4,2
γ _{opt} sur 0/31,5 (t/m3)	2,34

ESSAI CBR (NF P 94-078)				Résultats	
Nombre de coups	Densité (t/m3)	CBR	Compacité	Gonflement %	
10	2,00	27,5	89	0,00	90% of yopt (g/cm³) 2,02
25	2,11	80,1	94	0,00	95% of yopt (g/cm³) 2,13
56	2,24	127,4	100	0,00	98% of yopt (g/cm³) 2,20
					Gonflement linéaire (1/10 ³ mm)
					0,00



Courbe CBR

Résultats	
CBR à 90% yopt	37
CBR à 95% yopt	87
CBR à 98% yopt	111

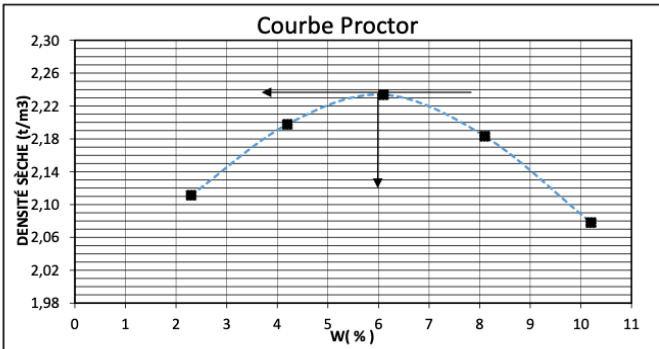
Annexe 3.1 : Identification complète de matériaux GNT

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Entreprise	Mission de contrôle	TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME-PORTO NOVO (10KM) ET DE CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO-NOVO IDENTIFICATION COMPLETE DE MATERIAUX	DATE	21/07/2023
				

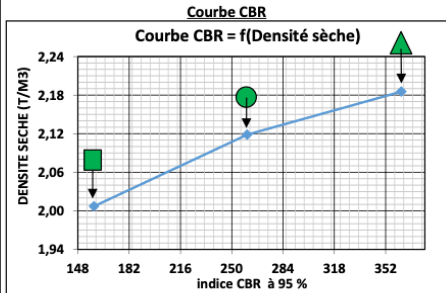
Nature du matériau : GNT 0/31,5 améliorée à 2,5% de ciment CEMII/B-LL 32,5R (CPJ35) NOCIBE
N° échantillon: GNT A-0006
Date de prélèvement : 15/04/2024
Lieu de prélèvement : PK0+162,5-PK0+337,5 chaussée gauche
Couche : Couche de base

Teneur en eau (W%)	Densité sèche (t/m ³)
2,3	2,11
4,2	2,20
6,1	2,23
8,1	2,18
10,2	2,08
W_{opt} sur 0/20 (%)	6,0
Y_{opt} sur 0/20 (t/m³)	2,23
W_{opt} sur 0/31,5 (%)	4,4
Y_{opt} sur 0/31,5 (t/m³)	2,34



Nombre de coups	Densité (t/m ³)	CBR	Compacité	Gonflement %
10	2,00	153	90	0,00
25	2,10	238	94	0,00
56	2,21	396	99	0,00

Gonflement linéaire (1/10°mm)	
0,00	



CBR à 90% y _{opt}	159
CBR à 95% y _{opt}	260
CBR à 98% y _{opt}	362

Indice CBR à 3jours air+4jours eau > 90	
---	--

Désignation	Résultats	Spécifications CCTP
Résistance à la compression à 7 jrs Air R _c	25,78	20 bars ≤ R _c ≤ 40 bars
Résistance à la compression à 3 jrs Air + 4 jrs eau R' _c	22,61	S/0
Résistance à la traction indirecte à 7 jrs Air R _{it}	2,66	S/0
R' _c /R _c	0,88	R' _c /R _c ≥ 0,50

Pour l'Entreprise	Pour la Mission de contrôle
-------------------	-----------------------------

Annexe 3.2 : Identification complète de matériaux – GNT amélioré au ciment

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Entreprise	Mission de contrôle	TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME-PORTO NOVO ET DE CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT EN 2X2 SUR LA LAGUNE DE PORTO-NOVO		DATE	21/07/2023
		CONTRÔLE DU DOSAGE EN CIMENT		TR-OA.SPN_GEN-25-FEL-038 A	

CONTROLE DU DOSAGE EN CIMENT

DATE :

Localisation :

Classe du ciment :

Dimensions de la plaque :

N° échantillon:

Opérateurs:

PK Essai	COTE OU BANDE	N° Plaque	Surface plaque (cm2)	CIMENT				Moyenne kg/m ²	Dosage en ciment %	Observation
				Masse plaque k(g)	Masse plaque + ciment (kg)	Masse ciment (kg)	Dosage kg/m ²			
0+330	1ère bande	1	2500	7,648	11,445	3,80	15,19	15,7	2,5	Conforme
0+270		2	2500	7,606	11,605	4,00	16,00		2,6	Conforme
0+170		3	2500	7,629	11,580	3,95	15,80		2,6	Conforme
0+330	2ème bande	1	2500	7,648	11,585	3,94	15,75	15,6	2,6	Conforme
0+270		2	2500	7,606	11,368	3,76	15,05		2,5	Conforme
0+170		3	2500	7,629	11,602	3,97	15,89		2,6	Conforme
0+330	3ème bande	1	2500	7,648	11,425	3,777	15,11	15,7	2,5	Conforme
0+270		2	2500	7,606	11,666	4,060	16,24		2,7	Conforme
0+170		3	2500	7,629	11,530	3,901	15,60		2,6	Conforme
0+330	4ème bande	1	2500	7,648	11,44	3,789	15,16	15,7	2,5	Conforme
0+270		2	2500	7,606	11,67	4,063	16,25		2,7	Conforme
0+170		3	2500	7,629	11,52	3,887	15,55		2,6	Conforme
0+330	5ème bande	1	2500	7,648	11,53	3,884	15,54	15,6	2,6	Conforme
0+270		2	2500	7,606	11,41	3,803	15,21		2,5	Conforme
0+170		3	2500	7,629	11,63	3,999	16,00		2,6	Conforme
0+330	6ème bande	1	2500	7,648	11,61	3,957	15,83	15,3	2,6	Conforme
0+270		2	2500	7,606	11,28	3,675	14,70		2,4	Conforme
0+170		3	2500	7,629	11,44	3,811	15,24		2,5	Conforme
Moyenne								15,6	2,6	Conforme

Spécifications CCTP	
Dosage en ciment (kg/m2)	15,12 ± 0,5

Pour l'Entreprise _____

Pour la mission de contrôle _____

Annexe 3.3 : Contrôle du dosage en ciment

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Entreprise	Mission de contrôle	TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME-PORTO NOVO ET DE CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT EN 2X2 SUR LA LAGUNE DE PORTO-NOVO				DATE	21/07/2023			
		MESURE DE TENEURS EN EAU IN SITU				TR-OA.SPN_GEN-25-FEL-036 A				
Nature de l'échantillon : GNT 0/31,5 améliorée à 2,5% de ciment CEMII/B-LL 32,5R (CPJ35) NOCIBE N° échantillon: GNT A-0006 Couche : Couche de base Lieu de prélèvement : PK0+162,5-PK0+337,5 chaussée gauche Date de prélèvement : 15/04/2024 Référence Proctor wopm : 2,34/4,4 Date d'essai : 15/04/2024 Opérateurs : GOUBATIN / Z. Brice										
TENEUR EN EAU AVANT RECYCLAGE										
N°	Désignation		Unité	Position						
				Bande 1	Bande 2	Bande 3	Bande 4	Bande 5	Bande 6	Bande 7
1	Temps de malaxage	Départ		12h31	12h48	13h05	13h20	13h35	13h46	13h53
		Arrivée		12h45	13h03	13h17	13h33	13h44	13h51	14h00
2	Teneur en eau initiale w		%	3,5	3,8	3,3	4,0	3,9	3,8	4,3
Teneur en eau moyenne				3,8						
TENEUR EN EAU AVANT COMPACTAGE DU MATERIAU AMELIORE										
N°	Désignation		Unité	Position						
				Bande 1	Bande 2	Bande 3	Bande 4	Bande 5	Bande 6	Bande 7
1	Temps de malaxage	Départ		14h00	14h22	14h48	15h20	15h50	16h22	17h00
		Arrivée		15h15	14h43	15h13	15h45	16h17	16h52	17h20
2	Teneur en eau w		%	4,5	4,2	4,7	5,3	5,0	4,9	5,0
Teneur en eau moyenne				4,8						
<u>Pour l'Entreprise</u> <u>Pour la Mission de contrôle</u>										

Annexe 3.4 : Mesure de la teneur en eau in-situ

ANALYSE TECHNIQUE ET ANALYSE DU CYCLE DE VIE D'UNE CHAUSSEE A BASE DE GRAVE AMELIOREE AU CIMENT ET AU BITUME : « TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME PORTO NOVO (10KM) ET CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT SUR LA LAGUNE DE PORTO NOVO BENIN »

Entreprise	Mission de contrôle	TRAVAUX DE DEDOUBLEMENT DE LA ROUTE SEME-PORTO NOVO ET DE CONSTRUCTION D'UN NOUVEAU PONT EN 2X2 SUR LA LAGUNE DE PORTO-NOVO		DATE	21/07/2023
		IMPREGNATION / ACCROCHAGE CONTRÔLE DU DOSAGE EN LIANT NF EN 12272-1		TR-OA.SPN_GEN-25-FEL-037 A	

CONTROLE DU DOSAGE EN LIANT	
DATE : 15/04/2024	Dimensions de la plaque : 25*25
Localisation : PK0+162,5-PK0+337,5 chaussée gauche	
Couche: Couche de base	Type de liant : ECM60
Opérateurs: GOUBATIN Rock / Z. Brice	
N° échantillon: GNT A-0006	

PK Essai	COTE OU BANDE	N° Plaque	Surface plaque (cm2)	LIANT				Moyenne g/m ²
				Masse plaque (g)	Masse plaque + liant (g)	Masse liant (g)	Dosage g/m ²	
0+336	1ère bande côté droit	1	625	1853	1882	29	464	488
0+279		4	625	1797	1828	31	496	
0+222		6	625	1826	1854	28	448	
0+165		7	625	1805	1839	34	544	
0+336	2ème bande côté axe	1	625	1853	1885	32	512	480
0+279		4	625	1797	1828	31	496	
0+222		6	625	1826	1854	28	448	
0+165		7	625	1805	1834	29	464	
0+336	3ème bande côté gauche	1	625	1853	1883	30	480,00	504
0+279		4	625	1797	1832	35	560,00	
0+222		6	625	1826	1855	29	464,00	
0+165		7	625	1805	1837	32	512,00	
0+336	4ème bande côté gauche	1	625	1853	1881	28	448,00	508
0+279		4	625	1797	1828	31	496,00	
0+222		6	625	1826	1859	33	528,00	
0+165		7	625	1805	1840	35	560,00	
Moyenne								495

Spécifications CCTP	
Dosage en liant (g/m2)	400 - 600
Pour l'Entreprise Pour la mission de contrôle	

Annexe 3.5 : Imprégnation, accrochage et contrôle du dosage en liant

ANNEXE 4 : MISE EN OEUVRE DE LA CHAUSSEE



Annexe 4.1 : Collectes de données sur le projet



Annexe 4.2 : Malaxage de la couche de GNT crue par la niveleuse



Annexe 4.3 : Mise en œuvre de la couche de GNT améliorée au ciment



Annexe 4.4 : Emission de poussière due à l'épandage du ciment



Annexe 4.5 : Malaxage du matériau traité au ciment à l'aide d'une recycleuse



Annexe 4.6 : Application de l'émulsion



Annexe 4.7 : Mise en œuvre de la couche de GB



Annexe 4.8 : Contrôle des épaisseurs de chaussées exécutées