



AMELIORATION D'UN SOL LATERITIQUE PAR AJOUT DE CIMENT POUR UNE UTILISATION EN ASSISE DE CHAUSSEE : CAS DES TRAVAUX DE REHABILITATION DE LA RN°08 PHASE 1, BOBO-DIOULASSO-ORODARA (21,5 KM)

MEMOIRE POUR L'OBTENTION D'UN DIPLÔME D'INGENIEUR 2IE AVEC GRADE DE MASTER

SPECIALITE Génie Civil - Bâtiments et Travaux Publics

Présenté et soutenu publiquement le 24/01/2025 par

Tégawindé Loetitia Flavie SAWADOGO (2021 0471)

Directeur de mémoire : **Dr Marie Thérèse Marame GOMIS/MBENGUE, Enseignant chercheur, 2IE**

Maître de stage : **Alphonse AHOUNOU**

Structure d'accueil du stage : ACIT-GEOTECHNIQUE

Jury d'évaluation du mémoire :

Dr Malicki ZOROM (Président de jury)

Dr Abdoulaye NADJIBOU (Rapporteur)

M. Marc COMBERE (Rapporteur)

DEDICACE

En témoignage de ma profonde gratitude, je dédie ce travail à mes plus grands soutiens.

A mes chers et adorables parents,

Aucun hommage, aucun mot et aucune langue ne saurait être à la hauteur pour pleinement exprimer ma plus grande reconnaissance pour les efforts colossaux que vous avez abattus pour mon éducation, ma formation et mon bien-être avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices consentis pour que je puisse être à ce stade. Vos prières, vos soutiens sans failles ont été des piliers inébranlables sur lesquels j'ai pu m'appuyer tout au long de ce parcours.

Papa, Remi SAWADOGO, mon héros, ma force, tu m'as, un jour dit " je marcherai nu s'il le faut pour te voir réussir" et toutes ces fois ou j'ai trébuché tu me répétais " tu as des potentialités pour y arriver, je suis derrière toi". Tu as toujours cru en moi, même lorsque je doutais et sans le savoir, chaque mot d'encouragement a nourri mes rêves. Rien de tout ce que je peux vous offrir ne pourra compenser ces innombrables sacrifices.

A la prunelle de mes yeux, Abdel Aziz FORGO,

Comme une épaule solide, ta présence à mes côtés m'a toujours apporté confiance et réconfort. Quand tout espoir semblait perdu, il n'y avait que toi pour me galvaniser à viser plus haut et à poursuivre mes rêves. Je te suis infiniment reconnaissante pour ton soutien indéfectible. Sans toi, tout ce document n'aurait pas vu le jour. Cette réussite est aussi la tienne pour tes immenses qualités d'époux.



CITATION

« Croyez en vos rêves et ils se réaliseront peut-être. Croyez en vous et ils se réaliseront sûrement »

Martin Luther King

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes et institutions à qui nous voudrons témoigner toute notre gratitude.

Nous disons merci à la Direction Générale de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE) et à tout le corps professoral pour avoir assuré notre formation universitaire.

Nous adressons toute notre reconnaissance à notre directeur de mémoire, Docteur Marie Thérèse Marame GOMIS/MBENGUE pour le temps qu'il a consacré à la supervision de ce rapport de stage et surtout ses judicieux conseils qui ont contribué à alimenter notre réflexion. Son exigence nous a beaucoup stimulées.

A Monsieur Alphonse AHOUNOU, notre maître de stage, nous disons merci pour avoir accepté de nous encadrer et de nous faire bénéficier de son expérience durant la conception et la rédaction de ce présent rapport de fin de cycle.

Nos sincères remerciements à Monsieur Ousseini MONE, Directeur Technique de ACIT-Géotechnique, pour m'avoir donné l'occasion extraordinaire de réaliser notre travail de terrain. Il a été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce rapport.

Nous témoignons notre gratitude à l'endroit de Monsieur Kouintané SANOU, Directeur de la Délégation Régionale du LNBTP Bobo pour nous avoir permis de réaliser certains essais de laboratoire au sein de sa structure. Sans son aide, mes recherches n'auront jamais abouti.

Notre gratitude va également à l'endroit de Monsieur Roger TRAORE, Ingénieur au LNBTP, pour sa grande disponibilité, son assistance et son soutien tout au long du stage.

A notre camarade Monsieur Razak COULIBALY, stagiaire à ACIT-Géotechnique, nous disons merci pour sa précieuse aide dans la réalisation des travaux de recherche ;

Grand merci à l'ensemble du personnel de ACIT-Géotechnique, du LNBTP et de l'entreprise KANAZOE Salif (EKS) pour la bonne entente sur le chantier.

À notre famille notamment à nos merveilleux frères et sœurs, Jean-Louis, Laurène et Sosthène, pour les liens solides qui nous unissent et qui ont boosté notre parcours.

Enfin, à toutes les personnes qui, d'une manière et d'une autre, ont été un soutien, un appui ou une source d'inspiration pour nous, nous leur disons merci.

RESUME

Les concepts de construction durable et à moindre coût sont devenus des préoccupations majeures. Il s'avère donc indispensable d'utiliser non seulement les matériaux locaux (recyclés ou brut) mais surtout de recourir à des méthodes d'amélioration des performances de ces matériaux capables de supporter n'importe quel trafic prévu. Le projet de réhabilitation de la route nationale N°8 Bobo-Dioulasso-Orodara-Frontière du Mali s'inscrit dans cette vision.

Cette étude intitulée « Amélioration d'un sol latéritique par ajout de ciment pour une utilisation en assise de chaussée : Cas des travaux de réhabilitation de la RN°08 Phase 1, Bobo-Dioulasso-Orodara (21,5 Km) » recherche une meilleure formulation du mélange graveleux latéritique-ciment en vue de renforcer les performances de la chaussée projetée.

En effet, certaines études ont été préalablement menées dans la perspective de trouver les caractéristiques physiques et mécaniques du graveleux latéritique à l'état brut et recyclé. Il s'agit notamment des essais d'identifications et de portances. Ces données nous ont permis d'opter pour un recyclage de graveleux latéritique provenant de l'ancienne couche de base en vue de procéder à son amélioration. Le matériau naturel a été stabilisé à un 1, 2, 2.5, 3, 4% de ciment puis soumis à des séries d'essais d'identification, de portance et de résistance. Une étude comparative des mélanges a été faite dans le but de guider des choix futurs fondés sur les spécifications du Cahier de Prescription Technique (CPT) pour une utilisation en assise de chaussée. Les résultats obtenus ont montré que l'amélioration à 3% donne la meilleure formulation.

Le dimensionnement structural de la chaussée, s'appuyant sur les études géotechniques, nous a permis d'obtenir une couche de chaussée composée de 25 cm de graveleux latéritique amélioré à 3% de ciment en couche de fondation, également 10 cm de grave bitume en couche de base, et une couche de roulement en béton bitumineux d'une épaisseur de 5 cm. Une planche d'essai a été effectuée pour mieux cerner la technique d'amélioration au ciment. Les résultats des études d'aménagements ont abouti à une largeur de plateforme de 12 m en agglomération et 10,20 m en rase campagne. L'originalité de cette étude repose non seulement sur son volet innovant, mais aussi et surtout par sa contribution au développement du secteur des infrastructures axé sur une construction résiliente.

Mot clés : Amélioration, sol latéritique, ciment, assise de chaussée.

ABSTRACT

The concepts of Sustainable and low-cost construction concepts have become major concerns. It is therefore essential to use not only local materials (recycled or raw) but above all to resort to methods of improving the performance of these materials capable of supporting any expected traffic. The project to rehabilitate national road No. 8 Bobo-Dioulasso-Orodara-Mali border is part of this vision.

This study entitled “Improvement of a lateritic soil by adding cement for use as a road base: Case of rehabilitation works on RN°08 Phase 1, Bobo-Dioulasso-Orodara (21.5 Km)” seeks a better formulation of the lateritic-cement gravel mixture in order to reinforce the performance of the planned roadway.

Indeed, certain studies were previously carried out with the aim of finding the physical and mechanical characteristics of lateritic gravel in its raw and recycled state. These include identification and lift tests. These data allowed us to opt for recycling lateritic gravel from the old base layer with a view to improving it. The natural material was stabilized at 1, 2, 2.5, 3, 4% cement then subjected to series of identification, load-bearing and resistance tests. A comparative study of the mixtures was carried out with the aim of guiding future choices based on the specifications of the Technical Specifications for use in road base. The results obtained showed that the improvement to 3% gives the best formulation.

The structural dimensioning of the roadway, based on geotechnical studies, allowed us to obtain a roadway layer composed of 25 cm of lateritic gravel improved with 3% cement as a foundation layer and also 10 cm of bitumen gravel in base layer, and a 5 cm thick bitumen concrete wearing course. A test board was carried out to better understand the cement improvement technique. The results of the development studies resulted in a platform width of 12 m in built-up areas and 10.20 m in open countryside. The originality of this study lies not only in its innovative aspect, but also and above all in its contribution to the development of the infrastructure sector focused on resilient and sustainable construction.

Keywords: Improvement, lateritic soil, cement, road base



LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS

ACIT : Afrique Commerce et Transport

AFNOR : Association Française de Normalisation

APD : Avant-Projet Détaillé

BM : Banque Mondiale

BTP : Bâtiments et Travaux Publics

CAM : Coefficient d'Agressivité Moyenne

CBR : Californian Bearing Ratio

CCTP : Cahier de Clauses Techniques et Particulières

CEBTP : Centre Expérimental de recherche de d'étude du Bâtiment et des Travaux Publics

CPJ : Ciment Portland Composé

CPT : Cahier des Prescriptions Techniques

DCE : Dossier de Consultation des Entreprises

DGIR : Direction Générale des Infrastructures Routières

EKS : Entreprise Kanazoe Salif

FRS-B : Fonds Spécial Routier

GAL : Gravaleux Argileuse Latéritique

ISO : Organisation Internationale de Normalisation

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

LNBTP : Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics

NF : Norme Française

OPM : Optimum Proctor Modifié

PK : Position Kilométrique

PL : Poids Lourds

RN : Route Nationale

SETRA : Service d'Etude Technique des Routes et Autoroutes

TDR : Termes De Reference

TMJA : Trafic Moyen Journalier Annuel

TPC : Terre-Plein Central

UEMOA : Union Economique et Monétaire Ouest-Africaine

2iE : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement

SOMMAIRE

DEDICACE -----	<i>i</i>
CITATION -----	<i>ii</i>
REMERCIEMENTS -----	<i>iii</i>
RESUME -----	<i>iv</i>
ABSTRACT -----	<i>v</i>
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS -----	<i>vi</i>
SOMMAIRE -----	<i>vii</i>
LISTE DES TABLEAUX-----	<i>x</i>
LISTE DES FIGURES -----	<i>xi</i>
INTRODUCTION -----	<i>1</i>
CHAPITRE I : CHAMP D'APPLICATION DE L'ETUDE -----	<i>3</i>
Introduction -----	<i>3</i>
I. Présentation de la structure d'accueil -----	<i>3</i>
I.1 Historique et mission de ACIT-Géotechnique -----	<i>3</i>
I.2 Domaine d'activités et organisation de l'entreprise-----	<i>3</i>
II. Présentation du projet -----	<i>5</i>
II.1 Contexte du projet -----	<i>5</i>
II.2 Objectifs du projet -----	<i>6</i>
II.3 Description de la zone du projet -----	<i>7</i>
III. Présentation du cadre de l'étude expérimentale -----	<i>9</i>
III.1 Description de la zone d'étude et détermination de l'indice qualité de la chaussée existante -----	<i>9</i>
III.2 Les hypothèses de l'étude -----	<i>9</i>
III.3. Les objectifs et Résultats de l'étude expérimentale -----	<i>10</i>
III.4. Méthodologie de l'étude -----	<i>11</i>
Conclusion -----	<i>12</i>
CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE -----	<i>13</i>
Introduction -----	<i>13</i>
I. Généralités sur la chaussée-----	<i>13</i>
I.1 Définition -----	<i>13</i>
I.2 Les constituants d'une chaussée -----	<i>13</i>
I.3 Les types de chaussées-----	<i>14</i>
II. Les graveleux latéritiques -----	<i>14</i>
II.1 Définition -----	<i>14</i>
II.2 Utilisation des graveleux latéritiques en travaux routiers -----	<i>15</i>
III. Le ciment -----	<i>16</i>
III.1 Définition -----	<i>16</i>
III.2 Utilisation du ciment en construction routière -----	<i>16</i>

IV. Les techniques de retraitement d'une ancienne chaussée -----	17
IV.1 Les différentes méthodes de retraitement d'une chaussée -----	17
IV.2 Les techniques d'amélioration des matériaux -----	17
Conclusion -----	19
CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES DE L'ETUDE EXPERIMENTALE ---	20
 Introduction -----	20
 I. Matériels-----	20
 II. Méthodologie -----	20
II.1 Prélèvement des matériaux -----	22
II.2 Echantillonnage -----	22
II.3 Les essais géotechniques sur la grave argileuse latéritique brut et recyclé (GAL) -----	23
II.4 Les essais sur la grave argileuse latéritique améliorée au ciment à différents dosages -----	28
II.5 L'essai pour la détermination de l'indice qualité de l'ancienne chaussée -----	33
 Conclusion -----	33
Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS-----	34
 Introduction -----	34
 I. Résultats et interprétation des essais réalisés sur GAL brut -----	34
I.1 Résultats et analyse de l'essai d'analyse granulométrique par tamisage sur le GAL brut -----	36
I.2 Résultats et analyse des limites d'Atterberg sur le GAL brut -----	37
I.3 Résultats et analyse de l'essai Proctor Modifié sur le GAL brut -----	39
I.4 Résultats de l'essai CBR simple -----	40
 II. Résultats et interprétation des essais réalisés sur le matériau recyclé -----	41
II.1 Analyse des résultats de l'essai d'AG sur le GAL recyclé -----	41
II.2 Analyse des résultats des limites d'Atterberg sur le matériau recyclé -----	42
II.3 Essai Proctor du matériau recyclé -----	44
II.4 Essai CBR simple-----	45
 III. Etude comparative entre le GAL brut et le GAL recyclé -----	46
III.1 Synthèse et discussion des résultats obtenus pour les deux (02) matériaux -----	46
III.2 Choix du matériau idéal pour une amélioration au ciment-----	47
 IV. Résultats et interprétations des essais réalisés sur le GAL recyclé et amélioré au ciment 48	
IV.1 Les limites d'Atterberg à 1%, 2%, 2,5%,3% et 4%-----	48
IV.2 Proctor modifié à 1%, 2%, 2,5%,3% et 4%-----	49
IV.3 Le CBR à 1%, 2%, 2,5%,3% et 4%-----	50
IV.4 L'essai de compression simple à 1%, 2%, 2,5%,3% et 4%-----	50
IV.5 L'essai de traction par fendage à 1%, 2%, 2,5%,3% et 4%-----	52
 V. Choix de la formulation optimale (GAL+Ciment) et de l'indice qualité de l'ancienne chaussée-----	54
V.1 Variation de la densité sèche en fonction du taux d'amélioration -----	54
V.2 Variation de la teneur en eau en fonction du taux de ciment -----	55
V.2 Variation de la portance CBR en fonction du taux d'amélioration -----	56
V.3 Evolution des résistances à la compression simple et en traction en fonction du taux d'amélioration -----	57
V.4 Evaluation de la qualité résiduelle de la chaussée existante -----	59

V.5 Choix du meilleur mélange et de la technique de retraitement de la chaussée -----	61
Conclusion -----	61
<i>CHAPITRE V : ETUDE STRUTURALE ET TECHNIQUE DE MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN-----</i>	62
Introduction -----	62
I. Etude Géotechnique -----	62
I.1 Reconnaissance du sol de la plateforme -----	62
I.2 La recherche de matériaux de variabilité (emprunts) -----	65
I.3 Dimensionnement de la chaussée -----	66
II. La planche d'essai de la technique de l'amélioration des graveleux latéritiques au ciment 80	
II.1 brigade des engins, matériels et matériaux utilisés-----	80
II.2 La méthodologie -----	81
Conclusion -----	85
CONCLUSION ET PERSPECTIVES -----	86
RECOMMANDATIONS -----	88
BIBLIOGRAPHIE-----	89
WEBOGRAPHIE -----	91
ANNEXES -----	92

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Position géographique	8
Tableau II: Les spécifications du CEBTP des matériaux crus pour la fondation	34
Tableau III: Les spécifications du CEBTP des matériaux crus pour la couche de base	35
Tableau IV: Les spécifications du CEBTP du GAL traité au ciment en assise de chaussée	35
Tableau V: Limites d'Atterberg du matériau brut	38
Tableau VI: Limites d'Atterberg du matériau brut	43
Tableau VII: Récapitulatif des résultats des graveleux latéritiques bruts et recyclés	46
Tableau VIII: Synthèse des résultats des essais des limites d'Atterberg sur les mélanges	48
Tableau IX: Valeurs du Proctor modifié des différents pourcentages de mélange	49
Tableau X: Synthèse des résultats des essais CBR sur les mélanges	50
Tableau XI: Synthèse des résultats des essais de la compression simple à 7 jours d'âge	50
Tableau XII: Synthèse des résultats des essais de la compression simple à 28 jours d'âge	51
Tableau XIII: Synthèse des résultats des essais de la traction par fendage à 7 jours d'âge	52
Tableau XIV: Synthèse des résultats des essais de la traction par fendage à 28 jours d'âge	53
Tableau XV: Corrélation entre le niveau de dégradation et de déflexion	59
Tableau XVI: Grille de décision de l'intervention	60
Tableau XVII: Classe de portance de la plateforme	63
Tableau XVIII: Récapitulatif des caractéristiques géotechniques des sols de plateforme	64
Tableau XIX: Résultats des emprunts étudiés	65
Tableau XX: Résultats des essais sur les produits rocheux des 2 carrières	66
Tableau XXI: Classe du trafic selon le guide CEBTP	69
Tableau XXII: Récapitulatif des valeurs des paramètres d'entrée pour la vérification pour la variante 1 et 2	74
Tableau XXIII: Résultats des vérifications sur alizé de la variante 1	75
Tableau XXIV: Résultats des vérifications sur alizé de la variante 2	76
Tableau XXV: Récapitulatif des paramètres d'entrée pour les variantes 3 et 4	77
Tableau XXVI: Résultats des vérifications de la variante 3 sur alizé	78
Tableau XXVII: Résultats des vérifications de la variante 4 sur alizé	79



LISTE DES FIGURES

Figure 1: Organigramme de l'entreprise	4
Figure 2: Etat dégradé de la chaussée existante	5
Figure 3 : Localisation du projet	7
Figure 4 : Organigramme de la méthode adoptée	12
Figure 5 : Chronologie de l'exécution des essais	21
Figure 6 : Echantillonnage du matériau par la méthode de l'échantillonneur	23
Figure 7 : Matériels servis pour l'essai Proctor modifié	26
Figure 8 : Prélèvement du matériau recyclé	29
Figure 9 : Mise en œuvre de l'essai de traction par fendage avec la presse hydraulique	30
Figure 10 : Illustration de l'essai de compression simple avec la presse hydraulique	32
Figure 11 : Courbe granulométrique de la graveleuse latéritique brut	36
Figure 12 : Courbe des limites d'Atterberg de la grave argileuse latéritique brut	37
Figure 13 : Courbe du Proctor modifié de la GAL brut	39
Figure 14: Courbe du CBR du GAL brut	40
Figure 15: Courbe granulométrique du GAL recyclé	41
Figure 16: Courbe des limites d'Atterberg du GAL recyclé	42
Figure 17: Courbe Proctor modifié du GAL recyclé	44
Figure 18: Courbe du CBR du GAL recyclé	45
Figure 19: Histogramme de l'évolution des CBR des deux matériaux	46
Figure 20: Resistance à la compression simple à 28 jours	52
Figure 21: Resistance à la traction à 28 jours	53
Figure 22: Courbe de variation de la densité sèche maximale en fonction du taux de ciment	54
Figure 23: Courbe de variation de la teneur en eau en fonction du taux de ciment	55
Figure 24: Courbe de variation du CBR en fonction du taux de ciment	56
Figure 25: Evolution de la résistance en compression simple à 7 et 28 jours en fonction du taux de ciment	57
Figure 26: Evolution de la résistance en traction par fendage à 7 et 28 jours en fonction du taux de ciment	58
Figure 27: Classe de portance de sol	72
Figure 28: Recyclage de la chaussée existante	82
Figure 29: Illustration de l'épandage du ciment par maille	83
Figure 30: Illustration du malaxage du matériau amélioré	84
Figure 31: Illustration de la mise en œuvre de la grave-bitume	85

INTRODUCTION

Routes bitumées inexistantes, bitumes ornés de nids de poule géants à l'image des tombes funèbres qui longent la route, on se croirait emprunter un cimetière. Jadis fierté des pays Africains, les routes sont devenues aujourd'hui un véritable calvaire à l'issue tragique. Selon la Banque Mondiale, en 2015 les accidents de routes demeurent la première cause de mortalité chez les 15-64 ans avec un taux de 34 décès pour 100 000 habitants dans le continent africain, qui est pourtant la zone la moins motorisée du monde. Comme aiment bien affirmer les spécialistes du développement " Tout commence par une route ", cependant force est de reconnaître que tout peut finir par une route tant que les infrastructures routières continuent d'être négligées. Au-delà de l'insécurité routière, l'insuffisance d'infrastructures de qualité engendre une barrière économique en freinant les échanges commerciaux interurbains et inter-États. Si rien n'est fait, les maux de la route infligeront au continent africain un coût humain et économique importants. Conscient de cette situation, l'État burkinabé a entrepris d'importants programmes d'aménagement et de construction de routes. Promesse a même été faite aux burkinabé de voir leur réseau routier remis à neuf au fil des ans. Malheureusement plus de deux (02) ans après, le résultat est loin d'être satisfaisant : la dégradation des voies passe au souvenir tout ce qui a été fait. Les programmes stratégiques de développement des routes demeurent moins efficaces fautes de moyens financiers suffisants pour construire des routes conformes aux normes en vigueur et assurer la maintenance adéquate de ces routes. Ces programmes restent également impuissants face à l'expansion démographique qui entraîne avec elle une augmentation du trafic routier et une rareté des matériaux de qualité d'où le mauvais état de nos routes. Alors, avec un financement limité, comment construire des routes de qualité qui répondent aux besoins de la population en termes de trafic et de sécurité ? Quels sont les enjeux liés à la rareté des matériaux de construction ?

La question de promouvoir des infrastructures fiables reste une réalité indéniable. Par conséquent, pour réduire les coûts de construction et d'entretien des routes tout en induisant à la baisse l'impact environnemental, l'utilisation des matériaux locaux (recyclé ou naturel) non conventionnels peut s'avérer efficace si elle est soumise au préalable à des études géotechniques. Nonobstant que les matériaux locaux ne respectent pas les normes européennes ou américaines comme les sols latéritiques, ils se sont révélés fiables à l'usage ; pendant que d'autres routes construites selon les exigences de ces normes se sont dégradées avant leur durée

de vie (Kana, E. M, 2016). Pour notre part ces normes n'ont pas été élaborées en tenant compte du comportement des matériaux en climat d'Afrique. Bien que dans le Sud du Sahara, particulièrement au Burkina-Faso, les graveleux latéritiques sont les plus utilisés en structure de chaussée, de nos jours ces matériaux en plus de disparaître, perdent en qualité en raison de la forte demande, de l'augmentation du trafic routier et de la sensibilité de ces matériaux aux actions climatiques (eaux, vents, sécheresse) et mécaniques (poids lourds). Ce constat justifie en filigrane, la nécessité d'intégrer au processus de construction routière, une stratégie pour améliorer la grave argileuse latéritique (GAL).

La présente étude, dont le thème est libellé comme suit : « **Amélioration d'un sol latéritique par ajout de ciment pour une utilisation en assise de chaussée : Cas des travaux de réhabilitation de la RN°08 Phase 1, Bobo-Dioulasso-Orodara (21,5 Km)** », s'inscrit dans une nécessité de répondre aux enjeux liés à l'amélioration des propriétés géotechniques des matériaux locaux. L'objectif principal de cette étude, est de proposer une formulation optimale du mélange ciment-latérite en assise de chaussée pour assurer sa pérennité. Spécifiquement, ce travail vise à caractériser la grave argileuse latéritique naturelle. Nous, chercherons donc à évaluer les performances mécaniques et physiques de la GAL crue améliorée à différents dosages en ciment.

Pour atteindre l'objectif fixé, nous avons articulé ce travail autour de cinq (05) chapitres :

- Le premier consacré à la généralité, donne une présentation de la structure d'accueil, du projet et de l'étude expérimentale ;
- Le second aborde une revue bibliographique portant sur les mots clés en lien avec notre thématique et sur les méthodes de stabilisation de la GAL ;
- Le troisième chapitre est dédié à la démarche méthodologique suivie pour aboutir à la meilleure formulation du mélange ciment-GAL ;
- Le quatrième quant à lui, présente les résultats et les discussions de notre travail ;
- Enfin, nous terminons par un dimensionnement structural de la chaussée et une méthodologie de sa mise en œuvre dans le but de vérifier la fiabilité de nos résultats.

CHAPITRE I : CHAMP D'APPLICATION DE L'ETUDE

Introduction

Dans ce chapitre il sera principalement question des attributions, du fonctionnement de l'entreprise d'accueil et de la présentation du projet dans son ensemble.

I. Présentation de la structure d'accueil

I.1 Historique et mission de ACIT-Géotechnique

Le bureau d'étude Afrique Commerce Transport (ACIT-Géotechnique) implanté au Burkina-Faso, est un établissement privé créé en Avril 2010 dans une perspective pluridisciplinaire sous le numéro BFOUA2010 A 0818 au registre de commerce et reconnu sous statut juridique d'entreprise Individuelle. Il agit en tant que bureau d'étude et de contrôle dans la gestion et la réalisation des projets d'aménagement routier. ACIT-Géotechnique à travers ces moyens techniques et intellectuels a pour vocation la réalisation des missions géotechniques. Située à Ouagadougou dans la commune rurale de Saaba. Elle est sous la direction de Monsieur Jean-Marie TOE avec un effectif total de 33 agents constitués d'ingénieurs, de techniciens supérieurs, d'agent d'exécution et de personnel administratif.

I.2 Domaine d'activités et organisation de l'entreprise

Dans le cadre de sa contribution au développement des routes, ACIT géotechnique participe aux études, contrôle et suivi des travaux dans les cas de projets d'ouvrages d'art, de bâtiments, des infrastructures de transport.

Par conséquent, il fournit les prestations suivantes :

- la conception et maîtrise d'œuvre des projets géotechniques,
- le contrôle et suivi technique des travaux de constructions neuves et de reconstructions (renforcement et/ou réhabilitation) des ouvrages,
- l'expertise des infrastructures de génie-civil sur des aspects spécifiques,
- la recherche dans le domaine des matériaux de construction,
- la formation des acteurs du BTP.

ACIT-Géotechnique pour bien fonctionner est organisé comme suit :

- un Secrétariat Particulier chargé du traitement, de la gestion des dossiers,

- un Service Administratif, Comptable et Financier chargé de la gestion administrative et financière,
- une Direction Technique, qui a pour mission, entre autres, la gestion administrative et technique, du contrôle technique, de la participation aux réceptions provisoires et définitives des travaux.

La figure 1 suivant présente l'organigramme de l'entreprise.

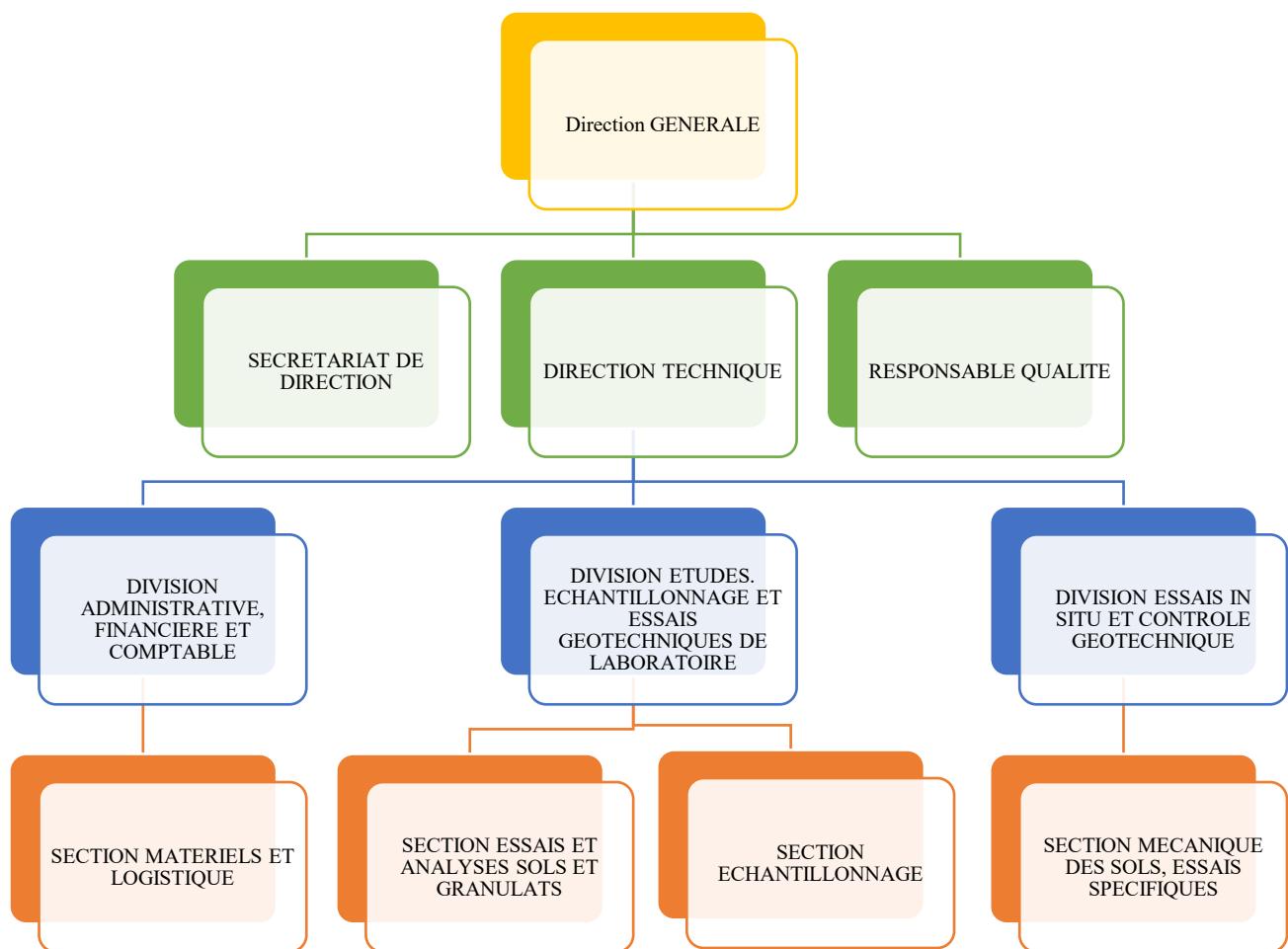


Figure 1: Organigramme de l'entreprise

Source : Données de l'étude

II. Présentation du projet

II.1 Contexte du projet

Le présent projet de renforcement et de réhabilitation, d'un linéaire de 130 km de la route communautaire Bobo-Dioulasso – Orodara – Frontière du Mali, s'inscrit dans le cadre d'une stratégie de développement du réseau routier national et international du Burkina-Faso. En effet, construit en 1999, la route Bobo-Orodara cumulant plus de 20 ans de service est soumis à un trafic de plus en plus dense d'où le mauvais état de sa structure. Cependant, les opérations d'entretiens courants restent inefficaces au regard de son état avancé de dégradation rendant la circulation et l'accès aux différentes agglomérations très difficiles surtout en saison hivernale. C'est dans cette optique que le Fonds Spécial Routier (FRS-B) avec l'appui des bailleurs de fonds, notamment l'UEMOA entreprend le projet concernant les travaux de réhabilitation de la route nationale N°8 (RN08). Outre la réhabilitation, la chaussée fera l'objet d'un élargissement. Pour mieux cerner l'état de la structure existante, nous avons illustré l'état des dégradations de la route avant les travaux par la figure 2 ci-dessous :



Figure 2: Etat dégradé de la chaussée existante

Source : Rapport géotechnique du projet

Les travaux routiers sont repartis en trois (03) phases distinctes comme suit :

- Phase 1 : Réhabilitation et renforcement du Tronçon Bobo – Orodara - Mali ;
- Phase 2 : Aménagement de 50 km de pistes rurales ;
- Phase 3 : Aménagement de 8 km de voiries à revêtir en pavés.

Notre travail porte sur la phase 1, Tronçon Bobo-Orodara et concerne spécifiquement la couche d'assise avec **le groupement d'entreprises SOGEDIM BTP SARL / SOBATRAP** en charge des travaux et d'autres intervenants tels que :

- **le maître d'ouvrage** : Ministère des infrastructures et du désenclavement ;
- **le maître d'ouvrage délégué** : Direction Générale des Infrastructure Routières (DGIR);
- **le maître d'œuvre** : Groupement TR-ENGINEERING / ACIT GEOTECHNIQUE / GIE ;

II.2 Objectifs du projet

Présentement en terre de largeur de plate-forme comprise entre 6 à 8m l'aménagement de la route s'intègre dans une contribution à la réalisation des objectifs généraux et spécifiques du Programme Sectoriel des Transports.

L'objectif principal du projet est de soutenir la croissance économique du Burkina Faso, de la sous-région et des états de l'UEMOA par le désenclavement des zones potentielles de pôles de croissance et permettre de ce fait, une dynamisation des échanges commerciaux intra-africains. Les objectifs spécifiques visés par ce projet sont entre autres :

- réhabiliter et renforcer 130 km de la route nationale RN°08 afin de faire face à l'augmentation du trafic ;
- lutter contre l'insécurité et particulièrement contre le terrorisme en assurant une meilleure liaison entre les localités du projet ;
- accroître les potentialités agricoles, fruitières et pastorales de la zone ;
- revaloriser les revenus de la population en créant des emplois durant et après la réalisation du projet ;
- améliorer les conditions de transit sur ce corridor communautaire.

II.3 Description de la zone du projet

II.3.1 Localisation du projet

La route communautaire est située à l'Ouest du BURKINA-FASO dans la région des **Hauts-Bassins** avec pour chef-lieu, la ville de Bobo-Dioulasso. Ainsi, la zone d'influence directe du projet regroupe les villes et agglomérations adjacentes à la route à savoir Bobo-Dioulasso, Orodara et Koloko. Cependant, la zone d'influence élargie du projet comprend les provinces du Houët, du Kénédougou, de la Léraba au Burkina Faso et le Mali voisin.

Pour ce qui est de l'origine du projet, elle se situe dans la ville de Bobo-Dioulasso, à l'intersection avec la RN07 et la fin du projet est la frontière avec le Mali à l'entrée de Hermakonon, soit un linéaire d'environ 130 kilomètres.

La situation géographique de la zone d'étude est résumée dans la figure 3 ci-après :

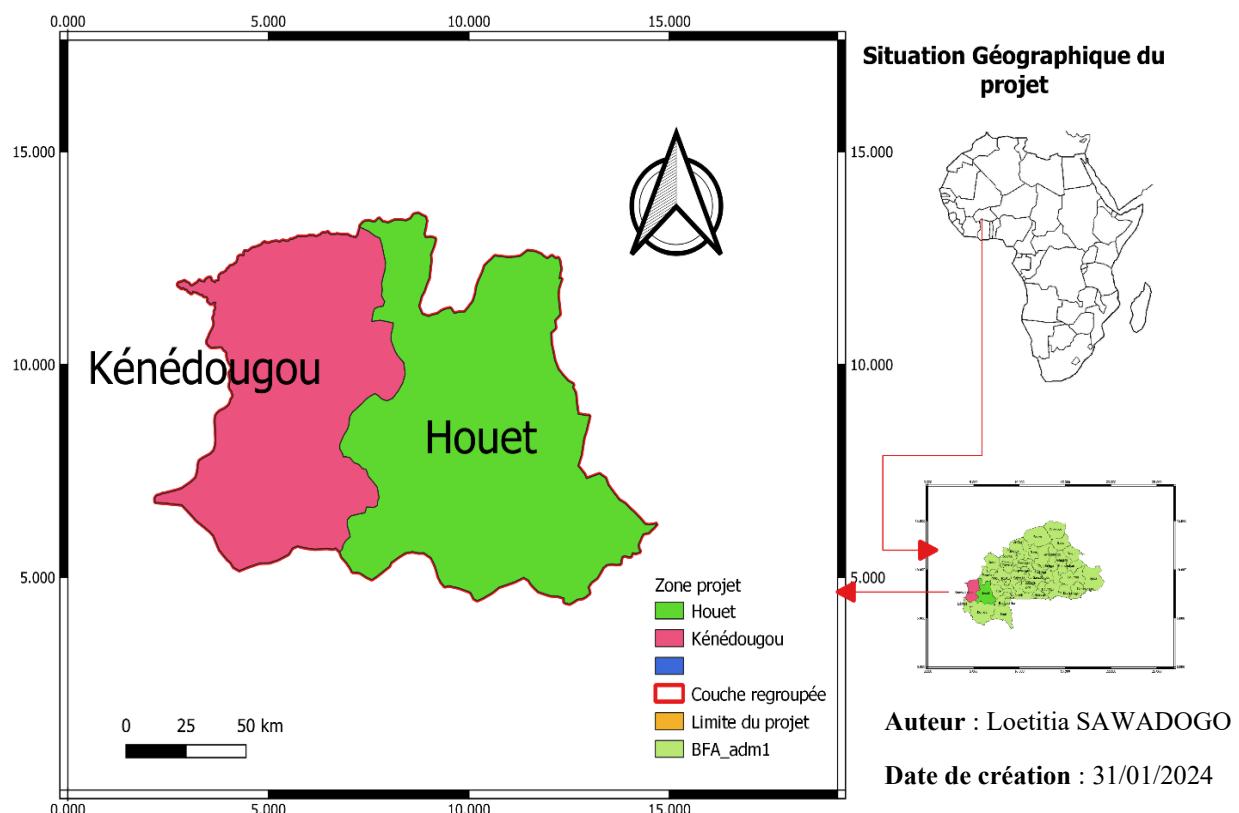


Figure 3 : Localisation du projet

Source : Quantum Geographic Information System (QGIS)

II.3.2 Géométrie de la route prévue

La RN°8 est une bande étriquée qui s'étend de l'Est à l'Ouest entre les longitudes comprises entre 4°18'W et 5°22' W et les latitudes Nord 10°59'et 11°10'. Le tableau I ci-dessous présente les références de sa position géographique.

Tableau I: Position géographique

Coordonnées	X	Y	UTM
Début du projet	356483.5509	1234601.1820	ZONE 30
Fin du projet	242216.1836	1230121.8650	ZONE 30

Source : Rapport topographique du projet

D'après les données topographiques, l'ancienne chaussée se caractérise par une plateforme de 9,00 m de large soit une largeur de 7,00 m et des accotements de 1,00 m large de part et d'autre. Cependant la route projetée connaîtra un élargissement de la chaussée et la géométrie de la nouvelle route se caractérise par trois (03) types de profils :

- ❖ Type 1 : Traversée d'agglomérations
 - Chaussée bidirectionnelle ;
 - Largeur : 8 m soit deux voies de 4 m de largeur ;
 - Des accotements de part et d'autre de la chaussée de 2,00 m chacune.
 - Largeur totale de la plateforme : 12,00 m.
- ❖ Type 2 : Rase campagne
 - Chaussée bidirectionnelle ;
 - Largeur : 7 m soit deux voies de 3,50 m de largeur ;
 - Des accotements de part et d'autre de la chaussée de 1,50 m de largeur chacune ;
 - Largeur de la plateforme : 10,20 m.
- ❖ Type 3 : Zone urbaine
 - Chaussée bidirectionnelle ;
 - Largeur : 3,5 m×2 séparée par un terre-plein central de 1,5 m de large ;
 - Des accotements de part et d'autre de la chaussée de 1,50 m chacune.
 - Largeur totale de la plateforme : 12,500 m.

III. Présentation du cadre de l'étude expérimentale

III. Description de la zone d'étude et détermination de l'indice qualité de la chaussée existante

Pour ce qui est de ce projet, les travaux de construction et de bitumage commencent à Bobo-Dioulasso (PK0) et finissent à la frontière du mali (PK84).

Notre projet d'étude porte sur un tronçon de 21,5 kilomètres de la phase n°1 Bobo-Orodara, à partir du PK 00, dans la ville de Bobo.

III.2 Les hypothèses de l'étude

Dans le cadre de notre étude, nous avons eu l'occasion de réaliser avec le bureau d'étude ACIT-Géotechnique, une auscultation de la chaussée à travers le manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux (CEBTP-LCP-édition Mai 1985). Les études ont montré deux (02) cas de figure :

- L'ancienne structure construite dans sa généralité en remblai sur des sols argileux est une chaussée souple en graveleux latéritique naturel en couche d'assise muni d'un revêtement en enduit superficiel.
- La chaussée présente des dégradations qui ne sont pas liées directement à un mauvais état de sa structure mais plutôt à un manque d'entretien périodique. Ainsi, les déflexions mesurées sur la chaussée montrent que :
 - ✓ Une partie du tronçon Bobo-Orodara de longueur totale 49,450 km soit 37,28% du linéaire présente des dégradations assez importantes (sans affaissement). Ainsi, sa portance est faible avec de mauvais matériaux formant sa structure. Cette partie du linéaire nécessiterait d'être renforcée ;
 - ✓ Le reste du linéaire (62,68%) soit une longueur cumulée de 83,150 Km, présente une portance élevée et les matériaux qui forment sa structure sont toujours de bonne qualité. Il nécessitera donc un entretien périodique.

III.3. Les objectifs et Résultats de l'étude expérimentale

III.3.1. Les objectifs de l'étude

L'objectif global de ce travail est de réussir à proposer une formulation optimale du mélange ciment-latérite en assise de chaussée pour assurer sa pérennité

Les objectifs spécifiques de l'étude sont entre autres :

- étudier les caractéristiques physiques et mécaniques du sol latéritique brut et recyclé afin d'identifier le matériau qui est à la fois performant et écologique ;
- identifier les paramètres physiques et mécaniques du mélange grave latéritique avec du ciment ;
- déterminer la meilleure formulation du mélange (GAL cru+%ciment) conforme aux exigences du Cahier des charges Pratique et Technique(CPT);
- dimensionner la structure de la chaussée en tenant compte des résultats obtenus lors de notre recherche expérimentale ;

III.3.2 Les résultats attendus

Dans le cadre de notre étude expérimentale, les résultats attendus sont les suivants :

- les données géotechniques issues de nos essais au laboratoire et in-situ,
- la caractérisation de la grave argileuse latéritique à l'état brut puis à l'état recyclé ;
- le choix du matériau adéquat pour un renforcement de la chaussée;
- l'analyse et interprétation des propriétés de la GAL amélioré à différent pourcentage en ciment ;
- les qualités physiques et mécaniques entre un matériau cru et un matériau amélioré par analyse comparative ;
- le meilleur dosage optimum qui répond à toutes les spécifications,
- proposition d'une nouvelle structure de la chaussée avec des matériaux de qualité et répondant aux besoins actuels de la route projetée ;
- la technique de mise en œuvre de l'amélioration d'un sol latéritique au ciment en couche de fondation afin de pallier aux risques liés à cette technique ;

III.4. Méthodologie de l'étude

III.4.1 Matériel

Dans l'optique de mener à bien notre étude, nous avons utilisé les logiciels suivants :

- Google Earth qui a servi à décrire la zone du projet ;
- Alizé LCPC utilisé pour le dimensionnement de la structure de chaussée ;
- Autocad qui facilitera la modélisation structurelle de la chaussée projetée ;
- Pack Office qui servira à la rédiger notre document ;
- Zotero qui permettra de trouver les sources de la revue littéraire.

III.4.2 Méthode

Pour atteindre les objectifs de notre étude expérimentale, les démarches suivantes ont été adoptées :

❖ La recherche documentaire

La recherche documentaire a été une étape cruciale car elle nous a servi à retrouver des sources sur des études en lien avec notre thématique à travers le logiciel Zotero.

❖ La collecte des données

C'est une étape qui consiste à réunir des informations et éléments directement liés au projet.

Ainsi, nous avons pu collecter les éléments suivants :

- Le rapport géotechnique d'Avant-Projet Détaillé (APD) ;
- Les données topographiques ;
- Les données pluviométriques et climatiques de la zone ;
- Les données de l'étude du trafic de la zone du projet ;
- Les spécifications techniques du Cahier de Charge Technique du Projet (CCTP).

❖ La réalisation de l'étude expérimentale

Cette étape est dédiée aux différents essais géotechniques permettant d'obtenir des résultats concrets de notre étude. Elle se fera selon la démarche suivante :

- La caractérisation physique et mécaniques du graveleux latéritique naturel à travers des essais d'identification (analyse granulométrique, limite d'Atterberg) et de portance (Proctor, CBR) ;

- Une étude du GAL amélioré à 1, 2, 2.5, 3, 4 % de ciment à travers les essais d'identification (limites d'Atterberg), de portance (Proctor, CBR), et des essais de résistance (compression simple, traction par fendage) ;
 - Une analyse, des interprétations et comparaisons des résultats obtenus des différents essais réalisés.
- ❖ L'étude géotechnique

Il s'agira ici d'utiliser les données de l'étude expérimentale dans le but de faire :

- un dimensionnement structural de la chaussée ;
 - une application de la mise en œuvre du GAL amélioré au ciment en couche de fondation.
- La figure 4 suivant présente la méthodologie de notre étude.

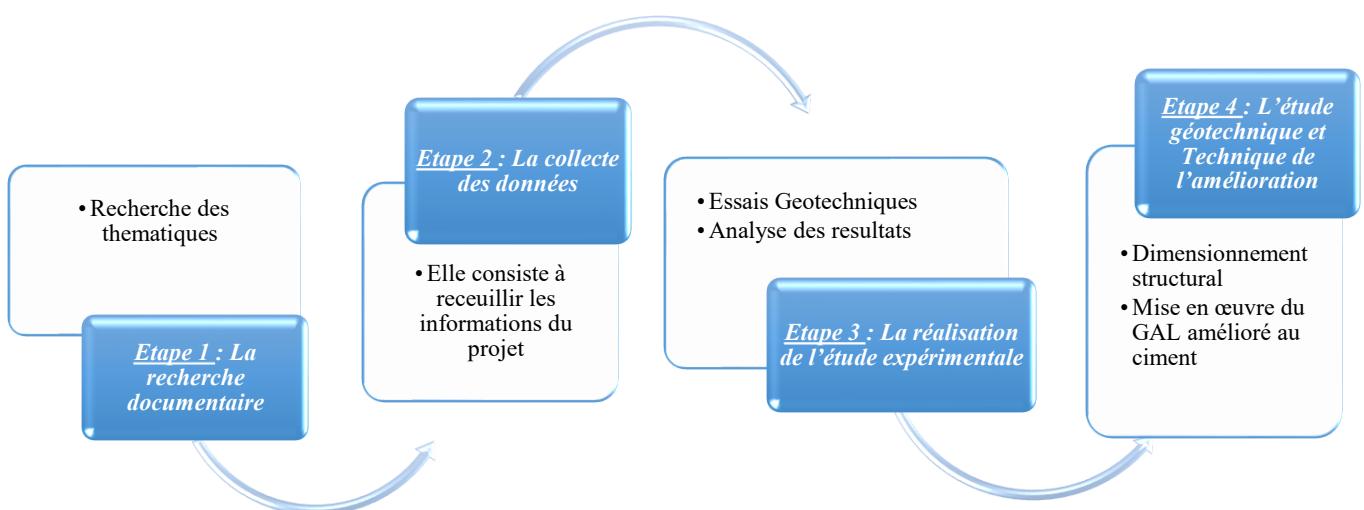


Figure 4 : Organigramme de la méthode adoptée

Source : Donnée de l'étude

Conclusion

Dans cette première partie nous avons présenté la structuration de ACIT-Géotechnique. Il ressort également à travers une présentation du projet que la route Bobo-Orodara-Frontière du Mali s'étend sur un linéaire de 130 kilomètres.

Cette présentation de la structure d'accueil, du projet et de l'étude expérimentale vise à planter le décor pour le développement de notre thème d'étude. Ceci passera d'abord par un aperçu sur la revue bibliographique.

CHAPITRE II : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Introduction

La revue de littérature, présente une documentation sur l'amélioration des matériaux dans le but de mieux orienter notre étude. Ce présent chapitre donne une vue générale sur la chaussée puis sur les matériaux (graveleux latéritiques et ciment). Nous allons terminer en parlant en substance des méthodes de retraitement d'une chaussée ancienne.

I. Généralités sur la chaussée

I.1 Définition

La chaussée peut être définie comme la partie aménagée de la route constituée de plusieurs couches consacrées à la circulation des différentes catégories de véhicules. Quel que soit les conditions météorologiques résultant d'un itinéraire, la chaussée doit garantir le déplacement des usagers, des marchandises dans de bonnes conditions de visibilité et de confort.

I.2 Les constituants d'une chaussée

Une chaussée est constituée d'une superposition de couches de matériaux différentes dont l'ensemble est appelé superstructure et reposant sur une infrastructure (Mahamadou Souley ISSIAKOU, 2016).

I.2.1 L'infrastructure

L'infrastructure de la chaussée est constituée d'une couche de forme et d'une plateforme qui peut être un terrain naturel, un sol à traiter ou un sol d'apport.

I.2.2 La superstructure

La superstructure est l'ensemble des couches de matériaux mis en œuvre au-dessus de l'infrastructure. De bas en haut, l'assise de chaussée comporte généralement les éléments suivants :

- une couche de fondation posée sur la forme (terrain naturel ou remblais) ;
- une couche de base .

La couche de surface permet de protéger l'assise de la chaussée contre les intempéries grâce à sa fonction d'étanchéité vis-à-vis de l'assise. Elle est constituée d'une couche de roulement sur laquelle s'exerce directement l'action du trafic et des agents atmosphériques avec parfois une couche de liaison, entre la couche de base et le revêtement.

I.3 Les types de chaussées

On distingue deux types de chaussées : les chaussées revêtues qui font l'objet de notre étude et les chaussées en terre ou non-revêtuves.

Au regard du mode de fonctionnement des couches composant la chaussée de type revêtu, on distingue six (06) familles de structures routières suivantes (LCPC-Setra, 1994) :

- les chaussées souples,
- les chaussées bitumineuses épaisse,
- les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques,
- les chaussées à structure mixte,
- les chaussées à structure inverse,
- les chaussées en béton de ciment.

II. Les graveleux latéritiques

II.1 Définition

Il existe plusieurs tentatives de définition de la latérite, suivant les experts qui ont travaillé sur le matériau. Vers 1087, le mot latérite a été pour la première fois recommandé par Buchaman. Il le décrit comme un matériau ferrugineux, non stratifié et non poreux dont la couleur jaune ocre est dû à une forte teneur en oxydes ferriques.

La latérite est une roche résiduelle rougeâtre issue d'un processus d'altération de roches meubles sous climat humide tropicaux à travers la décomposition d'une roche mère comme le granite ou basalte (Bourgeon et Gunnell, 2005).

Du point de vue de l'ingénieur routier, on parlera de *graveleux latéritique* qui constituent un matériau très variable. Selon les études (Pierre LOMPO, 1980), Il s'agit d'un sol meuble de granulométrie 0/20 à 0/40 mm comportant 10 à 35% de fines (passants au tamis de 80µm) et un squelette de 20 à 60% (refus au tamis de 2mm). On considère ainsi qu'un sol latéritique contenant plus de 35% de passant à 80µm n'est pas un graveleux latéritique. Ainsi il entre alors dans les catégories des sols fins.

II.2 Utilisation des graveleux latéritiques en travaux routiers

Dans le cas de la couche de forme, les graveleux latéritiques sont mis en remblai en fonction de leur densité et réservés pour la partie supérieure des terrassements (PST). Quant à la couche d'assise, les latérites doivent répondre à des spécifications selon la couche concernée (KANAZOE Marietou, 2011).

Cependant les latérites ayant une meilleure qualité de portance sont utilisées dans le corps des chaussées des routes en terre et des routes revêtues. Pour ce qui sont des routes en terre, elles sont utilisées en couche de roulement, et dans le cas des routes revêtues, elles interviennent en assise de chaussée.

❖ Les graveleux latéritiques en couche de base

Pour la couche de base, le CBR étant le critère fondamental de convenance d'un matériau, doit être au minimum de 60 pour une compacité de 95% à l'OPM.

Les études (Mahamadou Souley ISSIAKOU, 2016) spécifient que pour les pays à forte pluviométrie cette portance est rarement atteinte quand les matériaux subissent une imbibition de 4 jours. Par contre en climat sec de type sahélien comme le Burkina Faso, le CBR obtenu après le poinçonnement immédiat des échantillons est plus souvent satisfaisant. Cependant, force est de reconnaître qu'aucun pays sahélien ne dispose d'un guide ou un document de spécifications permettant le zonage des localités où la valeur du CBR peut être prise en compte sans imbiber les éprouvettes de sol avant poinçonnement.

❖ Les graveleux latéritiques en couche de fondation

La couche de fondation des chaussées est le domaine d'utilisation privilégié des graveleux Latéritiques naturels. L'épaisseur de couche de fondation en graveleux latéritiques après compactage varie de 15 à 50 cm selon la nature des sols de plateforme et de l'importance du trafic.

III. Le ciment

III.1 Définition

Le ciment est une poudre fine initialement inerte composée de plusieurs actifs dont le sulfates de calcium, le gypse, le clinker ainsi que d'autres substances variées provenant de sous-industries comme les cendres volantes, pouzzolanes, le laitier de hauts fourneaux. Ces matières poudreuses forment avec une solution d'eau ou saline une réaction chimique pâteuse capable de faire prise en durcissant progressivement selon le type de ciment. On parlera donc du processus d'hydratation.

Cependant, le ciment artificiel ou ciment Portland désigne un produit provenant de la cuisson de mélanges artificiels de silice, d'alumine, de carbonate de chaux, sur lesquels l'eau n'a aucune action, ou du moins une action très lente et qui, réduits en poudre font prise sous l'action de l'eau (ATANGA Vincent de Paule, 2015).

III.2 Utilisation du ciment en construction routière

Le ciment est un matériau généralement utilisé pour les travaux de génie-civil dans le but de réaliser le béton, du mortier ou de procéder à un traitement du sol comme dans le cas de notre étude. Alors, suivant de l'usage qui peut être fait, nous aurons besoin de différentes sortes de ciment classés selon des appellations et des catégories précises répondant aux normes NF P15-301 et ENV 197-1. Il s'agit en autres du :

- CEM I : ciment Portland Artificiel (CPA) contenant au moins 97% de clinker plus fillers ;
- CEM II : ciment Portland composé (CPJ) contenant au moins 65% de clinker et un ou plusieurs des autres composants ;
- CEM III : ciment de haut fourneau (CHF) contenant 40 à 75% de laitier, au plus 25% et au plus 3% de fillers ;
- CEM IV : ciment pouzzolanique ((CPZ)) ;
- CEM V : ciment au laitier et aux cendres (CLC) contenant 25 à 60% de clinker, 20 à 45% de laitier, 20 à 45% de cendres et au plus 3% de fillers ;
- Ciment au laitier au clinker (CLK) contient au moins 80% de laitier, au plus 20% de clinker et au plus 3% de filler.

En fonction de la valeur de la résistance à la compression à 28 jours d'un mortier normalisé, les ciments se répartissent en quatre classes de résistance : ce sont les classes 32.5, 42.5, 52.5 et HP (haute performance).

Dans le cadre de notre étude, les ciments **CPJ 45 de CIMFASO** répondant aux spécifications du CPT ont été utilisés pour effectuer nos différents essais.

IV. Les techniques de retraitement d'une ancienne chaussée

Une chaussée est dimensionnée pour supporter plusieurs sollicitations durant une certaine période prédefinie. Cependant lorsqu'elle épouse sa durée de vie, la structure de chaussée se retrouvera en mauvais état dû à plusieurs facteurs notamment l'augmentation du trafic et la mauvaise qualité des matériaux. Face à une telle situation, la chaussée sera soit reconstruite entièrement, soit retraitée.

IV.1 Les différentes méthodes de retraitement d'une chaussée

Le retraitement est un procédé ayant pour but de réparer en transformant une structure ancienne dégradée en une chaussée capable de résister aux sollicitations du trafic actualisé. IL regroupe deux (02) facteurs à savoir le recyclage et l'amélioration du matériau provenant de ce recyclage (Sourou Emmanuel Ismaël MILLOGO, 2017).

Ainsi, le retraitement peut se réaliser :

- In-situ : les différents mélanges sont faits sur place ;
- En centrale : le matériau est traité dans une centrale puis transporté et mis en place sur le chantier ;
- A froid : le matériau est traité sans le chauffer ;
- A chaud : le matériau est traité en centrale à chaud pour faciliter le mélange.

IV.2 Les techniques d'amélioration des matériaux

L'amélioration a pour vocation d'augmenter la qualité d'un matériau qui présente des caractéristiques inadaptées ou non utilisables à l'état initial pour supporter un trafic donné. En d'autres termes cela revient à augmenter la résistance mécanique, améliorer l'aptitude d'un matériau au compactage, réduire sa sensibilité au gel et à l'eau.

En géotechnique routière, il existe plusieurs techniques de stabilisation des sols qui sont regroupés en deux grandes catégories : la stabilisation chimique et la stabilisation mécanique.

IV.2.1 La stabilisation chimique

Traiter chimiquement un sol, est un mode qui consiste à mélanger de façon homogène un matériau à une quantité précise d'ajout de produit dans l'objectif de provoquer une réaction physico-chimique visant à améliorer sa capacité de portance et pérenniser la structure.

Ainsi, la stabilisation chimique consiste donc en l'adjonction de produits chimiques tels que le chlorure de calcium CaCl₂, les laitiers de hauts fourneaux. Il s'agit dans tous les cas d'augmenter la cohésion des matériaux en utilisant une réaction chimique provoquée par l'eau et les matériaux eux-mêmes (Maliki Otiéboame DJANDJIEME, Juin 2018).

Les types de stabilisation chimique les plus courantes sont :

- l'amélioration au ciment ;
- l'amélioration aux pouzzolanes tels que l'amélioration aux cendres volantes et le traitement aux laitiers (la métallurgie) ;
- l'amélioration aux liants hydrocarbonés (Bitume, goudron) ;
- l'amélioration aux produits chimiques comme le cas de certains produits chimiques à base de chlorure de calcium, hydroxyde de calcium, silicates, polymères, sont utilisés en construction routière pour améliorer la capacité portante des sols (Bakar et al, 2014).

IV.2.2 La stabilisation mixte

Le traitement mixte consiste à procéder au mélange de deux ou plusieurs stabilisants dans l'optique d'avoir les performances mécaniques ainsi que la qualité du sol désirée. Parmi les types de stabilisation mixte, la plus fréquente est celle de la chaux-ciment qui sont des liants ayant une action complémentaire.

Les études (Génie Hippique, 2004) montrent qu'il est préférable d'utiliser la chaux lorsque le sol est humide et le ciment pour les sols peus argileux. Cependant, dans le cas des sols humides et peus argileux, on préconise d'intégrer d'abord la chaux à faible dose (0.5 à 2%) et ensuite le ciment. En effet, à travers le rôle qu'a la chaux de rendre sec immédiatement le matériau ; il serait conseillé de débuter le traitement à la chaux afin de mieux préparer le matériau pour l'amélioration au ciment.

IV.2.3 La stabilisation physico-mécanique

L'opération d'amélioration mécanique consiste à améliorer la qualité de compactage et la résistance d'un sol par ajout d'un matériau afin d'améliorer son squelette granulaire.

Plusieurs techniques de stabilisation mécaniques existent les plus connues sont :

- la litho-stabilisation ;
- l'utilisation des géosynthétiques ;
- ajout d'un sol fin à un sol grenu ;
- ajout d'un sol grenu (ou une fraction) à un sol fin.

Conclusion

A l'issu de ce chapitre, il ressort que les matériaux locaux aussi faibles soient-ils, sont utilisables en construction routière en procédant à une amélioration de leur performance physiques et mécaniques.

Dans l'optique de respecter la structure de notre étude, il convient dans le chapitre suivant de connaître l'ensemble des matériels nécessaires pour la réalisation de ce présent travail ; ainsi que la méthodologie à adopter pour l'atteinte des objectifs de l'étude.

CHAPITRE III : MATERIELS ET METHODES DE L'ETUDE EXPERIMENTALE

Introduction

Dans le cadre de l'étude expérimentale, nous avons réalisé des essais en laboratoire pour analyser les performances des matériaux et des essais In-Situ pour identifier les paramètres des matériaux en place. Il s'agit principalement d'élucider l'ensemble des essais effectués dans le cadre de notre étude en suivant un processus conforme aux normes en vigueur. Les différents essais portent sur un sol latéritique cru puis sur le graveleux latéritique amélioré au ciment.

I. Matériels

Pour la réalisation de nos différents essais, des matériels et/ou accessoires seront nécessaires. Ces matériels et accessoires sont spécifiques pour chacun des différents essais. Nous les présenterons donc, après la méthodologie de chaque essai.

II. Méthodologie

Pour mener nos recherches dans une logique qualité, les études géotechniques ont été faites suivant la norme NF P 94-500, version 2016 afin de lever le maximum d'information sur nos matériaux et de s'assurer de la fiabilité des résultats d'essais délivrés. Ces essais ont été effectués par nous-même sur les graveleux latéritiques bruts, sur des matériaux recyclés et des graveleux latéritiques améliorés au ciment à différents dosages sous la supervision de nos encadreurs.

Le processus général de recherche appliquée aux essais géotechniques qui a été largement adopté dans cette présente étude et conforme aux exigences de la norme ISO 17 025, est présenté selon la chronologie des activités dans la figure 5 suivant :

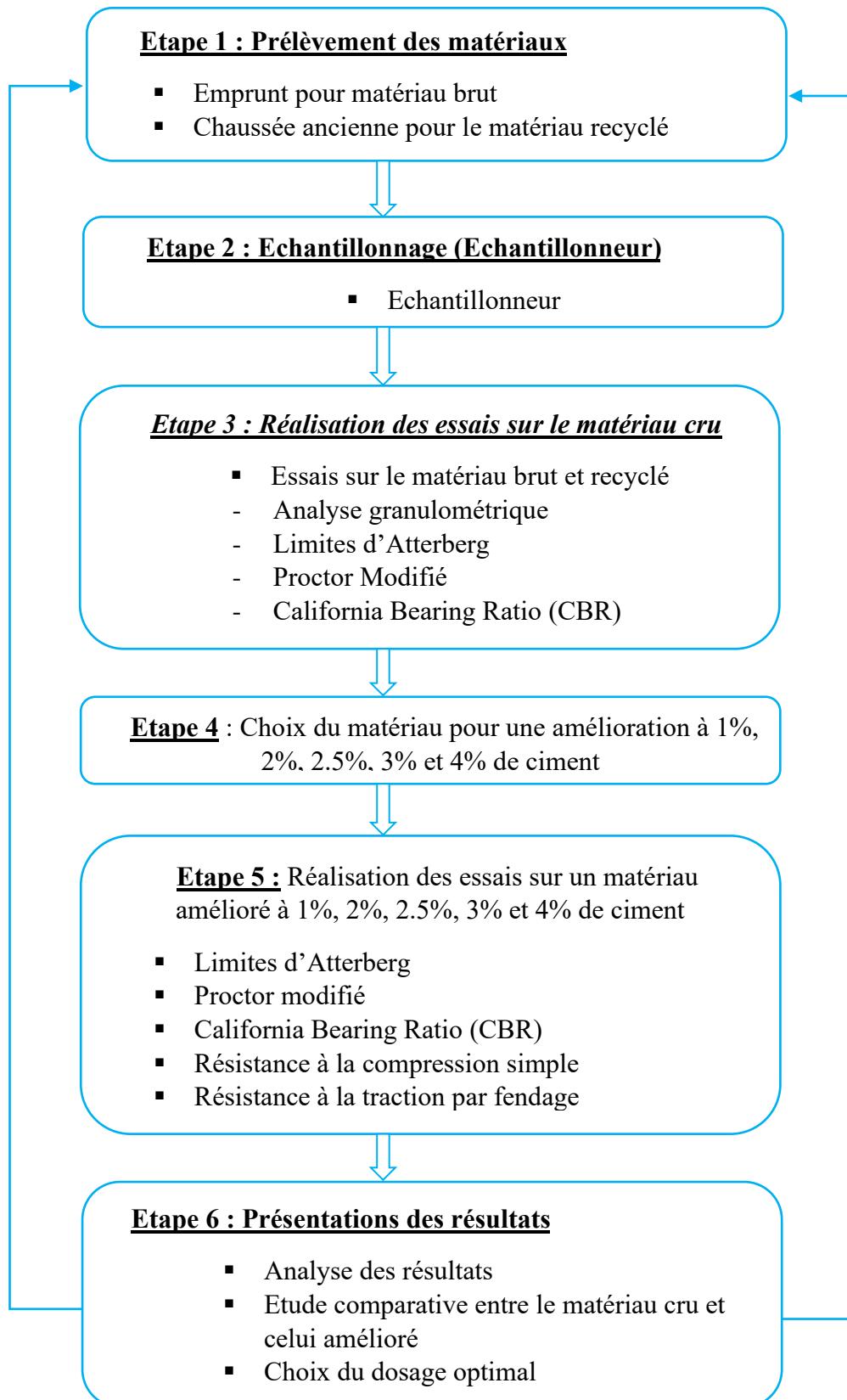


Figure 5 : Chronologie de l'exécution des essais

II.1 Prélèvement des matériaux

Lors de notre étude expérimentale, nous avons eu à prélever dans des sacs une quantité importante de deux (02) types de graveleux latéritiques qui se distinguent de leur provenance. Ainsi, nous avons du GAL à l'état brut qui provient de la carrière de l'entreprise EKS et du GAL recyclé provenant de la chaussée existante. Le prélèvement in situ du GAL recyclé, a été obtenu à travers des sondages manuels tous les 100 m sur une profondeur de 20 cm. Les essais en laboratoire portent sur des quantités réduites de matériaux intacts, qui permettront de connaître les caractéristiques de l'ensemble du matériau dans lequel nous avons fait le prélèvement. En fonction des essais à réaliser, la masse des matériaux est déterminée.

II.2 Echantillonnage

L'échantillonnage est une technique qui permet de prélever par partage, une portion d'un matériau afin que l'échantillon destiné à l'essai soit représentatif de l'ensemble de la masse. En d'autres termes que la partie prélevée soit identique à la partie restante. Il existe deux méthodes d'échantillonnage à savoir celle par :

- **quartage,**
- **échantillonneur.**

Pour ce qui concerne notre étude, nous avons opté d'effectuer le prélèvement de nos matériaux à l'aide de l'échantillonneur qui consiste à diviser en deux (02) parties égales dont nous ne retenons que chaque moitié de manière séparée dans un bac. Cette sélection est homogénéisée en répétant l'opération de manière identique trois ou quatre fois. Alors, nous obtenons, un échantillon représentatif du matériau initial. Cette méthode est plus objective que la première.

Notons qu'avant le prélèvement des matériaux pour les essais à l'aide de l'échantillonneur, nous avons étalé sur une bâche et séché à l'air libre l'échantillon humide prélevé sur le terrain, puis concassé à l'aide de marteaux en bois pour uniquement dissocier les agglomérés de grains. Les différents échantillons issus des prélèvements de la phase terrain ont été soumis à divers essais d'identification et de portance en laboratoire.

La réussite de tous les essais dépendant particulièrement de cette étape, nous avons donc apporté un grand soin à la réalisation de l'échantillonnage.

La figure 6 ci-dessous présente un aperçu de la méthode de l'échantillonneur.



Figure 6 : Echantillonnage du matériau par la méthode de l'échantillonneur

Source : Donnée de notre étude

II.3 Les essais géotechniques sur la grave argileuse latéritique brut et recyclé (GAL)

Les essais d'identification permettent de déterminer les propriétés physiques, mécaniques ou chimiques d'un matériau dans le but de le caractériser. Dans le cadre de notre étude, différents essais d'identifications et de portance ont été réalisés séparément sur le GAL à l'état brut et recyclé à savoir : l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, le Proctor modifié, le CBR.

II.3.1 Analyse granulométrique par tamisage [NF P 94-056]

❖ Méthode

L'analyse granulométrique consiste à déterminer au moyen d'une série de tamis la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre **0,063 et 125 mm**. Lorsque la portion de sol dont le diamètre des grains est inférieur à 0,08 mm, l'analyse granulométrique se fait par sédimentométrie. Cependant, pour un diamètre des grains supérieur à 0,08 mm, elle se fait par tamisage.

Dans le cadre de notre étude, quel que soit le pourcentage (%) de fines, nous nous limiterons à l'analyse granulométrique par tamisage conformément au mode opératoire NP P 18-560. Le tamisage par voie sèche a été effectué à travers une colonne de tamis ayant à sa base un tamis de 80 µm reposant sur un fond étanche afin de récupérer les fines et soumise à des vibrations. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.

❖ Expression des résultats

Les résultats de l'AG (Analyse Granulométrique) sont appréciés sous forme de courbe granulométrique dont nous déterminerons la nature du matériau en interprétant ses coefficients de courbure. Il s'agit donc de deux (02) coefficients à savoir :

- le coefficient d'uniformité de HAZEN (Cu)

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

- le coefficient de courbure(Cc)

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Avec D₁₀, D₃₀ et D₆₀ qui représentent respectivement les diamètres correspondant à 10%, 30% et 60% de passants.

Par interprétation, lorsque :

- Cu>2, la granulométrie du matériau est dite **étalée ou variée**,
- Cu <2, la granulométrie est dite **uniforme ou serrée**,
- 1 < Cc < 3 et Cu > 5, le matériau est dit **bien gradué**, dans le cas contraire, le matériau est dit **mal gradué**.

❖ Matériels utilisés

Pour cet essai, nous avons utilisé, conformément à la norme des tamis, un fond étanche et un couvercle, deux (02) récipients pour tamiser et peser, une balance et une étuve.

II.3.2 Limites d'Atterberg [NFP 94- 051]

❖ Méthode

Les limites d'Atterberg permettent de définir la consistance d'une fraction de sol passant à travers le tamis de mailles d'ouverture 400 µm. A l'issue de cet essai, trois (03) grandeurs caractéristiques du sol sont déterminées :

- **La limite de liquidité (WL)** : C'est la teneur en eau à laquelle le sol remanié se situe au point de transition entre les états liquide et plastique. Cette teneur est déterminée à travers la fermeture d'un centimètre (1 cm) après 25 chocs répétées d'une rainure pratiquée sur un sol que nous avons placé dans une coupelle.
- **La limite de plasticité (WP)** : C'est la teneur en eau d'un sol remanié en rouleau se situant au point de transition entre les états plastique et solide. L'essai consiste donc à rechercher la teneur en eau après fissuration d'un sol en forme de cylindre roulé à la main de dimensions fixes.
- **Indice de plasticité (IP)** : il est déterminé à travers la différence des limites de liquidité et de plasticité.

❖ Expression des résultats

Les résultats de l'essai seront interprétés en déterminant la valeur de l'indice de plasticité à travers la relation suivante :

$$I_p = W_L - W_P$$

Notons qu'une quatrième grandeur peut déterminer. Il s'agit de l'indice de consistance (I_c) qui caractérise la consistance du sol à son état naturel. Il s'obtient par la relation suivante :

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p}, \text{ avec :}$$

W = la teneur en eau naturelle du sol.

❖ Matériels

Les matériels utilisés sont entre autres : un récipient de 2 L, un tamis de d'ouverture 400 µm, l'appareil de Casagrande et ses accessoires, une balance.

II.3.3 Essai Proctor Modifié [NF P 94 -093]

❖ Méthode

L'essai Proctor est un essai géotechnique qui consiste à déterminer la teneur en eau optimale pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire à différentes teneurs en eaux croissantes. L'essai se fait en compactant avec une énergie identique l'échantillon par couches d'épaisseur déterminée, en fonction d'un nombre de coups normalisé.

Il existe deux (02) variantes de l'essai qui se diffèrent de l'énergie de compactage mise en œuvre, il s'agit de :

- l'essai Proctor Normal qui est généralement utilisé au niveau des barrages avec une énergie de compactage modéré pour remblais en terre ;
- l'essai Proctor Modifié qui est utilisé dans les travaux routiers avec une énergie de compactage intense pour couche de chaussées.

Dans le cadre de la présente étude, les matériaux ont été soumis à l'essai Proctor Modifié et les résultats que nous avons trouvés sont illustrés dans les annexes 1 et 2.

❖ Matériels

Pour l'essai Proctor modifié, les équipements nécessaires sont : une règle à raser, un moule Proctor modifié accompagné de ces accessoires, une éprouvette d'une capacité de 1000 ml, une balance et un bac pour la préparation de l'échantillon.

La figure 7 présente l'ensemble des équipements pour l'essai.



Figure 7 : Matériels servis pour l'essai Proctor modifié

Source : Données de l'étude

II.3.4 Essai de portance CBR (Californian Bearing Ratio test) [NF P 94-078]

❖ Méthode

Pour la construction des couches de formes on ne peut admettre que de très faibles déformations. Ainsi, nous déterminons donc la portance du sol compacté, c'est-à-dire sa résistance à la rupture, à travers l'essai C.B.R (Californian Bearing Ratio) ou essai de portance californien.

L'essai consiste à poinçonner le matériau par un piston de 19.3 cm^2 de section, enfoncé à une vitesse constante de 1.27 mm/mn . Le matériau est au préalable compacté dans les conditions de l'essai Proctor modifié et soumis à des conditions hydriques (immersion dans l'eau) de 4 jours avant poinçonnement.

❖ Expression des résultats

A travers le matériau sec obtenu durant l'échantillonnage et connaissant la teneur en eau optimale (W_{opt}) ainsi que la densité apparente sèche maximale (γ_{dmax}) de l'essai Proctor modifié, on incorpore à l'échantillon une quantité d'eau suffisante afin d'obtenir un matériau ayant une teneur en eau optimale (W_{opt}). Cette quantité d'eau appelée l'eau de mouillage se traduit par :

$$\text{Eau de mouillage} = \frac{P_s \times W_s}{100}, \quad \text{Avec } W_s = W_{opt} - W_i \text{ et } P_s = \frac{P_t}{1 + W_i}$$

W_s : Teneur en eau du matériau sec

W_i : Teneur en eau initiale

P_s : Poids sec du matériau

P_t : Poids total du matériau pour l'essai

Conventionnellement, on définit l'indice CBR par :

$$\text{CBR} = \text{Max} \left\{ \frac{100 \times \text{effort à } 2,50 \text{ mm}}{13,35}; \frac{100 \times \text{effort à } 5 \text{ mm}}{19,93} \right\}; F \text{ en KN}$$

❖ Matériels

Dans le cadre de cet essai, nous avons utilisé entre autres : un moule CBR avec une embase et une hausse, une presse de compression CBR pour le poinçonnement et le même matériel utilisé pour l'essai Proctor.

II.4 Les essais sur la grave argileuse latéritique améliorée au ciment à différents dosages

Dans le cadre du projet de réhabilitation de la RN8, l'amélioration du GAL par ajout de ciment demeure une solution primordiale face à la mauvaise qualité des matériaux et à l'état très dégradée de la chaussée existante qui ne peut plus répondre aux sollicitations pour évacuer un trafic dense de plus en plus croissant. Dans l'optique donc d'atteindre les résultats souhaités et de mieux approfondir notre présente étude, nous avons effectué des essais sur le GAL recyclé et amélioré au ciment à différents dosage en ciment (1, 2, 2.5, 3 et 4%). Ces essais permettront de densifier de façon optimale les caractéristiques mécaniques du matériau qui constituera l'assise de chaussée. Il s'agit donc des essais suivants :

- les limites d'Atterberg à 1, 2, 2.5, 3, 4 % de ciment,
- l'essai Proctor modifié à 1, 2, 2.5, 3, 4 % de ciment,
- le CBR à 1, 2, 2.5, 3, 4 % de ciment,
- l'essai de la traction par fendage à 1, 2, 2.5, 3, 4 % de ciment,
- l'essai de compression simple à 1, 2, 2.5, 3, 4 % de ciment.

Spécifiquement, la réalisation des essais sur le GAL amélioré au ciment, se fait en deux (02) grandes étapes à savoir :

- Détermination de la quantité de ciment,
- Exécution des essais.

Notons qu'à la différence de l'essai CBR du matériau cru, celui du matériau amélioré requiert spécifiquement que l'on place l'ensemble du sol compacté dans une pièce climatisée à 30 °C durant trois (03) jours. A l'issue des 72 heures à l'air, nous avons imbibé ces lots de matériaux dans les plus mauvaises conditions hygrométriques pendant quatre (04) jours. A la fin de l'imbibition, nous avons donc déterminé les teneurs en eau à travers le poinçonnement. Pour ce qui est de cet essai, nous avons utilisé un échantillon du matériau qui a servi à l'essai CBR du GAL cru.

La figure 8 ci-dessous présente le prélèvement effectué sur la chaussée ancienne.



Figure 8 : Prélèvement du matériau recyclé

Source : Donnée de l'étude

II.4.1 Essai de traction par fendage à différents dosages (NF EN 13286-42)

❖ Méthode

L'essai de traction par fendage ou traction indirecte a pour but de connaître la contrainte de traction. En effet, cela revient à chercher la résistance à la traction d'une éprouvette cylindrique du sol ciment à différents dosages par écrasement ; en le posant au centre d'un plateau. Conformément donc à la norme EN 12390- 6, pour obtenir des contraintes uniformes lors de l'écrasement, un effort de compression a été appliquée de façon uniforme et continue sans variation brusque qui induira ainsi des contraintes de traction à travers deux (02) génératrices diamétralement opposées ce qui va produire une rupture de l'éprouvette.

❖ Confection des éprouvettes

En ce qui concerne notre étude, les essais de traction par fendage ont été effectués séparément pour chaque pourcentage de ciment. Ainsi nous avons effectué cinq (05) séries d'essais pour les dosages de 1%, 2%, 2.5%, 3% et 4%. En raison de trois éprouvettes par pourcentage d'où quinze (15) éprouvettes au total à sept (07) jours d'âge et quinze (15) autres éprouvettes à vingt-huit (28) jours d'âges dont 30 moules CBR fendu au total de dimension 152×152 mm pour l'essai de traction par fendage. Une fois le nombre de moule acquis, les éprouvettes sont donc confectionnés avec une teneur en eau de mouillage optimale déjà définie en cherchant une quantité de ciment proportionnelle au poids du matériaux cru et au taux de ciment prédéfinis (GAL cru +%ciment).

Notons que les éprouvettes utilisées ont été confectionnées selon le mode opératoire de l'essai Proctor Modifié puis démoulées et placées dans une salle climatisée à 25°C sans interruption afin de maintenir une température ambiante jusqu'à la réalisation des écrasements des éprouvettes à un âge de 7 jours et 28 jours. Pour la bonne marche de l'essai, les éprouvettes ont été emballées dans des sachets plastiques ce qui a évité la perte de masse dû à l'évaporation.

❖ Expression des résultats

A l'issue de l'écrasement des éprouvettes, nous avons relevé la force maximale (F) lors de la rupture. Le calcul de la résistance à la traction indirecte s'est fait selon la formule suivante :

$$R_t = 0,8 \times R_{it} \text{ et } R_{it} = \frac{2F}{\pi HD}, \text{ Avec :}$$

- R_t : la résistance à la traction réelle exprimé en MPa ;
- R_{it} : la résistance à la traction indirecte exprimé en N ;
- F : la force maximale à la rupture exprimée en N ;
- H : longueur de l'éprouvette exprimé en mm ;
- D : le diamètre de l'éprouvette.

❖ Matériels nécessaires

Pour la réalisation de l'essai de traction indirecte, le matériel suivant a été mis à notre disposition : une presse hydraulique, des moules cylindriques, une balance. La figure 9 donne un aperçu de l'exécution de l'essai.



Figure 9 : Mise en œuvre de l'essai de traction par fendage avec la presse hydraulique

Source : Données de l'étude

II.4.2 Essai de la compression simple à différents dosages

❖ Méthode

En ce qui concerne l'essai de compression simple, il a pour but de déterminer la résistance à la compression. D'abord nos éprouvettes ont été confectionnées avec une teneur en eau optimale prédefinie suivant la même procédure que l'essai Proctor Modifié avec des moules fendues en écrasant dans le sens longitudinal des éprouvettes cylindriques normalisées selon les dosages de 1, 2, 2.5, 3, et 4 % de ciment. La résistance à la compression est obtenue à travers une série de trois éprouvettes (10, 25 et 56 coups) à 7 et 28 jours d'âge à l'air. Afin d'obtenir une rupture après le début de l'application de la pression sur le disque supérieur, l'écrasement a été fait au moyen d'une charge continue sans choc et à vitesse constante. Ce qui nous a permis de connaître la valeur de la résistance après rupture de l'éprouvette.

Par manque de machine à commande automatique, nous avons donc utilisé une presse à béton à commande manuelle. Ainsi, nous avons veillé à régler de façon adéquate les commandes pour corriger la vitesse de mise en charge constante à 1,27 mm/min à chaque fois qu'elle baisse.

❖ Confection des éprouvettes

Les éprouvettes pour l'essai de la compression simple ont été confectionnées selon le même mode opératoire que ceux de l'essai de traction par fendage énuméré plus tôt.

❖ Expression des résultats

Au moment de la rupture des éprouvettes, nous avons enregistré la force maximale (KN) qui nous sert à calculer la résistance à la compression simple ou contrainte maximale (R_c) à travers la formule suivante :

$$R_c = \frac{F}{S}$$

Le module d'élasticité en compression simple est donné par la formule suivante : $E = \frac{1,2 \times Fr}{\pi \times D^2 \times \varepsilon}$

- R_c : la contrainte maximale exprimé en MPa ;
- F : la force maximale supportée par l'éprouvette ;
- S : la surface de l'éprouvette calculée en fonction du diamètre exprimée en mm^2 ;
- ε : l'allongement longitudinal de l'éprouvette lorsque $F = 0,3 \times F$;
- D : le diamètre de l'éprouvette.

❖ Matériels nécessaires

Dans le cadre de cet essai nous avons utilisé le matériel suivant : une balance, une presse à béton, des moules CBR à fente de forme cylindrique et à volume connu. L'exécution de l'essai est présentée par la figure 10 ci-dessous.



Figure 10 : Illustration de l'essai de compression simple avec la presse hydraulique

Source : Données de l'étude

II.5 L'essai pour la détermination de l'indice qualité de l'ancienne chaussée

Vu le caractère souple de l'ancienne chaussée, l'analyse de cette structure se fera selon le manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux (CEBTP-LCPC-édition Mai 1985). La détermination de l'indice qualité de notre chaussée vise à connaître la qualité de l'ancienne chaussée afin de proposer des solutions d'interventions sur les itinéraires et à mieux dimensionner la structure de la route projetée. Selon le manuel le choix de l'indice de qualité (Qi) de la chaussée dépend de deux (02) paramètres à savoir :

- L'état apparent de la chaussée (le niveau de dégradation) ;
- Et la déflexion.

❖ La méthode de l'essai de la déflexion

L'essai consiste à déterminer le comportement mécanique, la portance et la rigidité de notre chaussée existante découlant par le passage d'une charge roulante de 13 tonnes ; ce qui permettra connaitre la déflexion caractéristique D₉₀ à travers la formule suivante :

$$D_{90}=D_{moyenne}+1,3\sigma ; \text{ Avec :}$$

- D₉₀ = Déflexion caractéristique pour une probabilité de risque de dépassement de 10%.
- D_{moyenne} = Déflexion moyenne
- σ = Ecart type

❖ Matériels

Les mesures des déflexions ont été réalisées à l'aide la poutre de BENKELMAN, d'un camion lesté de 13 tonnes à l'essieu arrière et des pneus gonflés à 7 bars.

Conclusion

En somme, il ressort dans cette partie, que la réalisation des essais demeure indispensable pour mieux connaître les paramètres intrinsèques des différents matériaux afin de maîtriser l'évolution de leur performance. Pour cela, le chapitre suivant présente les résultats issus de ces essais et donne la formulation optimale du mélange GAL- ciment.

Chapitre IV : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction

Les résultats de nos différents essais réalisés pour caractériser le GAL feront donc l'objet d'une analyse afin de s'assurer qu'ils sont conformes aux normes en vigueurs. Les résultats obtenus seront soumis à une série d'évaluation comparatives pour mieux orienter nos choix.

I. Résultats et interprétation des essais réalisés sur GAL brut

En ce qui concerne notre travail, nous appliquerons les prescriptions du guide pratique de dimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux (CEBTP) car le CCTP n'a pas défini des critères d'acceptabilité. Les tableaux II et III ci-dessous illustrent les prescriptions du CEBTP respectivement pour la couche de fondation et de base car notre étude porte sur l'assise de chaussée.

Tableau II: Les spécifications du CEBTP des matériaux crus pour la fondation

GAL CRU en couche de fondation		
Nature des essais		Résultats exigés
Essais d'identification	Analyse granulométrique	Taille maximale de 10 à 50 mm et $0,08 \text{ mm} < 35\%$ Pourcentage de fines (%) $< 0,08 \text{ mm } (\%) < 20$
	Limites d'Atterberg	Indice de plasticité (Ip) < 30
	Protor modifié	Densité sèche minimale à l'OPM : $\gamma_d \geq 1,8 - 2 \text{ t/m}^3$
Essais de résistance	CBR simple	CBR (95% OPM) ≥ 35

Source : Guide pratique de dimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux

Tableau III: Les spécifications du CEBTP des matériaux crus pour la couche de base

GAL CRU en couche de base		
Nature des essais		Résultats exigés
Essais d'identification	Analyse granulométrique	Taille maximale de 10 à 50 mm ; 0,08 mm<35% et Cu >10
	Limites d'Atterberg	Pourcentage de fines (%) < 0,08 mm (%) < 20
Essais de résistance	Protor modifié	Densité sèche minimale à l'OPM : $\gamma_d \geq 1,8$ à 2 t /m ³
	CBR simple	CBR (95% OPM) ≥ 60 pour un trafic faible

Source : Guide pratique de dimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux

Les critères d'acceptabilité des graveleux latéritiques améliorés au ciment sont présentés au tableau IV suivant :

Tableau IV: Les spécifications du CEBTP du GAL traité au ciment en assise de chaussée

Graveleux latéritiques améliorés au ciment		
Couche	Fondation	Base
CBR à 95 % de l'OPM exigé	CBR>100	CBR >160
Résistance en compression exigée (bars)	R_c \geq10 bars	18< R_c < 30
Resistance en traction exigée (bars)	-	R_t>3

Source : guide pratique de dimensionnement des chaussées dans les pays tropicaux

I.1 Résultats et analyse de l'essai d'analyse granulométrique par tamisage sur le GAL brut

❖ Résultats

L'essai d'analyse granulométrique effectué sur le matériau brut provenant de l'emprunt a permis le traçage de la courbe granulométrique représentant le pourcentage de passants en fonction du diamètre des mailles à travers la figure 11.

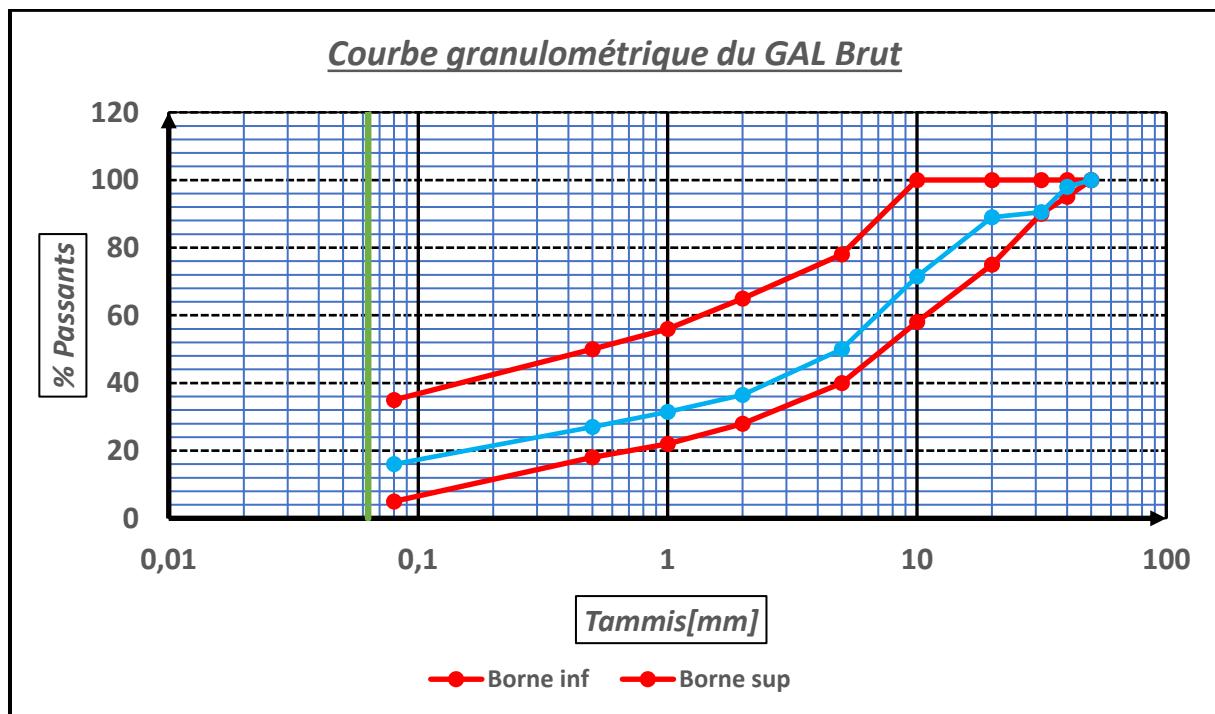


Figure 11 : Courbe granulométrique de la graveleuse latéritique brut

Source : Donnée de l'étude

❖ Interprétation des résultats

En examinant la courbe ci-dessus, il ressort que le matériau utilisé ici a une répartition granulométrique qui est comprise dans le fuseau granulométrique de la couche de fondation exigé par le CEBTP. Le graveleux latéritique brut provenant de notre emprunt peut donc être amélioré en vue d'une utilisation en assise de chaussée.

L'exploitation de cette courbe donne les résultats suivants :

$$D_{10} = 0,03 \text{ mm} \quad D_{30} = 0,8 \text{ mm} \quad D_{60} = 7 \text{ mm}$$

- D_{10} : diamètre du grain correspondant à 10% de passant ;
- D_{30} : diamètre du grain correspondant à 30% de passant ;
- D_{60} : diamètre du grain correspondant à 60% de passant.

Les deux (02) coefficients caractérisant le sol sont :

- le coefficient d'uniformité ou de HAZEN : $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 233,33$
- le coefficient de courbure : $Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = 3,05$

Nous remarquons que le matériau à un coefficient d'uniformité supérieur à 2 ($Cu > 2$) ce qui signifie que la granulométrie est étalée tandis que son coefficient de courbure (Cc) n'est pas compris entre l'intervalle 1 et 3, ce qui veut dire que le matériau est mal gradué.

I.2 Résultats et analyse des limites d'Atterberg sur le GAL brut

❖ Résultats

Les essais sur les états de consistance sur le GAL cru nous ont fourni les résultats présentés par la figure 12.

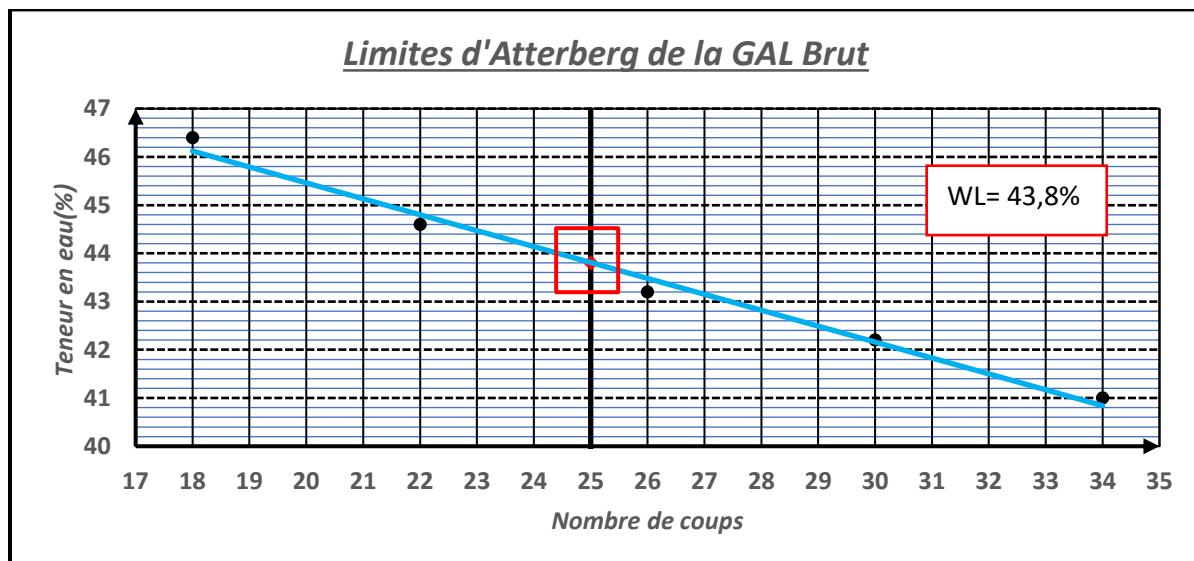


Figure 12 : Courbe des limites d'Atterberg de la grave argileuse latéritique brut

Source : Donnée de l'étude

Les essais réalisés sur le matériau brut ont donné des résultats consignés dans le tableau V suivant :

Tableau V: Limites d'Atterberg du matériau brut

Limite de liquidité WL	43,8%
Limite de plasticité WP	23%
Indice de plasticité IP (WL-WP)	20,8%

Source : Donnée de l'étude

❖ Interprétations

En examinant les résultats obtenus, nous remarquons que :

- IP est inférieur à la valeur limite fixée par le CEBTP aussi bien en couche de fondation qu'en couche de base.
- IP <30 et aussi IP<25
- Tamisât à 80 µm ($T_{80\mu m}(\%)$) est compris entre 12 et 35%.

Nous pouvons donc déduire que les limites de liquidité et de plasticité sont conformes aux exigences du CEBTP. Aussi en nous basant sur la classification des sols du guide des terrassements Routiers, nous pouvons dire que notre matériau est de classe B6 car $IP>12\%$ et $12 \leq T_{80\mu m}(\%) \leq 35$.

En exploitant le diagramme de Casagrande, nous constatons que les fines de notre matériau sont composées d'argiles peu plastiques.

Il s'avère nécessaire d'améliorer les performances du matériau.

L'abaque de plasticité de Casagrande simplifié est présenté dans l'annexe 10.

I.3 Résultats et analyse de l'essai Proctor Modifié sur le GAL brut

❖ Résultats

A travers la réalisation des essais de Proctor modifié sur le graveleux latéritique à l'état naturel, nous obtenons une courbe Proctor modifié traduit par la figure 13 ci-dessous :

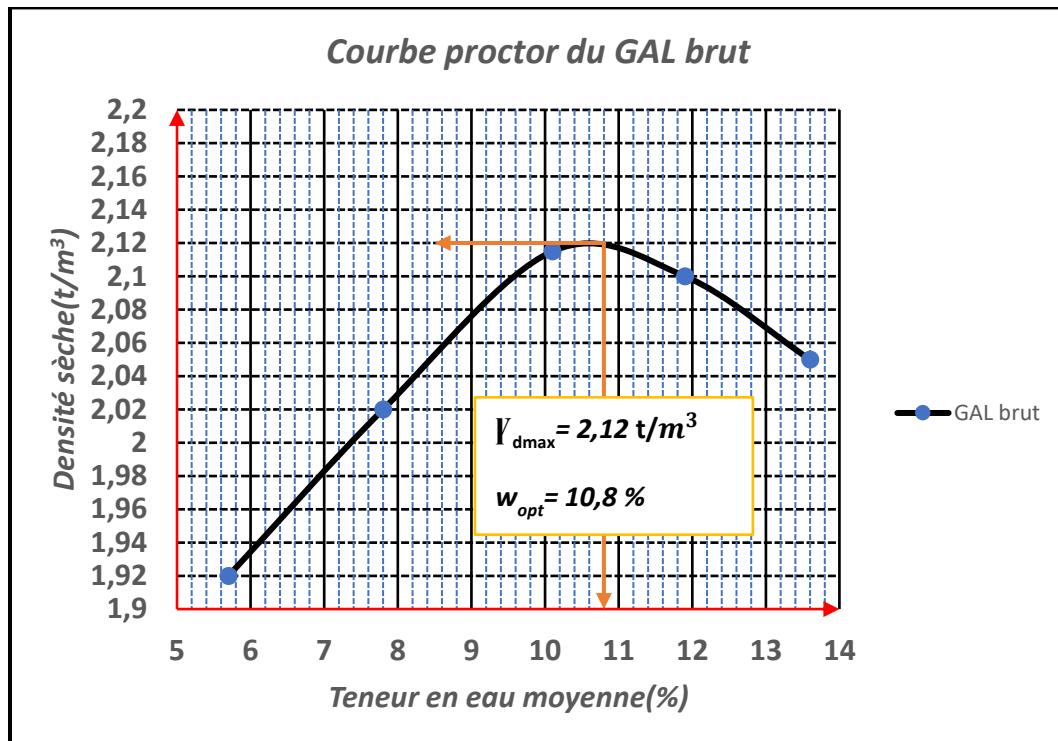


Figure 13 : Courbe du Proctor modifié de la GAL brut

Source : Données de l'étude

❖ Interprétations du résultat

En exploitant la courbe ci-dessus, nous obtenons les valeurs suivantes :

- Teneur en eau à l'OPM (w_{opt}) = 10,8 % ;
- Le densité sèche (γ_d)= 2,12 %.

D'après le guide CEBTP, la densité sèche doit être supérieure ou égale à 1,8 à 2 t/m^3 . Ces exigences étant respectées, nous pouvons conclure que notre matériau convient pour un traitement au ciment.

I.4 Résultats de l'essai CBR simple

❖ Résultats

Les résultats issus de l'essai CBR ont permis de tracer la courbe CBR à la figure 14 qui représente l'évolution de la portance CBR du GAL brut en fonction des densités sèches maximales.

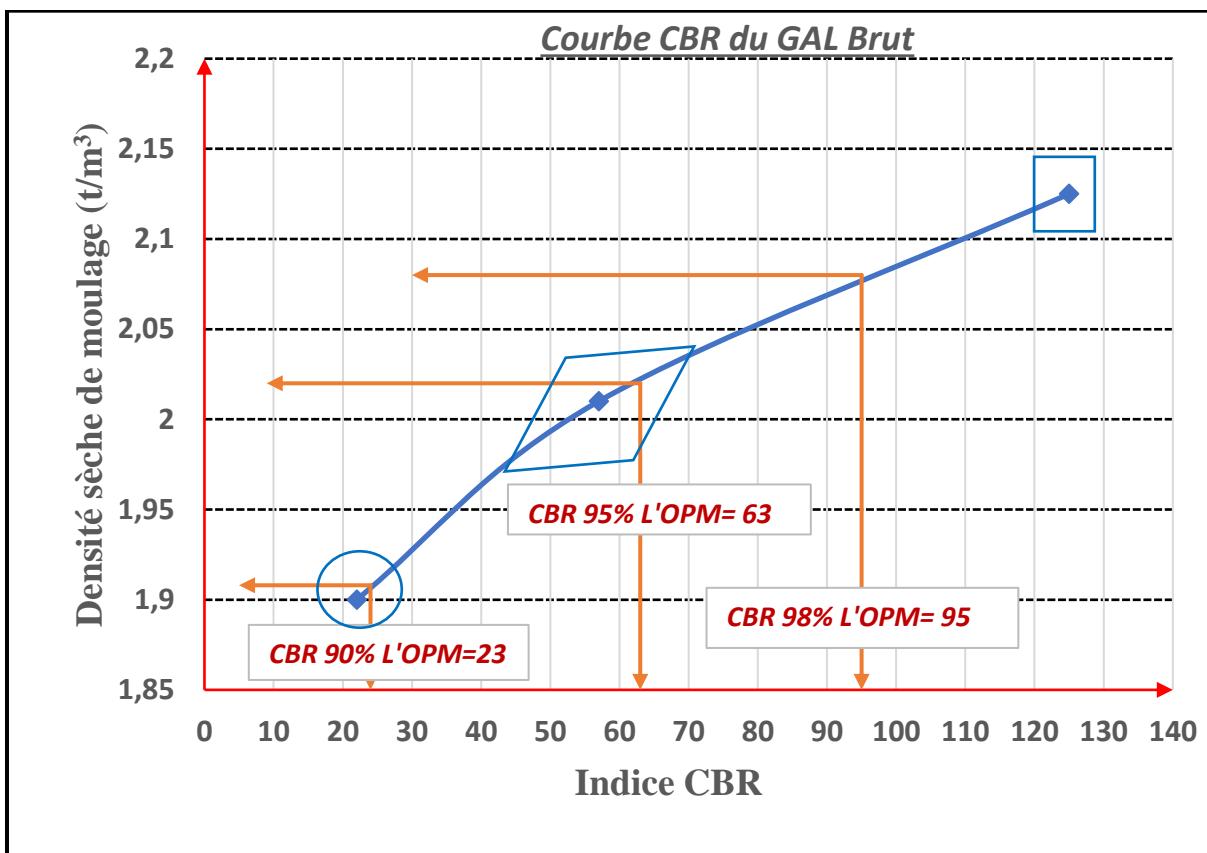


Figure 14: Courbe CBR du GAL brut

Source : Données de l'étude

❖ Interprétations des résultats

A travers la figure 14, nous constatons que les résultats des portances obtenues respectent les exigences du CEBTP (CBR à 95% OPM ≥ 60 pour la couche de base et ≥ 35 pour la couche de fondation). Le matériau ayant un CBR à 95% de l'OPM égale à 63, rempli donc les critères d'aptitude pour une amélioration au ciment en couche de fondation et en couche de base.

II. Résultats et interprétation des essais réalisés sur le matériau recyclé

II.1 Analyse des résultats de l'essai d'AG sur le GAL recyclé

❖ Résultats

La figure 15 représente les résultats de l'analyse granulométrique sur le matériau recyclé.

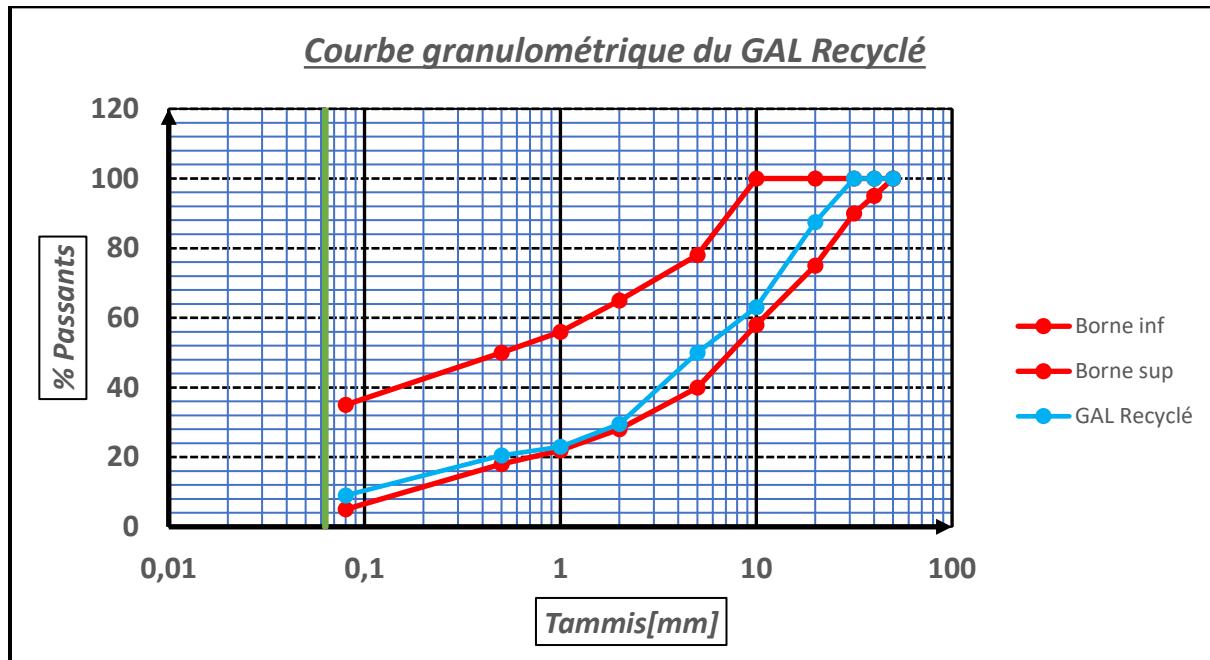


Figure 15: Courbe granulométrique du GAL recyclé

Source : Données de l'étude

❖ Interprétation des résultats

En examinant la courbe ci-dessus, il ressort que le matériau utilisé ici, a une répartition granulométrique qui est comprise dans le fuseau granulométrique exigé par le CEBTP. Le graveleux latéritique brut provenant de notre emprunt peut donc être amélioré en vue de d'utilisation en assise de chaussée.

L'exploitation de cette courbe donne les résultats suivants :

$$D_{10} = 0,1 \text{ mm} \quad D_{30} = 2 \text{ mm} \quad D_{60} = 9 \text{ mm}$$

- D_{10} : diamètre du grain correspondant à 10% de passant ;
- D_{30} : diamètre du grain correspondant à 30% de passant ;
- D_{60} : diamètre du grain correspondant à 60% de passant.

Les deux (02) coefficients caractérisant le sol sont :

- le coefficient d'uniformité ou de HAZEN : $Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 90$
- le coefficient de courbure : $Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = 4,44$

Nous remarquons que le matériau à un coefficient d'uniformité supérieur à 2 ($Cu > 2$) ce qui signifie que la granulométrie est variée tandis que son coefficient de courbure (Cc) n'est pas compris entre l'intervalle 1 et 3, ce qui veut dire que le matériau est mal gradué.

II.2 Analyse des résultats des limites d'Atterberg sur le matériau recyclé

❖ Résultats

L'essai a donné les résultats suivants présentés dans la figure 16 ci-dessous :

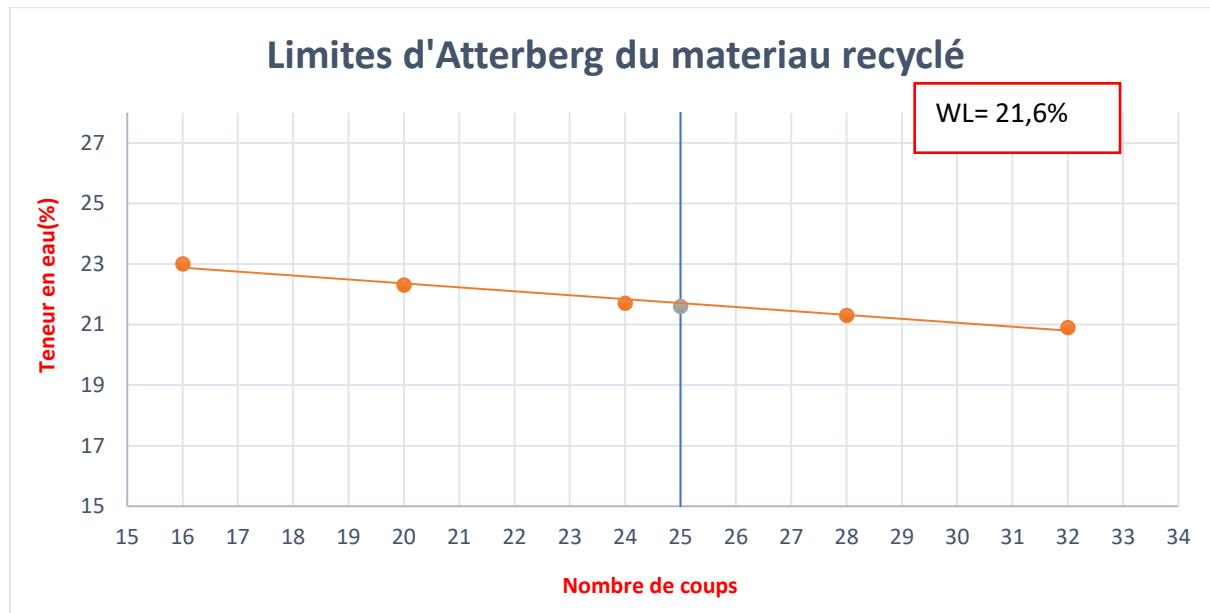


Figure 16: Courbe des limites d'Atterberg du GAL recyclé

Source : Donnée de l'étude

Les essais réalisés sur le matériau brut ont donné des résultats consignés dans le tableau VI suivant :

Tableau VI: Limites d'Atterberg du matériau brut

Limite de liquidité WL	21,6%
Limite de plasticité WP	11,9%
Indice de plasticité IP (WL-WP)	9,7%

Source : Donnée de l'étude

❖ Interprétations

En examinant les résultats obtenus, nous remarquons que :

- IP est inférieur à la valeur limite fixée par le CEBTP aussi bien en couche de fondation qu'en couche de base.
- IP <30 et aussi IP<25
- Tamisât à 80 µm ($T_{80\mu m}(\%)$) est compris entre 12 et 35%.

Nous pouvons donc déduire que les limites de liquidité et de plasticité sont conformes aux exigences du CEBTP. Aussi en nous basant sur la classification des sols du guide des terrassements Routiers, nous pouvons dire que notre matériau est de classe B6 car $IP<12\%$ et $12 \leq T_{80\mu m}(\%) \leq 35$.

En exploitant le diagramme de Casagrande en annexe 10, nous constatons que les fines de notre matériau sont composées d'argiles peu plastique. Il s'avère nécessaire d'améliorer les performances du matériau.

II.3 Essai Proctor du matériau recyclé

❖ Résultats

L'essai Proctor a donné les résultats présentés dans la figure 17.

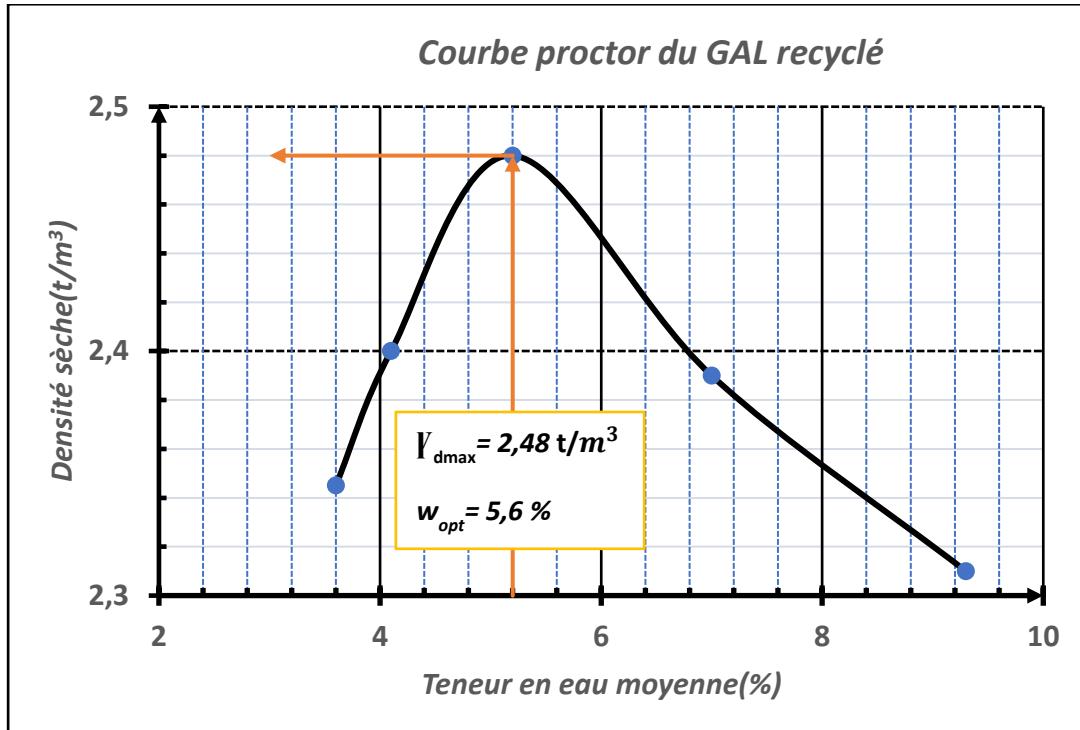


Figure 17: Courbe Proctor modifié du GAL recyclé

Source : Données de l'étude

❖ Interprétations

En exploitant la courbe ci-dessus, nous obtenons les valeurs suivantes :

- Teneur en eau à l'OPM (wopt) = 5,6% ;
- Le densité sèche (γ_d)= 2,48%.

D'après le guide CEBTP, la densité sèche doit être supérieure ou égale à 1,8 à 2 t/m³. Ces exigences étant respectées, nous pouvons conclure que notre matériau convient pour un traitement au ciment.

II.4 Essai CBR simple

❖ Résultats

Les données de l'essai CBR du GAL recyclé nous ont donc permis de tracer la courbe CBR dans la figure 18.

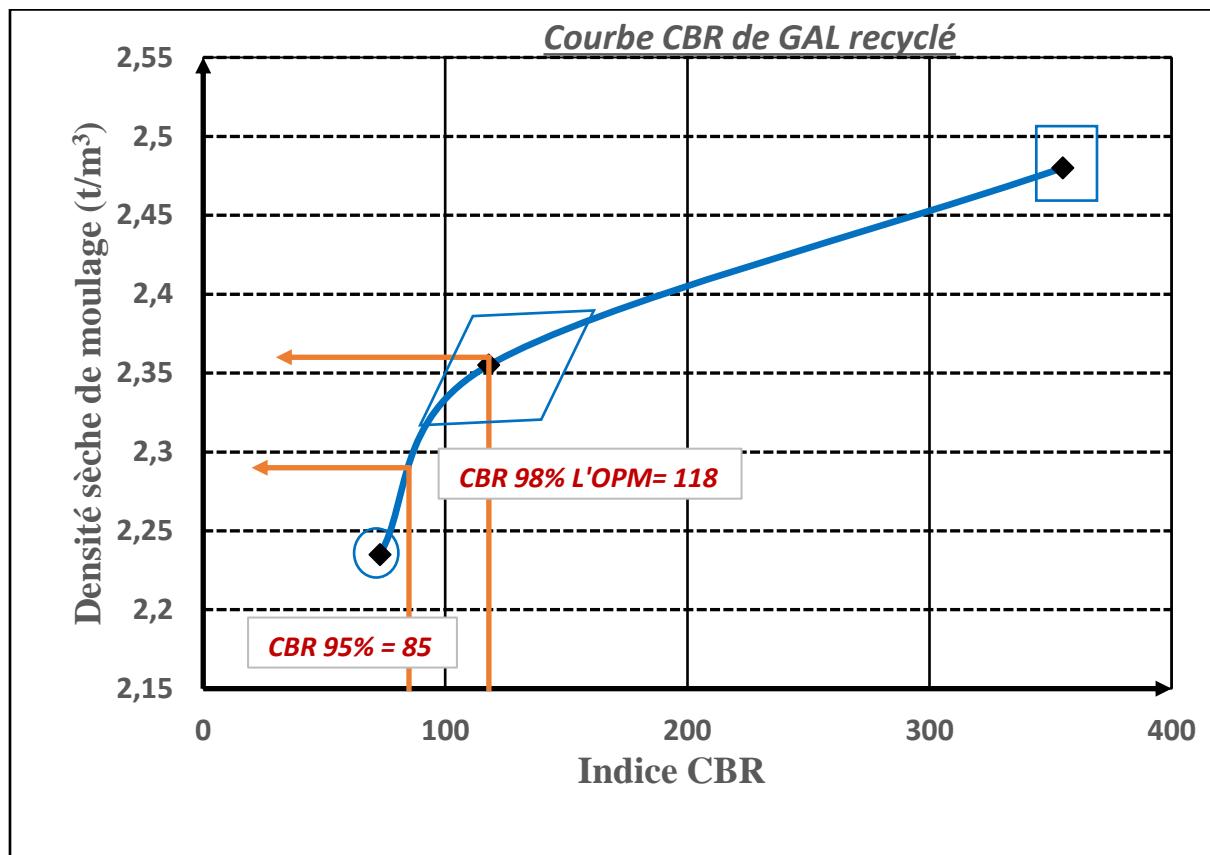


Figure 18: Courbe du CBR du GAL recyclé

Source : Données de l'étude

❖ Interprétations des résultats

A travers ces résultats, nous constatons que les résultats des portances obtenues respectent les exigences du CEBTP (CBR à 95% OPM ≥ 60 pour la couche de base et ≥ 35 pour la couche de fondation). Le matériau ayant un CRB à 95% de l'OPM égale à 85, rempli donc les critères d'aptitude pour une amélioration au ciment en couche de fondation et en couche de base.

III. Etude comparative entre le GAL brut et le GAL recyclé

III.1 Synthèse et discussion des résultats obtenus pour les deux (02) matériaux

Le tableau VII ci-dessous présente la synthèse des résultats des différents essais réalisés sur les GAL à l'état brut et recyclé.

Tableau VII: Récapitulatif des résultats des graveleux latéritiques bruts et recyclés

ESSAIS		GRANULOMETRIE %FINES	LIMITES D'ATTERBERG		PROCTOR MODIFIE		CBR	
			WL (%)	IP (%)	γ_d max	ω_{OP} M	95%	98%
Matériaux	GAL BRUT	16	43,8	23	2,12	10,8	63	95
	GAL RECYCLE	9	25,9	11,3	2,48	5,6	85	118
Observations		Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon	Bon

Source : Données de l'étude

Ces données nous ont donc permis de réaliser un histogramme comparatif des CBR des deux (02) matériaux, illustrées par la figure 19 ci-dessous.

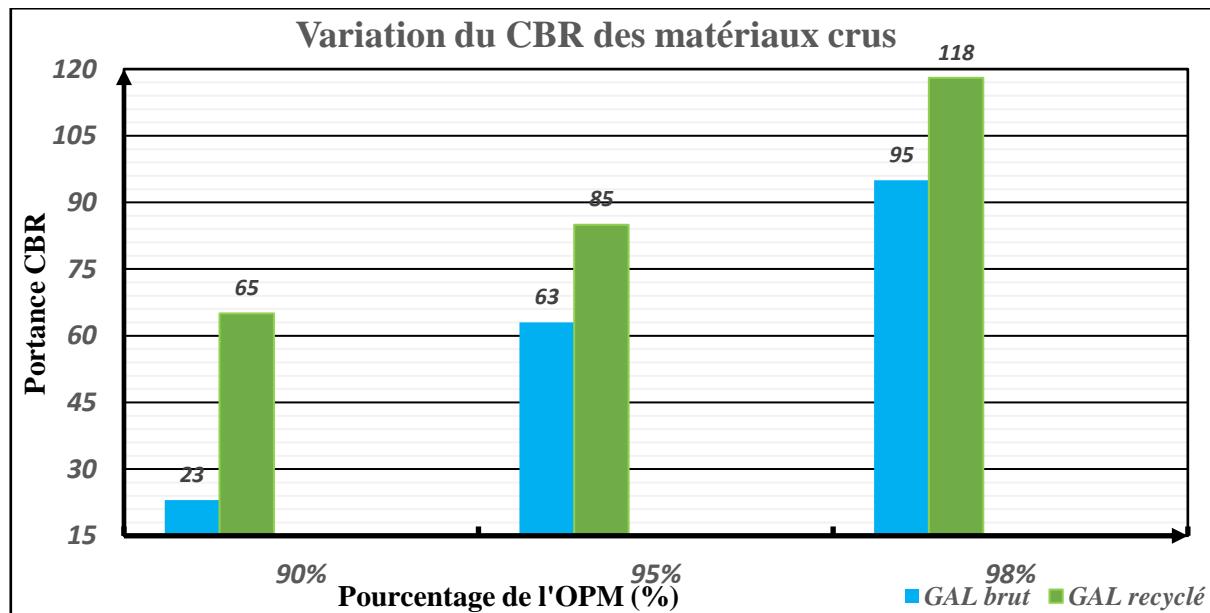


Figure 19: Histogramme de l'évolution des CBR des deux matériaux

Source : Données de l'étude

III.2 Choix du matériau idéal pour une amélioration au ciment

Nous constatons que le matériau recyclé (CBR à 95% de l'OPM égale à 85%) sur l'ancienne structure de notre chaussée offre une meilleure portance CBR que le matériau provenant de l'emprunt (CBR à 95% de l'OPM égale à 63).

Aussi, du point de vue écologique, les matériaux provenant des sites d'emprunt sont très néfastes vis-à-vis de l'environnement en raison de leur production tandis que redonner de la valeur aux matériaux de l'ancienne structure, c'est donner une plus-value à notre environnement.

Dans le but, de promouvoir le secteur des infrastructures routiers tout en tenant compte des réalités financières de l'Afrique en général et du Burkina-Faso en particulier, nous estimons que le recyclage des matériaux réduirait considérablement le coût économique (la rareté et coûts élevés des granulats ainsi que de leurs transports) de la réhabilitation de la RN°8.

Au regard des résultats obtenus, nous décidons d'opter pour des graveleux latéritiques recyclés pour la suite des essais. Ce matériau sera amélioré à différents dosages en ciment afin de rechercher la formulation optimale pour une utilisation en assise de chaussée.

IV. Résultats et interprétations des essais réalisés sur le GAL recyclé et amélioré au ciment

La structure de la chaussée ne répondant plus aux sollicitations actuelles, nous avons élargi notre présente étude par plusieurs séries d'essai sur du GAL brut provenant de l'emprunt et sur du GAL naturel recyclé provenant de la chaussée existante. De ce fait, nous avons donc décidé de continuer nos recherches avec le matériau le plus performant qu'est le GAL recyclé. Cependant, vu les nombreuses dégradations observées sur la chaussée existante, ce matériau ne présente pas les qualités nécessaires pour la bonne tenue de la route. Dans le but d'améliorer les matériaux de moindre portance utilisés dans la structure de chaussée, nous avons effectué les essais dans les conditions exigées par le CEBTP.

Ainsi, les résultats issus des essais soumis au GAL recyclé et amélioré à 1%, 2%, 2,5%, 3% et 4% sont présentés dans les lignes qui suivent.

IV.1 Les limites d'Atterberg à 1%, 2%, 2,5%, 3% et 4%

❖ Résultats

Les différents mélanges sont soumis à l'essai des limites d'Atterberg, et les divers résultats issus de ces mélanges sont consignés dans le tableau VIII.

Tableau VIII: Synthèse des résultats des essais des limites d'Atterberg sur les mélanges

Matériau	Limite de liquidité (WL) %	Indice de plasticité (IP) %	Limite de plasticité (LP)%
Gal amélioré à 1%	22	9,6	12,4
Gal amélioré à 2%	23,2	10,6	12,6
Gal amélioré à 2,5%	22	9,9	12,1
Gal amélioré à 3%	22,4	10,2	12,2
Gal amélioré à 4%	23,3	10,7	12,6

Source : Données de l'étude

❖ Interprétation des résultats

En examinant les résultats ci-dessus, nous remarquons que l'indice de qualité (IP) croît au fur et à mesure que le ciment augmente. Cependant, l'évolution de l'indice IP n'est pas trop significative car IP à 1% de ciment (9,6 %) est proche de l'IP à 4% de ciment (10,7%). Nous pouvons donc déduire que le ciment n'a pas une très grande influence sur les limites d'Atterberg.

IV.2 Proctor modifié à 1%, 2%, 2,5%, 3% et 4%

❖ Résultats

Le tableau IX présente les résultats de l'essai Proctor provenant des différents mélanges.

Tableau IX: Valeurs du Proctor modifié des différents pourcentages de mélange

Matériau	Teneur en eau (%)	Densité sèche (t/m ³)
Gal amélioré à 1%	5,1	2,41
Gal amélioré à 2%	6,3	2,40
Gal amélioré à 2,5%	6,5	2,395
Gal amélioré à 3%	5,9	2,385
Gal amélioré à 4%	6,3	2,355

Source : Données de l'étude

❖ Interprétation des résultats

Nous remarquons à travers les données ci-dessus, que pendant que la densité sèche diminue au fur et à mesure que le taux de ciment augmente, la teneur en eau quant à elle, croît en fonction du dosage en ciment. Ainsi, le ciment a une très grande influence sur la densité sèche des graveleux latéritiques.

IV.3 Le CBR à 1%, 2%, 2,5%,3% et 4%

❖ Résultats

Les indices CBR ont été déterminés à 90%, 95% et 98% de l'optimum Proctor modifié présenté dans le tableau X.

Tableau X: Synthèse des résultats des essais CBR sur les mélanges

Matériau	CBR à 90% OPM	CBR à 95% OPM	CBR à 98% OPM
Gal amélioré à 1%	52	113	149
Gal amélioré à 2%	88	192	289
Gal amélioré à 2,5%	96	199	311
Gal amélioré à 3%	136	224	338
Gal amélioré à 4%	172	346	540

Source : Données de l'étude

❖ Interprétation des résultats

Les résultats des essais CBR montrent que le ciment agit sur la portance des matériaux qui évolue en fonction de la teneur en ciment.

IV.4 L'essai de compression simple à 1%, 2%, 2,5%,3% et 4%

A l'issu de l'essai, nous obtenons les valeurs des contraintes à 7 jours d'âge de chaque dosage en ciment représentées par les tableaux XI et XII ci-dessous.

Tableau XI: Synthèse des résultats des essais de la compression simple à 7 jours d'âge

Dosage en ciment	Résistance à la compression simple à 7 jours (MPa)			Edét	Ec=5×CBR
	10 Coups	25 coups	56 coups	25 coups	25 coups
GAL amélioré à 1%	0,96	1,31	2,66	142,26	565
GAL amélioré à 2%	1,26	1,42	3,81	154,2	960
GAL amélioré à 2,5%	1,74	3,13	4,07	341,412	995
GAL amélioré à 3%	2,38	3,23	4,61	351,612	1 120
GAL amélioré à 4%	4,78	5,07	5,27	548,4	1 730

Source : Données de l'étude

Module de Young E

Les résultats du module de Young montrent l'influence du ciment sur le matériau avec un module qui augmente avec l'ajout de ciment. Aussi nous remarquons que le module déterminé (Edet) par l'essai de compression simple est trois (03) fois plus petite que le module calculé (Ecal) par $E = 5 \times CBR$. Elle passe d'une valeur de 142,26 MPa (dosage à 1%) à une valeur de 548,4 MPa à 4 % de ciment.

Nous pouvons convenir avec les études (Marie Thérèse Marame GOMIS/MBENGUE, Juillet 2023) que la formule CEBTP permettant de déterminer le module à partir du CBR surestime la valeur du module et n'est donc pas vérifié pour ce matériau.

Tableau XII: Synthèse des résultats des essais de la compression simple à 28 jours d'âge

Dosage en ciment	Résistance à la compression simple (MPa)		
	10 Coups	25 coups	56 coups
GAL amélioré à 1%	3,86	5,23	10,66
GAL amélioré à 2%	5,04	5,67	15,24
GAL amélioré à 2,5%	6,97	12,52	16,28
GAL amélioré à 3%	9,52	12,90	17,34
GAL amélioré à 4%	18,45	20,28	21,15

Source : Données de l'étude

En parcourant ces résultats, nous remarquons que la résistance à la compression évolue en fonction du pourcentage en ciment.

Ces données ont permis de tracer le graphique présenté par la figure 20 ci-dessous :

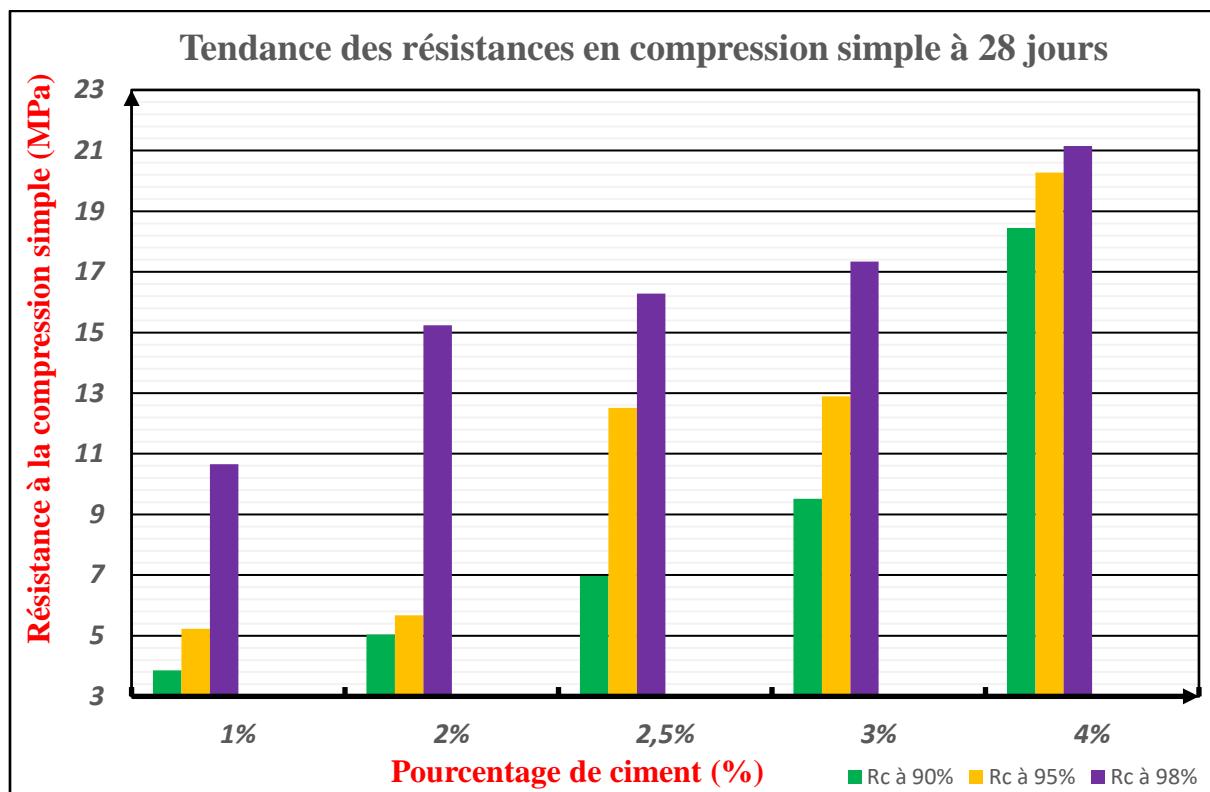


Figure 20: Résistance à la compression simple à 28 jours

Source : Donnée de l'étude

IV.5 L'essai de traction par fendage à 1%, 2%, 2,5%,3% et 4%

A l'issu de l'essai, nous obtenons les valeurs des contraintes à 7 jours et 28 jours d'âge de chaque dosage en ciment représentées par les tableaux XIII et XIV ci-dessous.

Tableau XIII: Synthèse des résultats des essais de la traction par fendage à 7 jours d'âge

Formulation	Résistance à la traction par fendage à 7 jours (MPa)		
	10 Coups	25 coups	56 coups
GAL amélioré à 1%	0	0	0
GAL amélioré à 2%	0,10	0,36	0,43
GAL amélioré à 2,5%	0,22	0,38	0,54
GAL amélioré à 3%	0,32	0,45	0,73
GAL amélioré à 4%	0,55	0,66	0,71

Source : Donnée de l'étude

Tableau XIV: Synthèse des résultats des essais de la traction par fendage à 28 jours d'âge

Formulation	Résistance à la traction par fendage à 28 jours (MPa)		
	10 Coups	25 coups	56 coups
GAL amélioré à 1%	0,32	0,36	0,54
GAL amélioré à 2%	0,4	1,44	1,72
GAL amélioré à 2,5%	0,88	1,52	2,16
GAL amélioré à 3%	1,28	1,8	2,84
GAL amélioré à 4%	2,2	2,64	2,94

Source : Donnée de l'étude

En examinant ces résultats, nous remarquons que la résistance à la traction par fendage à 25 coups évolue en fonction du dosage en ciment.

Ces données ont permis de tracer le graphique présenté par la figure 21 ci-dessous :

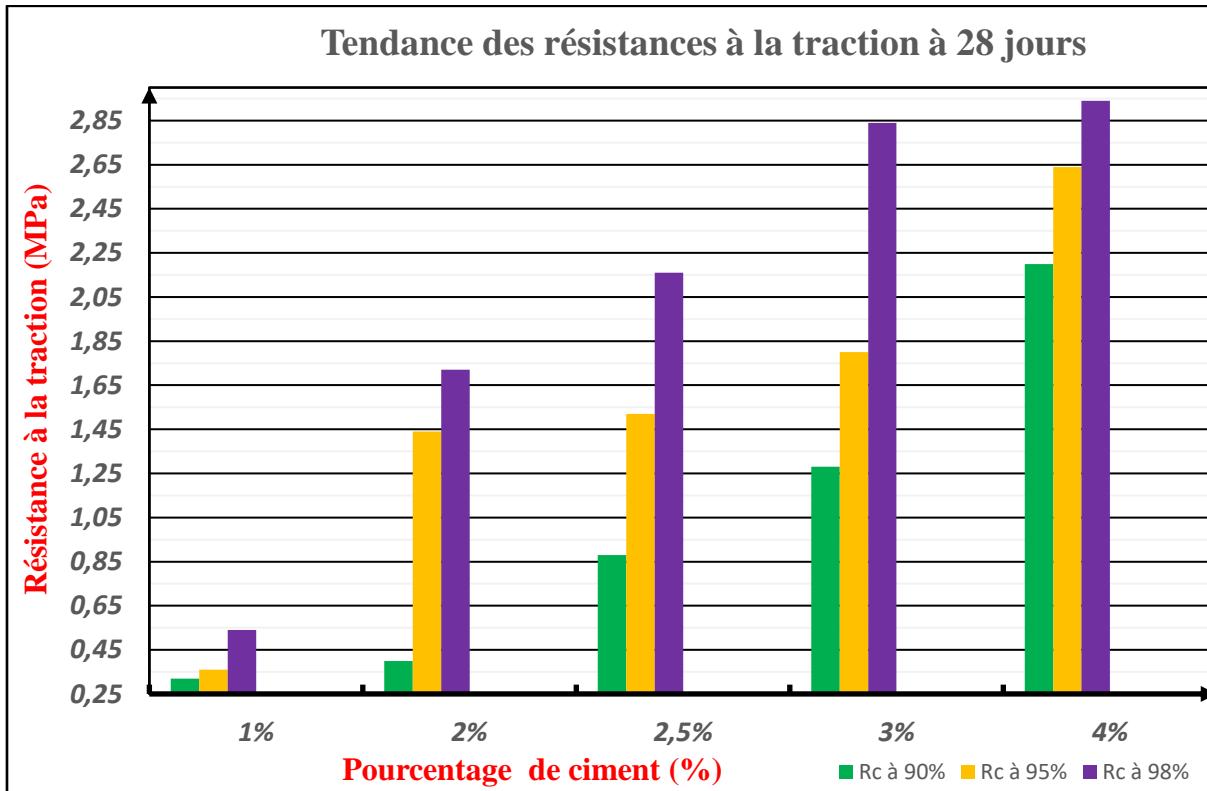


Figure 21: Résistance à la traction à 28 jours

Source : Donnée de l'étude

V. Choix de la formulation optimale (GAL+Ciment) et de l'indice qualité de l'ancienne chaussée

V.1 Variation de la densité sèche en fonction du taux d'amélioration

Les graveleux latéritiques améliorés à 1%, 2%, 2.5%, 3% et 4% ont été soumis à l'essai portor modifié, ce qui nous a permis d'apprécier la variation de la densité sèche maximale en fonction de la teneur en ciment. La figure 22 ci-dessous illustre cette variation.

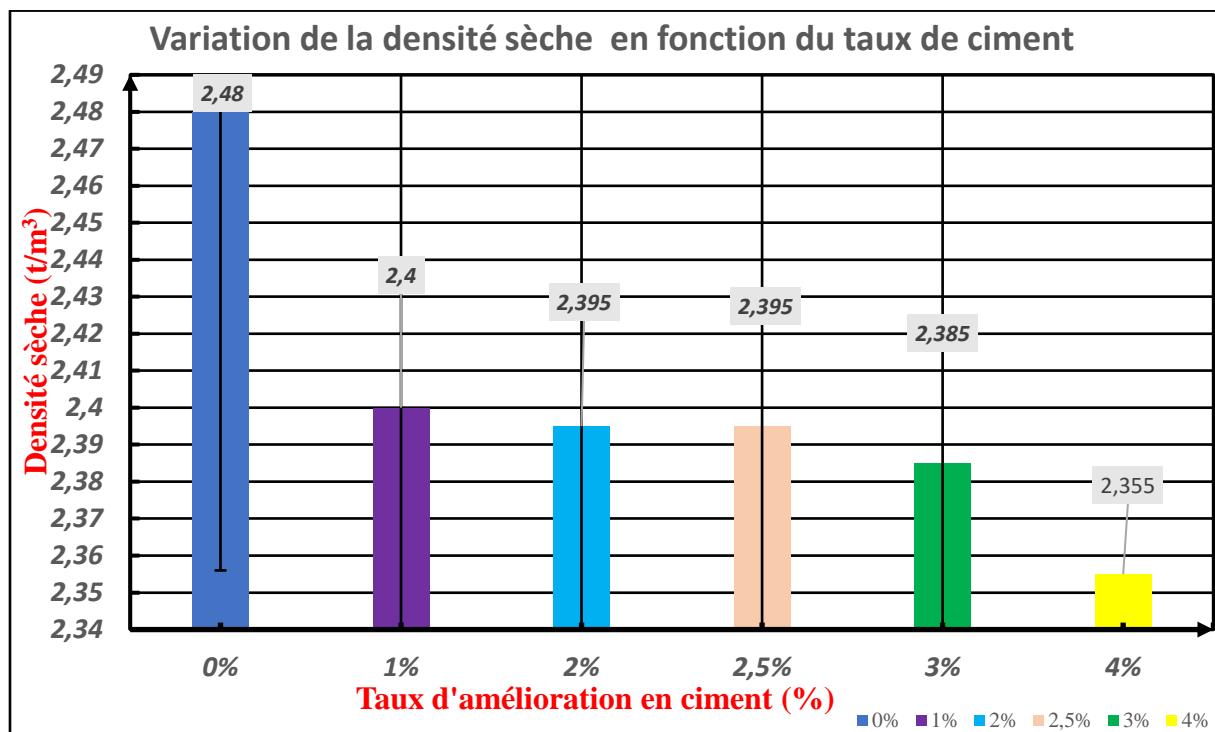


Figure 22: Courbe de variation de la densité sèche maximale en fonction du taux de ciment

Source : Données de l'étude

En exploitant cette courbe nous remarquons que la densité sèche diminue au fur et à mesure que le taux de ciment augmente. Cela s'explique par le faible poids volumique du ciment mais aussi par le fait que l'ajout de ciment occasionne un plus grand volume.

V.2 Variation de la teneur en eau en fonction du taux de ciment

Les graveleux latéritiques améliorés à 1%, 2%, 2.5%, 3% et 4% ont été soumis à l'essai portor modifié, ce qui nous a permis d'apprécier la variation de la teneur en eau en fonction de la teneur en ciment. La figure 23 ci-dessous illustre cette variation.

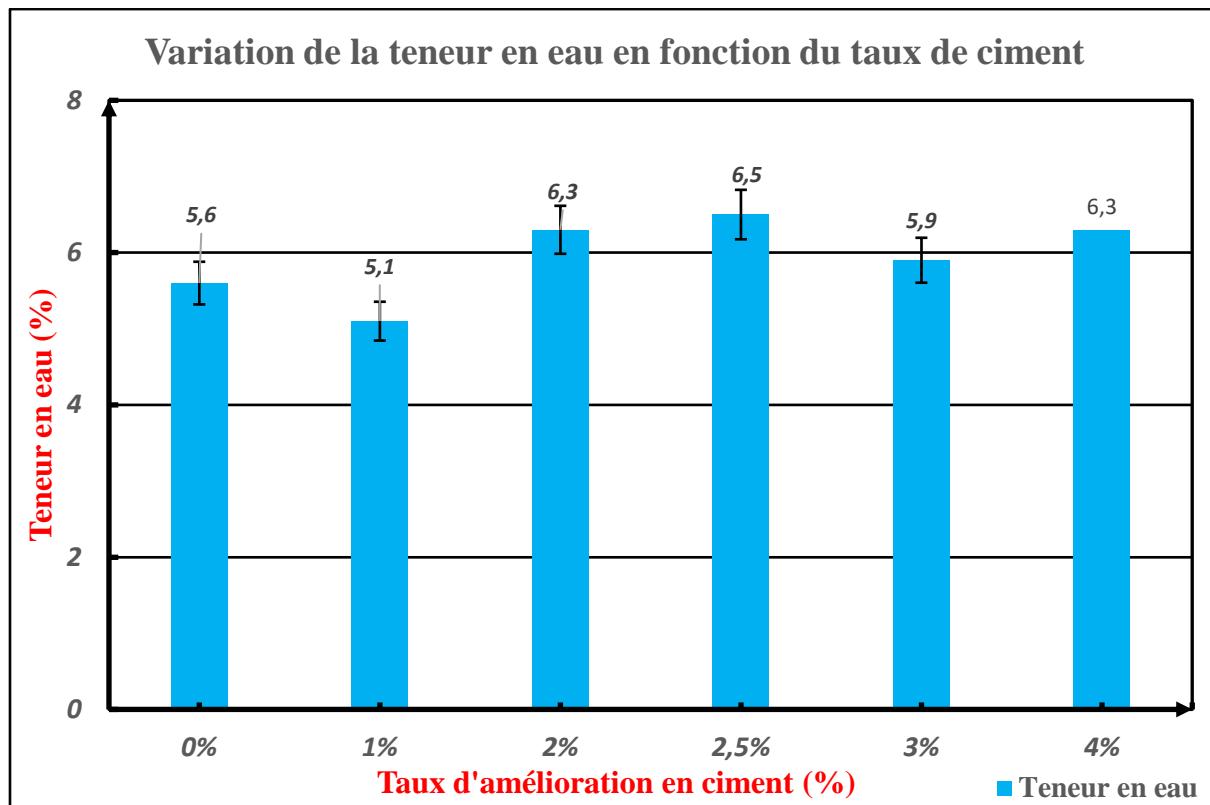


Figure 23: Courbe de variation de la teneur en eau en fonction du taux de ciment

Source : Données de l'étude

Au regard de ces résultats, nous remarquons que la teneur en eau optimale croît après amélioration. Avant amélioration, la teneur en eau optimale passe de 5,6 à 6,3 après amélioration. Cela s'explique par le fait que l'ajout de ciment demande plus d'eau pour produire une réaction chimique. Cependant l'exception est faite au niveau de 2% et 2,5% de ciment en raison d'un mauvais compactage.

V.2 Variation de la portance CBR en fonction du taux d'amélioration

L'essai CBR pour chaque mélange nous a permis d'obtenir une évolution de la portance CBR à 95% et 98% de l'OPM du GAL amélioré à différents dosage en ciment. La figure 24 suivante donne une évolution de la portance du matériau.

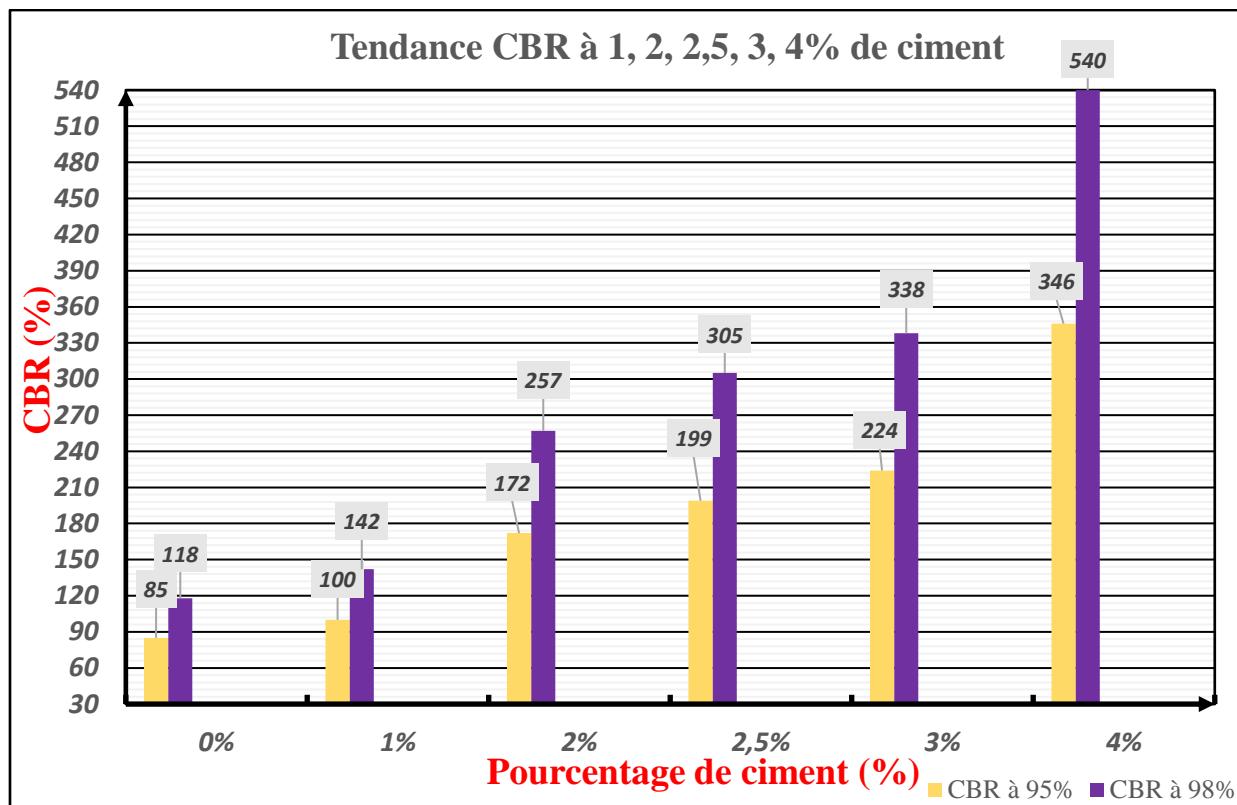


Figure 24: Courbe de variation du CBR en fonction du taux de ciment

Source : Données de l'étude

Il ressort de ces résultats que le CBR croît en fonction de la teneur en ciment. Les valeurs du CBR des graveleux latéritiques crus sont de loin très inférieures à celles du matériau amélioré. Nous déduisons donc que le ciment a une influence considérable sur les graveleux latéritiques et donc permet une amélioration des performances physiques et mécaniques des matériaux de faible portance.

Au regard de ces résultats, nous constatons que les valeurs à 1%, 2%, 2.5%, 3% et 4% du CBR à 95% de l'OPM sont conformes aux critères d'acceptabilité des graveleux latéritiques améliorés au ciment exigé par le CEBTP pour une utilisation en couche de base et en couche de fondation.

V.3 Evolution des résistances à la compression simple et en traction en fonction du taux d'amélioration

A l'issu des essais de compression simple et de traction par fendage réalisés sur notre matériau amélioré au ciment, nous obtenons des résistances en compression mais aussi des contraintes en traction à 7 et 28 jours d'âge de chaque dosage en ciment. Les figures 25 et 26 suivants donnent une synthèse des valeurs de contrainte.

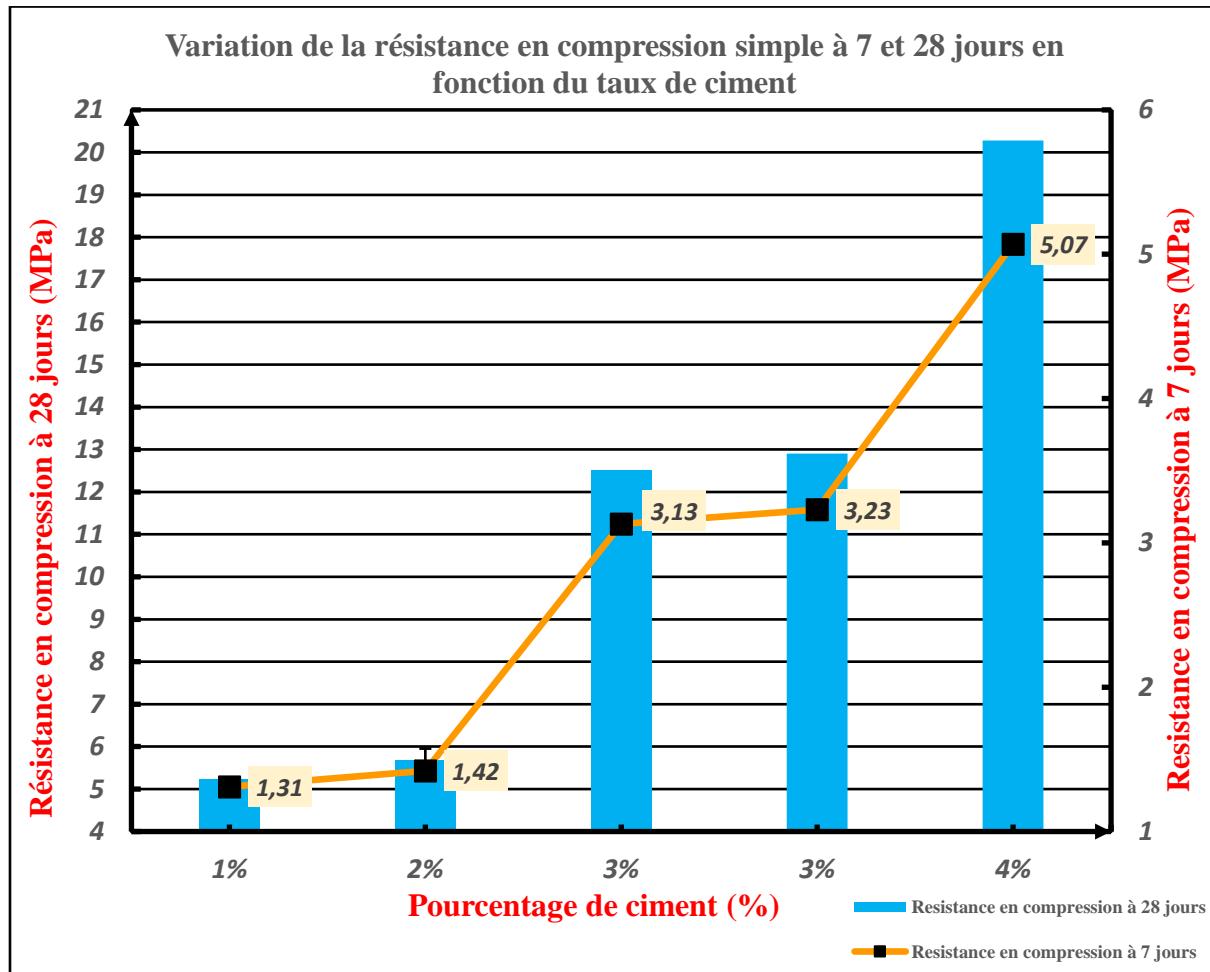


Figure 25: Evolution de la résistance en compression simple à 7 et 28 jours en fonction du taux de ciment

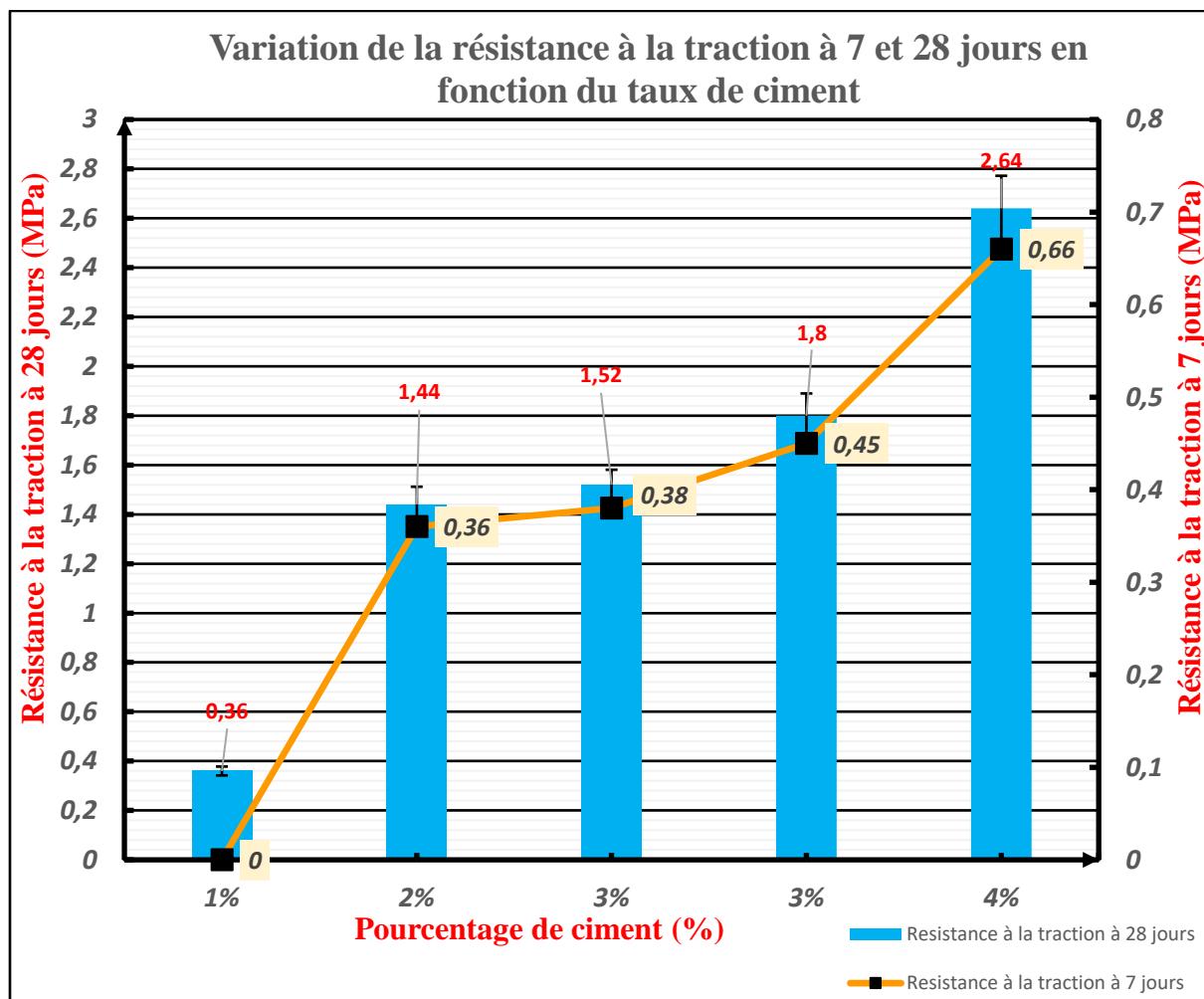


Figure 26: Evolution de la résistance en traction par fendage à 7 et 28 jours en fonction du taux de ciment

Nous remarquons que plus la teneur en ciment augmente, plus les résistances en compression et en traction croissent. Aussi, nous voyons que les résistances à 28 jours sont plus élevées que celles à 7 jours d'âge en raison de l'influence du ciment. En effet, le ciment durcit avec le temps dû aux réactions chimiques qu'il occasionne en contact de l'eau. Au regard des résultats, les graveleux latéritiques améliorés respectent les critères d'acceptabilité pour une utilisation en assise de chaussée.

V.4 Evaluation de la qualité résiduelle de la chaussée existante

D'après le manuel pour le renforcement des chaussées souples, nous avons deux (02) seuils de déflexion critiques obtenues à travers une corrélation entre le niveau de dégradation et de déflexion d'une chaussée en s'appuyant sur les conditions climatiques et géologiques de la zone du projet à savoir :

- le seuil d_1 : valeur en dessous de laquelle, on considère que la structure se comporte de façon satisfaisante ;
- le seuil d_2 : valeur au-dessus de laquelle, on considère que la structure présente de sérieux défaut de portance.

Pour ce qui est de notre projet, les valeurs seuils d_1 et d_2 sont respectivement de l'ordre de 60 et 80 pour 1/100 mm.

Le tableau XV ci-dessous présente une corrélation entre le niveau de dégradation et le niveau de déflexion de la chaussée.

Tableau XV: Corrélation entre le niveau de dégradation et de déflexion

Déflexion	Faible	d_1	d_2	Forte
Portance	Elevée	Médiocre	Faible	
Qualité des structures	Bonne	Douteuse	Mauvaise	

Source : Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux

Ainsi, en nous référant au manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux – édition CEBTP Mai 1985 nous pouvons donc faire le choix de l'indice qualité de notre ancienne chaussée à travers le tableau XVI ci-dessous :

Tableau XVI: Grille de décision de l'intervention

Déflexion Etat apparent	Faible	d_1	d_2	Elevée
Bon 1	Q1 Entretien	Q2 Entretien	Q3	
Fissuré non déformé 2-3	Q2 Entretien	Q3	Q4 Renforcement	
Déformée 4-7	Q3	Q4 Renforcement	Q5 Renforcement	

Source : Source : Manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux

Analyse du tableau

La chaussée nécessitera :

- ✓ Un entretien : pour les parties de la route ayant des indices qualité Q1 et Q2 ;
- ✓ Un renforcement : toutes les parties de la route ayant un indice qualité Q3, Q4 et Q5 et dont la déflexion D_{90} est supérieure à d_1 ou avec un état apparent déformé et fissuré.

Dans le cadre de notre étude, nous avons présenté un diagnostic de l'ancienne chaussée en chapitre I, ce qui nous montre que la chaussée actuelle fait face à plusieurs dégradations.

Ainsi, après l'essai de la déflexion nous obtenons le tableau présentant la mesure de la déflexion en **annexe 8**. L'indice Qi de la chaussée varie entre Q3 et Q4.

Cependant, dans le cadre de notre étude, nous optons pour le renforcement de l'ensemble de la route pour les raisons suivantes :

- mise en service en 1999, la durée de vie de la route construite pour 15 ans est dépassée sans aucun entretien périodique.
- face à un important trafic toujours croissant pour les prochaines années, le renforcement de la route est indispensable.

V.5 Choix du meilleur mélange et de la technique de retraitement de la chaussée

Au terme des études sur l'amélioration des graveleux latéritiques au ciment, nous remarquons :

- ❖ La densité sèche diminue en fonction du taux de ciment, de 2,41 t/m³ pour le matériau cru, elle passe à 2,35 t/m³ pour le matériau amélioré à 4% de ciment.
- ❖ Plus le taux de ciment augmente, plus la portance du matériau évolue ;
- ❖ La résistance en compression simple du matériau traité augmente en fonction de la teneur en ciment ;
- ❖ Quant à la résistance en traction par fendage, elle croît au fur et à mesure que nous augmentons le ciment.
- ❖ Le ciment n'a pas influence remarquable sur les limites d'Atterberg car les valeurs des indices de plasticité varient moins. L'indice de plasticité à 0% de ciment est de 9,7%. Pour une amélioration à 1%, cette valeur passe de 9,7% à 9,6% et à 4%, nous avons une IP=10,7%.
- ❖ L'indice qualité de notre chaussée est de classe 4 (Q4).

Dans le cadre de notre travail, nous décidons de maintenir **le caractère souple de la chaussée**. En effet, selon les études (Sourou Emmanuel Ismaël MILLOGO, 2017), les chaussées semi-rigides ou rigides étant plus soumis aux efforts de traction car elles résistent plus aux déformations verticales, sont plus sujettes aux fissurations. Dans ce sens, nous allons procéder à un traitement à faible taux de ciment pour conserver la chaussée souple.

Par conséquent, compte tenu de la nature du trafic, de l'indice de qualité de la chaussée existante et dans une perspective de réduire le coût économique du projet, nous optons pour un **renforcement généralisé de route à travers une amélioration du graveleux latéritiques (provenant de l'ancienne chaussée avec un léger apport du GAL brut provenant d'un de nos emprunt) à 3% de ciment**.

Conclusion

En conclusion, l'ensemble des résultats de l'amélioration des graveleux latéritiques au ciment sont conformément aux exigences du **CCPT et du CEBTP**. Nous proposerons donc des matériaux pour chacune des couches de notre chaussée et nous montrerons le processus de sa mise en œuvre.

CHAPITRE V : ETUDE STRUTURALE ET TECHNIQUE DE MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN

Introduction

Nous avons vu dans le chapitre précédent, qu'un renforcement de la chaussée s'impose en améliorant à 3 % de ciment, les graveleux latéritiques recyclés avec un apport de GAL brut. En ce qui concerne ce chapitre, nous réaliserons une étude géotechnique de la route existante en proposant une structure de chaussée à travers un dimensionnement. Enfin, nous montrerons comment mettre en œuvre la chaussée projetée.

I. Etude Géotechnique

L'étude géotechnique, est indispensable pour déterminer avec précision les épaisseurs optimales ainsi que la composition des différentes couches constituant une chaussée dans le but d'assurer sa durabilité. Cette étape de notre étude consistera entre autres à :

- connaître l'état de portance des sols d'assise de notre chaussée ;
- identifier les emprunts de matériaux disponibles ;
- étudier le trafic de la route projetée ;
- procéder au dimensionnement structural de la chaussée.

I.1 Reconnaissance du sol de la plateforme

La reconnaissance géotechnique des sols de notre plateforme a été réalisée tous les 500 m environs, à travers des sondages manuels effectués par l'équipe géotechnique de ACIT sur une profondeur d'au moins 1m. Ensuite, les échantillons de matériaux ont été prélevés pour des essais en laboratoire dans l'objectif de mieux connaître la portance des sols de plateforme. Il ressort donc à travers ces résultats que les sols en place sont des graveleux latéritiques naturels aussi bien en couche de base qu'en couche de fondation.

Ce qui nous permet donc de classifier le sol de la plateforme en nous référant au guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux (CEBTP) présenté par le tableau XVII ci-dessous :

Tableau XVII: Classe de portance de la plateforme

Classe de sol	Portance
S1	CBR \leq 5
S2	5 \leq CBR \leq 10
S3	10 \leq CBR \leq 15
S4	15 \leq CBR \leq 30
S5	CBR \geq 30

Source : Guide CEBTP

Le tableau XVIII présente le récapitulatif des caractéristiques géotechniques des sols de plateforme de notre tronçon.

Tableau XVIII: Récapitulatif des caractéristiques géotechniques des sols de plateforme

PK	N° sondage	Portance CBR [95%]	Classe de portance	Couche concernée
2+000	S4	49	S3	COUCHE DE FORME
4+000	S8	49	S2	
6+000	S12	49	S3	
8+000	S16	40	S5	
10+000	S20	61	S5	
12+000	S24	62	S4	
16+000	S32	88	S4	
18+000	S36	39	S2	
20+000	S40	40	S5	
22+000	S44	35	S2	
24+000	S48	41	S3	
30+000	S60	24	S5	
32+000	S64	25	S3	
34+000	S68	35	S3	
36+000	S72	25	S5	
38+000	S76	26	S4	
40+000	S80	27	S4	
42+000	S84	55	S2	
44+000	S88	28	S5	
48+000	S96	40	S3	
50+000	S100	40	S4	
52+000	S104	37	S4	
56+000	S112	35	S2	
58+000	S116	36	S3	
60+000	S120	24	S3	

Source : Rapport géotechnique du projet

Nous remarquons que les classes de portance varient de S4 à S5 avec des valeurs de CBR comprises entre 24 et 88. Pour le dimensionnement de la chaussée de notre projet, nous préconiserons de considérer la plus faible valeur obtenue. Alors, nous prendrons en compte, un sol de plateforme de classe de portance minimale S4.

I.2 La recherche de matériaux de variabilité (emprunts)

❖ Emprunts de graveleux latéritiques

Les équipes géotechniques ont réalisé des essais pour identifier les propriétés mécaniques et physiques des matériaux provenant des sites d'emprunt par mailles carrées de 50m×50 m pour trouver des emprunts capables de fournir des matériaux de variabilité pour la phase de mise en place du corps de chaussée ainsi que des carrières de roches entrant dans le revêtement.

Tableau XIX: Résultats des emprunts étudiés

N° EMPRUNT	PK	DISTANCE MORTE [m]	PUISSEANCE [m ³]	CBR		NATURE
				95%	98%	
N°14	96+150D	2 300	13 500	49	68	GAL
N°15	104+400D	520	12 000	44	62	GAL
N°16	115+700D	1 000	10 500	123	150	GAL
N°17	115+700D	1 200	12 000	24	35	GAL
N°18	120+000D	900	13 125	72	106	GAL
N°19	127+250G	950	12 000	54	78	GAL

Source : Rapport géotechnique du projet

A travers ces résultats, il ressort que seul l'emprunt N°17 dont le CBR à 95% de l'OPM est seulement de 24 sera rejeté. Cependant à l'exception de l'emprunt N°17, la disponibilité des autres sites d'emprunt en quantité suffisante de matériaux est évidente et peuvent être utilisés aussi bien pour la couche de base que pour la couche de fondation. Dans une perspective de protéger l'environnement, nous allons procéder au recyclage du GAL provenant de l'ancienne chaussée. Cela concerne particulièrement les tronçons dont l'ancienne structure est toujours en bon état.

❖ Carrière de roche massive

Pour les besoins de production de granulats servant aussi bien pour le revêtement que pour le béton hydraulique, un site de roche massive a été identifié. Ce site se situant au PK54+700 présente des caractéristiques intrinsèques pour le béton et le revêtement.

Le tableau XX suivant présente les résultats des prospections de la carrière de roche.

Tableau XX: Résultats des essais sur les produits rocheux des 2 carrières

CARRIERE	LOS ANGELES		MICRO DEVAL HUMIDE	
	6/10	10/14	6/10	10/14
PK54+700	17,2	15,3	15,4	14,6

Source : Rapport géotechnique du projet

I.3 Dimensionnement de la chaussée

Le dimensionnement se fera dans le strict respect des exigences du guide CEBTP et consistera à déterminer la nature du matériau ainsi que l'épaisseur des couches pouvant permettre à la chaussée de supporter tout au long de sa durée de vie souhaitée, un trafic prévu en tenant compte des paramètres suivants :

- ❖ la qualité du sol support ;
- ❖ l'importance du trafic et la durée de vie de la chaussée ;
- ❖ la qualité des matériaux ;
- ❖ et des différentes déformations (sols et matériaux).

Pour ce qui est de notre étude, nous utiliserons la méthode empirique à travers le manuel pour le renforcement des chaussées souples en pays tropicaux développé par le CEBTP en 1985 pour le prédimensionnement. En ce qui concerne le dimensionnement ainsi que la vérification des différentes sollicitations sur notre chaussée, nous optons pour la méthode rationnelle du SETRA-LCPC.

Le dimensionnement se fera en deux (02) étapes à savoir : une étude du trafic et le choix des matériaux.

I.3.1 Etude du trafic

Dans le cadre de l'étude économique de ce projet, les campagnes de comptage et d'enquête de trafic effectuées du 30 Octobre au 05 Novembre 2017 pour le tronçon Bobo-Dioulasso-Orodara ont donné les résultats suivants :

- A la mise en service de la route qui était prévue en 2022, le volume du trafic (trafic normal et induit) exprimé en véhicules à quatre (04) roues et plus est de 1284 ;
- le taux de croissance des véhicules légers, des camionnettes, des minibus et des bus est en moyenne de 6,4% ;
- le taux de croissance du trafic poids lourd est quant à lui égal à une moyenne de 6%.

Les données et hypothèses de calcul de trafic cumulé poids lourds sont les suivants :

- Le dimensionnement se fera vis-à-vis du trafic poids lourds ($PTAC > 3,5$ tonnes) ;
- Trafic Moyen Journalier Annuel (TMJA 2022) = **366 PL/jr** ;
- Essieu de référence =**13T** ;
- Durée de mise en service =**20 ans** ;
- Année de mise en service= **2025** ;
- Taux d'accroissement géométrique= **6%** ;
- Coefficient d'Aggressivité Moyen (CAM)=**1,40** ;
- CBR du sol support=**24**.

Le nombre NE d'essieux équivalent grâce auquel nous déterminerons la classe de notre trafic est calculé par la formule suivante :

$$NE = N \times CAM \text{ où } N = 365 \times T_0 \times \frac{(1+i)^D - 1}{i}; \text{ Avec :}$$

N : Trafic cumulé de poids lourd

T_0 : Trafic moyen journalier annuel

D : Durée de mise en service

i : Taux de croissance du trafic

n : durée de vie de l'ouvrage

CAM : Coefficient d'Aggressivité Moyen

❖ **Actualisation du trafic à l'année de mise en service (2025)**

En ce qui concerne notre étude, nous optons d'actualiser nos données à l'année de mise en service réel au vu de l'ancienneté des données recueillies.

▪ **Trafic à l'année de mise en service**

Le trafic moyen journalier prévu en 2025 (T_{2025}) est calculé par la relation suivante :

$$T_{2025} = T_{2022} \times (1 + i)^{n-1}; \text{ Avec :}$$

- t_{2025} : Trafic actualisé pour l'année 2025 (année de mise en service)
- t_{2022} : Trafic à l'année 2022 (année de comptage)
- n : Différence entre l'année de mise en service et l'année de comptage (n=3)

$$T_{2025} = 366 \times (1 + 0,06)^{3-1}$$

$$T_{2025} = \mathbf{411,23 \text{ PL/Jr}}$$

❖ **Le trafic cumulé de poids lourd (N) a été calculé :**

$$N = 365 \times 411,23 \times \frac{(1+0,06)^{20}-1}{0,06}$$

$$N = \mathbf{5521478,615 \text{ PL/Jr}} \text{ soit } \mathbf{5521479 \text{ PL/Jr}}$$

❖ **Le nombre d'essieux équivalents est :**

$$NE = N \times 0,5 \times CAM$$

Selon la norme NF P 98-082, pour les chaussées >6m, Nous multiplions N par 0,5.

$$NE = \mathbf{5521479 \times 0,5 \times 1,40}$$

$$NE = 3865035,3 \text{ PL/Jr} \text{ soit } 3865035 \text{ PL/Jr}$$

$$\mathbf{NE= 3 865 035 \text{ PL/Jr}}$$

❖ Détermination de la classe du trafic

En connaissant le nombre d'essieu équivalent de poids lourds (NE), nous pourrons déterminer la classe du trafic en nous référant à la classification selon la méthode CEBTP qui nous donne cinq (05) classes de trafic qui vont de T1 à T5 résumé dans le tableau XXI.

Tableau XXI: Classe du trafic selon le guide CEBTP

Classe de trafic	Nombre journalier de véhicules (véh/j)	Nombre cumulé de poids lourds (PL)	Nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 T(NE)
T1	$100 \leq T < 300$	$1.10^5 \leq T < 5.10^5$	$1.10^5 \leq T < 5.10^5$
T2	$300 \leq T < 1\,000$	$5.10^5 \leq T < 1,5.10^6$	$5.10^5 \leq T < 1,5.10^6$
T3	$1\,000 \leq T < 3\,000$	$1,5.10^6 \leq T < 4.10^6$	$1,5.10^6 \leq T < 4.10^6$
T4	$3\,000 \leq T < 6\,000$	$4.10^6 \leq T < 1.10^7$	$4.10^6 \leq T < 1.10^7$
T5	$6\,000 \leq T < 12\,000$	$1.10^7 \leq T < 2.10^7$	$1.10^7 \leq T < 5.10^7$

Source : Guide de dimensionnement des chaussées souples en pays tropicaux CEBTP

Nous déduisons alors que nous avons un trafic de **classe T3**.

I.3.2 Prédimensionnement et choix de la variante de la chaussée

Le choix de la variante de la structure de chaussée est fonction du cadre et des spécificités du projet. De façon générale, les structures de chaussée peuvent être de type souple, bitumineuse épaisse, semi-rigide ou rigide. Pour notre projet nous choisissons une structure de chaussée souple. Le manuel de renforcement des chaussées souples en pays tropicaux donne les types de matériaux à utiliser en renforcement des chaussées, selon le niveau de trafic et l'indice Qi de la chaussée.

Conformément au manuel, l'utilisation de matériaux naturels tels que le concassé 0/31,5 – le tout-venant naturel et les graveleux latéritiques naturels, ne serait indiquée que pour les trafics légers T1 et T2. Pour les trafics moyens à lourds (T3, T4 et T5), les matériaux recommandés pour le renforcement des chaussées souples sont le béton bitumineux, la grave-ciment et la grave-bitume. Le recours aux matériaux non traités tels que les graveleux et/ou la grave naturelle serait donc déconseillée pour ces niveaux de trafics.

Proposition de la variante de couche de chaussée

A partir de la portance retenue du sol support (S4), de la classe de notre trafic (T3), de l'indice qualité variant entre Q3 et Q4, nous nous appuyons sur **le catalogue du manuel de renforcement des chaussées souples** pour choisir nos variantes de couche en fonction des matériaux disponibles.

Ainsi nous optons pour les variantes suivantes :

❖ Variante 1

- Couche de revêtement : 05 cm de béton bitumineux à module élevé (BBME)
- Couche de base : 10 cm de grave ciment de classe 3 (GC3)
- Couche de fondation : 23 cm de graveleux latéritique amélioré à 3% de ciment.

❖ Variante 2

- Couche de revêtement : 06 cm de béton bitumineux à module élevé (BBME)
- Couche de base : 25 cm de grave ciment de classe 3 (GC3)
- Couche de fondation : 30 cm de graveleux latéritique amélioré à 3% de ciment.

Vérification des variantes selon la méthode du Cetra-LCPC

En rappel les conditions de la vérification des sollicitations sur la chaussée selon la méthode rationnelle du SETRA-LCPC sont :

- la déformation du sol soit inférieure à la déformation admissible du sol,
- la contrainte du sol soit inférieure à la contrainte admissible du sol.

Chaque couche de chaussée est caractérisée par l'épaisseur h_i , le coefficient de poisson μ , le module d'élasticité ou module de Young E , l'état de liaison avec la couche voisine.

Les déformations et contraintes dépendent de la nature des couches :

- Pour les couches liées, le critère dimensionnant est la déformation verticale ε_z en haut de la couche ;
- Pour les couches bitumineuses, le critère dimensionnant est la déformation horizontale ε_t en bas de la couche ;
- Pour les couches traitées aux liants hydrauliques ou les bétons de ciment, nous tiendrons compte de la contrainte de traction par flexion à la base de la couche.

❖ Hypothèses de calcul

- Pour les matériaux crus, le coefficient de poisson $v= 0,35$;
- Pour les matériaux traités, le coefficient de poisson $v=0,35$;
- Toutes les interfaces entre les couches seront non collées ;
- Pour les matériaux semi-rigides, le CAM=0,745 ;
- La variation de la température= 30°C
- Durée de vie de la chaussée= 20 ans ;

- Classe de portance de la plateforme

Nous distinguons quatre (04) classes de portance de sol de plateforme en fonction du module de Young ($E=5 \times CBR$) selon le catalogue des structures types chaussées neuves du LCPC-SETRA.

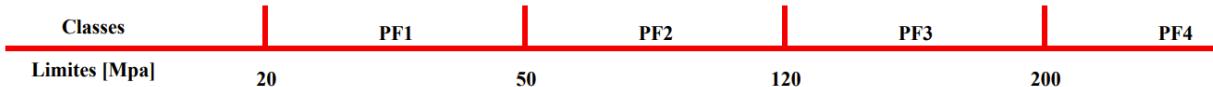


Figure 27: Classe de portance de sol

Source : Catalogue des chaussées du LCPC

Soit E le module d'élasticité ou module de Young nous avons :

$$E = 5 \times 24 = 120 \text{ MPa}$$

La portance CBR à 95% de notre sol de plateforme varie entre 24 et 88, correspond à une plateforme de classe PF2.

On a précédemment calculé le nombre NE d'essieux équivalents.

$$\text{NE} = 3\,865\,035 \text{ PL/Jr}$$

✚ Calcul des déformations et contraintes admissibles

Les chaussées seront calculées vis-à-vis du modèle d'endommagement par accumulation de déformation plastique irréversible.

Ainsi les déformations verticales ε_z au sommet du sol support doivent être inférieures à la valeur limite donnée par la formule ci-dessous :

- $\varepsilon_{zadm} = 0,016 \times NE^{-0.222}$; Pour un trafic de classe T < T3 (trafic faible)
- $\varepsilon_{zadm} = 0,012 \times NE^{-0.222}$; Pour un trafic de classe T > T3 (trafic moyen à fort)

Les équations qui permettent de déterminer les déformations et contraintes pour chaque type de couche sont les suivantes :

- ❖ Pour les matériaux non traités et le sol support, les contraintes (σ_{Zadm}) et déformations (ϵ_{Zadm}) admissibles sont calculées à partir des équations ci-dessous ;

- ✓ Les contraintes verticales admissibles sont calculées à partir de la formule de Kerkhoven et Dormon qui est la suivante :

$$\sigma_{Zadm} = \frac{0,3 \times CBR}{1 + 0,7 \log (NE)}$$

NE d'essieux équivalent **NE= 3 865 035 PL/jr**, et les différentes valeurs du CBR ont été obtenu lors des essais effectués au laboratoire.

Pour les différentes couches nous considérons conformément au CCTP les classes de portance suivante à 95% d l'OPM.

En ce qui concerne le sol support : $24 < CBR < 88$

$$\sigma_{Zadm} = \frac{0,3 \times 24}{1 + 0,7 \log (4.361.10^6)} = 1,27. \text{ Ainsi } \sigma_{Zadm} = 1,27 \text{ MPa}$$

- ✓ Les déformations verticales admissibles dans le cas d'un fort trafic T3, alors nous avons : $\epsilon_{Zadm} = A \times NE^{-0,222}$

$$\epsilon_{Zadm} = 0,012 \times NE^{-0,222}$$

$$\text{Ainsi, } \epsilon_{Zadm} = 0,012 \times (4 361 274)^{-0,222}$$

$$\epsilon_{Zadm} = 402,89 \mu\text{def}$$

- ❖ En ce qui concerne les matériaux bitumineux (liant hydrocarboné), les déformations admissibles en traction sont calculées par la relation suivante :

$$\epsilon_{t,adm} = \epsilon_6 \times (10^\circ C ; 25HZ) \times \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \times \sqrt{\frac{E(10^\circ C)}{E(\theta eq)}} \times K_c \times K_r \times K_s$$

- ❖ Pour les matériaux traités au liant hydraulique (couche améliorée au ciment) le critère de contrainte admissible est :

$$\sigma_{t,adm} = \epsilon_6 \times \left(\frac{NE}{10^6} \right)^b \times K_c \times K_r \times K_s \times K_d$$

Nous avons :

- ε_6 : Niveau de déformation pour 10^6 cycles de chargement
- NE : Nombre d'essieux équivalents calculé à partir du trafic cumulé et du CAM
- E(10) : Module du matériau à 10°C
- E(θ_{eq}) : Module du matériau à $\theta_{eq}^\circ\text{C}$
- b : Pente de la droite de fatigue
- K_c : Coefficient de calage
- K_r : Coefficient de risque
- K_d : Coefficient de discontinuité
- K_s : Coefficient de plateforme

Le tableau XXII présente une synthèse des paramètres de la variante 1 et 2.

Tableau XXII: Récapitulatif des valeurs des paramètres d'entrée pour la vérification pour la variante 1 et 2

Matériaux	Béton Bitumineux à module élevé	Grave Ciment (GC3)	Graveleux latéritique traités à 3 % de ciment
Module E ($\theta_{eq}=30^\circ\text{C}$) en MPa	3000	23000	1120
Module E (10°C) en MPa	11970	-	-
Coefficient de poisson	0,35	0,25	0,25
Pente - 1/b	5	15	15
Ecart type SN	0,25	1	1
Ecart type Sh	0,025	0,03	0,03
Coefficient de calage K_c	1,1	1,4	1,4
Coefficient de risque K_r	0,712	0,712	0,712
Coefficient de plateforme K_s	1	1	1
$\varepsilon_6(10^\circ\text{C} ; 25\text{Hz})$	100	-	-
Coefficient de discontinuité K_d	-	1	1

Source : Donnée de l'étude

Résultats de la vérification

Le module de YOUNG utilisé pour les graveleux latéritiques améliorés à 3% de ciment est de l'ordre de 1120 MPa en couche de fondation.

Variante 1

Le tableau XXIII ci-dessous montre les résultats de la vérification sur alizé.

Tableau XXIII: Résultats des vérifications sur alizé de la variante 1

Couches	Epaisseur (m)	Valeurs Calculées $\varepsilon_{t/z}$ ($\mu\text{d}\text{ef}$) σ_t (MPa)	Valeurs admissibles $\varepsilon_{t/z}$ ($\mu\text{d}\text{ef}$) σ_t (MPa)	Observations
Revêtement (BBME)	0,05	$\varepsilon_t = 28,2$	$\varepsilon_t = 136,6$	ε_t calculé < ε_t admissible → Bon
Couche de base Grave Ciment (GC)	0,10	$\sigma_t = 1,593$	$\sigma_{tadm} = 0,683$	ε_t calculé > ε_t admissible → Pas Bon
Couche de fondation (GLC)	0,23	$\sigma_t = 0,160$	$\sigma_{tadm} = 0,670$	ε_z calculé < ε_z admissible → Bon
Sol support	-	$\varepsilon_z = 299,4$ $\sigma_z = 0,036$	$\varepsilon_{zadm} = 402,89$ $\sigma_{zadm} = 1,27$	ε_z calculé < ε_z admissible → Bon

D'après le tableau ci-dessus, nous remarquons que la variante 1 présente au niveau de sa couche de base, une contrainte calculée supérieure à valeur limite admissible. Cependant la variante 1 ne respecte pas les conditions de vérification sur la chaussée.

❖ Variante 2

Le tableau XXIV ci-dessous montre les résultats de la vérification sur alizé.

Tableau XXIV: Résultats des vérifications sur alizé de la variante 2

Couches	Epaisseur (m)	Valeurs Calculées ϵ_{tz} (μdéf) σ_t (MPa)	Valeurs admissibles ϵ_{tz} (μdéf) σ_t (MPa)	Observations
Revêtement (BBME)	0,06	$\epsilon_t = 14,7$	$\epsilon_t = 136,6$	ϵ_t calculé < ϵ_t admissible → Bon
Couche de base Grave Ciment (GC)	0,25	$\sigma_t = 0,671$	$\sigma_{tadm} = 0,683$	σ_t calculé < σ_t admissible → Bon
Couche de fondation (GLC)	0,30	$\sigma_t = 0,049$	$\sigma_{tadm} = 0,670$	σ_t calculé < σ_t admissible → Bon
Sol support	-	$\epsilon_Z = 96,5$ $\sigma_Z = 0,011$	$\epsilon_{Zadm} = 402,89$ $\sigma_{Zadm} = 1,27$	ϵ_Z calculé < ϵ_Z admissible → Bon

Source : Donnée de l'étude

En augmentant considérablement les épaisseurs des différentes couches, nous remarquons que la variante 2 est conforme aux conditions de vérification de la méthode rationnelle du SETRA-LCPC. Cependant l'utilisation du grave ciment en couche de base s'avère être très couteuse. Nous proposerons ainsi deux nouvelles variantes en remplacement le grave ciment par du grave-bitume.

⊕ Choix de nouvelles variantes de chaussée

Nous optons pour les variantes suivantes :

❖ Variante 3

- Couche de revêtement : 06 cm de béton bitumineux à module élevé (BBME)
- Couche de base : 12 cm de grave bitume de classe 3 (GB3)
- Couche de fondation : 28 cm de graveleux latéritique amélioré à 3% ciment (GLC)

❖ Variante 4

- Couche de revêtement : 05 cm de béton bitumineux à module élevé (BBME)
- Couche de base : 10 cm de grave bitume de classe 3 (GB3)
- Couche de fondation : 25 cm de graveleux latéritique amélioré à 3% de ciment (GLC)

Le tableau XXV présente une synthèse des paramètres des variantes 3 et 4.

Tableau XXV: Récapitulatif des paramètres d'entrée pour les variantes 3 et 4

Matériaux	Béton Bitumineux à module élevé	Grave Bitume (GB3)	Graveleux latéritique traités à 3 % de ciment
Module E ($\theta_{eq}=30^{\circ}C$) en MPa	3000	2700	1120
Module E ($10^{\circ}C$) en MPa	11970	9310	-
Coefficient de poisson	0,35	0,35	0,25
Pente - 1/b	5	5	15
Ecart type SN	0,25	0,25	1
Ecart type Sh	0,025	0,025	0,03
Coefficient de calage K_c	1,1	1,100	1,4
Coefficient de risque K_r	0,712	0,712	0,712
Coefficient de plateforme K_s	1	1	1
$\varepsilon_6(10^{\circ}C ; 25HZ)$	100	100	-
Coefficient de discontinuité K_d	-	-	1

 **Vérification des nouvelles variantes**

❖ **Variante 3**

Tableau XXVI: Résultats des vérifications de la variante 3 sur alizé

Couches	Epaisseur (m)	Valeurs Calculées $\varepsilon_{t/z}$ (μdéf) σ_t (MPa)	Valeurs admissibles $\varepsilon_{t/z}$ (μdéf) σ_t (MPa)	Observations
Revêtement BBME	0,06	$\varepsilon_t=2,4$	$\varepsilon_{tadm}=136,6$	ε_t calculé < ε_t admissible → Bon
Couche de base Grave Bitume	0,12	$\varepsilon_t=76,4$	$\varepsilon_{tadm}=147,3$	ε_t calculé < ε_t admissible → Bon
Couche de fondation (GLC)	0,28	$\sigma_t = 0,151$	$\sigma_{tadm}=0,670$	σ_z calculé < σ_z admissible → Bon
Sol support	-	$\varepsilon_z=277,8$ $\sigma_z=0,033$	$\varepsilon_{zadm}=402,89$ $\sigma_{zadm}=1,27$	ε_z calculé < ε_z admissible → Bon

❖ Variante 4

Tableau XXVII: Résultats des vérifications de la variante 4 sur alizé

Couches	Epaisseur (m)	Valeurs Calculées	Valeurs admissibles	Observations
Revêtement BBME	0,05	$\varepsilon_t=13,5$	$\varepsilon_t=136,6$	ε_t calculé < ε_t admissible → Bon
Couche de base Grave Bitume	0,10	$\varepsilon_t=85,7$	$\varepsilon_t=150$	ε_t calculé < ε_t admissible → Bon
Couche de fondation (GLC)	0,25	$\sigma_t=0,188$	$\sigma_{tadm}=0,670$	σ_t calculé < σ_t admissible → Bon
Sol support	-	$\varepsilon_z=343,6$ $\sigma_z=0,041$	$\varepsilon_{zadm}=402,89$ $\sigma_{zadm}=1,27$	ε_z calculé < ε_z admissible → Bon

Conclusion

Les deux (02) nouvelles variantes calculées, ont des déformations et contraintes calculées inférieures aux valeurs limites admissibles prédéfinies. Mais pour des raisons économiques, nous retenons la variante 4.

En fin de compte nous retenons la structure de chaussée suivante :

- **Couche de revêtement : 05 cm de béton bitumineux à module élevé (BBME)**
- **Couche de base : 10 cm de grave bitume de classe 3 (GB3)**
- **Couche de fondation : 25 cm de graveleux latéritique amélioré à 3% de ciment (GLC)**

II. La planche d'essai de la technique de l'amélioration des graveleux latéritiques au ciment

L'amélioration au ciment concerne l'assise de chaussée et particulièrement la couche de fondation.

II.1 brigade des engins, matériels et matériaux utilisés

Brigade des engins

Avant toutes opérations de la mise en œuvre des graveleux latéritiques au ciment, il sied de disposer des matériels nécessaires pour ces travaux. Ainsi la brigade des engins est l'ensemble des engins utilisés dans le cadre des travaux d'amélioration. Ces engins qui la constituent sont les suivants :

- Une recycleuse RM 350 pour désagréger la structure existence ;
- Un pulvimer pour le malaxage ;
- Trois (03) camions bennes pour apporter les surplus de GAL des emprunts ;
- Un camion-citerne à eau équipée d'une rampe pour un arrosage homogène ;
- Un camion plateau pour ciment ;
- Un camion-citerne (bouille de bitume) ;
- Une niveleuse pour le profilage de la route ;
- Un rouleau vibrant lourd (classe V2 minimum) pour les premières passes ;
- Un rouleau à pneu lourd (classe P2 minimum) pour la finition ;
- Une plaque vibrante (classe PQ2 minimum) pour les surfaces réduites.

Matériels

L'ensemble des matériels sont entre autres :

- Des raclettes d'épandage de ciment ;
- Pelles, cordes, marteaux ;
- Matériels de topographie (mires, piquets, niveau, GPS) ;
- Matériel de laboratoire pour la densité et l'essai de plaque.

Matériaux

Les matériaux utilisés pour le mélange des graveleux latéritiques à 3% de ciment sont :

- Graveleux latéritiques naturels (recyclés +brut) ;
- Ciment CPJ 45 ;
- Emulsion de bitume ECR65 (65% de bitume et 35% d'eau) ;
- Eaux.

II.2 La méthodologie

Les principales opérations de renforcement au ciment de la structure ancienne s'étalent sur deux (02) phases :

- ❖ Mise en œuvre de la couche de fondation :
 - Recycler la structure existante ;
 - Epandre le ciment à la main ;
 - Compacter la couche de fondation ;
 - Réalisation de la géogrille ;
- ❖ Mise en place de la couche de base, suivis du revêtement.

II.1 Méthodologie de la mise en œuvre de la couche de fondation

❖ Les opérations de recyclage

Ces travaux consistent à morceler puis à recycler la couche de base existante sur 15 cm d'épaisseur avec une recycleuse tout en malaxant le matériau obtenu qui est du graveleux latéritique recyclé. Sur notre planche d'essai nous avons fait un apport de graveleux latéritique provenant de l'emprunt pour que la nouvelle couche après mise en œuvre ait une épaisseur de 25 cm. Ainsi le mélange (Gal brut+ recyclé) a été compacté légèrement à l'aide d'un rouleau à pneus lourds (minimum 30 KN par roue) précédé d'un camion à eau pour amener le matériau à une teneur en eau égale à celle de l'OPM à plus 1% ou moins 2% près. Cette nouvelle couche a été améliorée au ciment à un taux de 3% et deviendra notre couche de fondation. Après la mise en place des matériaux crus, un échantillon est prélevé pour des essais de densité sèche du cru qui servira aux calculs des mailles et du contrôle de la teneur en eau.

La figure 28 donne un aperçu de l'exécution du recyclage.



Figure 28: Recyclage de la chaussée existante

Source : Donnée de l'étude

❖ **Epandage du ciment à 3%**

Pour cette opération, l'équipe topographique procède au reprofilage de la route afin de s'assurer de la conformité des profils en long et en travers de la chaussée. Ensuite nous procédons au calcul des mailles qui s'effectuent comme suit :

$$A(m) = \frac{3,902}{yd \cdot d_{max}} \quad \text{Avec :}$$

- a : Coté dans le sens de la longueur de la chaussée ;
- b : coté dans le sens de la largeur de la chaussée.

L'épandage du ciment a été effectué manuellement à l'aide de raclettes en fonction de la quantité de ciment par maille. Le dosage en ciment initial de 3% a été majoré de 0,5% de ciment lors de sa mise en œuvre in-situ conformément aux prescriptions du CEBTP.

La figure 29 ci-dessous illustre l'étape de l'épandage de ciment.



Figure 29: Illustration de l'épandage du ciment par maille

Source : Donnée de l'étude

❖ Malaxage et Compactage

Le mélange ainsi obtenu a été malaxé par la recycleuse RM 350 suivi de la citerne à eau puis compacté à moins de quatre (04) heure après le malaxage avec soin jusqu'à obtention de la compacité désirée. Le compactage a été effectué selon les exigences du CCTP à travers cinq (05) passes du rouleau vibrant et vingt (20) passes de celui à rouleau à pneus (charge > 5T par roue). Cependant, l'usage du rouleau à pied-de-mouton est exclu en ce qui concerne le matériau amélioré. Après le compactage l'équipe topographique s'assure du contrôle des profils par un réglage à la niveleuse.

La figure 30 donne un aperçu de l'exécution du malaxage.



Figure 30: Illustration du malaxage du matériau amélioré

Source : Donnée de l'étude

❖ **La cure du matériau amélioré**

La phase de cure du matériau amélioré, s'étend sur une semaine en arrosant sa surface pour maintenir le matériau humide tout en respectant sa teneur en eau prévue. A la fin de cette étape nous avons obtenu 25 cm de couche de fondation amélioré à 3% de ciment.

II.2 Méthodologie de mise en œuvre de la couche de base et du revêtement

Pour éviter les phénomènes de microfissuration nous avons opté de fixer une géogrille entre la couche de fondation et de base ce qui limitera les remontées de fissures à travers le revêtement. Cette opération consiste :

❖ **Mise en œuvre de la grille de fibre de verre**

Avant la mise en œuvre de la géogrille, une couche d'accrochage est faite en répandant une émulsion cationique de bitume à 69% dosée à 600 g/m² de bitume résiduel. Toute fois l'utilisation de gasoil est interdite. La géogrille est répandue dans le respect des indications du fabricant sur un support qui n'absorbe pas l'émulsion et doit être propre et plan.

❖ **Répandage de la grave-bitume**

Après fixation de la géogrille, le grave bitume fabriqué en centrale est transporté dans des camions et est repêché sous une température de 130°C à l'aide d'un finisseur automoteur en

mesure de repartir le matériau sans faire de ségrégation tout en respectant les épaisseurs et profils prévus. Enfin le compactage est réalisé selon la méthode dite « compacteur à pneumatiques en tête ».

Après vérification de la qualité de la couche de base, nous procédons à l'exécution de la couche de roulement en béton bitume selon la même procédure.

La figure 31 donne un aperçu de l'exécution du répandage de la grave-bitume.



Figure 31: Illustration de la mise en œuvre de la grave-bitume

Conclusion

À la fin de ce chapitre, nous pouvons retenir que l'obtention d'une route de qualité repose sur les études géotechniques dès le début de la conception de la chaussée. Il ressort aussi que la mise en œuvre d'une chaussée améliorée au ciment requiert une parfaite maîtrise des techniques de mise en place des différentes couches.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'axe Bobo-Orodara, étant une route revêtue en phase de construction, présente ainsi certains types de dégradations communs à cette catégorie de routes. L'inventaire de ces pathologies a permis de montrer que cette route nécessite une intervention rapide avant que les charges du trafic n'amplifient la dégradation de la structure de la chaussée.

La présente étude de recherche visait à mettre en relief la nécessité d'une meilleure prise en compte de l'amélioration des performances des graveleux latéritiques en assise de chaussée, ce qui revêt d'une importance primordiale dans le contexte actuel de pérennité des infrastructures routières. La stratégie initiée, qui permettra d'atteindre la totalité des objectifs fixés est basée sur une approche de recherches approfondies et une méthodologie rigoureuse.

L'ensemble des essais d'identification, de portance et de résistance effectués sur les graveleux latéritiques naturels (bruts et recyclés), puis sur le matériau amélioré à différents pourcentages (1%, 2%, 2.5%, 3% et 4%) a constitué la première étape de notre recherche. En plus les données issues de ces essais, ont été soigneusement analysées et interprétées en vue de mieux caractériser ces matériaux et de manager avec plus d'efficacité le mélange aboutissant à la meilleure formulation.

L'évaluation des performances des matériaux constitue une ressource essentielle pour une formulation optimale des graveleux latéritiques par ajout de ciment. Il ressort des essais d'identification et de portance que le matériau latéritique pour être utilisé en couche de fondation doit présenter un CBR supérieur ou égal à 35 à 95% de l'optimum Proctor Modifié. Nous avons obtenu 85 ce qui prouve son amélioration. En effectuant des analyses comparatives du comportement mécaniques et physiques des matériaux étudiés, nous avons observé l'influence du ciment sur l'évolution de la portance et de la résistance du matériau cru. Il ressort de cette étude que les différents mélanges respectent la prescription du CEBTP.

Il ressort également, que la résistance à la compression simple et à la traction par fendage à 28 jours d'âge évolue avec le taux de ciment. En ce qui concerne notre projet, la teneur en ciment de 3% correspond à une résistance à la compression simple à 25 coups de 3,23 MPa supérieur à celle demandée par le CEBTP ($R_c \geq 1\text{ MPa}$) à 7 jours d'âge à l'air. Quant à la résistance à la traction par fendage à 2,5 %, 3 % et 4% de ciment nous obtenons respectivement, une résistance de 0,38 MPa, 0,45 MPa et 0,66 MPa. Dans le cadre d'un trafic élevé, la couche

de fondation a besoin du module le plus élevé possible. En tenant compte de la densité du trafic sur notre route qui s'avère être de classe T3 et dans le but de réduire le coût du projet, notre choix porte sur la formulation du mélange graveleux latéritique à 3% de ciment.

Au terme de notre étude, nous retenons que l'amélioration des graveleux latéritiques à 3% de ciment augmente efficacement ces qualités tout en assurant la durée de vie de l'ouvrage.

Finalement, les infrastructures routières ne peuvent être protégées contre tous les dommages. Cependant, en appliquant l'approche de l'amélioration des matériaux de faible portance au ciment, celle-ci peut rendre moins vulnérable la chaussée.

Les résultats de l'étude que nous avons menée par le biais de ce stage pourraient contribuer à améliorer l'état de cette infrastructure routière qui a fait l'objet de ladite étude et, partant, faciliter la fluidité entre les localités de Bobo et de Orodara.

Cette étude fut bénéfique dans la mesure où elle nous a permis de nous imprégner des réalités liées aux études de stabilisation des matériaux locaux. Néanmoins, nous déplorons le fait que nous n'ayons pas abordé certains points essentiels de cette étude tels que la mise en place d'outils et de techniques liées à la caractérisation des modules réels des matériaux locaux utilisables en structure de chaussée.

Des études ou des recherches peuvent être explorées concernant le concept de normalisation des matériaux locaux en construction routière au BURKINA-FASO pour faciliter les choix optimaux en matière de construction durable.

RECOMMANDATIONS

Nous pouvons formuler les recommandations à l'endroit des différentes structures suivantes :

- ⊕ A l'endroit du LNBTP et du bureau d'étude ACIT-Géotechnique nous recommandons :
 - ❖ une célérité dans la transmission des résultats du laboratoire au bureau de contrôle ;
 - ❖ faire des recherches sur les matériaux locaux non conventionnels afin de mettre en place une base de données des paramètres intrinsèques des graveleux latéritiques en tenant compte du comportement de ces matériaux en fonction du climat au Burkina ;
 - ❖ organiser des sessions de formations sur la technique de mise en œuvre des matériaux améliorés au ciment, à l'endroit des laborantins, des terrassiers et des ouvriers afin qu'ils maîtrisent correctement cette nouvelle méthode.
- ⊕ A l'endroit de l'Entreprise KANAZOE Salif (EKS), en charge des travaux nous recommandons :
 - ✓ le respect des clauses techniques du projet ;
 - ✓ faire le compactage des différentes couches avec soin tout en contrôlant les teneurs en eau optimale ;
 - ✓ de faire un minimum d'auto-contrôle en affectant sur le chantier une ressource humaine qualifiée et expérimentée en fonction de l'avancement des travaux ;
 - ✓ de fournir un dossier d'exécution hebdomadaire au bureau de contrôle , cela va permettre d'aller plus vite dans l'exécution des travaux.
- ⊕ A l'endroit des bureaux de contrôle
 - ✓ veiller à ce que les travaux soient réalisés selon les exigences des normes en vigueurs tout en s'assurant de la fiabilité des résultats des essais ;
 - ✓ mettre en place des dispositifs de surveillance continue pour vérifier les performances des matériaux améliorés une fois la route sera mise en service ;
- ⊕ Enfin à l'endroit des populations bénéficiaires, nous recommandons une implication de tous, dans la protection de cette route et une participation citoyenne en respectant le code de la route et en évitant les surcharges de poids.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] (Kana, E. M. (2016). *Geotechnical engineering practice for road works in tropical regions of Africa. Lettre Afrigeo n°2.*
- [2] (Bourgeon, G., & Gunnell, Y. (2005). *La latérite de Buchanan. Etude et gestion des sols*, 87-100.
- [3] LOMPO, P. (1980). Les matériaux utilisés en construction routière en Haute Volta. Un matériau non traditionnel “le lithostab” IVe conférence routière africaine.
- [4] KANAZOE, M. (2011). *Amélioration des graveleux latéritiques avec du granite concassé de classes granulométriques différentes (0/20 ; 0/31,5 ; 5/20).*
- [5] ISSIAKOU, M. S. (2016). *Caractérisation et valorisation des matériaux latéritiques utilisés en construction routier au Niger. Bordeaux : Université de Bordeaux.*
- [6] ATANGA, V. de P. (2015). *Problématique de l'amélioration au ciment des graveleux latéritiques utilisées en couche de base.*
- [7] MILLOGO, S. E. I. (2017). *Retraitement de chaussées par amélioration des caractéristiques mécaniques de la couche de base latéritique.*
- [8] DJANDJIEME, M. O. (Juin 2018). *Caractérisation des graveleux latéritiques améliorés au ciment et lithostabilisés en vue d'une utilisation en construction routière.*
- [9] LCPC-Setra. (1994). *Guide technique de construction et de dimensionnement des structures de chaussées.*
- [10] Bakar, & al. (2014). *Paramètres d'impact pour les composites hybrides.*
- [11] Génie, H. (2004). *Traitemet des sols à la chaux ou au ciment.*
- [12] NF P 94-057. (Mai 1992). Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*
- [13] NF P 94-051. (Mars 1993). Détermination des limites d'Atterberg. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*
- [14] NF P 94-078. (Décembre 1992). Détermination de l'Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice Portant immédiat. *Association Française de Normalisation (AFNOR).*

[15] NF P 94-093. (Octobre 1999). Détermination des références de compactage d'un matériau.
Association Française de Normalisation (AFNOR).

[16] CEBTP. (1984). *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux.* ISBN 2-1108-4811-1, 154p.

[17] CEBTP - LCPC. (Mai 1985). *Manuel pour le renforcement des chaussées souples en les pays tropicaux.* ISBN 2-1108-4817-0, 166p.

WEBOGRAPHIE

[1] Actes Interactifs. (2018, janvier 14). PDF.

<https://www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AII3/pdfs/167421.pdf>

[2] Caractérisation géotechnique des graveleux latéritiques. (2017, décembre). Recherche.

https://www.researchgate.net/publication/328382802_Caracterisation_geotechnique_des_graveleux_lateritiques_des_carrieres_de_Lam-Lam_et_Mont-Rolland_Senegal_Occidental_pour_une_utilisation_en_construction_routiere

[3] Comportement mécanique d'une couche de base en graveleux latéritiques améliorés au ciment : cas des routes en Côte-d'Ivoire. (1980). Livre.

https://books.google.fr/books/about/Comportement_m%C3%A9canique_d_une_couche_de.html?id=jKhpXwAACAAJ&redir_esc=y

[4] Webmaster. (2017, Novembre 02). Retraitement de chaussées par amélioration des caractéristiques mécaniques de la couche de base latéritique. Le site officiel / 2iE.

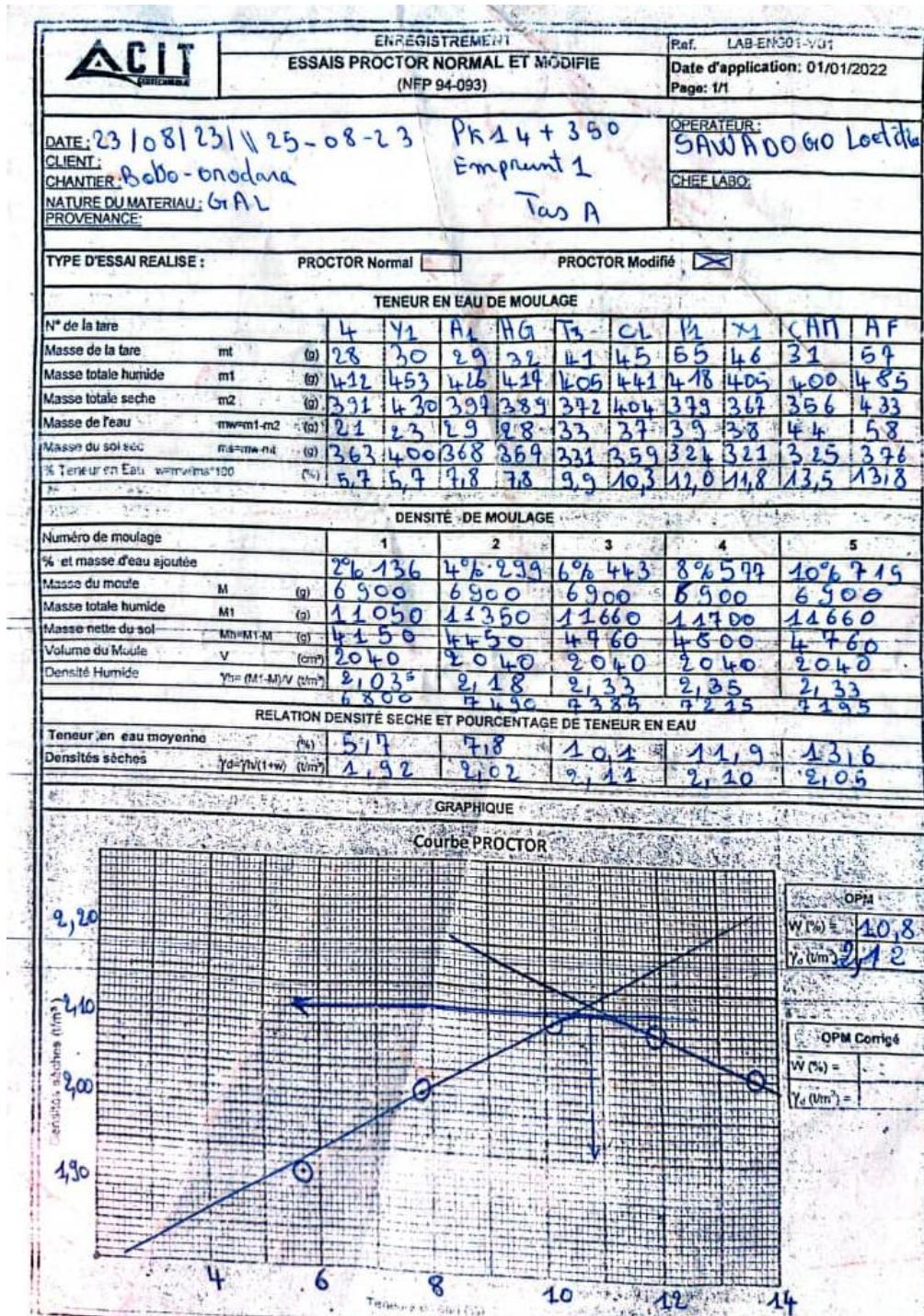
http://documentation.2ie-edu.org/cdi2ie/opac_css/doc_num.php?explnum_id=2819

ANNEXES

<i>Annexe 1 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique brut -----</i>	<i>93</i>
<i>Annexe 2 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique recyclé-----</i>	<i>97</i>
<i>Annexe 3 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 4% de ciment---</i>	<i>101</i>
<i>Annexe 4 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 3% de ciment---</i>	<i>103</i>
<i>Annexe 5 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 2,5% de ciment</i>	<i>105</i>
<i>Annexe 6 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 2% de ciment---</i>	<i>107</i>
<i>Annexe 7 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 1% de ciment---</i>	<i>109</i>
<i>Annexe 8 : Résultats des essais de déflexions-----</i>	<i>111</i>
<i>Annexe 9 : Résultats de la vérification des variantes sur alizé -----</i>	<i>113</i>
<i>Annexe 10 : diagramme de Casagrande -----</i>	<i>117</i>

Annexe 1 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique brut

Essai proctor



 Essai CBR

ACIT GEOTECHNIQUE		ENREGISTREMENT		Ref: LAB-ENG02-V01			
		INDICE PORTANT IMMEDIAT (IPI) INDICE CBR IMMEDIAT INDICE CBR après immersion NFP 94-078		Date d'application: 01/01/2022 Page: 1/2			
<u>DATE:</u> 23-08-2023 <u>CLIENT:</u> Bobo - Orodara <u>CHANTIER:</u> Bobo - Orodara <u>NATURE DU MATERIAU:</u> <u>PROVENANCE:</u>				<u>OPERATEUR:</u> SAWADOGO Flavie <u>CHEF LABO:</u>			
<u>REF. PROCTOR:</u> <input type="checkbox"/> Normal <input checked="" type="checkbox"/> Modifié		<u>Masse vol. sèche optimum :</u> 2,12 KN/m ³ <u>Teneur en eau optimum :</u> 10,8 %					
TYPE D'ESSAI REALISE IPI <input type="checkbox"/> CBR Immédiat <input type="checkbox"/> CBR Après immersion <input checked="" type="checkbox"/>							
<u>Densité de moulage</u> Tare N° Masse totale humide (g) Masse du moule (g) Masse du sol humide (g) Volume du moule (cm ³) Masse vol. humide (KN/m ³) Masse vol. sèche (KN/m ³) Compacité (%)	56	25	10				
	MP	A1	A12				
<u>Teneur en eau initiale</u> Tare N° Masse totale humide (g) Masse totale sèche (g) Masse tare (g) Masse eau (g) Masse sèche nette (g) Teneur en eau (%) Moyenne	0,1	0,4	1,54				
	4140	4880	45,2				
<u>Teneur en eau finale</u> Tare N° Masse totale humide (g) Masse totale sèche (g) Masse tare (g) Masse eau (g) Masse sèche nette (g) Teneur en eau (%) Moyenne	HP	A1	A12				
	4950	10220	9,15				
<u>Date de poinçonnement :</u> 07-09-2023 <u>Compactage</u> <u>Moule N°</u> <u>ANNEAU</u> <u>Équation de déformation</u> <u>Poinçonnement</u>							
<u>Poinçonnement</u>	Enfoncement (mm)	Lecture (mm)	Effort (kN)	Lecture (mm)	Effort (kN)	Lecture (mm)	Effort (kN)
	0,00						
	0,25						
	0,75	4,1		10			10
	1,25	5,6		10			10
	2,00	7,1		10			10
	2,50	8,0		10			10
	3,00	8,8		10			10
	3,50	9,4		10			10
	4,00	9,8		10			10
	4,50	10,2		10			10
	5,00	10,2		10			10
	7,50	11,1		10			10
10,00	11,5		10			10	
12,50							

Le tableau ci-dessous représente les résultats du CBR immergé dans 4 jours dans l'eau sur le matériau à l'état brut.

Tableau : Résultats de l'essai CBR

ESSAI CBR		Immersion à 4 jours		
Nombre de coups	Densité sèche (t/m ³)	CBR	Teneur en eau (%)	
			Moulage	Après essai
56	2,12	95	10,8	13,5
25	2,01	63		15,6
10	1,9	23		16,8

Source : Données de l'étude

 Analyse granulométrique

ACIT		ENREGISTREMENT ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE NF P 94-059			Ref : LAB-ENG03-V01 Date d'application: 01/01/2022 Page: 1/1
DATE:	23-08-23 28-08-23	CLIENT:	Bobo - Orodara		OPÉRATEUR: Flavie SAWADOGO
CHANTIER:	GAL		NATURE DU MATERIAU:		CHEF LABO:
PROVENANCE:					
Tamis	Module AFNOR	Masse de refus cumulés r(g)	% de refus cumulés R(%) = $(r/m_2) \times 100$	% de tamisés cumulés T(%) = $100 - R(%)$	
Ouvertures (mm)					
100	51				
80	50				
63	49				
50	48				
40	47	95	2,0	98	
31,5	46	230	5,5	94,5	
25	45	385	9,5	90,5	
20	44	450	11,0	89	
16	43	600	15	85	
12,5	42	860	21,0	79	
10	41	1160	28,5	71,5	
8	40	1475	36,0	64	
6,3	39	1790	44	56	
5	38	2035	50	50	
4	37	2250	55	45	
3,15	36	2380	58	42	
2,5	35	2500	61,0	39	
2	34	2595	63,5	36,5	
1,6	33	2675	65,5	34,5	
1,25	32	2745	67,0	33	
1	31	2795	68,5	31,5	
0,8	30	2815	70	30	
0,63	29	2915	71,5	28,5	
0,5	28	2970	73	27	
0,4	27	3035	74,5	25,5	
0,315	26	3110	76,0	24	
0,25	25	3170	78	22	
0,2	24	3235	79	21	
0,16	23	3325	81,5	18,5	
0,125	22	3375	83	17	
0,1	21	3425	84	16	
0,08	20	3430	84	16	
<i>Fond</i>					
<i>B</i>					

Annexe 2 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique recycle

✚ Analyse granulométrique

ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR TAMISAGE (NFP 18-560)				
Date de prélèvement :	26/12/2023	Nature :	GAL Recyclé	
Date de l'essai :	10/01/2024	Provenance:	Sur chaussée PK15+00-	
Masse de l'échantillon M(g) :	4697	Operateur :	SAWADOGO Flavie	
Modules AFNOR	Tamis (mm)	Masse des refus cumulés [Ri]	% des refus cumulés [100(Ri/M)]	% de tamisât cumulés [100-100(Ri/M)]
50	80		0	100,0
49	63		0	100,0
48	50		0	100,0
47	40		0	100,0
46	31,5	0	0,00	100,0
45	25	165	3,50	96,5
44	20	590	12,50	87,5
43	16	910	19,00	81,0
42	12,5	1375	29,00	71,0
41	10	1755	37,00	63,0
40	8	2135	45,50	54,5
39	6,3	2510	53,50	46,5
38	5	2830	60,00	40,0
37	4	3055	65,00	35,0
36	3,15	3220	68,50	31,5
35	2,5	336	71,50	28,5
34	2	3455	73,50	26,5
33	1,6	3525	75,00	25,0
32	1,25	3570	76,00	24,0
31	1	3605	77,00	23,0
30	0,8	3640	77,50	22,5
29	0,63	3680	78,00	22,0
28	0,5	3730	79,50	20,5
27	0,4	3795	81,00	19,0
26	0,315	3895	83,00	17,0
25	0,25	3990	85,00	15,0
24	0,2	4080	87,00	13,0
23	0,16	4140	88,00	12,0
22	0,125	4195	89,00	11,0
21	0,1	4245	90,00	10,0
20	0,08	4275	91,00	9,0

✚ Essai de la limite d'Atterberg

ENREGISTREMENT						Ref : LAB-ENG05-V01
LIMITES D'ATTERBERG						Date d'application: 01/01/2022
						Page: 1/1
DATE :	12/06/2021	CLIENT :	Mat. cru.	OPERATEUR :		
CHANTIER :	Bobo - Orodara	NATURE DU MATERIAU :	GAI	CHEF LABO:		
PROVENANCE :	nr Recydage /c/ foilest PK15+000-15+500					
LIMITE DE LIQUIDITE						
Nombres de coups	16	20	24	28	32	
Tare N°	44	42	43	44	45	46
Masse totale humide g	974	954	1064	980	1045	1080
Masse totale sèche g	801	788	814	810	855	835
Masse tare g	060	060	060	060	060	060
Masse eau g	173	166	186	175	175	164
Masse sèche nette g	741	728	818	795	775	750
Teneur en eau %	23,3	22,8	22,7	22,0	21,6	21,9
Teneur en eau moyenne %	23,0	22,3	21,7	21,3	21,3	20,9
Teneur en eau (%)						
						WL = 21,6 %
Nombre de coups						
LIMITE DE PLASTICITE						
Tare N°	AM	AL				
Masse totale humide g	7176	680				
Masse totale sèche g	432	408				
Masse tare g	060	060				
Masse eau g	441	422				
Masse sèche nette g	372	348				
Teneur en eau %	11,8	12,0				
						WP = 11,9 %
INDICE DE PLASTICITE : IP (WL-WP) = 09,7 %						
INDICE DE CONSISTANCE (Pour Wn = %) : IC (WL-Wn)/IP =						

 Essai Proctor modifié

Essai Proctor modifié										
Teneur en eau de moulage										
Numéro de Tare	BD	P1	4	101	7	O10	BT	SJ	C12	AC24
Masse totale humide (g)	477	493	499	461	481	457	536	596	497	487
Masse totale sèche (g)	461	478	476	439	453	430	494	550	479	469
Masse de la Tare(g)	43	55	28	29	47	58	49	59	42	31
Masse d'eau (g)	16	15	23	22	28	27	42	46	18	18
Masse du sol sec (g)	418	423	448	410	406	372	445	491	437	438
Teneur en eau (%)	3,8	3,5	5,1	5,4	6,9	7,3	9,4	9,4	4,1	4,1
Teneur en eau moyenne (%)	3,6		5,2		7,0		9,3		4,1	
Densité de Moulage										
Masse total humide (g)	11855		12225		12120		12050		12000	
Masse du moule (g)	6900		6900		6900		6900		6900	
Masse nette humide (g)	4955		5325		5220		5150		5100	
Volume du moule (cm 3)	2040		2040		2040		2040		2040	
Densité humide	2,429		2,61		2,56		2,52		2,50	
Densité sèche	2,35		2,480		2,39		2,31		2,40	
Masse nette à compacté (g)	8980		9115		8300		8560		9690	
Eau de mouillage (g)	2% - 179		4% - 364		6% - 498		8% - 685		3% - 291	

 Essai CBR

Essai CBR			
Echantillon		Opérateur	
Identification	PK 15+00-	Nom	SAWADOGO
Provenance	Chaussee Bobo-Dioulasso Orodara	Date de moulage	05/12/2024
Nature	GAL crue	Date d'essai	09/01/2024
Installations et conditions ambiantes		Equipements	
Lieu des essais	Labo chantier	Moules/Dame	CBR
Socle de compactage	BA	Balances	
Séchage (NFP 94-050)	Au moins 4H à 105°C	Etuve	
REFERENCES DE COMPACTAGE		Teneur en eau	5,6
		Densité	2,41
INTENSITE DE COMPACTAGE		MOULAGE A (5x56 COUPS)	MOULAGE B (5x25 COUPS)
Teneur en eau de moulage			
Numéro de Tare	9	H	TB
Masse totale humide(g)	413	429	421
Masse totale sèche(g)	390	410	402
Masse de la tare (g)	29	30	38
Masse d'eau(g)	23	19	19
Masse du sol sec(g)	361	380	364
Teneur en eau (%)	6,3	5	5,2
Teneur en eau moy (%)	5,5		
Densité de moulage			
Numéro de moule	A11	N49	N32
Masse totale humide(g)	10810	10910	10815
Masse du moule (g)	5415	5815	5980
Masse nette humide(g)	5395	5095	4835
Volume du moule (cm ³)	2058	2049	2049
Densité humide	2,62	2,485	2,36
Densité sèche	2,48	2,355	2,235

L'essai CBR après 4 jours d'immersion a donné les résultats présentés par le tableau ci-dessous.

Tableau : Résultats de l'essai CBR

ESSAI DE PORTANCE CBR Recyclé				
ESSAI CBR		Immersion à 4 jours		
Nombre de coups	Densité sèche (t/m ³)	CBR	Teneur en eau (%)	
			Moulage	Après essai
56	2,36	118	5,6	6,3
25	2,29	85		5
10	2,17	65		5,2

Annexe 3 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 4% de ciment

Essai CBR

		INDICE CBR APRES IMMERSION		Référence : FE PTR Indice : 00 Date : 13/11/05 Page : 3 / 6
Mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR (NFP 94-078)				
Echantillon		Opérateur		
Identification	PK 15+000 - 15+500	Nom & Prénom		
Provenance	Bobo - Orodara	Date moulage		30/12/2023
Nature	GAL + 4% de Ciment	Date essai		06/01/2024
Date réception		visa		
Installation et condition ambiantes		Equipements		
Lieu des essais	INBTP, Bobo-BASE La fubougou	Moule	CBR	
Socle de compactage	Au moins 4h à	Dame	Manuelle	
Séchage	105±5°C	Balance	Electronique 55kg Maxi	
(NFP 94-050)		Etuve		
REFERENCES ² DE COMPACTAGE		Teneur en eau (%)	6,3 2,35	
		Densité	2,35	
INTENSITE DE COMPACTAGE		MOULAGE A (5x56) COUPS	MOULAGE B (5x25) COUPS	MOULAGE C (5x10) COUPS
Teneur en eau de moulage				
Numéro de Tare	99	8	7	
Masse Totale humide (g)	450	475	455	
Masse Totale sèche (g)	428	450	432	
Masse de la tare (g)	70	55	50	
Masse d'eau (g)	22	25	23	
Masse du sol sec (g)	358	355	382	
Teneur en eau (%)	6,1	6,3	6,0	
Teneur en eau moyenne (%)	3,51	3,1	3,5	
Numéro de moule	3D1	A1	B5	
Densité de moulage				
Masse Totale humide (g)	11305	9070	8880	
Masse du moule (g)	5570	3690	3720	
Masse nette humide (g)	5735	5380	5160	
Volume du moule (cm ³)	2285	2261	2279	
Densité humide	2,51	2,138	2,126	
Densité sèche	2,365	2,214	2,135	
Mesure du gonflement linéaire après immersion dans l'eau				
Numéro d'Identification du comparateur				
Lecteur (mm)				
Gonflement linéaire -G (%)				

23960 Kg
Ciment 960 \rightarrow 24920 \Rightarrow 11.178

⊕ Essai proctor

	MODE OPERATOIRE D'ESSAI		Indices : 00
	Date : 13/11/05	Page : 2/6	
DETERMINATION DES REFERENCES DE COMPACTAGE D'UN MATERIAU			
Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié(NFP 94-093)			

Echantillon		Opérateur	
Identification	PK15+000 - PK15+500	Nom & prénoms	
Provenance	Bobo - Orodara	Date essai	29-12-2023
Nature	GAL + 6% de ciment	Visa	

Teneur en eau de moulage							
Numéro de Tare	89	0 F	80	FL	W8	AF	RS
Masse totale humide (g)	620	290	285	290	430	456	355
Masse totale sèche (g)	410	280	270	275	410	430	330
Masse de la Tare (g)	60	40	45	50	70	70	60
Masse d'eau (g)	10	10	15	15	20	25	25
Masse du sol sec (g)	350	240	225	225	340	360	275
Teneur en eau (%)	2,8	4,1	6,1	6,1	5,8	7,2	9,0
Teneur en eau moyenne (%)	3,1	4	6,1		7,2		9,0
Numéro de moule	1,4		2,6		1,2		1,0

Densité de moulage

Masse totale humide (g)	10865	11260	11340	11225
Masse du moule (g)	5612	5612	5612	5612
Masse nette humide (g)	5253	5648	5728	5613
Volume du moule (cm³)	2296	2296	2296	2296
Densité humide	2,29	2,66	2,49 ⁵	2,46 ⁵
Densité sèche	2,21	2,31	2,33	2,24 ⁵
	8200	8650	7335	7790

Annexe 4 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 3% de ciment

Essai CBR

		INDICE CBR APRES IMMERSION		Référence : FE PTR Indice : 00 Date : 13/11/05 Page : 3 / 6
Mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR (NFP 94-078)				
<i>3 jours à l'air libre.</i>				
Echantillon	Opérateur			
Identification	Nom & Prénom			
Provenance	Date moulage	30/12/2023		
Nature	Date essai	06/01/2024		
Date réception	visa			
Installation et condition ambiantes		Equipements		
Lieu des essais	Moule	CBR		
<i>ENBTP, Bobo-BASE La Joubangu</i>	Dame	Manuelle		
Socle de compactage	Balance	Electronique 55kg Maxi		
Séchage (NFP 94-050)	Etuve			
REFERENCES ² DE COMPACTAGE		Teneur en eau (%)	<i>5,9</i>	
		Densité	<i>2,1385</i>	
INTENSITE DE COMPACTAGE	MOULAGE A (5x56) COUPS	MOULAGE B (5x25) COUPS	MOULAGE C (5x10) COUPS	
Teneur en eau de moulage				
Numéro de Tare	<i>75</i>	<i>11</i>	<i>AP</i>	
Masse Totale humide (g)	<i>460</i>	<i>435</i>	<i>405</i>	
Masse Totale sèche (g)	<i>460</i>	<i>415</i>	<i>385</i>	
Masse de la tare (g)	<i>88</i>	<i>55</i>	<i>45</i>	
Masse d'eau (g)	<i>26</i>	<i>5,6</i>	<i>20</i>	
Masse du sol sec (g)	<i>355</i>	<i>360</i>	<i>340</i>	
Teneur en eau (%)	<i>5,6</i>	<i>5,5</i>	<i>5,8</i>	
Teneur en eau moyenne (%)				
Numéro de moule	<i>B14</i>	<i>A2</i>	<i>JR4</i>	
Densité de moulage				
Masse Totale humide (g)	<i>9485</i>	<i>9320</i>	<i>8645</i>	
Masse du moule (g)	<i>3745</i>	<i>3855</i>	<i>3530</i>	
Masse nette humide (g)	<i>5740</i>	<i>5475</i>	<i>5115</i>	
Volume du moule (cm ³)	<i>22735</i>	<i>22825</i>	<i>2255</i>	
Densité humide	<i>2,52</i>	<i>2,39</i>	<i>2,17</i>	
Densité sèche	<i>2,39</i>	<i>2,27</i>	<i>2,15</i>	
Mesure du gonflement linéaire après immersion dans l'eau				
Numéro d'identification du comparateur				
Lecteur (mm)				
Gonflement linéaire -G (%)				

*28720 kg → 29580 ⇒ 1 l 343
Ciment 860*

⊕ Essai proctor

		MODE OPERATOIRE D'ESSAI								Reference : FE PTR Indices : 00 Date : 13/11/05 Page : 2/6		
DETERMINATION DES REFERENCES DE COMPACTAGE D'UN MATERIAU												
Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié(NFP 94-093)												
Echantillon					Opérateur							
Identification	$P_{k15+00} - P_{k15+00}$				Nom & prénoms							
Provenance	Bobo-Orodara				Date essai		29-12-2023					
Nature	GA2 + 3% de ciment				Visa							
Teneur en eau de moulage												
Numéro de Tare	99	95	92	91	A11	M1	4	9L				
Masse totale humide (g)	410	420	405	370	410	445	445	425				
Masse totale sèche (g)	406	410	385	355	390	415	410	395				
Masse de la Tare (g)	70	55	55	60	70	70	60	55				
Masse d'eau (g)	10	10	20	15	20	30	35	30				
Masse du sol sec (g)	330	355	330	295	320	345	350	340				
Teneur en eau (%)	3,0	2,8	6,0	5	6,2	8,6	10	8,8				
Teneur en eau moyenne (%)	2,9		5,5		7,4		9,4					
Numéro de moule	0,9		1,5		1,4		1,4					
Densité de moulage												
Masse totale humide (g)	10895	11385	11365	11270								
Masse du moule (g)	5612	5612	5612	5612								
Masse nette humide (g)	5283	5773	5753	5658								
Volume du moule (cm^3)	2296	2296	2296	2296								
Densité humide	2,30	2,515	2,505	2,465								
Densité sèche	2,23	2,38	2,33	2,25								
	26180	46270	66546	86750								
	9115	6740	9110	9375								

Annexe 5 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 2,5% de ciment

Essai CBR

INDICE CBR APRES IMMERSION		Référence : FE PTR Indice : 00 Date : 13/11/05 Page : 3 / 6	
Mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR (NFP 94-078)			
<i>3 jours à l'air libre</i>			
Echantillon	Opérateur		
Identification	Nom & Prénom		
Provenance	Date moulage		
Nature	Date essai		
Date réception	visa		
Installation et condition ambiantes			
Lieu des essais	Moule	CBR	
<i>1. NHTP, BoboBASE La fabriquée</i>	Dame	Manuelle	
Socle de compactage	Balance	Electronique 55kg Maxi	
Séchage (NFP 94-050)	Etuve		
REFERENCES ² DE COMPACTAGE	Teneur en eau (%)	6,5	
	Densité	<i>2,305 2,325</i>	
INTENSITE DE COMPACTAGE	MOULAGE A (5x56) COUPS	MOULAGE B (5x25) COUPS	MOULAGE C (5x10) COUPS
Teneur en eau de moulage			
Numéro de Tare	<i>LN15</i>	<i>RAT</i>	<i>58</i>
Masse Totale humide (g)	<i>430</i>	<i>425</i>	<i>365</i>
Masse Totale sèche (g)	<i>408</i>	<i>403</i>	<i>347</i>
Masse de la tare (g)	<i>58</i>	<i>6,2</i>	<i>50</i>
Masse d'eau (g)	<i>22</i>	<i>22</i>	<i>18</i>
Masse du sol sec (g)	<i>353</i>	<i>313</i>	<i>297</i>
Teneur en eau (%)	<i>6,2</i>	<i>6,4</i>	<i>6,0</i>
Teneur en eau moyenne (%)			
Numéro de moule	<i>ABC</i>	<i>B7</i>	<i>B10</i>
Densité de moulage			
Masse Totale humide (g)	<i>11350</i>	<i>10870</i>	<i>8955</i>
Masse du moule (g)	<i>5515</i>	<i>5490</i>	<i>3730</i>
Masse nette humide (g)	<i>5835</i>	<i>5380</i>	<i>5225</i>
Volume du moule (cm ³)	<i>2312</i>	<i>22146</i>	<i>2303</i>
Densité humide	<i>2,52</i>	<i>2,39</i>	<i>2,127</i>
Densité sèche	<i>2,38</i>	<i>2,125</i>	<i>2,114</i>
Mesure du gonflement linéaire après immersion dans l'eau			
Numéro d'identification du Comparateur			
Lecteur (mm):			
Gonflement linéaire -G (%)			

$$\frac{32250}{ciment 805} \rightarrow 33055 \text{ Kg} \Rightarrow 10765$$

⊕ Essai proctor

	MODE OPERATOIRE D'ESSAI DETERMINATION DES REFERENCES DE COMPACTAGE D'UN MATERIAU <i>Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié(NFP 94-093)</i>	Reference : FE PTR Indices : 00 Date : 13/11/05 Page : 2/6
---	---	---

Echantillon		Opérateur	
Identification	PR15+100 - PR15 T 500	Nom & prénoms	
Provenance	Bobo - Orodara	Date essai	29-12-2003
Nature	GAL + 2,5% Ciment	Visa	

Teneur en eau de moulage								
Numéro de Tare	10	12	FN	27	AAT	ECA	OR	20
Masse totale humide (g)	425	450	510	475	585	520	495	385
Masse totale sèche (g)	415	435	485	455	550	485	460	360
Masse de la Tare (g)	55	50	55	55	60	60	60	50
Masse d'eau (g)	10	15	25	20	35	35	35	25
Masse du sol sec (g)	360	385	430	400	480	425	400	310
Teneur en eau (%)	2,7	3,8	5,8	5	7,1	8,2	8,7	8,0
Teneur en eau moyenne (%)	3,2	5,4	7,6		8,3			
Numéro de moule	1,21	1,14	1,16		0,3			

Densité de moulage

Masse totale humide (g)	10915	11880	11310	11195	
Masse du moule (g)	5618	5612	5612	5612	5612
Masse nette humide (g)	5303	5668	5698	5583	
Volume du moule (cm ³)	2296	2296	2296	2296	
Densité humide	2,31	2,47	2,48	2,43	
Densité sèche	2,24	2,34	2,30	2,24	
	26150	46280	66415	86605	
	7410	7000	6955	7545	

Annexe 6 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 2% de ciment

Essai CBR

INDICE CBR APRES IMMERSION		Référence : FEF ... Indice : 00 Date : 13/11/05 Page : 3 / 6	
Mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR (NFP 94-078)			
<i>3 jours à l'air libre.</i>			
Echantillon	Opérateur		
Identification	Nom & Prénom		
Provenance	Date moulage		
Nature	Date essai		
Date réception	visa		
Installation et condition ambiantes		Equipements	
Lieu des essais	ENBTP, Bobo-DIÈSE La fiabougou	Moule	CBR
Socle de compactage	Au moins 4h à	Dame	Manuelle
Séchage (NFP 94-050)	105±5°C	Balance	Électronique 55kg Maxi
REFERENCE ² DE COMPACTAGE		Teneur en eau (%)	6,3
		Densité	2,395
INTENSITE DE COMPACTAGE	MOULAGE A (5x56) COUPS	MOULAGE B (5x25) COUPS	MOULAGE C (5x10) COUPS
Teneur en eau de moulage			
Numéro de Tare	5	ZA	0
Masse Totale humide (g)	335	335	385
Masse Totale sèche (g)	318	375	366
Masse de la tare (g)	50	55	55
Masse d'eau (g)	17	62	19
Masse du sol sec (g)	268	320	311
Teneur en eau (%)	6,3	6,2	6,1
Teneur en eau moyenne (%)	K2	YE	B3
Densité de moulage			
Masse Totale humide (g)	9285	9070	8890
Masse du moule (g)	3565	3545	3735
Masse nette humide (g)	5720	5525	5155
Volume du moule (cm ³)	20551	2285	2285
Densité humide	2,53	2,542	2,525
Densité sèche	2,39	2,28	2,12
Mesure du gonflement linéaire après immersion dans l'eau			
Numéro d'identification du comparateur			
Lecteur (mm)			
Gonflement linéaire -G (%)			

31180 kg
ciment 625 → 31805 kg ⇒ 10569

⊕ Essai proctor

	MODE OPERATOIRE D'ESSAI	Reference : FE PTR Indices : 00 Date : 13/11/05 Page : 2/6
DETERMINATION DES REFERENCES DE COMPACTAGE D'UN MATERIAU <i>Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié(NFP 94-093)</i>		

Echantillon		Opérateur	
Identification	PR15+00 PR15+500	Nom & prénoms	
Provenance	Bobo-Orodara	Date essai	29/12/2023
Nature	GAL + 2% de ciment	Visa	

Teneur en eau de moulage								
Numéro de Tare	M9	LN15	MAR	36	H11	B11	14	214
Masse totale humide (g)	440	530	440	355	485	400	500	480
Masse totale sèche (g)	436	515	420	340	455	375	460	445
Masse de la Tare (g)	55	55	60	50	55	55	60	60
Masse d'eau (g)	10	15	20	15	30	25	40	35
Masse du sol sec (g)	375	460	360	290	400	320	400	385
Teneur en eau (%)	2,6	3,2	5,5	5,1	7,5	7,8	10	9
Teneur en eau moyenne (%)	2,9	5,3			7,6		9,5	
Numéro de moule	0,9	1,3			1,6		1,5	

Densité de moulage				
Masse totale humide (g)	10820	11300	11365	11235
Masse du moule (g)	5612	5612	5612	5612
Masse nette humide (g)	5208	5688	5753	5623
Volume du moule (cm^3)	2296	2296	2296	2296
Densité humide	2,24	2,48	2,50 ⁵	2,45
Densité sèche	2,20	2,35	2,33	2,24
	26165	4% 355	6% 585	8% 850
	8185	89,15	8792	11135

Annexe 7 : Résultats des essais effectués sur le graveleux latéritique amélioré à 1% de ciment

Essai CBR

		INDICE CBR APRES IMMERSION		Référence : FE PTR Indice : 00 Date : 13/11/05 Page : 3 / 6
Mesure sur échantillon compacte dans le moule CBR (NFP 94-078)				
<i>3 jours à l'air libre</i>				
Echantillon	Opérateur			
Identification	Nom & Prénom			
Provenance	Date moulage			30/12/2023
Nature	Date essai			06/01/2024
Date réception	visa			
Installation et condition ambiantes		Equipements		
Lieu des essais	Moule			CBR
	Dame			Manuelle
Socle de compactage	Balance			Electronique 55kg Maxi
Séchage (NFP 94-050)	Etuve			
REFERENCES ² DE COMPACTAGE		Teneur en eau (%)	5,1	
		Densité	2,110	
INTENSITE DE COMPACTAGE		MOULAGE A (5x56) COUPS	MOULAGE B (5x25) COUPS	MOULAGE C (5x10) COUPS
Teneur en eau de moulage				
Numéro de Tare	A	291	86	
Masse Totale humide (g)	455	435	445	
Masse Totale sèche (g)	436	417	426	
Masse de la tare (g)	55	55	55	
Masse d'eau (g)	19	4,9	18	19
Masse du sol sec (g)	381	362	371	
Teneur en eau (%)	4,9	4,9	5,1	
Teneur en eau moyenne (%)				
Numéro de moule	AB1	B12	B8	
Densité de moulage				
Masse Totale humide (g)	9465	9230	8555	
Masse du moule (g)	3840	3730	3725	
Masse nette humide (g)	5625	5500	5230	
Volume du moule (cm ³)	2737	2312	2303	
Densité humide	2,51	2,38	2,17	
Densité sèche	2,140	2,27	2,16	
Mesure du gonflement linéaire après immersion dans l'eau				
Numéro d'Identification du comparateur				
Lecteur (mm)				
Gonflement linéaire -G (%)				

$$\begin{array}{l} 25650 \text{ kg} \\ \text{Ciment } 2,55 \\ \hline \end{array} \Rightarrow 25905 \text{ kg} \Rightarrow 998$$

⊕ Essai proctor

	MODE OPERATOIRE D'ESSAI	Reference : FE PTR Indices : 00 Date : 13/11/05 Page : 2/6
DETERMINATION DES REFERENCES DE COMPACTAGE D'UN MATERIAU <i>Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié(NFP 94-093)</i>		

Echantillon	Opérateur	
Identification : PK 15+00 - 15+500	Nom & prénoms	
Provenance : Bobo - Orodara	Date essai	29/11/2023
Nature : GAL + 1% de ciment	Visa	

Teneur en eau de moulage									
Numéro de Tare	PS	RAS	8	40	X1	PG	0	121	
Masse totale humide (g)	405	430	440	365	350	270	515	565	
Masse totale sèche (g)	395	420	425	350	330	255	475	520	
Masse de la Tare (g)	55	55	55	55	55	30	55	55	
Masse d'eau (g)	10	10	15	15	20	15	40	45	
Masse du sol sec (g)	340	365	370	295	275	225	420	465	
Teneur en eau (%)	2,5	2,7	4,0	5	7,2	6,6	9,5	9,6	
Teneur en eau moyenne (%)	2,8		4,5		6,9		9,5		5,1 11,2 3,9
Numéro de moule	0,8		0,5		0,9		1,5		

Densité de moulage

Masse totale humide (g)	10845	11315	11345	11270	
Masse du moule (g)	56121	56121	56121	56121	
Masse nette humide (g)	5233	5703	5733	5658	
Volume du moule (cm³)	2296	2296	2296	2296	
Densité humide	2,28	2,48	2,49	2,465	
Densité sèche	2,92	2,38	2,33	2,23	
	2% 174	4% 370	6% 485	8% 705	
	8741	9265	8130	8807	

Annexe 8 : Résultats des essais de déflexions

Après plusieurs passages à des positions kilométriques différentes nous obtenons les résultats des mesures de déflexion consignés le tableau suivant :

Tableau : Résultats de l'essai de déflexion et de l'état apparent de la chaussée

Pk Début	Pk Fin	Déflexion				Etat apparent				Décision
		D ₉₀ (1/100 mm) par section homogène	D ₉₀ < d ₁	d ₁ < D ₉₀ < d ₂	D ₉₀ > d ₂	Bon (1)	Déformé non fissuré (2-3)	Déformé et fissuré (4-7)	Indice de qualité (Qi)	
0,050	1,100	46	X			X			Q ₁	Entretien
1,100	2,300	54	X					X	Q ₃	Renforcement
2,300	3,450	77		X		X			Q ₂	Entretien
3,450	3,650	62		X				X	Q ₄	Renforcement
3,650	4,850	87			X		X		Q ₄	Renforcement
4,850	6,300	65		X				X	Q ₃	Renforcement
6,300	8,400	53	X			X			Q ₁	Entretien
8,400	9,400	71		X			X		Q ₃	Renforcement
9,400	12,200	49	X					X	Q ₃	Renforcement
12,200	13,300	61		X				X	Q ₄	Renforcement
13,300	21,050	50	X					X	Q ₃	Renforcement
21,050	22,050	68		X				X	Q ₄	Renforcement
22,050	22,450	51	X				X		Q ₃	Renforcement
22,450	23,900	59	X				X		Q ₃	Renforcement
23,900	25,200	45	X					X	Q ₄	Renforcement

Le manuel de renforcement des chaussées souples en pays tropicaux donne les types de matériaux à utiliser en renforcement des chaussées, selon le niveau de trafic.

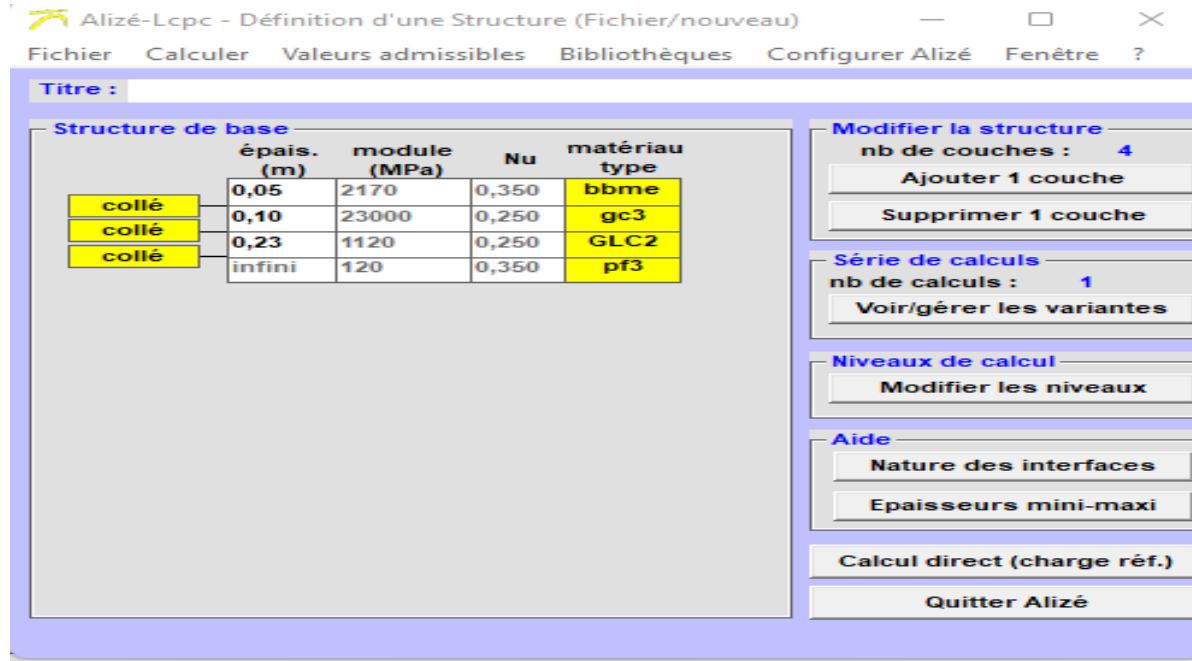
Tableau : Matériaux de renforcement en fonction du trafic

Matériaux	Deux (02) couches	
	Renforcement pour trafic léger ou moyen T1, T2 (T3)	Renforcement pour trafic moyen ou lourd T3, T4, T5
Béton bitumineux : Couche mince \leq 6 cm	X (une couche)	
Béton bitumineux : Couche épaisse $>$ 6 cm à 2×7 cm		X
Graveleux latéritique ciment	X	
Concassé 0/ 31,5	X	
Tout-venants naturels	X	
Sable (limoneux ou argileux) ciment	X	
Sable laitier	X	
Grave ciment		X
Sable bitume	X	
Grave bitume		X

Source : Manuel de renforcement des chaussées souples en pays tropicaux

Annexe 9 : Résultats de la vérification des variantes sur alize

Variante 1



The screenshot shows the 'Résultats' (Results) screen of the Alizé-Lcpc software. A context menu is open over a table of results. The table has columns: épaisss. (m), module (MPa), coef. Poisson, Zcalcul (m), EpsT (μdéf), SigmaT (MPa), EpsZ (μdéf), and SigmaZ (MPa). The rows correspond to the layers defined in the base structure.

épaisss. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (μdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	2170,0	0,350	0,000	55,0	0,242	112,4	0,659
collé			0,050	28,2	0,128	127,3	0,617
0,100	23000,0	0,250	0,050	28,2	1,047	-8,6	0,617
collé			0,150	-57,2	-1,592	37,5	0,151
0,230	1120,0	0,250	0,150	-57,2	-0,031	144,5	0,151
collé			0,380	-120,6	-0,160	97,4	0,036
infini	120,0	0,350	0,380	-120,6	-0,002	299,4	0,036

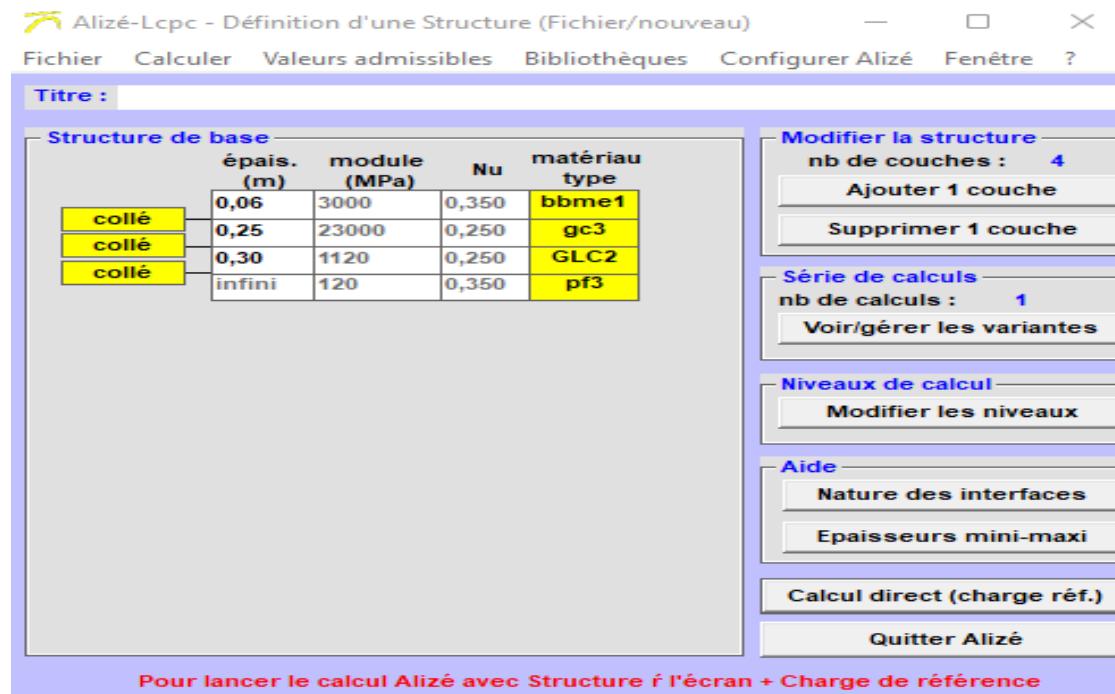
The context menu, titled 'Alizé-Lcpc M...', contains the following items:

- 1-EpsiT= 136,6
- 2-SigmaT= 0,683
- 3-SigmaT= 0,670
- 4-EpsiZ= 413,8

Below the menu, there is a note: "effacer=dble click Pour imprimer les données des calculs de valeurs admissibles à la suite des résultats des calculs mécaniques: cocher les cases correspondantes dans la liste ci-dessus."

At the bottom of the window are buttons for 'Imprimer' (Print), 'Enregistrer' (Save), 'Voir Chapt.' (View Chapter), and 'Fermer' (Close).

⊕ Variante 2



épaisseur (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (μdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μdéf)	SigmaZ (MPa)
0,060	3000,0	0,350	0,000	14,0	0,135	117,2	0,657
collé		0,060		14,7	0,112	112,3	0,629
0,250	23000,0	0,250	0,060	14,7	0,629	11,5	0,629
collé		0,310		-24,0	-0,671	14,7	0,040
0,300	1120,0	0,250	0,310	-24,0	-0,020	43,0	0,040
collé		0,610		-36,2	-0,049	31,4	0,011
infini	120,0	0,350	0,610	-36,2	0,000	96,5	0,011

Variante 3

Alizé-Lcpc - Définition d'une Structure (Fichier/nouveau)

Fichier Calculer Valeurs admissibles Bibliothèques Configurer Alizé Fenêtre ?

Titre :

Structure de base

	épais. (m)	module (MPa)	Nu	matériau type
collé	0,06	3000	0,350	bbme1
collé	0,12	2700	0,350	gb3
collé	0,28	1120	0,250	GLC2
collé	infini	120	0,350	pf3

Modifier la structure
nb de couches : 4
Ajouter 1 couche
Supprimer 1 couche

Série de calculs
nb de calculs : 1
Voir/gérer les variantes

Niveaux de calcul
Modifier les niveaux

Aide
Nature des interfaces
Epaisseurs mini-maxi

Calcul direct (charge réf.)
Quitter Alizé

Donner le titre de la structure (texte libre, facultatif)

Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran, Charge de référence)

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul	EpsT (μdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μdéf)	SigmaZ (MPa)
0,060	3000,0	0,350	0,000	2,4	0,148	14,7	0,659
collé			0,060	-0,9	0,212	118,3	0,584
0,120	2700,0	0,350	0,060	-0,9	0,195	131,8	0,584
collé			0,180	-76,4	-0,173	119,6	0,219
0,280	1120,0	0,250	0,180	-76,4	-0,034	205,6	0,219
collé			0,460	-114,5	-0,151	91,1	0,033
infini	120,0	0,350	0,460	-114,5	-0,002	277,8	0,033

Alizé-Lcpc M... 0sec

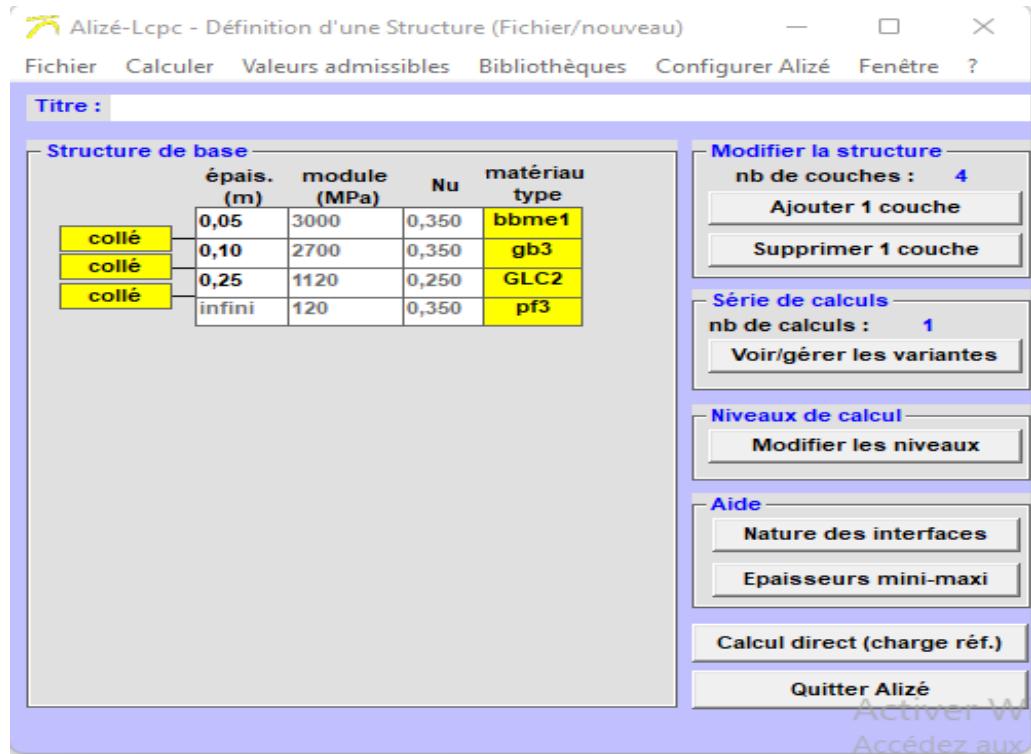
21-EpsiT= 136,6
22-EpsiT= 147,3
23-SigmaT= 0,670
24-EpsiZ= 413,8

effacer=dble click
Pour imprimer les
données des calculs de
valeurs admissibles à la
suite des résultats des
calculs mécaniques:
cocher les cases
correspondantes dans
la liste ci-dessus.

Imprimer Enregistrer

Voir Charg. Fermer

 Variante 4



The screenshot shows the 'Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran, Charge de référence)' window. It displays a table of mechanical parameters for each layer:

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (μdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	3000,0	0,350	0,000	6,1	0,183	-2,9	0,659
collé			0,050	13,5	0,266	103,8	0,601
0,100	2700,0	0,350	0,050	13,5	0,242	117,7	0,601
collé			0,150	-85,7	-0,184	141,5	0,270
0,250	1120,0	0,250	0,150	-85,7	-0,031	250,0	0,270
collé			0,400	-144,1	-0,188	111,6	0,041
infini	120,0	0,350	0,400	-144,1	-0,002	343,6	0,041

A context menu is open over the results table, listing items like '29-EpsiT= 136,6', '30-EpsiT= 150,0', '31-SigmaT= 0,670', and '32-EpsiZ= 413,8'. The menu also contains instructions for printing admissible values and has buttons for 'Imprimer' and 'Enregistrer'.

Annexe 10 : diagramme de Casagrande

