

***AMELIORATION DES GRAVELEUX LATERITIQUES
AU CIMENT EN COUCHES DE CHAUSSEE AU
BURKINA FASO : « CAS DES TRAVAUX DE
RENFORCEMENT DE LA RN1 ENTRE BOROMO ET
BOBO - DIOULASSO »***

**Mémoire pour l'obtention du diplôme de
MASTER EN INGÉNIERIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT**

OPTION : Génie Civil

Présenté et soutenu publiquement le 23 Juin 2012 par :

MAHAMAT Nganansou

Travaux dirigés par :

Ismaila GUEYE

Enseignant au ZiE

UTER ISM

Ali SANA

Chef de Département

Géotechnique Routière

LNBTP

Promotion 2011 - 2012

DEDICACE

A mes parents,

Pour leur amour et leur sacrifice énorme consenti à ma formation qu'ils trouvent ici la récompense de leurs sacrifices ;

A mes frères et sœurs,

Qui contre leur volonté, ont supporté mon absence mais m'encouragent chaque fois qu'ils le peuvent ; qu'ALLAH nous unisse toujours et qu'il montre à chacun de nous le chemin de la vérité et de l'amour ;

A ma tante et son mari,

Pour leurs soutiens multiformes dans mes études primaire et secondaire ;

A mes défuntes grandes sœurs et grand-mère,

Pour leur amour et leurs encouragements, que le meilleur du paradis soit leur demeure.

REMERCIEMENTS :

Qu'il nous soit permis d'exprimer notre gratitude ici à tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont contribué à l'aboutissement de cette étude qui s'inscrit dans le cadre du mémoire de fin de cycle.

Il a d'abord fallu la confiance du personnel du Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) pour que cette étude prenne forme. Nous remercions personnellement son Directeur Général **M. KABORE Kalsibiri** qui nous a accordé ce stage et notre maître de stage **M. Ali SANA** qui s'est assuré de toutes les conditions de travail et a su répondre à nos moindres préoccupations. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nous remercions également toute l'équipe pédagogique du 2iE pour l'enseignement et leur disponibilité à assurer notre formation professionnelle. En particulier, **M. Ismaïla GUEYE**, notre Directeur de Mémoire, qui n'a ménagé aucun effort dans la recherche d'une assistance au bon déroulement de ce mémoire soit témoin de notre sincère reconnaissance.

Nous remercions enfin :

- ✓ Nos oncles LOUMIGUE et ALIDOU Nganansou pour leurs encouragements ;
- ✓ Notre très chère amie MIEN Reine pour son soutien multiforme durant les années passées ensemble ;
- ✓ Tout le personnel du Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) pour leurs disponibilités à répondre à toutes nos préoccupations ;
- ✓ Nos amis et frères TOUGMA Paul, DIANDA Mahamadou, NIAMPA Fatima, YE Douawéré, BELEM André, BASSAN Jacques, FOKA Alouaba Davy, ASLINA Mahamat Gocké, NGADY et DJOUFOUNA Dougouna, GORSOU BAGAO Daniel, HAMIT Hassan Hissein, NARBE Maxime, GONGA Eric, ASSIMTAN Serge, VOUNSOUMNA Mogobang, SASSOU Bangmadi ... qu'ils trouvent ici notre reconnaissance ;
- ✓ Tous les étudiants du 2iE (2009-2012) pour la bonne ambiance et l'esprit de paix et d'harmonie qu'ils ont su préserver au sein de l'Institut ;
- ✓ La communauté tchadienne du 2iE (AET-2iE) et toute la grande communauté tchadienne au Burkina-Faso (AESET-BF) pour l'ambiance fraternelle qu'elles ont su créer autour de nous durant tout notre séjour au Burkina-Faso (2005-2012).

RESUME :

Dans les pays en voie de développement, l'essentiel des transports étant fait par voie terrestre, ces pays ont essayé de développer un réseau routier leur permettant de désenclaver les différentes régions. Au Burkina Faso comme dans la plupart des pays sahéliens, la majorité des assises des chaussées sont en matériaux graveleux latéritique. Ce matériau, disponible le long des tracés des routes et de faible coût, constitue presque 100 % des couches de fondation et 60 à 70 % des couches de base (Sandoumbé THIAW, 2006). Au regard du trafic actuel élevé son utilisation en construction routière à l'état naturel présente de fois de faible portance causant la dégradation rapide des assises, a conduit le Burkina Faso, a adopté une technique d'amélioration des graveleux latéritiques au **ciment**.

L'étude menée dans le cadre de notre mémoire concerne un échantillon de matériau graveleux latéritique prélevé sur un emprunt et amélioré au ciment à des différents pourcentages pour atteindre la portance répondant aux spécifications techniques du CPT.

Des essais de laboratoire ont préalablement été réalisés sur les graveleux latéritiques à l'état naturel. Il s'agit de l'analyse granulométrique, les limites d'Atterberg, l'essai Proctor Modifié et l'essai CBR. Ces essais ont permis de conclure que ce matériau ne peut pas être utilisé en couche de fondation à l'état naturel car son indice CBR égal 55 à 98% de l'Optimum Proctor Modifié (OPM) est inférieur à 80 imposé par le cahier de prescription technique (CPT).

Le matériau a été amélioré au ciment avec des différents pourcentages (1, 2, 2.5, 3 et 4%) afin d'observer l'évolution de l'indice CBR et de la résistance à la compression simple.

L'indice portant CBR à 98% de l'Optimum Proctor Modifié du graveleux latéritique passe de 55 à l'état naturel à 340 à 2.5% de ciment à 25 coups tandis que la résistance à la compression simple passe de 18.15 Kg/Cm² à l'état naturel à 25.01Kg/Cm² à 2.5% de ciment à 25 coups.

Nous concluons que l'amélioration à **2.5%** de ciment donne les résultats conformes aux spécifications du CPT en ce qui concerne l'indice CBR et la résistance à la compression simple.

Mots clefs : Graveleux latéritique ; Ciment ; Portance CBR ; Résistance ; Amélioration.

ABSTRACT

In developing countries, most transport is by land, these countries have tried to develop a road network allowing them to open up different areas. In Burkina Faso, as in most Sahelian countries, the majority of pavement foundation materials are gravelly laterite. This material is available along the route and of low cost, is almost 100% of sub-base and 60 to 70% of the base layers (Sandoumbé THIAW, 2006). Given the current high traffic use in road construction in its natural state this time of low bearing causing the rapid deterioration of the foundations, led Burkina Faso, adopted a technical improvement of lateritic gravel with cement. The study in this part of our memory for a sample of material taken from a lateritic gravelly borrowing and improved cement in different percentages to reach the lift meets the technical requirements of the CPT. Laboratory tests have previously been made on lateritic gravel in its natural state. This is the particle size analysis, Atterberg limits, Proctor and modified CBR test. These tests have concluded that this material cannot be used in sub base naturally because its CBR equal 55 to 98% of Modified Proctor Optimum (OPM) is less than 80 imposed by the book technical requirement (CPT).The material has been improved with cement with different percentages (1, 2, 2.5, 3 and 4%) to observe the evolution of the CBR and the unconfined compressive strength. The bearing ratio CBR to 98% of Modified Proctor Optimum of lateritic gravel from 55 naturally to 340 at 2.5% cement to 25 shots while the compressive strength increased from 18.15 Kg/Cm² simple to naturally to 25.01Kg/Cm² to 2.5% cement to 25 shots. We conclude that improved to 2.5% of cement produces results as specified in the CPT in respect of the CBR and the unconfined compressive strength.

Keywords: Gravelly lateritic; Cement; CBR Bearing Resistance; Improvement.

LISTE DES ABREVIATIONS

BB : Béton Bitumineux

GAL : Grave Argileuse Latéritique

GB : Grave Bitume

CBR: Californian Bearing Ratio

CEBTP: Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics

Cc: Coefficient de courbure

CPT : Cahier de Prescriptions Techniques

Cu: Coefficient d'uniformité

LCPC : Laboratoire Centrale de Ponts et Chaussées

LNBT : Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics

NF: Norme Française

OPM: Optimum Proctor Modifié

RN1: Route Nationale N° 1

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

SOMMAIRE :

REMERCIEMENTS :	ii
RESUME :	iii
ABSTRACT	iv
LISTE DES ABREVIATIONS	v
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
I. INTRODUCTION	1
II. PRESENTATION DU CADRE DE L'ETUDE	4
1. Présentation de la structure d'accueil.....	4
2. Le projet d'étude	4
a) <i>Description du projet</i>	4
b) <i>Localisation de la zone du projet</i>	5
III. NOTIONS GENERALES :	6
1) Définition	6
2) Constituant d'une chaussée	6
a) <i>L'infrastructure</i>	6
b) <i>Rôle de l'infrastructure</i>	6
c) <i>La superstructure</i>	6
d) <i>Rôle de la superstructure</i>	7
3) Types de chaussée	8
a) <i>Les chaussées souples ou flexibles</i>	8
b) <i>Les chaussées semi rigides</i>	8
c) <i>Les chaussées rigides</i>	9
IV. LA TECHNIQUE DE L'AMELIORATION DES GRAVELEUX LATERITIQUES AU CIMENT	9
1. Historique de l'amélioration au ciment.....	9

2.	Principe.....	9
3.	Mise en œuvre	10
	a) L'épaisseur de la couche à traiter.....	10
	b) Le dosage en liant	11
V.	LES GRAVELEUX LATÉRITIQUES.....	11
1.	Définition :	11
2.	Les graveleux latéritiques utilisés au Burkina Faso	11
3.	Utilisation des graveleux latéritiques en construction routière	12
VI.	LE CIMENT	12
1.	Définition :	12
2.	Différents types de ciments	13
VII.	COLLECTE ET ANALYSE DES RESULTATS DE L'AMELIORATION.....	13
	AU CIMENT REALISEE LORS DES TRAVAUX DE RENFORCEMENT DE LA RN1 ENTRE BOROMO ET BOBO DIOULASSO	13
1)	Collecte des résultats de l'amélioration au ciment réalisée lors des travaux de renforcement de la RN1 entre Boromo et Bobo Dioulasso	13
2)	Analyse des résultats de l'amélioration au ciment réalisée lors des travaux de renforcement de la RN1 entre Boromo et Bobo Dioulasso	14
	a) Synthèse des résultats des essais d'identification et de portance	14
	b) La densité sèche maximale avant et après amélioration.....	14
	c) La teneur en eau optimale avant et après amélioration.....	15
	d) Le CBR à 98% de l'OPM avant et après amélioration.....	15
VIII.	ETUDE EXPERIMENTALE	16
1)	Essais sur la grave argileuse latéritique (GAL).....	16
	a. Analyse granulométrique	16
	b. Limites d'Atterberg	17
	c. Proctor Modifié :.....	18
	d. Essai CBR.....	19
2)	Essais sur la grave argileuse latéritique améliorée au ciment à différents dosages	21
	a. Proctor Modifié	21

b.	<i>Essai CBR.....</i>	22
c.	<i>Essai de compression simple.....</i>	22
d.	<i>Essai de traction par fendage à 2.5 % de ciment.....</i>	23
3)	Analyse granulométrique et Limites d'Atterberg à 2.5% de ciment avant et après compactage.....	24
a)	<i>Analyse granulométrique à 2.5% de ciment avant compactage.....</i>	24
b)	<i>Analyse granulométrique à 2.5% de ciment après compactage.....</i>	24
c)	<i>Limites d'Atterberg à 2.5% de ciment avant compactage.....</i>	25
d)	<i>Limites d'Atterberg à 2.5% de ciment après compactage.....</i>	25
IX.	INTERPRETATIONS DES RESULTATS.....	26
1.	Variation de la densité sèche en fonction du taux d'amélioration.....	26
2.	Evolution de la portance CBR en fonction du taux d'amélioration.....	27
3)	Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du taux d'amélioration.....	28
X.	APPLICATION DE LA TECHNIQUE D'AMELIORATION DES GRAVELEUX LATERITIQUES AU CIMENT : CAS DE LA ROUTE BOROMO BOBO DIOULASSO	28
1)	Structure de la chaussée existante.....	28
2)	Etude du trafic.....	29
3)	Dimensionnement du renforcement par la méthode CEBTP et le logiciel Alizé du LCPC.....	30
a)	<i>Méthode CEBTP.....</i>	30
b)	<i>Vérification par le logiciel Alizé III du LCPC.....</i>	31
c)	<i>Les hypothèses.....</i>	31
d)	<i>Les vérifications à faire.....</i>	33
e)	<i>Résultats des déformations:.....</i>	33
XI.	PHENOMENES DE MICRO FISSURATION.....	35
XII.	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	37
XIII.	BIBLIOGRAPHIE.....	39

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Epaisseur des couches à traiter	10
Tableau 2: Synthèse des résultats des essais d'identification et de portance	14
Tableau 3: Les limites d'Atterberg de la GAL	18
Tableau 4: Résultats de l'essai Proctor Modifié.....	19
Tableau 5: Résultats de l'essai CBR sur le matériau non amélioré	20
Tableau 6: Synthèse des différents résultats obtenus pour la GAL naturelle.....	21
Tableau 7: Récapitulatif des résultats des essais CBR sur les mélanges.....	22
Tableau 8: Récapitulatif des résultats des essais de la compression simple sur les mélanges .	23
Tableau 9: Récapitulatif des valeurs de la granulométrie	25
Tableau 10: Récapitulatif des valeurs des limites d'Atterberg.....	26
Tableau 11: Formule d'expression du trafic (source CEBTP, 1984).....	30
Tableau 12: Modélisation du renforcement proposé par le CPT	30
Tableau 13: Récapitulatif des résultats de simulation sur le logiciel Alizé avant itération.....	33
Tableau 14: Récapitulatif des résultats de simulation sur le logiciel Alizé après itération.....	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone du projet	5
Figure 2: Variation de la densité sèche maximale avant et après amélioration	14
Figure 3: Variation de la teneur en eau optimale avant et après amélioration	15
Figure 4: Variation du CBR à 98% de l'OPM avant et après amélioration	15
Figure 5: Courbe granulométrique du matériau cru	17
Figure 6: Courbe Proctor Modifié GAL.....	19
Figure 7: Courbe CBR du matériau non amélioré.....	20
Figure 8: Variation des caractéristiques de compactage à l'OPM pour les différents pourcentages de ciment.	21
Figure 9: Courbe granulométrique à 2.5% de ciment avant compactage.....	24
Figure 10: Courbe granulométrique à 2.5% de ciment après compactage.....	24
Figure 11: Limites de liquidité à 2.5% de ciment avant compactage.....	25
Figure 12: Limites de liquidité à 2.5% de ciment après compactage.....	25
Figure 13: Variation de la densité sèche maximale en fonction du taux d'amélioration.....	26
Figure 14: Evolution de la portance CBR en fonction du taux d'amélioration	27
Figure 15: Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du taux d'amélioration au ciment.....	28
Figure 16: Moteur de calcul Alizé.....	31

I. INTRODUCTION

Compte tenu de l'épuisement et de la rareté des graveleux latéritiques de bonne qualité, l'on s'oriente vers d'autres alternatives: amélioration de la qualité des matériaux disponibles pour obtenir les caractéristiques géotechniques de bonne qualité.

Les graveleux latéritiques ont été largement utilisés pour l'exécution des assises de chaussées au Burkina-Faso pour leur bonne tenue et leur cout intéressant. Mais aujourd'hui, avec la croissance exponentielle des poids lourds induite par le volume des échanges économiques, que connaissent les grands axes routiers, de préoccupations récurrentes surgissent:

- ✓ Les graveleux latéritiques naturels présentent actuellement des limites en tant que matériaux de base et de fondation;
- ✓ Les graveleux de bonne qualité se font de plus en plus rares.

L'utilisation systématique des graveleux latéritiques comme matériau de renforcement des assises de chaussées commence à devenir rares dans certaines régions du pays. Cette rareté a pour conséquence l'utilisation des matériaux améliorés ayant des indices CBR répondant aux spécifications du CPT. Pour le cas de notre étude, nous adoptons la technique de l'amélioration des matériaux au ciment.

En 2004, le gouvernement burkinabè a décidé de procéder au renforcement des grands axes routiers avec des matériaux plus élaborés.

C'est dans cette logique que les graveleux latéritiques de la couche de base et le revêtement de la chaussée existante ont été améliorés au ciment pour être déclassés en couche de fondation sur des épaisseurs variables entre 16 et 20cm: *c'est la technique de l'amélioration des graveleux latéritiques au ciment*. Le projet de renforcement du tronçon Boromo Bobo Dioulasso déjà réalisé et sur lequel portent nos travaux de recherche est une application de ladite technique.

Hypothèses :

L'environnement géologique relativement homogène du Burkina Faso donne des possibilités non négligeables en matière de matériaux de construction routière. Il s'agit notamment des graveleux latéritiques. Ils sont utilisés dans le corps de chaussée des routes en terre et des

routes revêtues. Pour ce qui est des routes revêtues, la structure des chaussées comporte une couche de fondation, une couche de base et le revêtement. Les graveleux latéritiques sont utilisés en couche de fondation et en couche de base. Selon les cas, ils doivent répondre à des spécifications techniques.

Le constat a été fait qu'il a toujours été possible de sélectionner des graveleux latéritiques pour être utilisés en couche de fondation. Par contre, des graveleux satisfaisant aux critères d'une couche de base, en particulier en ce qui concerne l'indice portant CBR, deviennent de plus en plus rares et sont difficiles à localiser. En outre, pendant l'exploitation des emprunts, il n'est pas toujours évident que l'on retrouve toujours les caractéristiques géotechniques annoncées lors de l'étude en emprunt. En général, les caractéristiques géotechniques des matériaux baissent après gerbage, approvisionnement, réglage et compactage.

Toutes ces constatations, qui relèvent d'expériences tirées de contrôles géotechniques des chantiers ont conduit à la nécessité d'améliorer les graveleux latéritiques devant être utilisés en couche de base dans bon nombre de cas.

La solution la plus immédiate et la plus rationnelle à laquelle on aurait aussitôt pensé dans le contexte géologique et financier du Burkina Faso est l'amélioration des graveleux latéritiques au concassé de granite (litho stabilisation). Mais vu le trafic élevé du tronçon, une chaussée dont la couche de fondation en latérite stabilisée au ciment serait la plus adéquate.

Objectif général :

Trouver des matériaux améliorés répondant aux caractéristiques géotechniques exigées dans les cahiers des prescriptions techniques (CPT).

Objectifs spécifiques :

- ✓ Analyser les performances des chaussées dont l'assise est constituée de graveleux latéritique naturel ;
- ✓ Analyser les performances des chaussées dont l'assise est constituée de graveleux latéritique amélioré au ciment ;
- ✓ Déterminer le pourcentage de ciment qui donnerait une meilleure portance aux couches d'assise de chaussée semi rigide.

Résultats attendus :

- ✚ Collecter et analyser les résultats de l'amélioration au ciment réalisée lors des travaux de renforcement de la RN1 entre Boromo et Bobo Dioulasso ;
- ✚ Réaliser des essais en laboratoire et proposer le dosage optimum ;
- ✚ Etudier le phénomène de micro-fissures observées avec cette technique

Méthodologie :

Pour mener à bien cette étude, la procédure suivante a été adoptée :

- ✚ Une recherche documentaire des travaux antérieurs en rapport avec la technique de l'amélioration au ciment;
- ✚ Une étude du graveleux latéritique naturel : essais d'identification (analyse granulométrique, limite d'Atterberg) et de portance (Proctor, CBR) ;
- ✚ Une étude du graveleux latéritique amélioré au ciment à plusieurs pourcentages : essais de portance (Proctor, CBR) et essais de résistance (compression simple, traction par fendage) ;
- ✚ Une analyse et interprétations des résultats obtenus sur les mélanges ;
- ✚ Une application de la technique, pour un dimensionnement sommaire du projet objet de notre d'étude ;
- ✚ Des annexes comportant les caractéristiques physiques du matériau étudié.

II. PRESENTATION DU CADRE DE L'ETUDE

1. Présentation de la structure d'accueil

Le Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) a été créé par décret n°68-223/PRES/LP/TP du 13 septembre 1968 sous forme d'établissement public. Il a été transformé par décret n° 94-420/PRES/MICM/MTPHU du 23 Novembre 1994, en Société d'Etat (S.E.) avec un capital porté de 100 à 318 millions FCFA. Son siège social est à Ouagadougou, 1909, boulevard Naaba ZOMBRE. La société jouit d'une autonomie financière et est placée sous la tutelle :

- ✓ Technique du Ministère des Infrastructures et du Désenclavement ;
- ✓ Financière du Ministère de l'Economie et des Finances ;
- ✓ De gestion du Ministère du Commerce, de la Promotion de l'Entreprise et de l'Artisanat.

Le LNBTP a pour missions :

- ✓ La réalisation d'études, de contrôles des travaux routiers, du bâtiment, des barrages et des ouvrages de génie civil et d'expertises en appui au secteur de production du bâtiment et des travaux publics ;
- ✓ La recherche dans le domaine du génie civil et de fondation.

A ce titre, il assure les prestations ci-après :

- ✓ Les études des sols de fondations ;
- ✓ Les études et contrôles géotechniques ;
- ✓ Les expertises en matière de géotechnique dans le domaine des routes, aérodromes, bâtiments, ouvrages d'art et barrages ;
- ✓ Les contrôles de la qualité des matériaux de construction ;
- ✓ Les contrôles techniques en vue de la garantie décennale ;
- ✓ Les contrôles des équipements.

2. Le projet d'étude

a) Description du projet

Long de 169 kilomètres, les travaux de renforcement du tronçon Boromo Bobo Dioulasso a été financé par la Communauté Européenne et l'Etat burkinabè à hauteur de **cinquante six**

milliards neuf cents quarante huit millions huit cents cinq huit mille cinq cents dix huit Franc CFA (56 948 858 518 F CFA).

Les travaux de renforcement du tronçon Bobo Dioulasso-Boromo ont débuté en septembre 2005 et achevé en 2009. Face à la croissance sans cesse du trafic et surtout à la dégradation rapide du tronçon après sa dernière réhabilitation, les autorités ont décidé du renforcement de la structure de chaussée pour supporter le trafic. La couche de roulement est en béton bitumineux (BB) 0/10 de 4cm, la couche de base en grave bitume (GB) 0/14 de 8cm, et enfin la couche de fondation en graveleux latéritique amélioré au ciment de 15cm. L'entrée de la ville de Sya, a été transformée en double voie, de même que des caniveaux d'assainissement y ont été réalisés.

b) Localisation de la zone du projet

Le projet est situé dans les régions des Hauts- Bassins et de la Boucle du Mouhoun.

La région des **Hauts-Bassins** est constituée de trois provinces : Houet , Kéné Dougou , et Tuy et a pour chef-lieu **Bobo Dioulasso**. Sa population était de 1.410.284 en 2006. Quant à la région de la **Boucle de Mouhoun**, elle est constituée de six provinces : les Balés , Banwa , Kossi , Mouhoun , Nayala et Sourou et à pour chef-lieu **Dédougou**. Elle comptait 1.434.847 en 2006, la 2ème région la plus peuplée au Burkina Faso après la région du Centre , et contient 10,5% de tous les Burkinabé.



Figure 1: Localisation de la zone du projet

III. NOTIONS GENERALES :

1) Définition

Une chaussée peut être définie comme une structure plane, conçue et dimensionnée pour garantir l'écoulement du trafic dans de bonnes conditions de visibilité, de sécurité et de confort pour les usagers et assurer une fonction pour une période de service minimale fixée au stade de l'élaboration du projet.

2) Constituant d'une chaussée

Une chaussée est constituée d'une superposition de couches de matériaux différents dont l'ensemble est appelé superstructure et reposant sur une infrastructure. Dans l'infrastructure nous avons la plate-forme et la couche de forme en cas de remblai ; pour la superstructure nous avons la couche de base, la couche de fondation et la couche de surface ou le revêtement.

a) L'infrastructure

L'infrastructure d'une chaussée peut être définie comme le terrassement nécessaire à la constitution de l'assise de la superstructure. Elle est composée d'une plateforme et d'une couche de forme. Le sol d'infrastructure peut être :

- ✚ Soit le terrain naturel (sol convenable) ;
- ✚ Soit un sol à consolider (traitement du sol en place par un liant) ;
- ✚ Soit un sol d'apport (sol à consolider pour supporter le passage des engins de chantier).

b) Rôle de l'infrastructure

La préparation de l'infrastructure vise à :

- ✚ Nivelier le terrain pour la mise en place d'une superstructure d'épaisseur constante ;
- ✚ Présenter une surface de roulement apte à recevoir la circulation des engins durant la construction ;
- ✚ Disposer d'une interface supérieure ou réduisant le risque de remontée d'eau dans la fondation (en conjonction avec un drainage latéral).

c) La superstructure

La superstructure est constituée par l'ensemble des couches de matériaux mis en œuvre au-dessus de l'infrastructure. Elle est composée d'une couche de fondation, d'une couche de base et d'une couche de surface (revêtement).

d) Rôle de la superstructure

D'une manière générale, la superstructure routière doit pouvoir supporter les charges de trafic et assurer leur diffusion selon les niveaux de contraintes supportables par l'infrastructure ; elle doit pouvoir, par ailleurs, subir l'agression des agents atmosphériques sans dégâts. Ces couches assurent les fonctions suivantes :

✚ Couche de surface :

- ✓ Présenter un uni de surface durable, de façon à assurer, durant toute sa durée de vie, un confort de roulement aux véhicules ;
- ✓ Garantir une adhérence optimale pneu-chaussée ;
- ✓ Empêcher l'infiltration des eaux superficielles (imperméabilité) ;
- ✓ Résister sans déformation, ni usure trop rapide, aux efforts de cisaillement transmis par les roues.

La couche de surface est généralement en bitume, en béton de ciment ou en béton bitumineux. Elle doit être de bonne qualité pour protéger l'assise contre l'action du trafic et des intempéries.

✚ Couche de base

La couche de base joue les rôles suivants :

- ✓ Supporter les charges de trafic transmises par le revêtement ;
- ✓ Constituer la couche rigide pour le compactage de la couche de roulement ;
- ✓ Neutraliser les effets négatifs des agents atmosphériques.

Elle est prépondérante et doit être constituée de matériaux suffisamment durs pour résister à l'attrition. Il est spécifié que le matériau cru doit avoir un grand indice portant ($CBR > 80\%$) ou qu'il est traité ($CBR > 160\%$). La couche de base est faite en graveleux naturels ou concassé, de granularité dense ou ouverte le plus souvent, et peut être stabilisée. Dans le cas de notre projet, elle est en grave bitume (GB).

✚ Couche de fondation

C'est la couche immédiatement au-dessus de la plateforme, elle joue comme rôle la répartition de façon homogène les contraintes sur le sol support. Cette couche doit être bien compactée pour éviter les tassements ultérieurs. Les matériaux qui la composent doivent avoir un CBR supérieur ou égal 30%. Entre l'infrastructure et superstructure on interpose une couche de transition, mise en œuvre exclusivement dans le cas d'un déblai. Elle joue :

- ✓ Le rôle anti contaminant en séparant le sol d'assise de la couche de fondation, elle empêche ainsi les particules fines d'un sol d'infrastructure de remonter dans une fondation grossière ;
- ✓ Le rôle de drainage de la fondation ;
- ✓ Le rôle d'empêcher la montée capillaire de l'eau provenant de la nappe phréatique.

Son inconvénient est qu'elle est difficile à mettre en œuvre. On a tendance à la remplacer par :

- ✓ Une feuille de matière plastique ou géotextile posé sur la plateforme ;
- ✓ Un traitement à la chaux ou au ciment de la plateforme.

3) Types de chaussée

Un véhicule transmet une charge sous forme de forces verticales par l'intermédiaire des pneumatiques. Le sol n'étant pas assez porteur ; il est donc nécessaire d'interposer un écran qui aura pour but de réduire et de répartir les charges. La chaussée constitue cet écran. Selon le mode de fonctionnement mécanique de la chaussée, nous avons des **chaussées souples**, des **chaussées semi rigides** et des **chaussées rigides**.

a) Les chaussées souples ou flexibles

Elles sont constituées d'une couche bitumineuse en surface au-dessus d'une couche de base et d'une couche de fondation en matériaux granulaires traités ou non. La chaussée souple distribue les efforts de surface à travers les couches de base et de fondation. Cette distribution se fait de façon à ce que l'effort sur la plateforme soit compatible avec la résistance de l'infrastructure et du sol support. La caractéristique d'une chaussée flexible est son aptitude de se déformer sans se fissurer.

b) Les chaussées semi rigides

Une chaussée semi rigide est une chaussée avec une couche de surface en béton bitumineux reposant sur une couche de base en matériaux stabilisés aux liants hydrauliques et une couche de fondation granulaire : c'est le type de chaussée de notre étude. Les couches bitumineuses assurent :

- ✚ La qualité d'uni de surface ;
- ✚ La limitation de la remontée des fissures transversales de la couche de matériaux traités en liants hydrauliques.

La couche de base diffuse et atténue les efforts transmis de par sa rigidité élevée offerte par le liant hydraulique.

c) Les chaussées rigides

Elles sont constituées d'une dalle de béton en ciment portland reposant directement sur la couche de fondation ou sur la couche de forme. La dalle de béton joue un double rôle : elle est à la fois la surface de roulement et la couche de base. Elle répartit les efforts de surface dus aux charges de cisaillement sur une large surface afin d'éviter une déformation sur la couche de fondation ou sur l'infrastructure.

IV. LA TECHNIQUE DE L'AMELIORATION DES GRAVELEUX LATERITIQUES AU CIMENT

1. Historique de l'amélioration au ciment

Les premières expériences ont été menées dans les années 50 aux Etats Unis (USA) et en France. Depuis 1985, cette technique n'a cessé de gagner en intérêt et aujourd'hui elle démontre toute son efficacité. En dehors des pays mentionnés, cette technique est utilisée partout ailleurs dans le monde et particulièrement en Afrique subsaharienne pour palier à la raréfaction des matériaux de bonne qualité pour les couches de fondation et de base pour des nombreux chantiers routiers. Cette évolution importante est due aux trois facteurs suivants :

- ✚ Une meilleure connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux stabilisés au moyen de ciment ainsi que du comportement de routes semi-rigides ;
- ✚ Une utilisation de nouvelles machines plus puissantes avec une plus grande profondeur de travail, de meilleures capacités de mélange et de plus hauts rendements, ce qui permet une finition et un coût moindre ;
- ✚ L'impulsion principale est sans conteste la bonne adéquation entre d'une part les avantages environnementaux de cette technique par rapport au renforcement classique de la chaussée et d'autre part le souci croissant pour un meilleur respect du milieu (**Division des infrastructures routières subdivisées de la Belgique, Gembloux : Mars 1995**).

2. Principe

Le ciment incorporé à un sol développe un réseau de liaisons entre les grains qui les composent. La réaction d'hydratation du ciment présente l'avantage d'une évolution rapide, ce qui permet d'obtenir les résistances mécaniques nécessaires dans un délai court.

3. Mise en œuvre

Les améliorations au ciment ont concerné principalement les couches de base, et les épaisseurs mises en œuvre varient généralement entre 10 et 25 cm. Certains tronçons d'essais ont cependant été traités sur une épaisseur relativement réduite de 7.5 cm.

Les teneurs en ciment sont déterminées en laboratoire à partir du critère de résistance à la compression simple, résistance pour laquelle une valeur minimale de 15 à 25Kg/ cm² est généralement admise.

Les principales opérations de mise en œuvre des sols ciment ont comporté :

- ✚ L'épandage à la main du ciment selon les dosages prescrits ;
- ✚ La réalisation du mélange in situ au moyen d'un pulvimixer ;
- ✚ Le compactage au rouleau à pneus suivi d'une finition au cylindre lisse ;
- ✚ La réalisation d'un enduit de cure ou d'une couche d'accrochage.

a) L'épaisseur de la couche à traiter

Elle dépend du type de route et du trafic qu'elle supporte. A titre indicatif, le tableau suivant fournit les ordres de grandeur pour quelques cas types :

Tableau 1: Epaisseur des couches à traiter

CATEGORIE DE LA ROUTE OU TRAFIC	EPPAISSEUR A TRAITER (cm)
Piste cyclable ou rue piétonnière	7 à 10 cm
Routes privées, parkings, routes à trafic léger	10 à 15 cm
Routes à trafic lourd élevé	15 à 25 cm

b) Le dosage en liant

En fonction de la nature du sol et des caractéristiques recherchées, le dosage en ciment des sols améliorés est de l'ordre de 2 à 3% du poids du sol sec pour une épaisseur de 10 à 20 cm.

V. LES GRAVELEUX LATÉRITIQUES

1. Définition :

Le terme latérite fait son apparition dans la littérature scientifique au début du 19^e Siècle pour désigner un matériau servant dans la construction dans la région de Malabar (Inde). Ce terme vient du latin « **later** » qui signifie brique (AUTRET, 1983).

La latérite est une roche résiduelle rougeâtre issue d'un processus d'altération de roches meubles silico-alumineuses avec départ de la silice et enrichissement relatif en alumine : on utilise la partie graveleuse et brèche.

Du point de vue de l'ingénieur routier, on parlera de **graveleux latéritique**. 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 ; Il entre alors dans les catégories des sols fins.

2. Les graveleux latéritiques utilisés au Burkina Faso

Les graveleux latéritiques constituent un matériau très variable. L'épaisseur des couches exploitables varie entre 20 cm et 50 cm, se situant beaucoup plus autour de 40 cm et très rarement entre 50 et 100 cm de profondeur.

Les graveleux latéritiques du Burkina Faso présentent généralement les spécificités techniques suivantes :

- ✚ Granulométrie : 0/40 ;
- ✚ Pourcentage de fines passant au tamis de 80 µm : 30% ;
- ✚ Refus au tamis de 2mm : 50 à 80% ;
- ✚ Indice de portance CBR : 18 à 85.

Ces spécificités sont issues de la classification internationale HRB, A24(0) à A26(0) (Pierre LOMPO, 1980).

3. Utilisation des graveleux latéritiques en construction routière

Il n'y a pas de moyens pratiques simples pour établir une distinction utile du point de vue de l'ingénieur. En effet, les seuls critères qui permettent de différencier les matériaux latéritiques et ceux qui ne sont que partiellement latérisés, sont les propriétés chimiques et minéralogiques. Leurs propriétés sont suffisamment proches les unes des autres pour que la distinction qu'on serait tenté de faire entre eux n'ait que peu de signification pour l'ingénierie.

Les latérites sont utilisées dans le corps des chaussées des routes en terre et des routes revêtues. Dans le cas des routes en terre, elles sont utilisées en couche de roulement, et dans le cas des routes revêtues, elles interviennent en couche de fondation et en couche de base. Dans l'un ou l'autre des cas, les latérites doivent répondre à des spécifications selon la couche concernée (KANAZOE Marietou, 2011).

Pour le cas particulier de la couche de fondation des chaussées qui fait l'objet de la présente étude, la latérite doit satisfaire aux spécifications suivantes :

- ✚ L'indice portant CBR à 95% de la densité sèche maximale du Proctor Modifié et après 4 jours d'imbibition doit être supérieur ou égal à 40;
- ✚ L'indice portant CBR à 98% de la densité sèche maximale du Proctor Modifié et après 4 jours d'imbibition doit être supérieur ou égal à 80;
- ✚ L'indice de plasticité < 15 ;
- ✚ Pourcentage de fines ≤ 25 ;
- ✚ La densité sèche de l'OPM $\geq 2.1 \text{ t/m}^3$;
- ✚ Le fuseau granulométrique admis est le suivant : (10mm $< 75\%$; 2mm $< 35\%$ et 0.08mm $< 25\%$).

VI. LE CIMENT

1. Définition :

Les ciments sont des liants hydrauliques c'est-à-dire des poudres minérales fines qui forment avec l'eau une pâte faisant prise et durcit progressivement. Les ciments sont formés des constituants anhydres renfermant essentiellement de la silice, de l'alumine et

de la chaux et dont le durcissement est principalement dû à la formation par combinaison de ses constituants anhydres avec l'eau.

Le ciment est un mélange intime des principaux produits suivants : le **clinker**, le **laitier**, la **pouzzolane** et les **fillers**.

2. Différents types de ciments

Il existe plusieurs types de ciments en bâtiment et travaux publics présentant des caractéristiques chimiques différentes en fonction de leurs constituants : il s'agit de :

- ✚ **Ciment Portland Artificiel (CPA)**: contient au moins 97% de clinker plus fillers ;
- ✚ **Ciment Portland Composé(CPJ)** : contient au moins 65% de clinker et un ou plusieurs des autres composants ;
- ✚ **Ciment à Haut Fourneau(CHF)** : contient 40 à 75% de laitier, au plus 25% et au plus 3% de fillers ;
- ✚ **Ciment de Laitier au Clinker(CLK)** : contient au moins 80% de laitier, au plus 20% de clinker et au plus 3% de fillers ;
- ✚ **Ciment au Laitier et aux Cendres (CLC)** : contient 25 à 60% de clinker, 20 à 45% de laitier, 20 à 45% de cendres et au plus 3% de fillers.

Les ciments se répartissent en quatre classes de résistance en fonction de la valeur de la résistance à la compression à 28 jours d'un mortier normalisé : ce sont les classes 32.5, 42.5, 52.5 et HP (haute performance). Les ciments **CPA 45 d'Abidjan** répondant aux spécifications du CPT ont été utilisés pour effectuer nos différents essais.

VII. COLLECTE ET ANALYSE DES RESULTATS DE L'AMELIORATION

AU CIMENT REALISEE LORS DES TRAVAUX DE RENFORCEMENT DE LA RN1 ENTRE BOROMO ET BOBO DIOULASSO

Les travaux de butimage du tronçon Boromo Bobo Dioulasso ont été achevés en 2009. En effet, pour mener à bon port notre étude, nous avons fait recours aux archives du LNBTP pour collecter et analyser les résultats des essais obtenus lors du renforcement.

1) Collecte des résultats de l'amélioration au ciment réalisée lors des travaux de renforcement de la RN1 entre Boromo et Bobo Dioulasso

Les résultats disponibles aux archives du LNBTP sont : la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale, le CBR (95% et 98% de l'OPM), le pourcentage des fines, la limite de liquidité et l'indice de plasticité du matériau naturel et la densité sèche maximale, la teneur en eau optimale, le CBR (95% et 98% de l'OPM), le dosage en ciment du matériau amélioré. Le récapitulatif est consigné en **annexe III** pour plus de détails.

2) Analyse des résultats de l'amélioration au ciment réalisée lors des travaux de renforcement de la RN1 entre Boromo et Bobo Dioulasso

a) Synthèse des résultats des essais d'identification et de portance

Tableau 2: Synthèse des résultats des essais d'identification et de portance

Essai	GRANULO	LIMITES D'ATTERBERG		CBR GAL		PROCTOR MODIFIE			
	% FINES	WL	IP	95%	98%	γ_{dmax}	ω_{OPM}	γ_{dmax}	ω_{OPM}
Maximum	11,5	25	11	2(83)	3(119)	2,44	15,4	2,35	11,4
Minimum	78	65	35	98(360)	156(500)	1,83	6,5	2,09	7,9
Moyenne	20,8	45,6	21,2	41,8(177)	68,9(232,1)	2,23	8,9	2,2	9,6

Ce tableau nous donne une vue globale sur les résultats des essais réalisés lors des travaux de renforcement.

b) La densité sèche maximale avant et après amélioration

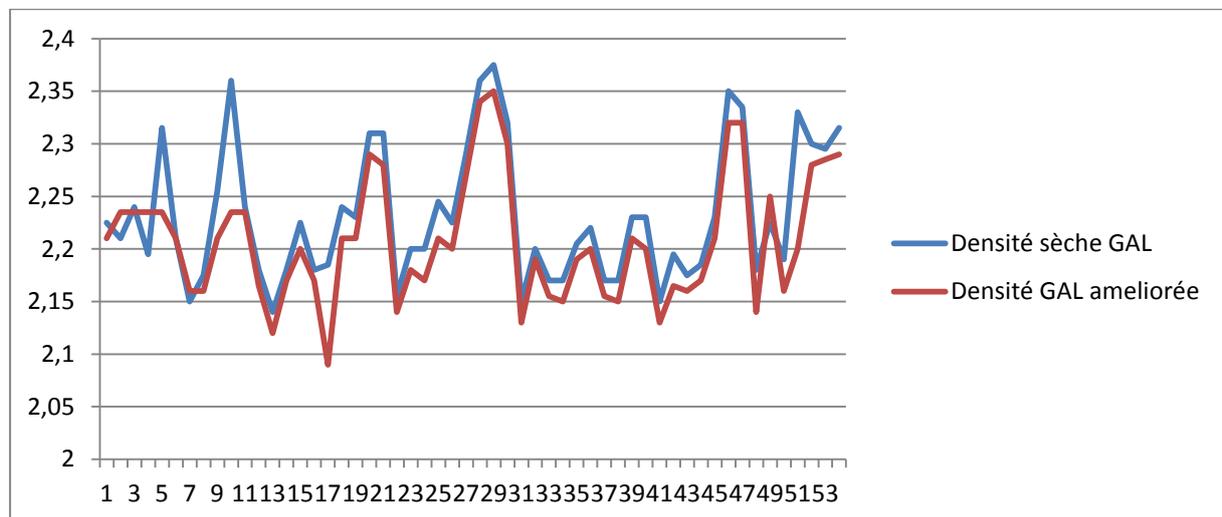


Figure 2: Variation de la densité sèche maximale avant et après amélioration

Cette figure nous donne la variation de la densité sèche maximale avant et après amélioration. En effet, nous remarquons que la densité avant compactage (courbe en bleu) décroît après amélioration (courbe en rouge).

c) La teneur en eau optimale avant et après amélioration

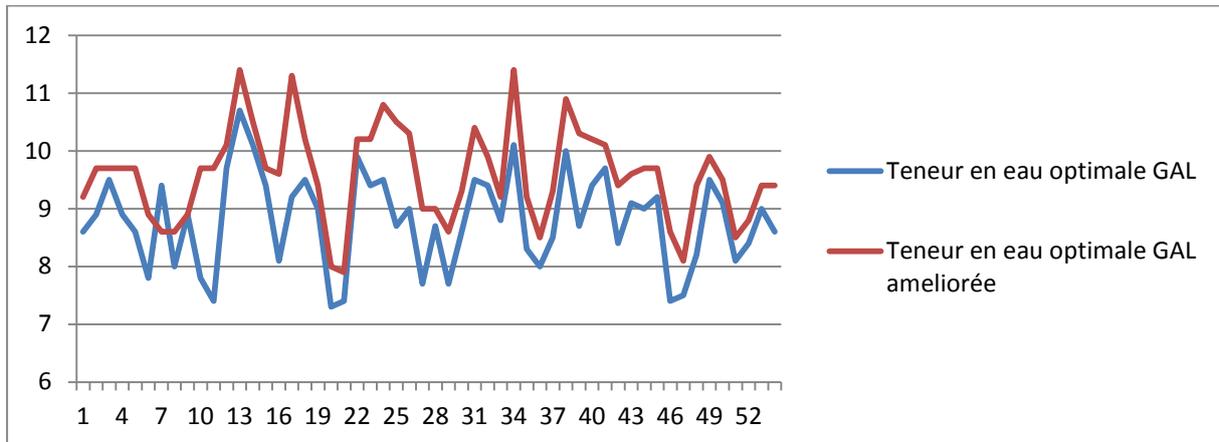


Figure 3: Variation de la teneur en eau optimale avant et après amélioration

Par contre, la teneur en eau optimale croit après amélioration (courbe en rouge). Ces résultats confirment les études antérieures sur le domaine.

d) Le CBR à 98% de l'OPM avant et après amélioration

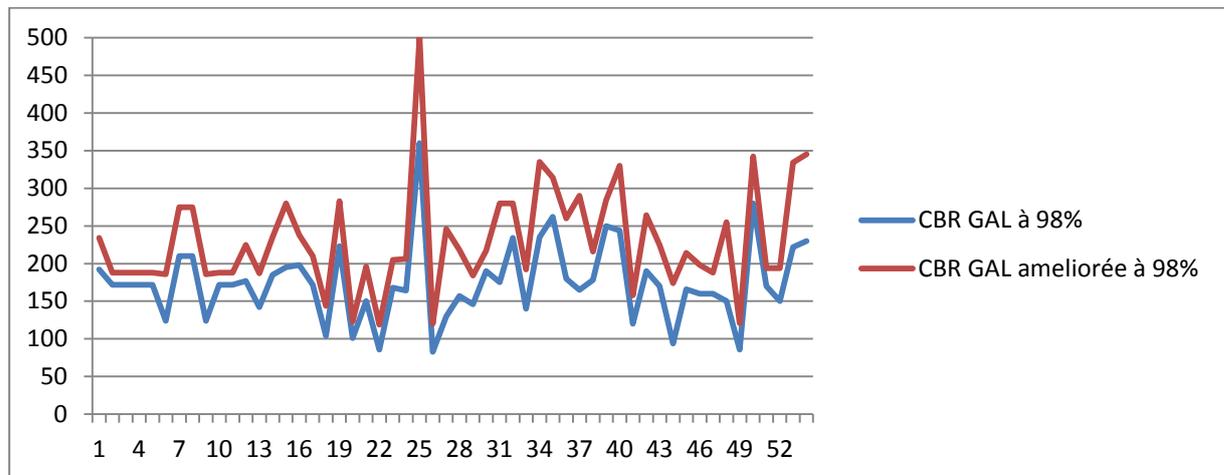


Figure 4: Variation du CBR à 98% de l'OPM avant et après amélioration

Nous remarquons que les valeurs de CBR après compactage sont largement au-dessus de celles de CBR avant amélioration. Cette évolution est due à l'incorporation du taux de ciment dans le matériau.

En analysant les résultats obtenus, nous nous rendons compte que les résultats des essais effectués sont dans l'ensemble conformes au Cahier des Prescriptions Techniques (CPT).

VIII. ETUDE EXPERIMENTALE

Les travaux de renforcement du tronçon Boromo Bobo Dioulasso étaient achevés en 2009. Cependant, pour réaliser les différents essais de notre étude, la grave argileuse latéritique de l'emprunt n°1 (situé dans la localité de Toudouweogo à une dizaine de kilomètres de Ouagadougou) des travaux d'aménagement et de bitumage de l'avenue de la Liberté (ancienne Avenue 56) à Ouagadougou a été choisi. Les caractéristiques de ce matériau se convergent à celles utilisées sur le tronçon Boromo Bobo Dioulasso.

1) Essais sur la grave argileuse latéritique (GAL)

Avant de faire les essais sur le matériau, celui-ci doit passer dans la section échantillonnage du laboratoire. L'échantillonnage est l'opération qui a pour but de prélever une fraction d'un matériau telle que la partie prélevée soit représentative de l'ensemble de l'échantillon. Il peut s'effectuer de deux façons :

- ✚ Par quartage lorsque la quantité de matériau est importante ;
- ✚ Au moyen d'échantillonneurs lorsque la quantité du matériau est peu importante.

a. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est un essai qui consiste à étudier la granulométrie du sol, c'est-à-dire la distribution des grains suivant leur dimension en déterminant par pesée l'importance relative des classes de grains de dimensions bien définies. Elle se fait par tamisage pour la fraction de sol dont le diamètre des grains est supérieur à 0,08 mm et par sédimentométrie pour la fraction de sol dont le diamètre des grains est inférieur à 0,08mm.

Dans le cadre de notre étude, nous nous limiterons à l'analyse granulométrique par tamisage, quel que soit le % de fines.

L'opération de tamisage a été effectuée à travers une colonne de tamis dont l'ouverture intérieure des mailles des tamis varie de 40 mm à 80µm soumise à des vibrations. Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage (voir annexe) sont reportés sur un diagramme semi-logarithmique appelé courbe granulométrique ci-dessous :

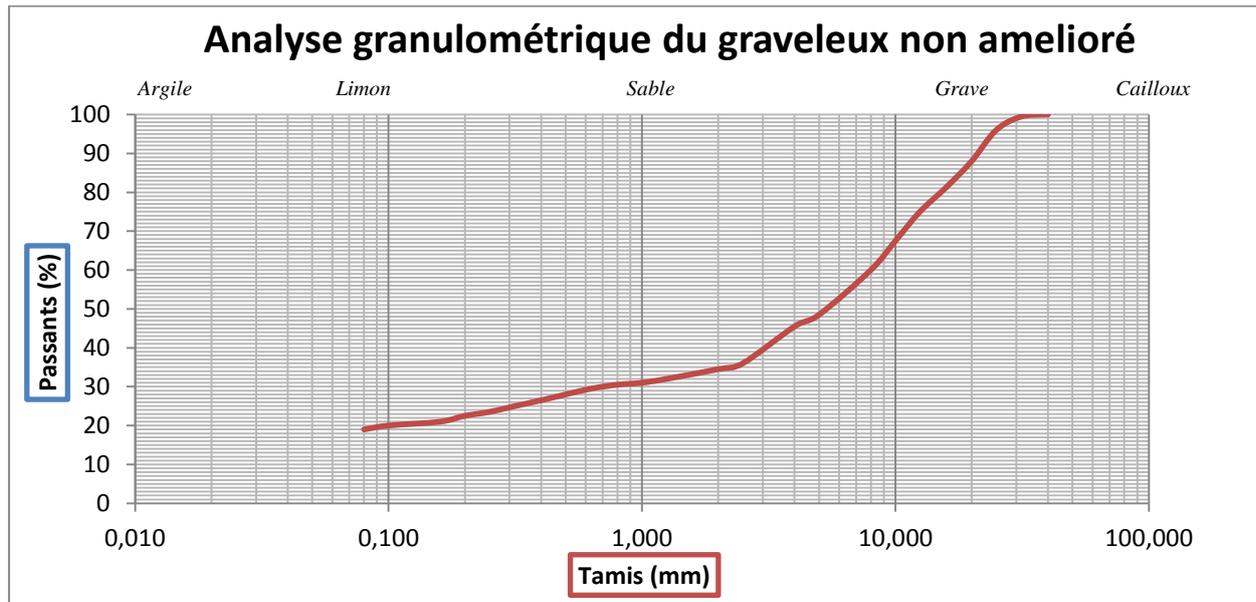


Figure 5: Courbe granulométrique du matériau cru

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

$D_{10} = 88\%$, $D_{30} = 100\%$, $D_{60} = 100\%$. Avec :

- ✓ D_{10} : diamètre du grain (mm) correspondant à 10% de passants ;
- ✓ D_{30} : diamètre du grain (mm) correspondant à 30% de passants ;
- ✓ D_{60} : diamètre du grain (mm) correspondant à 60% de passants.

On détermine alors les caractéristiques du sol par deux coefficients :

✚ *Le coefficient d'uniformité* ou de HAZEN : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 1.13$;

✚ *Le coefficient de courbure* : $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = 1.13$.

Le coefficient d'uniformité inférieur à 2 signifie que la granulométrie est **uniforme** tandis que le coefficient de courbure compris entre 1 et 3 cela signifie que le matériau est **bien gradué**.

b. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des teneurs en eau pondérales correspondantes à des états particuliers d'un sol.

- ✚ **La limite de liquidité** : C'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états liquide et plastique, on recherche la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol remanié placé dans une coupelle doit se refermer sur à peu près un centimètre (1cm) sous l'effet d'environ 25 chocs répétés.
- ✚ **La limite de plasticité** : C'est la teneur en eau d'un sol remanié au point de transition entre les états plastique et solide, on recherche la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionnée manuellement se fissure.
- ✚ **Indice de plasticité I_p** : il se déduit des limites par la différence $I_p = w_L - w_p$

Dans le cadre de cette étude, l'essai a donné les résultats suivants qui figurent dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3: Les limites d'Atterberg de la GAL

Limite de liquidité WL(%)	25
Limite de plasticité WP(%)	14
Indice de plasticité IP (%)	11

c. Proctor Modifié :

L'essai consiste à déterminer pour des teneurs en eau croissantes ω les densités sèches obtenues en compactant chaque fois le matériau dans les mêmes conditions. Le compactage de l'échantillon ne doit pas contenir d'éléments supérieurs à 20 mm se fait par couches d'épaisseurs déterminée sous un nombre donné de coups (56) d'une dame de caractéristiques normalisées. Les résultats des valeurs sont dans le tableau 1 de l'annexe.

Les résultats se présentent sous la forme d'une courbe dont en abscisse : la teneur en eau optimale et en ordonnée : la densité sèche maximale. Cette courbe à un maximum dit Optimum Proctor Modifié (OPM). Ce maximum définit la teneur en eau optimale ω_{opt} et la densité sèche maximale ρ_{dmax} .

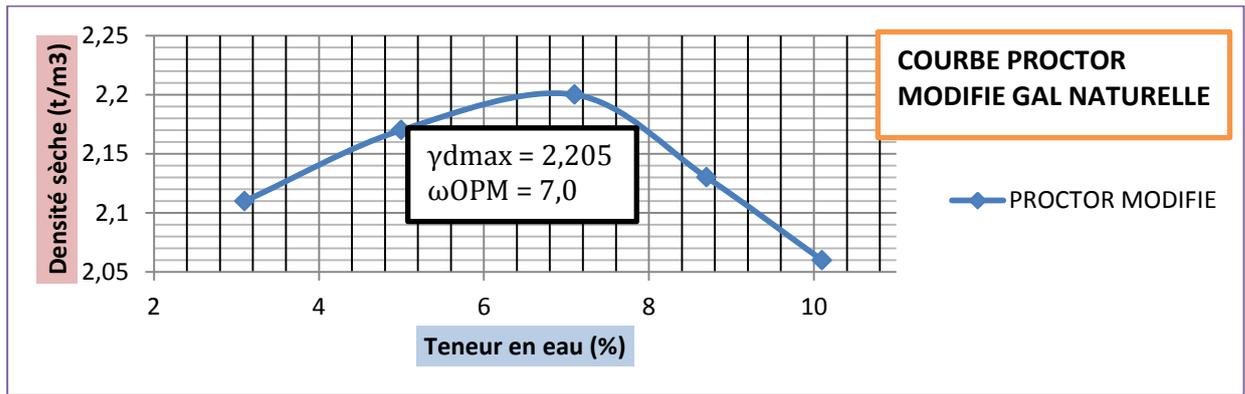


Figure 6: Courbe Proctor Modifié GAL

Les résultats obtenus pour cet essai sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 4: Résultats de l'essai Proctor Modifié

ESSAI PROCTOR MODIFIE	
Teneur en eau à l'OPM (%)	7.0
Densité sèche à l'OPM (t/m3)	2.205

d. Essai CBR

L'essai CBR est un essai de portance qui a pour but de voir comment le matériau se comporte au passage des charges, et permet de déterminer l'épaisseur des couches de chaussées. Il est obtenu en mesurant les forces à appliquer sur un poinçon cylindrique de section 19.35 cm² pour le faire pénétrer dans un échantillon de sol à la vitesse constante de 1.27mm/mn. Les valeurs particulières des deux sols ayant provoqué les enfoncements de 2.5 et 5mm sont alors aux valeurs de référence de 13.35 et 20 KN correspondant aux forces observées sur un matériau de référence aux enfoncements.

L'indice CBR est défini conventionnellement comme étant le plus fort du rapport :

$$CBR = \max \{ F(2.5mm)/13.35 ; F(5mm)/20 \}, F \text{ en KN}$$

Après le calcul des densités sèches des matériaux compactés à 56, 25 et 10 coups et le poinçonnement des trois moules imbibés pendant quatre jours, il a été déterminé les indices portants immédiats (IPI) résumés dans le tableau suivant :

Tableau 5: Résultats de l'essai CBR sur le matériau non amélioré

ESSAI DE PORTANCE CBR				
Nombre de coups	Densité sèche	Indice de portance (IP)	Teneur en eau (%)	
			Moulage	Après Essai
10 coups	1,975	22	8,3	10,7
25 coups	2,095	35	8,3	9,7
56 coups	2,21	75	8,3	8,9

A partir de ces données, la courbe CBR ci-dessous a été tracée et elle illustre l'évolution de l'indice CBR de la grave argileuse latéritique (GAL) en fonction des densités sèches :

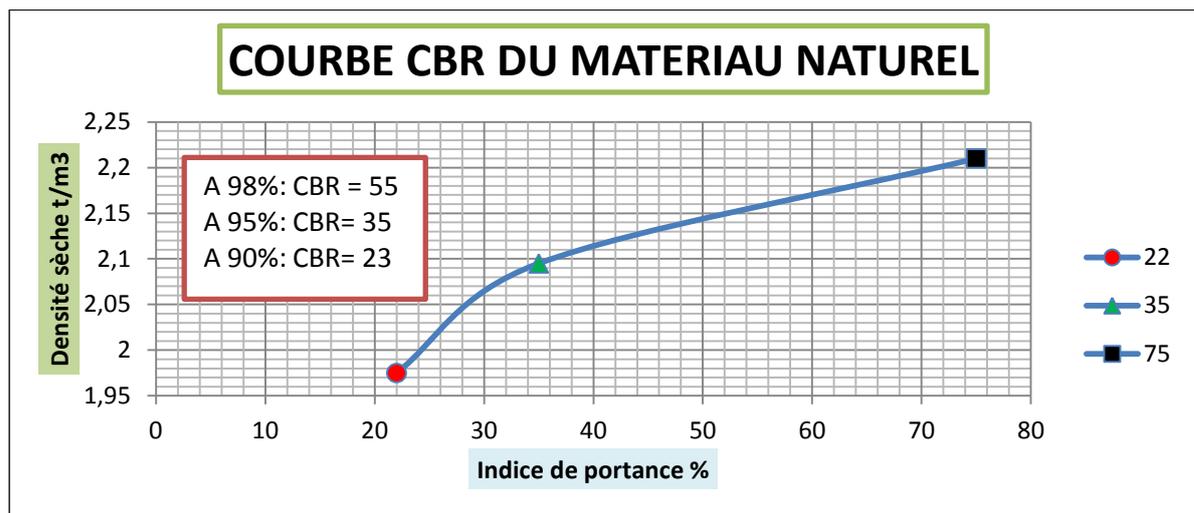


Figure 7: Courbe CBR du matériau non amélioré

Les portances à 95% et 98% de l'optimum Proctor modifié (OPM) ont été déterminées

✚ CBR (95% OPM) = 35 ;

✚ CBR (98% OPM) = 55.

Les portances trouvées ne vérifient pas les conditions du Cahier de Prescriptions Techniques (CPT) : CBR à 95% de l'OPM < 40 et CBR à 98% OPM < 80. Il y a donc nécessité d'améliorer ce matériau.

Tableau 6: Synthèse des différents résultats obtenus pour la GAL naturelle

Essai	GRANULOMETRIE	LIMITES D'ATTERBERG		CBR		PROCTOR MODIFIE	
	% FINES	WL	IP	95%	98%	γ_{dmax}	ω_{OPM}
	19	25	11	35	55	2,205	7,0

2) Essais sur la grave argileuse latéritique améliorée au ciment à différents dosages

Dans le souci d’améliorer de façon optimale les caractéristiques mécaniques des matériaux de moindre portance utilisés dans la structure de chaussées, la stabilisation à différents dosages du ciment de la grave argileuse latéritique a été effectuée ; car la qualité des matériaux a une influence non négligeable sur la bonne tenue de la route. Notre préoccupation est de densifier le matériau qui constituera l’assise de la chaussée. L’essai Proctor Modifié a été réalisé pour les dosages suivants : 1, 2, 2.5, 3 et 4% et celui du CBR à 1, 2, 2.5 et 3% car à 4%, l’anneau de 60KN ne pouvait plus continuer de peur de casser la manivelle.

a. Proctor Modifié

Les matériaux prélevés sur le chantier passent par la section échantillonnage où les prises d’essais sont réparties d’une manière quasi équitable et représentative. Pour l’amélioration, la quantité du ciment est pesée tout en tenant compte du taux d’amélioration. Les différents mélanges sont soumis à l’essai Proctor Modifié et les différentes courbes Proctor de ces divers mélanges sont représentées ci-dessous :

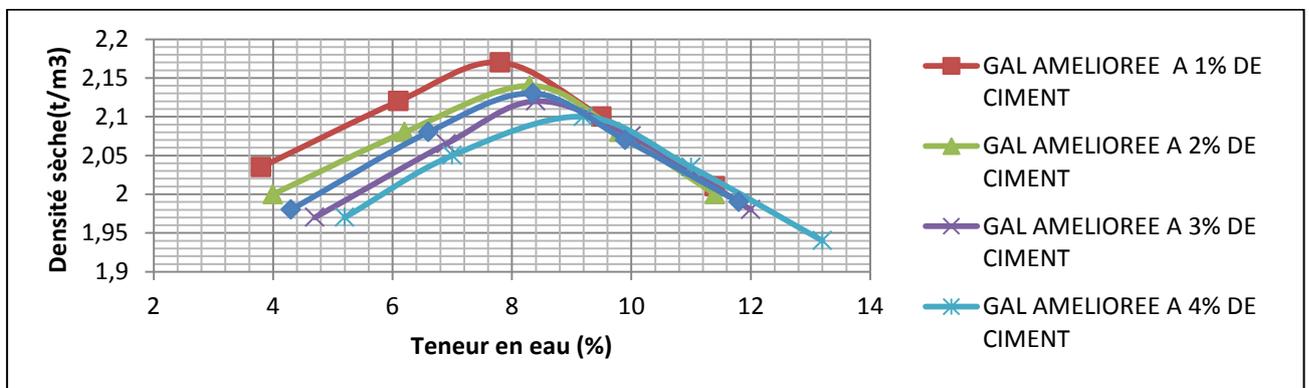


Figure 8: Variation des caractéristiques de compactage à l’OPM pour les différents pourcentages de ciment.

Le traitement au ciment réduit la valeur de la densité sèche maximale et augmente la valeur de la teneur en eau optimale. L'augmentation de la teneur en eau optimale est due à l'accroissement de la surface totale des particules des mélanges traités par les grains fins du ciment additionné, puis la raison de la diminution de la densité sèche maximale est le faible poids volumique du ciment.

A partir de ces courbes, il a été déterminé la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale correspondantes pour chaque dosage, qui permettraient de procéder à l'essai CBR.

b. Essai CBR

Les matériaux qui ont servi à l'essai CBR ont été pesés au préalable tout en respectant le taux d'amélioration du ciment. Après trois jours air et quatre jours d'immersion, nous avons procédé au poinçonnement des moules. Les courbes CBR ont été tracées pour les différents échantillons de latérite améliorée à 1, 2, 2.5 et 3%. Les indices CBR ont été déterminés à 95% et 98% de l'Optimum Proctor Modifié (OPM). Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7: Récapitulatif des résultats des essais CBR sur les mélanges

Matériau	CBR A 95% OPM	CBR A 98% OPM
GAL améliorée à 1% de ciment	148	206
GAL améliorée à 2% de ciment	232	312
GAL améliorée à 2,5% de ciment	265	340
GAL améliorée à 3% de ciment	425	515

c. Essai de compression simple

On utilise une éprouvette cylindrique normalisée qu'on écrase dans le sens longitudinal au moyen d'une pression agissant à vitesse constante. Deux disques de mêmes diamètres que l'éprouvette, sont placés à deux extrémités. A l'aide d'un piston relié à un anneau dynamométrique, on exerce à vitesse constante une charge sur le disque supérieur ; on note la valeur de la résistance après rupture de l'éprouvette.

Pour cette série d'essais, les éprouvettes sont fabriquées avec les moules fendus selon la procédure de l'essai Proctor modifié, avec la teneur en eau optimale déjà définie.

La résistance à la compression simple est déterminée à partir d'une série de trois éprouvettes (10, 25 et 56 coups) à un âge de sept (07) jours air. Les résultats sont consignés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 8: Récapitulatif des résultats des essais de la compression simple sur les mélanges

POURCENTAGE EN CIMENT	RESISTANCE A LA COMPRESSION SIMPLE EN Kg/Cm ²		
	10 COUPS	25 COUPS	56 COUPS
GAL améliorée à 1%	10,7	19,3	22,3
GAL améliorée à 2%	11,26	24,67	31,12
GAL améliorée à 2,5%	12,56	25,01	31,35
GAL améliorée à 3%	14,2	25,75	31,74
GAL améliorée à 4%	17,03	35,93	41,25

Les résistances à la compression simple croissent avec le pourcentage de ciment.

d. Essai de traction par fendage à 2.5 % de ciment

Objectif de l'essai : le but de l'essai est de connaître la résistance à la traction de l'éprouvette du sol ciment.

On procède généralement par essai de fendage sur éprouvette cylindrique conformément à la norme EN 12390- 6. Dans cet essai, on applique à l'éprouvette un effort de compression le long de deux génératrices opposées. Cet effort de compression induit des contraintes de traction dans le plan passant par ces deux génératrices. La rupture, due à ces contraintes de traction, se produit dans ce plan.

Nous obtenons les contraintes suivantes en fonction de nombres de coups :

- ✚ 56 coups : **0.82 MPa** ;
- ✚ 25 coups : **0.66 MPa** ;
- ✚ 10 coups : **0.45 MPa**.

Toutes ces valeurs sont supérieures à **0.3 MPa**, valeur exigée par le CPT.

3) Analyse granulométrique et Limites d'Atterberg à 2.5% de ciment avant et après compactage.

Ces essais ont été effectués pour voir le comportement du matériau à 2.5% de ciment avant et après compactage avec celui à l'état naturel.

a) Analyse granulométrique à 2.5% de ciment avant compactage

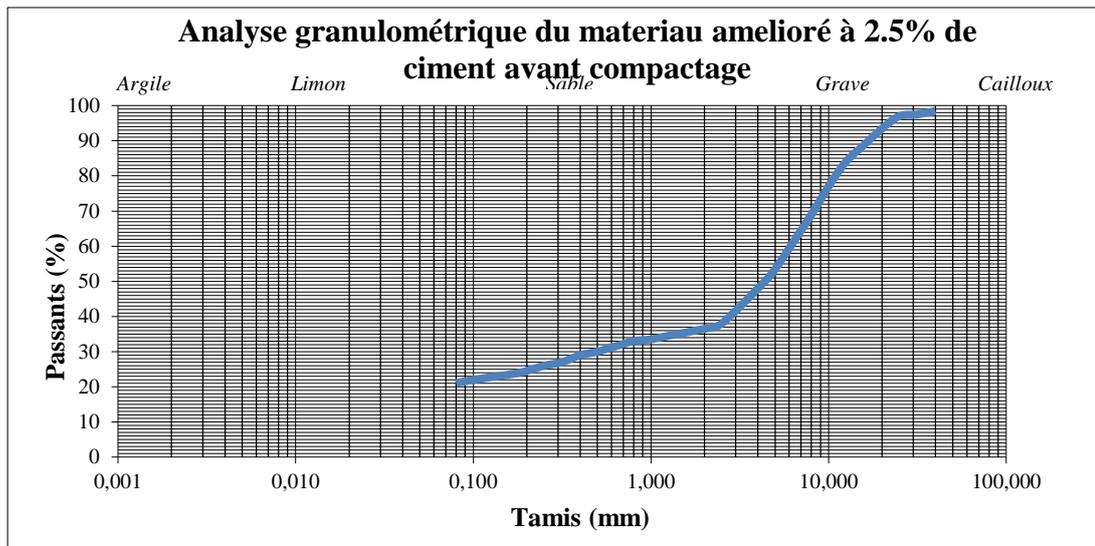


Figure 9: Courbe granulométrique à 2.5% de ciment avant compactage

b) Analyse granulométrique à 2.5% de ciment après compactage

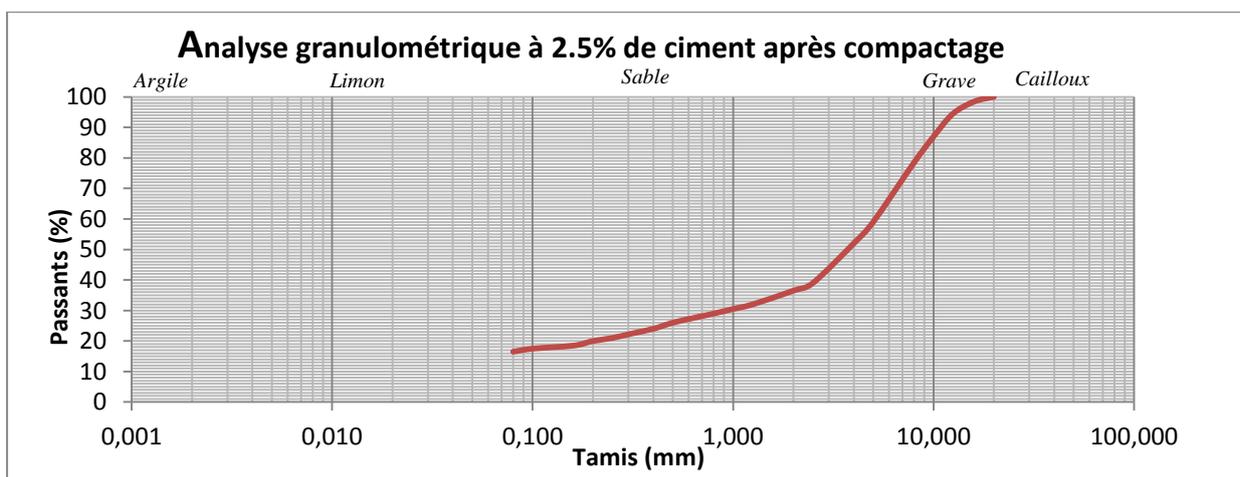


Figure 10: Courbe granulométrique à 2.5% de ciment après compactage

D'après les courbes ci-dessus, nous avons déterminé le Cu, le Cc et le pourcentage des fines.

Les valeurs sont consignées dans le tableau ci-après :

Tableau 9: Récapitulatif des valeurs de la granulométrie

ESSAI		GAL CRUE	GAL A 2,5% DE CIMENT AVANT COMPACTAGE	GAL A 2,5% DE CIMENT APRES COMPACTAGE
ANALYSE GRANULOMETRIQUE	Coefficient d'uniformité	1,13	1,26	1,19
	Coefficient de courbure	1,13	1,33	1,19
	Pourcentage des fines	19	21	16,5

c) Limites d'Atterberg à 2.5% de ciment avant compactage

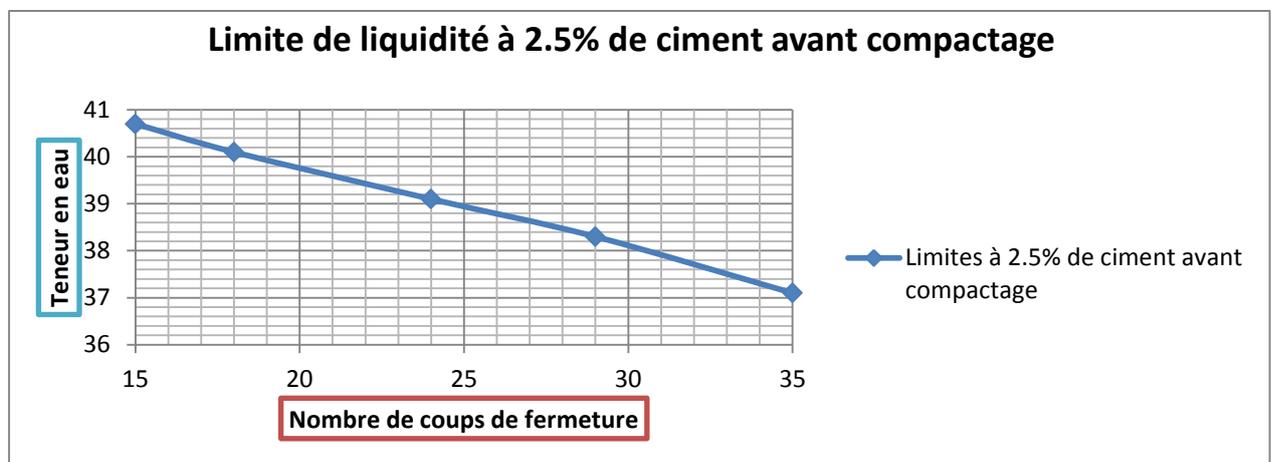


Figure 11: Limites de liquidité à 2.5% de ciment avant compactage

d) Limites d'Atterberg à 2.5% de ciment après compactage

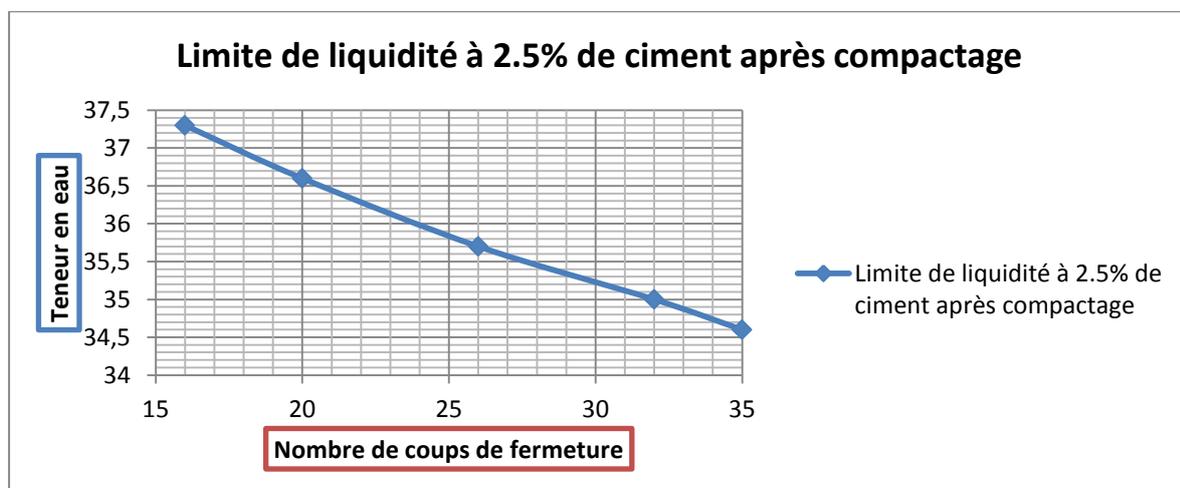


Figure 12: Limites de liquidité à 2.5% de ciment après compactage

D'après les courbes ci-dessus, nous avons déterminé la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité. Les valeurs sont consignées dans le tableau ci-après :

Tableau 10: Récapitulatif des valeurs des limites d'Atterberg

ESSAI		GAL CRUE	GAL A 2,5% DE CIMENT	GAL A 2,5% DE CIMENT APRES COMPACTAGE
LIMITES D'ATTERBERG	Limite de liquidité	25	39	36
	Limite de plasticité	14	21	19
	Indice de plasticité	11	18	17

IX. INTERPRETATIONS DES RESULTATS

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

L'essai Proctor modifié a été réalisé sur la GAL améliorée à plusieurs pourcentages de ciment. Pour chaque mélange, la densité sèche à l'OPM a été déterminée. Le graphe ci-dessous donne la variation de la densité sèche maximale en fonction du taux d'amélioration :

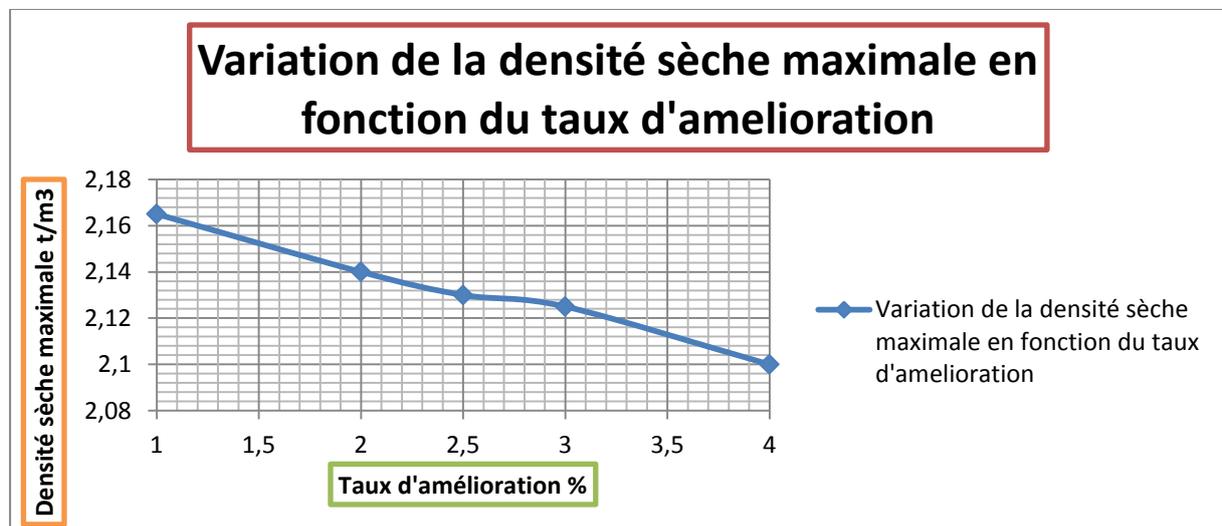


Figure 13: Variation de la densité sèche maximale en fonction du taux d'amélioration

La courbe montre que la latérite objet de cette étude atteint une densité sèche maximale lorsqu'elle est améliorée à 1% de ciment. La diminution de la densité sèche maximale est due au faible poids volumique du ciment.

La densité sèche maximale de la latérite décroît au fur et à mesure que le dosage augmente. L'amélioration à 1 % de ciment atteint une densité sèche maximale de 2,165 t/m³. Ce résultat est inférieur à la densité sèche maximale de la latérite naturelle qui est de 2,205 t/m³.

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

Le graphique ci-dessous donne l'évolution de la portance CBR à 95% et à 98% de l'OPM de la latérite améliorée en fonction du taux d'amélioration :

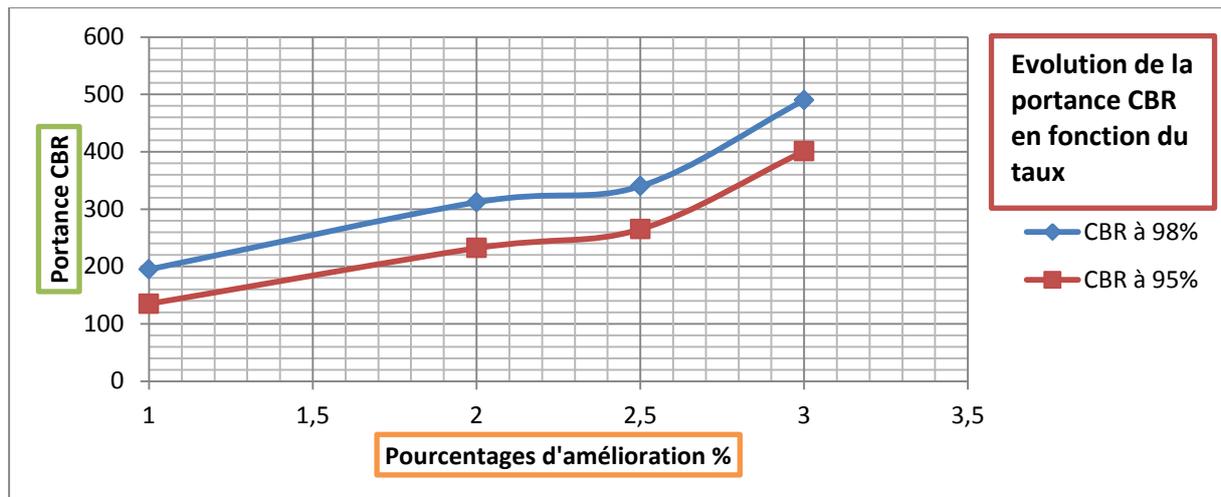


Figure 14: Evolution de la portance CBR en fonction du taux d'amélioration

Ces deux courbes montrent que la portance du CBR croît en fonction du taux d'amélioration au ciment. La latérite améliorée atteint la portance imposée par les spécifications du CPT pour une amélioration à 2.5% de ciment. L'amélioration à 1% est celle qui apporte la quantité optimale de fines qui permette de combler les vides de la latérite alors que la meilleure résistance est obtenue pour une amélioration de 2.5% laisse penser que la relation entre la portance de la latérite améliorée et sa densité sèche maximale n'est pas établie.

L'allure croissante de la courbe de l'évolution de la portance CBR en fonction du taux d'amélioration confirme les résultats des recherches antérieures dans le domaine. La latérite améliorée à 2.5% de ciment atteint des indices CBR de 340 à 98% de l'OPM et 265 à 95% de l'OPM. Ces valeurs sont de loin très supérieures à celles de la latérite naturelle qui sont généralement inférieures à 60 à 95% et 100% à 98% de l'OPM.

Conclusion : L'amélioration de la latérite au ciment à un taux de 2.5% avec une énergie de compactage à 98% de l'OPM est donc suffisante pour ce projet.

3) Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du taux d'amélioration

Nous constatons que la résistance à la compression simple à 28 jours d'âge évolue avec le pourcentage du ciment. Dans notre projet, la teneur en ciment de 2.5% correspondant à une résistance à la compression simple à 25 coups de 25.01 Kg/cm² égale à celle demandée par le CPT (20 à 25Kg/Cm²). La courbe en rouge ci-dessous confirme les résultats.

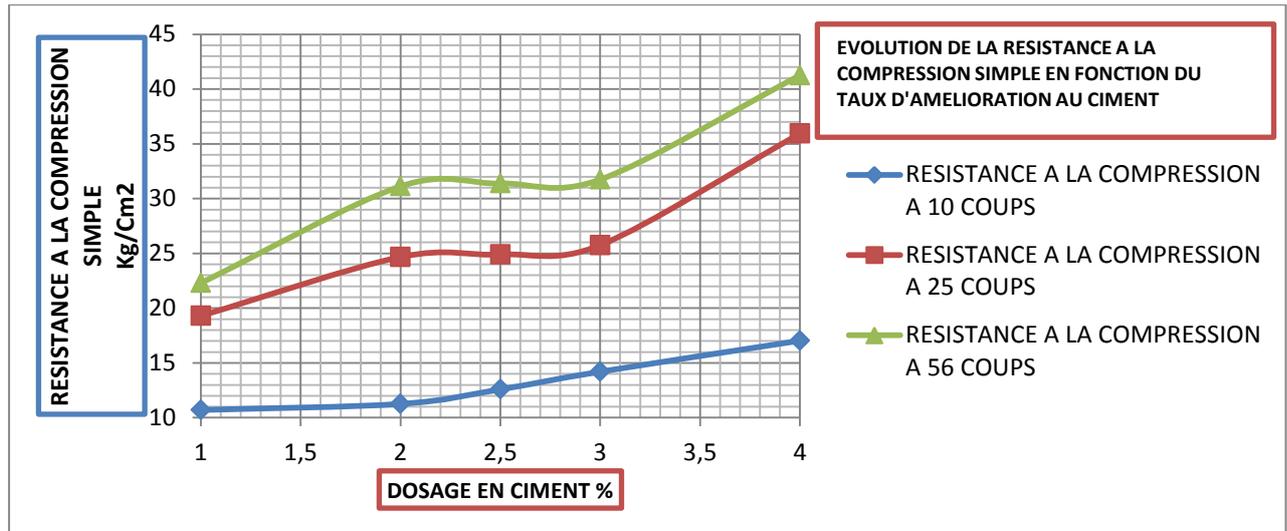


Figure 15: Evolution de la résistance à la compression simple en fonction du taux d'amélioration au ciment.

X. APPLICATION DE LA TECHNIQUE D'AMELIORATION DES GRAVELEUX LATERITIQUES AU CIMENT : CAS DE LA ROUTE BOROMO BOBO DIOULASSO

Le présent projet d'étude qui concerne l'application de la technique de l'amélioration au ciment consistera à faire un dimensionnement dans les conditions réelles du projet. Le projet étant un renforcement d'une chaussée déjà existante, il sera fait ici une étude sommaire de cette dernière avant le dimensionnement proprement dit.

1) Structure de la chaussée existante :

Selon les recherches documentaires que nous avons effectuées, la route Boromo- Bobo Dioulasso a été construite entre 1979 et 1982.

La structure est caractérisée par :

- ✚ Largeur de la chaussée : 6 à 8 m ;
- ✚ Couche de roulement en graveleux latéritique ;
- ✚ Ouvrages d'assainissement transversaux constitués de radiers et de murettes.

Les premiers travaux de réhabilitation ont été effectués en 2001 par l'entreprise française Razel. Mais le tronçon n'a pas pu résister pour des raisons non encore établies. La structure de chaussée était constituée d'une fondation en GAL, d'une couche de base en GAL et d'un revêtement en enduit superficiel.

Les derniers travaux de renforcement ont été effectués en 2005 par le groupement d'entreprises SOGEA-SATOM, DTP Terrassement et CSE (Compagnie Sahélienne d'Entreprise) et les caractéristiques géométriques de la route ont été ramenées à :

- ✚ Largeur de la plate-forme : 9 m;
- ✚ Largeur de la chaussée : 7 m ;
- ✚ Largeur de l'imprégnation: $7 + 2 \times 1$ m (plus surlargeurs éventuelles);
- ✚ Béton bitumineux : 4 cm ;
- ✚ Couche de base en Grave bitume : 8cm ;
- ✚ Couche de fondation en graveleux latéritique amélioré au ciment : 15 Cm ;
- ✚ Couche de forme en graveleux latéritique : 25cm

2) Etude du trafic

L'étude du trafic est une étape fondamentale pour le dimensionnement de la chaussée. Pour cette étude, il sera considéré, selon le CPT, un nombre d'essieux équivalent de 13 tonnes de 3.3×10^6 .

Le « guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux ou CEBTP de 1984 » donne les classes de trafic comme suit :

Tableau 11: Formule d'expression du trafic (source CEBTP, 1984)

Catégorie de trafic proposé	FORMULES D'EXPRESSION DU TRAFIC		
	1	2	3
	Nombre journalier de véhicules (véh./j)	Nombre cumulé de poids lourds (P.L)	Nombre cumulé d'essieux équivalents de 13 T (EE13T)
T1	$100 \leq T < 300$	$1 \times 10^5 \leq T < 5 \times 10^5$	$1 \times 10^5 \leq T < 5 \times 10^5$
T2	$300 \leq T < 1000$	$5 \times 10^5 \leq T < 1,5 \times 10^6$	$5 \times 10^5 \leq T < 1,5 \times 10^6$
T3	$1000 \leq T < 3000$	$1,5 \times 10^6 \leq T < 4 \times 10^6$	$1,5 \times 10^6 \leq T < 4 \times 10^6$
T4	$3000 \leq T < 6000$	$4 \times 10^6 \leq T < 1 \times 10^7$	$4 \times 10^6 \leq T < 1 \times 10^7$
T5	$6000 \leq T < 12000$	$1 \times 10^7 \leq T < 2 \times 10^7$	$1 \times 10^7 \leq T < 2 \times 10^7$

La classe de trafic du projet est donc de type T3 en considérant le nombre d'essieux équivalent de 13 tonnes de 3.3×10^6 .

3) Dimensionnement du renforcement par la méthode CEBTP et le logiciel Alizé du LCPC

Les calculs se feront à deux étapes :

D'abord par **la méthode empirique en utilisant la méthode CEBTP** : pour pré dimensionner à l'aide des tableaux fournis par le *Manuel pour le Renforcement des Chaussées Souples en pays tropicaux de 1985* et ensuite faire une vérification par **la méthode rationnelle en utilisant le logiciel Alizé III du LCPC**.

a) Méthode CEBTP

La méthode **CEBTP** est caractérisée par deux paramètres importants (le trafic et les mesures de déflexion) pour déterminer les épaisseurs des couches de chaussées. Par manque des données sur la mesure de déflexion, nous ne serions à mesure d'utiliser le *Manuel pour le Renforcement des Chaussées Souples en pays tropicaux de 1985*. Ainsi, nous allons nous contenter de vérifier la structure proposée par le CPT.

Tableau 12: Modélisation du renforcement proposé par le CPT

Couches	Epaisseurs	Modules E (MPa)	Coefficients de poisson
Couche de roulement (BB)	4	1300	0,35
Couche de base (GB3)	8	2700	0,35
Couche de fondation (MTLH)	15	650 à 750	0,35

Couche de Forme (graveleux latéritique)	20	200 à 300	0,35
Plateforme	infini	50 à 80	0,35

b) Vérification par le logiciel Alizé III du LCPC

Ce programme Alizé III est très largement utilisé pour le dimensionnement et la vérification des structures de chaussées et de renforcement. Il permet de calculer les contraintes et les déformations induites dans les différentes couches de la chaussée choisie. La charge prise en compte est une charge unitaire correspondant à un demi-essieu de 13 tonnes représenté par une empreinte circulaire (Figure 16).

Les données à rentrer dans le modèle pour les différentes simulations sont :

- ✚ Les épaisseurs de chaque couche ;
- ✚ Les modules de Young (E) ;
- ✚ les coefficients de poisson (ν) de chaque couche y compris le sol support ;
- ✚ Les types d'interface entre les couches (conditions de collage).

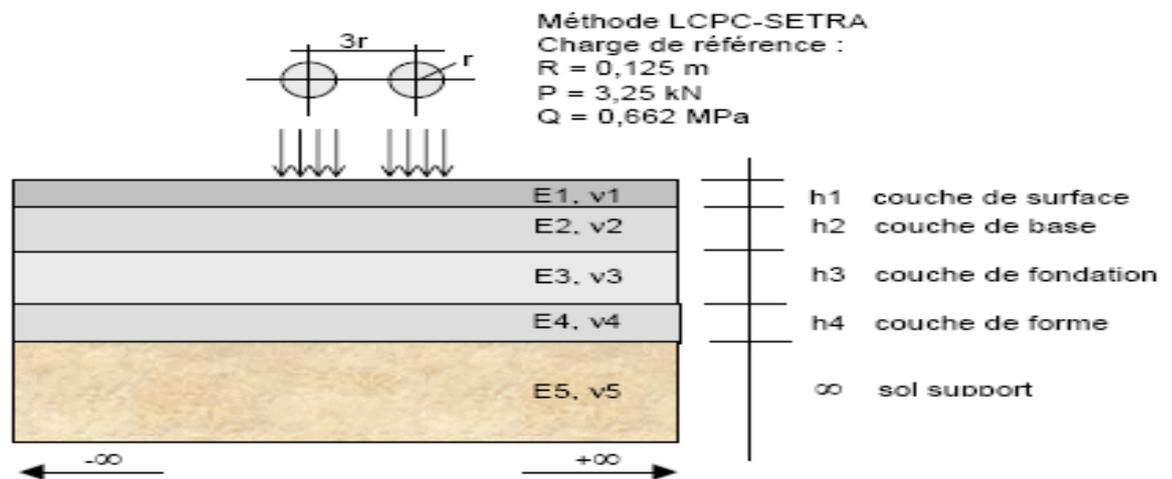


Figure 16: Moteur de calcul Alizé

c) Les hypothèses

D'après le modèle géotechnique, nous adopterons les valeurs des modules dynamiques et les coefficients de poisson donnés par SETRA édition 1998:

- ✚ Le module de la couche de roulement $E = 1300 \text{ MPa}$ (Bibliothèque des matériaux dans le guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées du SETRA/LCPC) ;
- ✚ Le coefficient de poisson de chaque couche $\nu = 0.35$
- ✚ Le Coefficient d'Agressivité Moyen (CAM) = 1,0 ;
- ✚ Nombre d'essieux équivalent $N = 3.3 * 10^6 \text{ PL}$;
- ✚ La durée de service est prise à 15 ans ;
- ✚ Le risque de 5% est conforme à celui que recommande le guide pour la classe de trafic considéré.

Les valeurs admissibles obtenues avec un trafic de $3.3 * 10^6$ sont les suivantes :

- ✓ $\epsilon_{t- \text{adm}} (\text{BB}) = 151.1 \mu\text{def (a)}$
- ✓ $\epsilon_{t- \text{adm}} (\text{GB}) = 140.7 \mu\text{def (b)}$
- ✓ $\epsilon_{z- \text{adm}} (\text{Sols non liés}) = 428.6 \mu\text{def (c)}$

(a) Résultat obtenu avec la loi de fatigue pour le BB :

$$\epsilon_{t- \text{adm}} = \epsilon_6 * (E1/E2)^{0.5} * (NE/10^6)^{-b} * k_c * k_r * k_s$$

(b) Résultat obtenu avec la loi de fatigue pour le GB3 :

$$\epsilon_{t- \text{adm}} = \epsilon_6 * (E1/E2)^{0.5} * (NE/10^6)^{-b} * k_c * k_r * k_s$$

(c) Résultats obtenus avec la loi de fatigue applicable aux sols non liés déjà en place (post consolidation) pour trafic moyen à fort.

$$\epsilon_{z- \text{adm}} = 12000 * (NE/10^6)^{-0.222}$$

- ✚ **NE** Le nombre équivalent de poids lourds ;
- ✚ **Kc** est le coefficient de calage ;
- ✚ **Kr** est lié au risque supporté par la chaussée avec $K_r = 10^{-tb\delta}$;
- ✚ **b** est la pente de la droite de fatigue bi logarithmique dans le domaine $10^5 - 10^6$ cycles ;

- ✚ **ks** est le facteur de stabilité tenant compte des hétérogénéités locales de portance d'une couche.
- ✚ ϵ_6 est l'élongation admissible pour une fréquence de 25Hz et une température de 10°C ;
- ✚ **E1** est le module du matériau à la température équivalente de 10°C ;
- ✚ **E2** est le module du matériau à la température équivalente du milieu d'utilisation.

d) Les vérifications à faire

Les vérifications à effectuer à ce stade de calcul concernent les critères de ruptures que sont :

- La déformation verticale ϵ_t à la surface du sol support doit être inférieure à la déformation admissible $\epsilon_t\text{- adm}$: $\epsilon_t \leq \epsilon_t\text{- adm}$;
- La déformation verticale ϵ_z à la surface du sol support doit être inférieure à la déformation admissible $\epsilon_z\text{- adm}$: $\epsilon_z \leq \epsilon_z\text{- adm}$.

e) Résultats des déformations:

Avec les données et hypothèses ci-dessus, le logiciel *Alizé* donne les résultats suivants :

Tableau 13: Récapitulatif des résultats de simulation sur le logiciel Alizé avant itération

Couches	Déformations des différentes couches (μdef)	Déformations des admissibles (μdef)	Commentaires
Couche de roulement (5cm BB)	55	151,1	$55 \leq 151,1$ Condition satisfaite
Couche de base (8 cm GB3)	155,4	140,7	$155,4 \geq 140,7$ Condition non satisfaite
Couche de fondation (15cm MTLH)	406,8	428,6	$406,8 \leq 428,6$ Condition satisfaite
Couche de forme (20cm grave latéritique)	418,2	428,6	$418,2 \leq 428,6$ Condition satisfaite
Sol support	442,5	428,6	$442,5 \geq 428,6$ Condition non satisfaite

En analysant les valeurs de déformations des couches, nous remarquons que celles du sol support et de la couche de base sont supérieures aux valeurs des déformations admissibles. Nous pouvons dire que ces couches ne pourront pas supporter le trafic ; d'où la nécessité d'augmenter l'épaisseur de la couche de base pour satisfaire aux conditions. Selon la Bibliothèque des matériaux dans le guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées du SETRA/LCPC, l'épaisseur de la GB est comprise entre 8 et 12cm. D'où le choix de la variation de la couche de base.

Après itération, la condition est vérifiée pour une base de 12cm d'épaisseur.

Pour plus de détails, les résultats des autres itérations sont en **annexe III**.

Tableau 14: Récapitulatif des résultats de simulation sur le logiciel Alizé après itération

Couches	Déformations des différentes couches (μdef)	Déformations des admissibles (μdef)	Commentaires
Couche de roulement (5cm BB)	47,7	151,1	$47,7 \leq 151,1$ Condition satisfaite
Couche de base (12cm GB3)	138,8	140,7	$138,8 \leq 140,7$ Condition satisfaite
Couche de fondation (15cm MTLH)	310,8	428,6	$310,8 \leq 428,6$ Condition satisfaite
Couche de forme (20cm grave latéritique)	337,5	428,6	$337,5 \leq 428,6$ Condition satisfaite
Sol support	369,3	428,6	$369,3 \leq 428,6$ Condition satisfaite

Conclusion :

Les valeurs des déformations obtenues sont acceptables car elles sont toutes inférieures aux valeurs admissibles.

Variante retenue :

- ✓ Couche de roulement : 5 cm de béton bitumineux ;
- ✓ Couche de base : 12 cm de GB3;

- ✓ Couche de fondation : 15cm de graveleux latéritique amélioré au ciment ;
- ✓ Couche de forme : 20 cm graveleux latéritique naturel.

D'une part l'amélioration au ciment présente certains inconvénients :

- ✚ mise en œuvre délicate à cause du temps de prise du ciment ;
- ✚ sa susceptibilité à la fissuration par retrait ;
- ✚ la difficulté des réparations et des reprises éventuelles, une fois la prise du ciment terminé et le compactage effectué ;
- ✚ le délai très court de mise en œuvre à moins de disposer d'un retardateur de prise ;
- ✚ L'épaisseur minimale que doit prévoir le dimensionnement.

Et d'autre part au Burkina-Faso, le mètre cube (m^3) de graveleux latéritique coûte entre **6000 à 10000 FCFA**, le mètre cube (m^3) de latérite litho stabilisée coûte **15000 à 17000FCFA** (réf. projet de renforcement du tronçon Ouaga-Pô-Frontière du Ghana) alors que le mètre cube (m^3) de la latérite stabilisée au ciment revient à **21000 à 25000 FCFA** (réf. route Ouaga-Bobo 2007).

Toutes ces raisons très importantes nous font pencher la balance du côté de la litho stabilisation en défaveur de l'amélioration au ciment.

Variante proposée :

- ✓ Couche de roulement : 5 cm de béton bitumineux ;
- ✓ Couche de base : 12 cm de GB3;
- ✓ Couche de fondation : 15cm de GAL litho stabilisée ;
- ✓ Couche de forme : 20 cm graveleux latéritique naturel.

XI. PHENOMENES DE MICRO FISSURATION

Le principal problème de l'amélioration au ciment se trouve au niveau de la mise en place des matériaux. Une mauvaise répartition du stabilisant ou un mauvais compactage peuvent réduire énormément la portance de la couche.

Il a été démontré en laboratoire que les différentes méthodes de murissement influent sur la résistance du sol amélioré. C'est ainsi qu'un séchage à forte température accroît le taux de gain en résistance. Mais s'il est excessif, ce gain de résistance peut être suivi de fissuration surtout dans le cas des sols argileux (Ingles et Metcalf, 1973).

D'après plusieurs chercheurs, la détérioration des routes améliorées est causée par des forces de tension qui représente environ 20% de la résistance à la compression simple à l'optimum Proctor. En général, une résistance à la compression supérieure à 7,5MPa transforme le comportement du sol traité et le fait travailler comme une dalle en béton. Ceci n'est pas conforme au fonctionnement des chaussées semi-rigides, d'où le développement d'une multitude de microfissures engendrant la rupture de la chaussée.

XII. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Un matériau, pour être utilisé en couche de base et en couche de fondation au Burkina Faso, doit avoir respectivement un indice portant CBR supérieur ou égal à 80 à 98% et supérieur ou égal à 30 à 95% de l'OPM. Mais la rareté de matériau naturel répondant à cette exigence a conduit à la mise au point d'une technique d'amélioration du graveleux latéritique naturel avec du ciment.

Les études réalisées au laboratoire ont concernées la grave argileuse latéritique ne pouvant être utilisée à l'état naturel en couche de fondation. En effet, son indice portant CBR est de 55 à 98% de l'Optimum Proctor Modifié. Ce matériau a été amélioré avec du ciment à différents pourcentages. Le but de l'étude est de d'observer l'influence du ciment sur l'évolution de l'indice portant CBR et de la résistance à la compression simple.

Nous constatons de façon générale, que les mélanges à 2.5% donnent les résultats répondant aux spécifications techniques du CPT.

Nous pouvons dire que l'amélioration du graveleux latéritique avec du ciment est influencée par des caractéristiques physiques et mécaniques du graveleux latéritique à améliorer et du ciment utilisé pour l'amélioration.

La latérite améliorée au ciment est plus résistante que la latérite à l'état naturel ou de la latérite litho stabilisée.

Cependant, les inconvénients et le coût élevé des graveleux latéritiques améliorés au ciment font pencher la balance du côté de la litho stabilisation car elle concilie bien les facteurs coût d'exécution et résistance dans le temps.

A la lumière de cette étude, les recommandations suivantes sont nécessaires pour une meilleure connaissance de la technique de l'amélioration au ciment puis pour la conception des routes durables et de qualité :

✚ A l'endroit du LNBTP :

Encourager les étudiants à faire des travaux de recherche autour de ce thème afin d'arriver un jour à mettre sur pieds une formule empirique ou un abaque propre aux contextes de l'Afrique qui permettent à base des caractéristiques intrinsèques de la latérite et du ciment de déterminer le taux d'amélioration ;

✚ A l'endroit des entreprises : respecter les clauses techniques des projets et employer une ressource humaine qualifiée et expérimentée dans la réalisation des travaux ;

✚ A l'endroit des bureaux de contrôle : veiller à ce que les travaux soient réalisés conformément à la règle de l'art et tout en ayant en permanence un contrôleur à pied d'œuvre lors du déroulement des travaux sur le chantier.

XIII. BIBLIOGRAPHIE

- 1) BCEOM- CEBTP, France. (1975) *Guide Pratique De Dimensionnement Des Chaussées Pour Les Pays Tropicaux*.
- 2) Centre de Recherche Routière, Bruxelles. *Code De Bonne Pratique Pour La Stabilisation Du Sol Au Ciment*.
- 3) Centre d'information sur le ciment et ses applications. (Juin 2004). "L'entretien Structurel Des Chaussées Souples Et Semi-rigides. Le Retraitement En Place à Froid Aux Liants Hydrauliques".
- 4) Idrissa Tochol. (1993) "Contribution à L'étude Des Graveleux Latéritiques Dans Les Pays Du Sahel: Cas Des Routes Non Revêtues".
- 5) Institut des sciences et des techniques de l'équipement et de l'environnement pour le développement. (1983). *Latérites Et Graveleux Latéritiques*.
- 6) JIKOLUM N. Emmanuel. (Juin 2011). *Utilisation De La Technique De La Litho Stabilisation En Assise De Chaussée : Cas Du Projet De Renforcement Du Tronçon Ouaga – Po – Frontière Du Ghana*, Avril 2012.
- 7) KANAZOE Marietou (Juin 2011). *Amélioration Des Graveleux Latéritiques Avec Du Granite Concassé De Classes Granulaires (0/20 ; 0/31.5 ; 5/20)*.
- 8) Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC), Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes. (Janvier 2000) "Traitement Des Sols à La Chaux Et/ou Aux Liants Hydrauliques (Application à La Réalisation Des Remblais Et Des Couches De Forme)".
- 9) Pierre LOMPO. IRF IVème Conférence Routière Africaine (20- 25 Janvier 1980)- Nairobi, Kenya. *Les Matériaux Utilisés En Construction Routière En Haute-Volta – Un Matériau Non Traditionnel « Le Lithostab »*.
- 10) Sandoumbé THIAW. (2006). *Dimensionnement Mécanistique – Empirique Des Structures De Chaussée : Application Du Tronçon Séo – Diourbel*.



ANNEXES

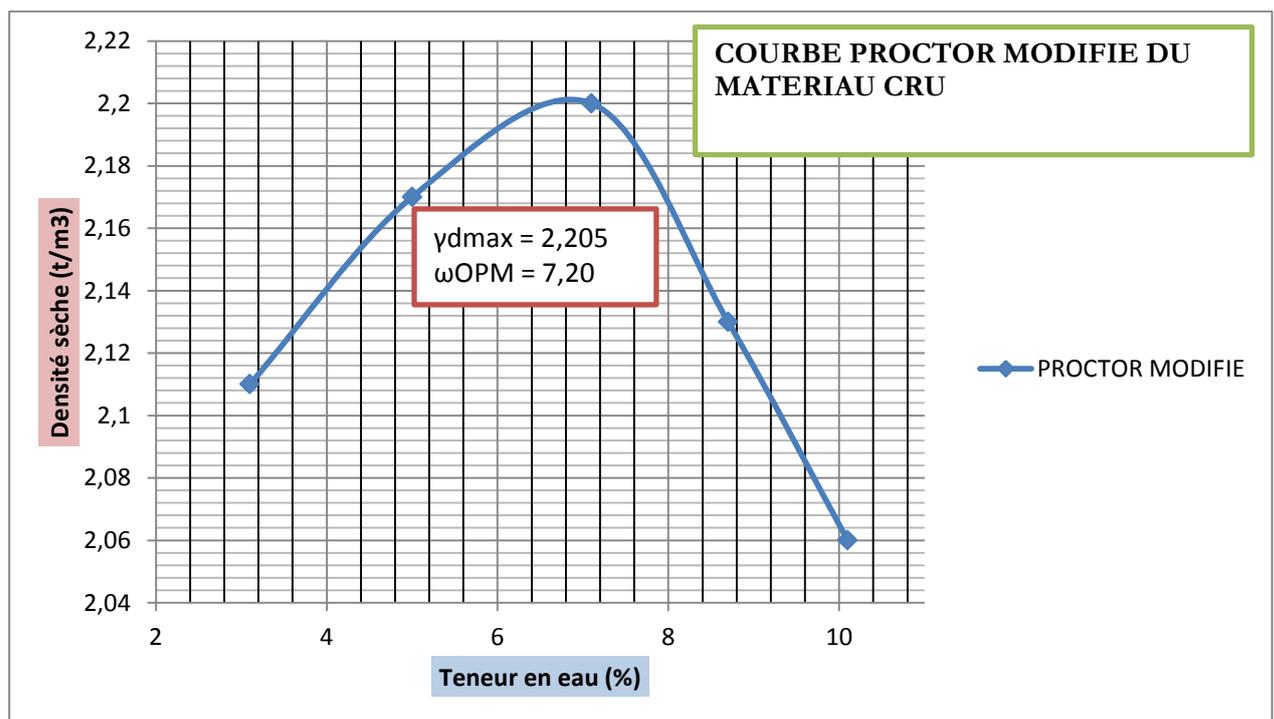
**ANNEXES N° 1 : RESULTATS DES ESSAIS SUR LA
GRAVE ARGILEUSE LATÉRIQUE NATURELLE**

I. RESULTATS DES ESSAIS SUR LA GRAVE ARGILEUSE LATERITIQUE CRUE

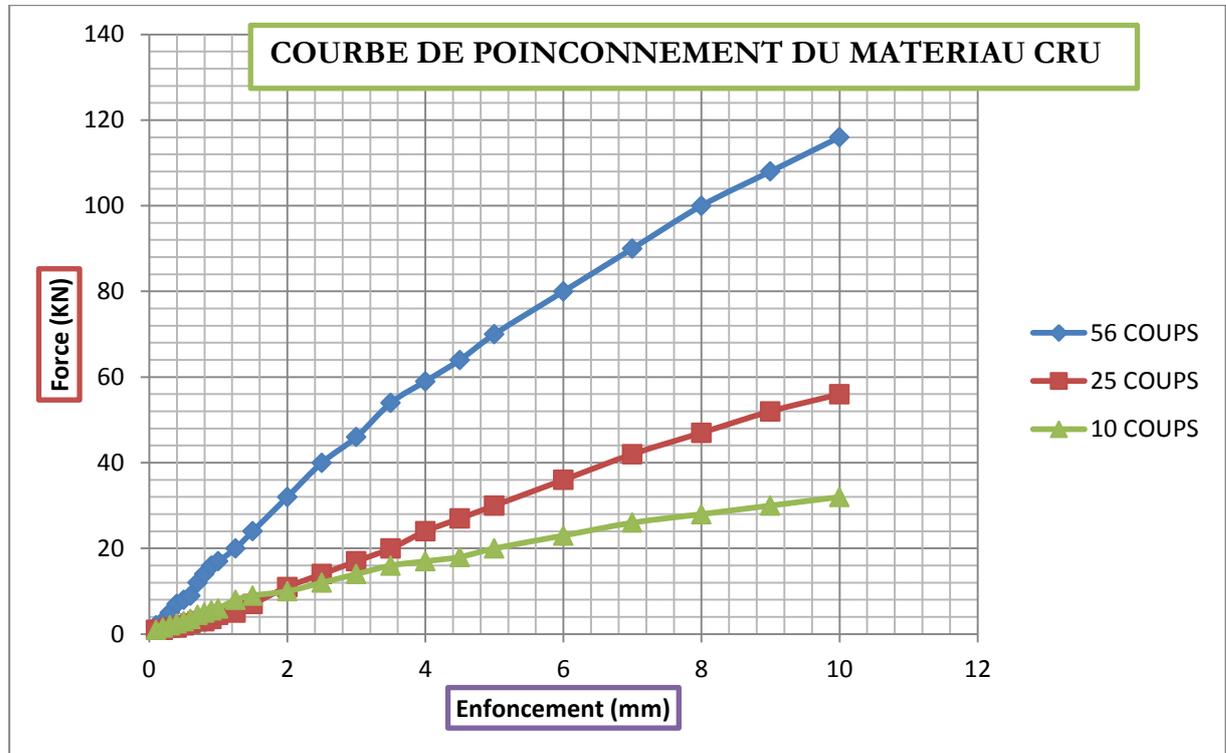
Annexe I.1 : Tableau des résultats du Proctor modifié du matériau cru

Teneur en eau de moulage GAL crue										
Numero de tare	35	45	9	32	21	48E	19	30	22	47
Masse totale humide(g)	487,65	485,4	422,75	459,9	417,9	384	413,3	385,65	433,85	434
Masse totale sèche(g)	474,45	472,75	405,25	441,1	394,35	363	385,55	359,55	397,6	400,45
Masse de la tare(g)	57,95	62,8	62,25	64,15	65,55	63,9	62,4	61,55	48,35	61,9
Masse d'eau(g)	13,2	12,65	17,5	18,8	23,55	21	27,75	26,1	36,25	33,55
Masse du sol sec(g)	416,5	409,95	343	376,95	328,8	299,1	323,15	298	349,25	338,55
Teneur en eau (%)	3,2	3,1	5,1	5,0	7,2	7,0	8,6	8,8	10,4	9,9
Teneur en eau moyenne (%)	3,1		5,0		7,1		8,7		10,1	
Densité de moulage										
Masse totale humide(g)	8110		8228		8403		8531		8472	
Masse du moule(g)	3666		3666		3666		3666		3666	
Masse nette humide(g)	4444		4562		4737		4865		4806	
Volume du moule(Cm ³)	2066		2066		2066		2066		2066	
Densité humide	2,15		2,21		2,29		2,35		2,33	
Densité sèche	2,11		2,17		2,20		2,13		2,06	
Eau de mouillage(g)	2%	166	4%	316	6%	426	8%	619	10%	750
	8299		7912		7103		7734		7507	
Courbe de saturation à 100%	2,447		2,338		2,231		2,155		2,089	
Courbe de saturation à 90%	2,427		2,307		2,192		2,111		2,040	

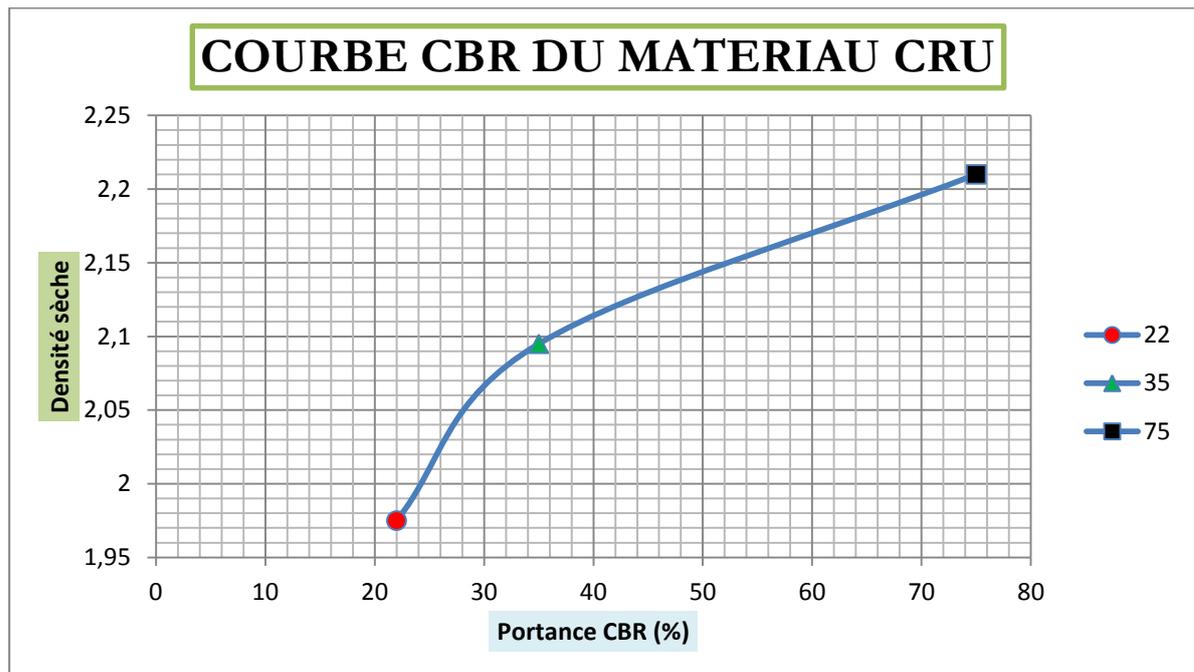
Annexe I.2 : Courbe Proctor modifié du matériau cru



Annexe I.3 : Courbe de poinçonnement du matériau cru



Annexe I.4 : Courbe CBR du matériau cru



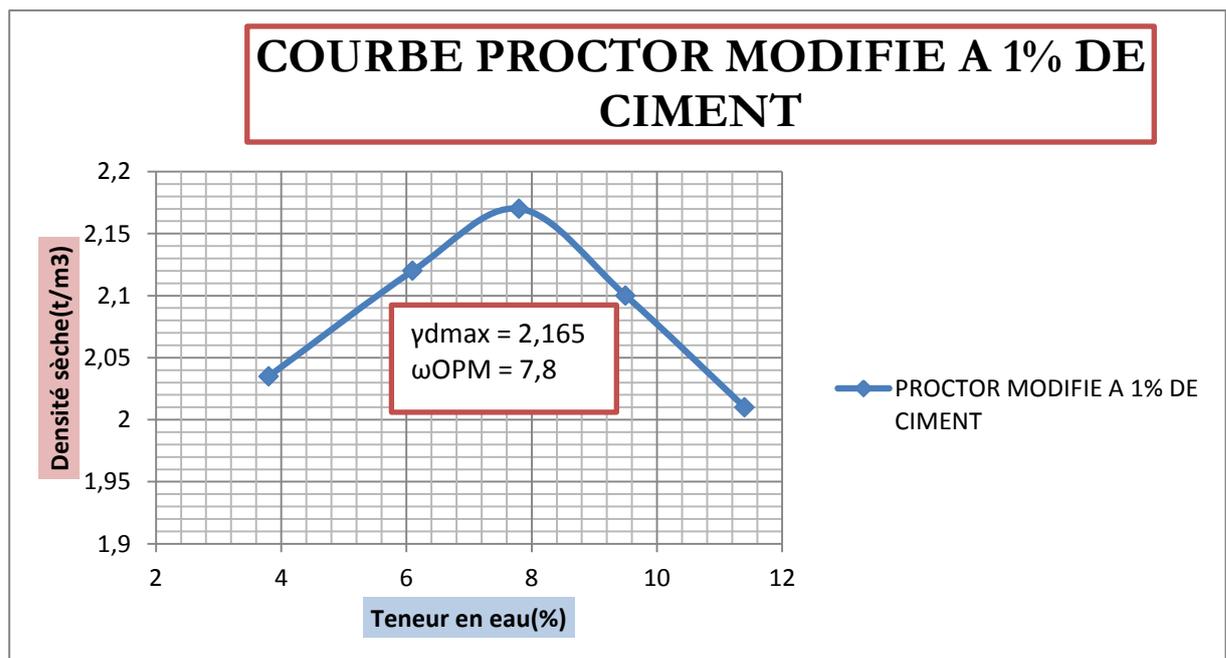
**ANNEXE N° 2 : RESULTATS DES ESSAIS SUR LA
GRAVE ARGILEUSE LATERITIQUE
AMELIOREE A DIFFERENTS POURCENTAGES
DE CIMENT**

II. RESULTATS DES ESSAIS SUR LA GRAVE ARGILEUSE LATÉRITIQUE AMÉLIORÉE A DIFFÉRENTS POURCENTAGES DE CIMENT

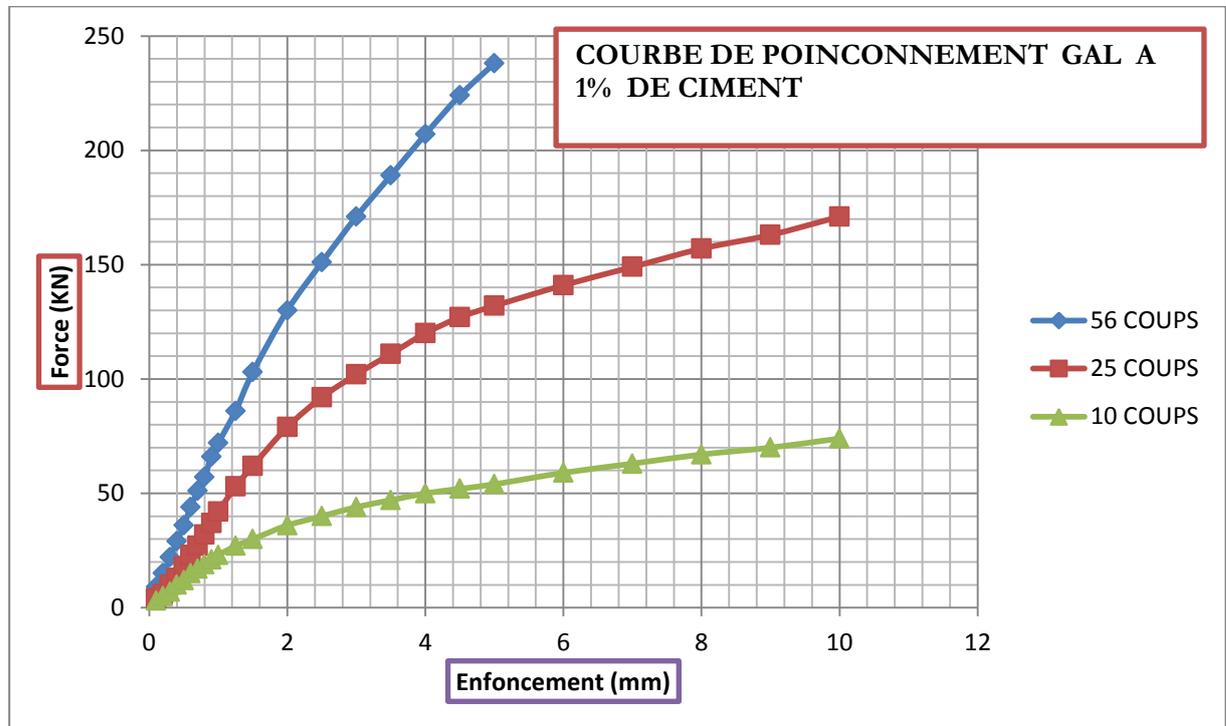
Annexe II.1.1 : Tableau des résultats du Proctor modifié du matériau amélioré à 1% de ciment

Teneur en eau de moulage à 1%										
Numero de tare	3	13	9	22	32	41E	24	10	42	31
Masse totale humide(g)	557,9	530,55	515,1	484,55	513,85	538,8	380,55	381,45	451	428,55
Masse totale sèche(g)	543,05	509,8	487,85	460,4	480,75	504,25	353,5	353,05	410,35	390,15
Masse de la tare(g)	58,05	61,4	62,25	48,35	64,15	62,2	61,35	60,55	55,35	52,9
Masse d'eau(g)	14,85	20,75	27,25	24,15	33,1	34,55	27,05	28,4	40,65	38,4
Masse du sol sec(g)	485	448,4	425,6	412,05	416,6	442,05	292,15	292,5	355	337,25
Teneur en eau (%)	3,1	4,6	6,4	5,9	7,9	7,8	9,3	9,7	11,5	11,4
Teneur en eau moyenne (%)	3,8		6,1		7,8		9,5		11,4	
Densité de moulage										
Masse totale humide(g)	7981		8234		8447		8449		8421	
Masse du moule(g)	3666		3666		3666		3666		3666	
Masse nette humide(g)	4315		4568		4781		4783		4755	
Volume du moule(Cm ³)	2066		2066		2066		2066		2066	
Densité humide	2,09		2,21		2,31		2,32		2,30	
Densité sèche	2,035		2,120		2,170		2,100		2,010	
Eau de mouillage(g)	2%	158	4%	314	6%	435	8%	669	10%	773
	7902		7867		7253		8369		7734	
Courbe de saturation à 100%	2,408		2,281		2,196		2,117		2,035	
Courbe de saturation à 90%	2,383		2,247		2,155		2,071		1,984	

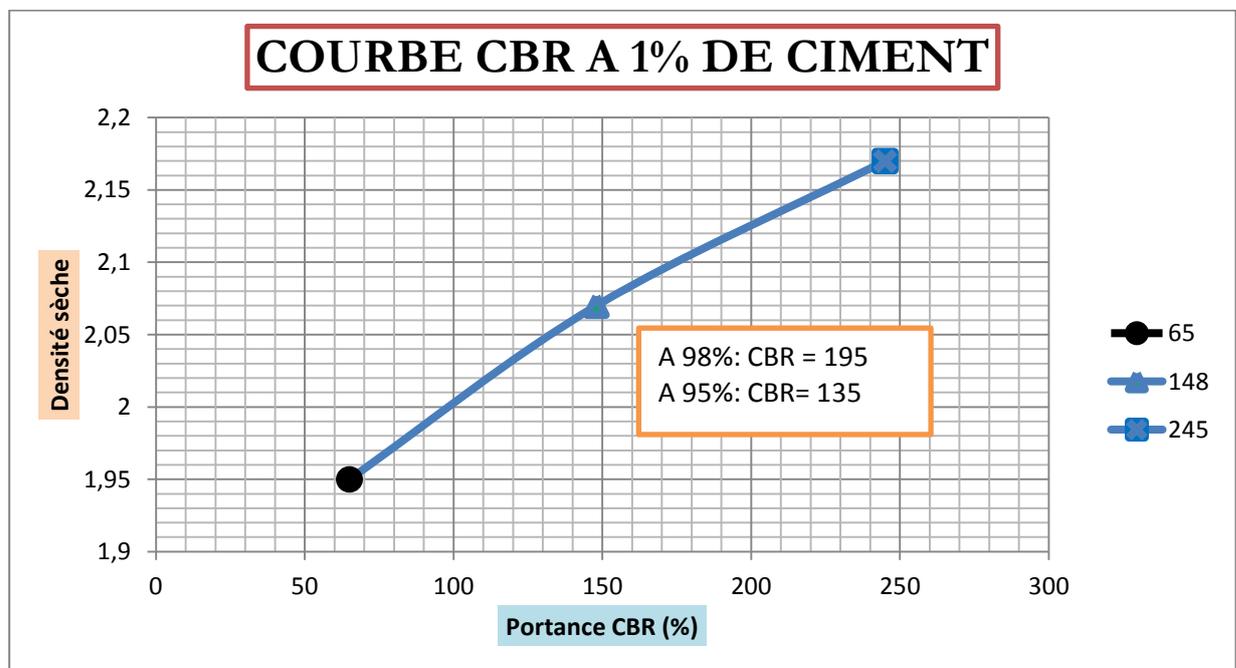
Annexe II.1.2 : Courbe Proctor modifié du matériau amélioré à 1% de ciment



Annexe II.1.3 : Courbe de poinçonnement du matériau amélioré à 1% de ciment



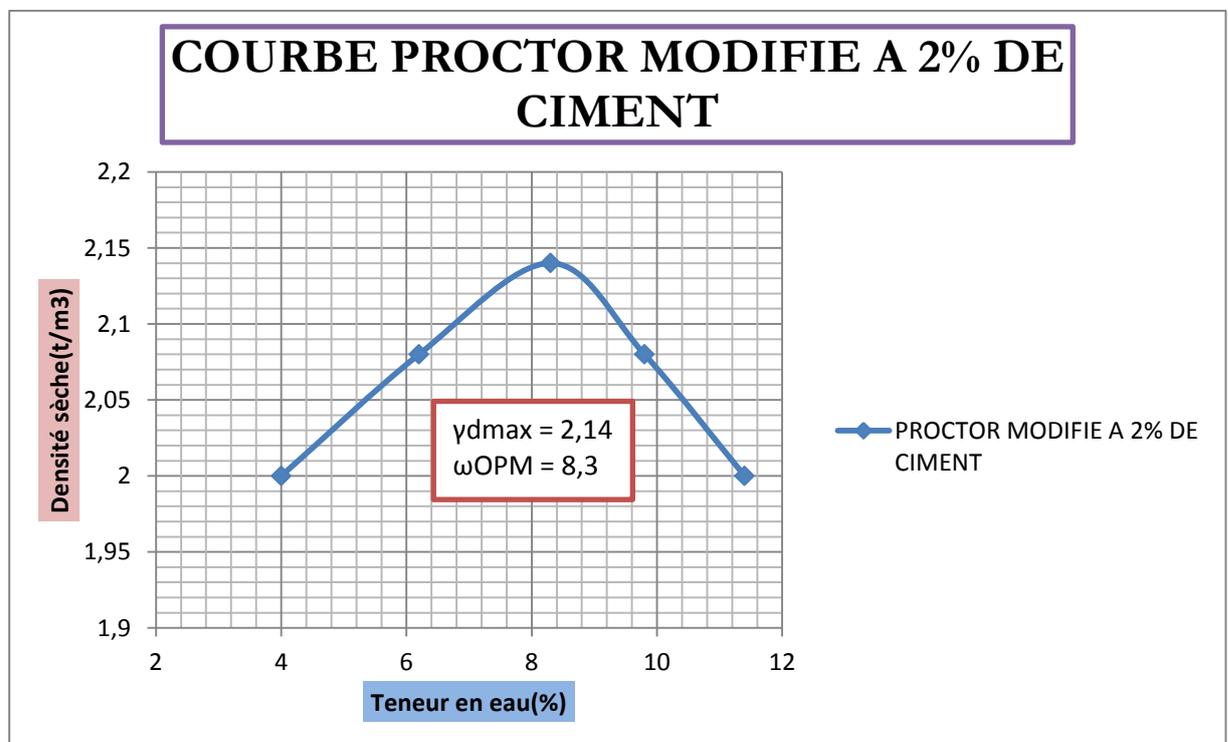
Annexe II.1.4 : Courbe CBR du matériau amélioré à 1% de ciment



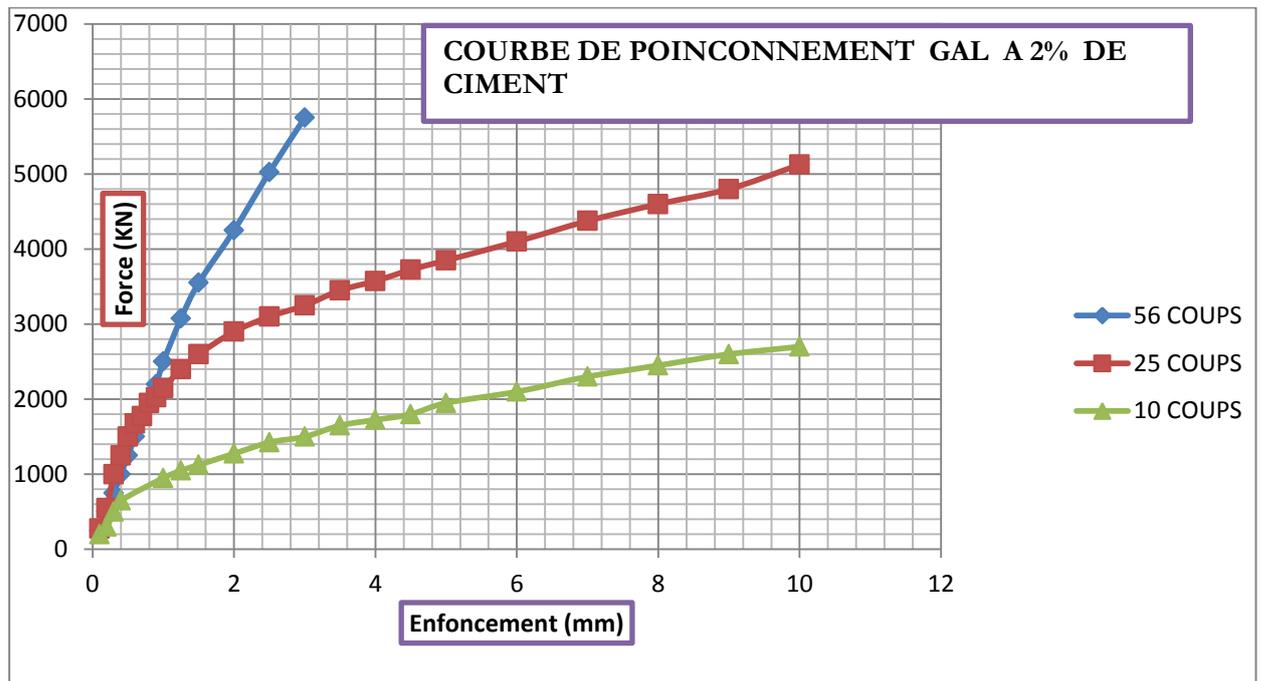
Annexe II.2.1 : Tableau des résultats du Proctor modifié du matériau amélioré à 2% de ciment

Teneur en eau de moulage à 2%										
Numero de tare	20	25	31	3	23	43E	37	39	28	48E
Masse totale humide(g)	525,4	560	492,3	482,9	507,65	480	512,25	516,55	520,85	490,9
Masse totale sèche(g)	506,15	542,3	467,15	457,85	472,15	449	471,1	476,25	474,1	446,75
Masse de la tare(g)	59,5	65,25	52,9	58,05	57,45	59,7	60,25	58,09	58,85	63,9
Masse d'eau(g)	19,25	17,7	25,15	25,05	35,5	31	41,15	40,3	46,75	44,15
Masse du sol sec(g)	446,65	477,05	414,25	399,8	414,7	389,3	410,85	418,16	415,25	382,85
Teneur en eau (%)	4,3	3,7	6,1	6,3	8,6	8,0	10,0	9,6	11,3	11,5
Teneur en eau moyenne (%)	4,0		6,2		8,3		9,8		11,4	
Densité de moulage										
Masse totale humide(g)	8070		8356		8507		8493		8445	
Masse du moule(g)	3666		3666		3666		3666		3666	
Masse nette humide(g)	4404		4690		4841		4827		4779	
Volume du moule(Cm ³)	2066		2066		2066		2066		2066	
Densité humide	2,13		2,27		2,34		2,34		2,31	
Densité sèche	2,000		2,080		2,140		2,080		2,000	
Eau de mouillage(g)	2%	154	4%	302	6%	474	8%	677	10%	826
	7703		7543		7899		8462		8263	
Courbe de saturation à 100%	2,395		2,278		2,174		2,102		2,035	
Courbe de saturation à 90%	2,370		2,243		2,131		2,055		1,984	

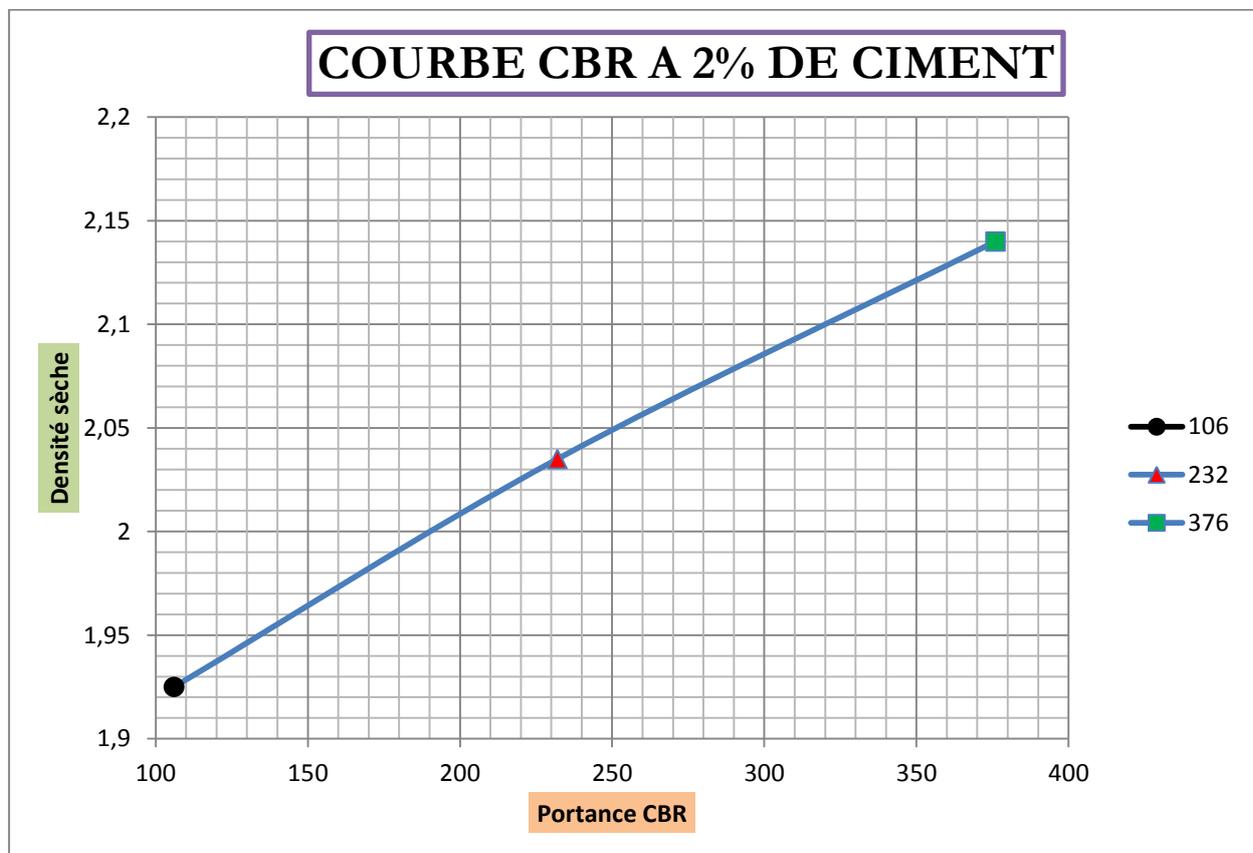
Annexe II.2.2 : Courbe Proctor modifié du matériau amélioré à 2% de ciment



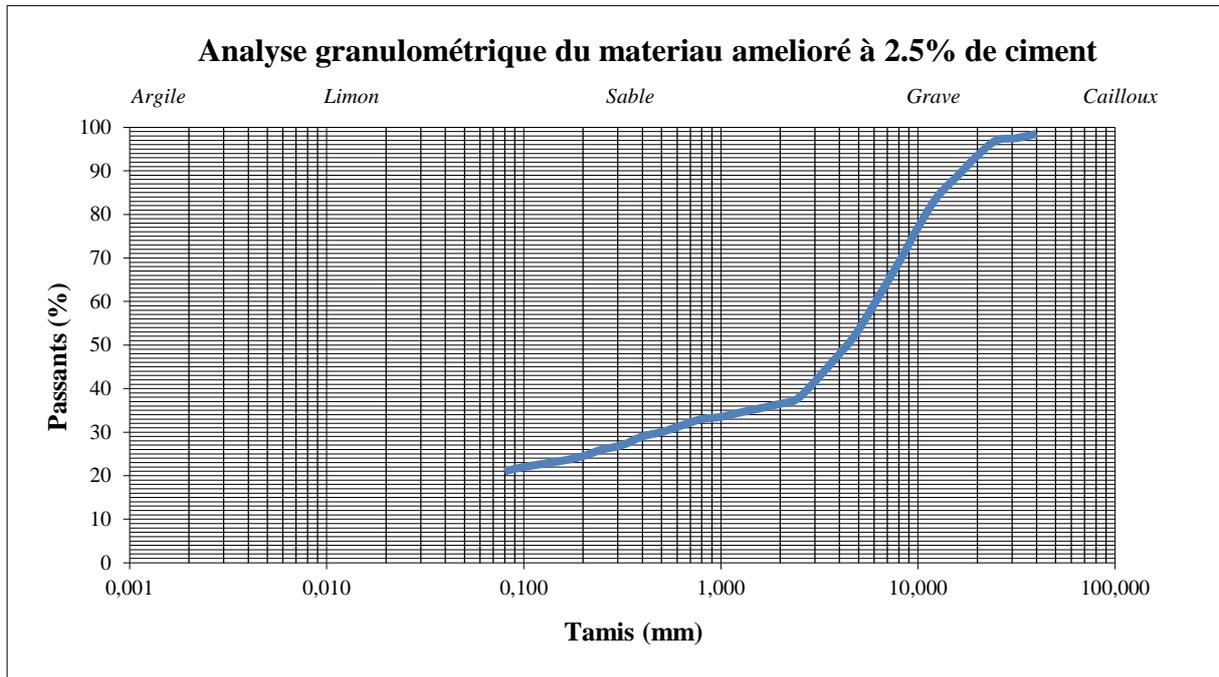
Annexe II.2.3 : Courbe de poinçonnement du matériau amélioré à 2% de ciment



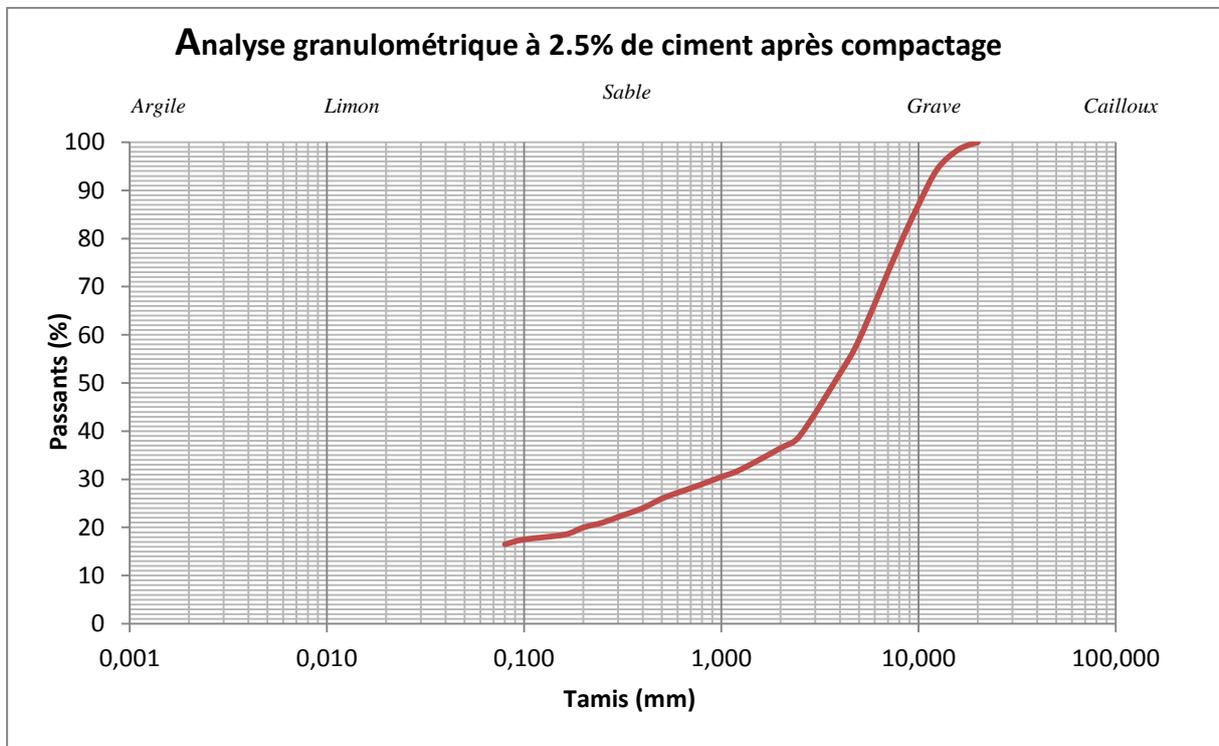
Annexe II.2.4 : Courbe CBR du matériau amélioré à 2% de ciment



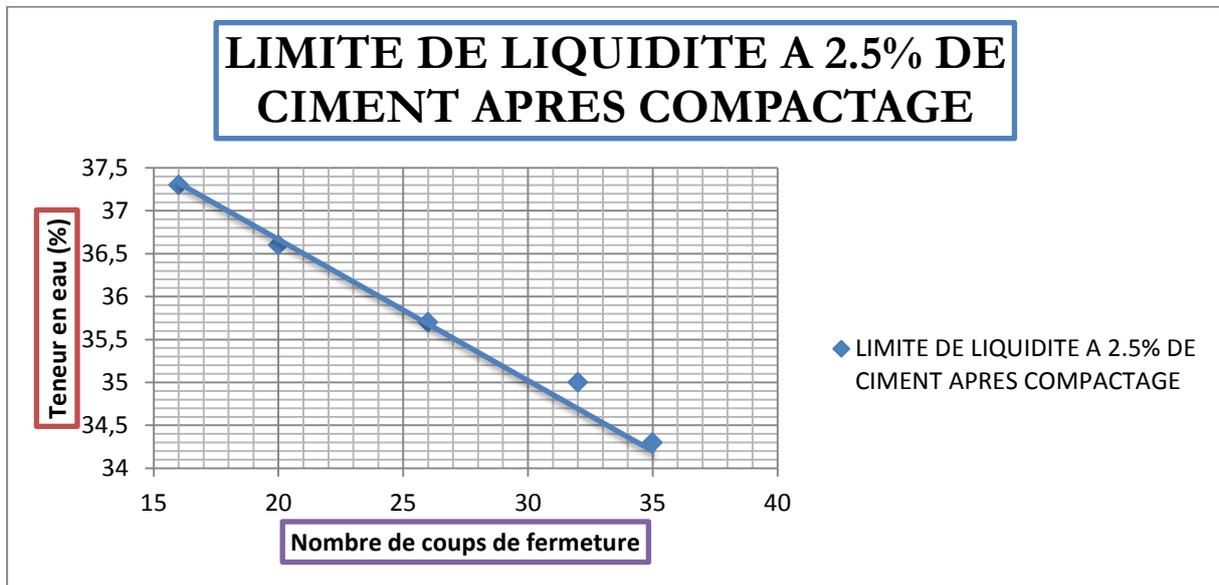
Annexe II.3.1 : Courbe granulométrique du matériau amélioré à 2,5% de ciment



Annexe II.3.2 : Courbe granulométrique du matériau amélioré à 2,5% de ciment après compactage



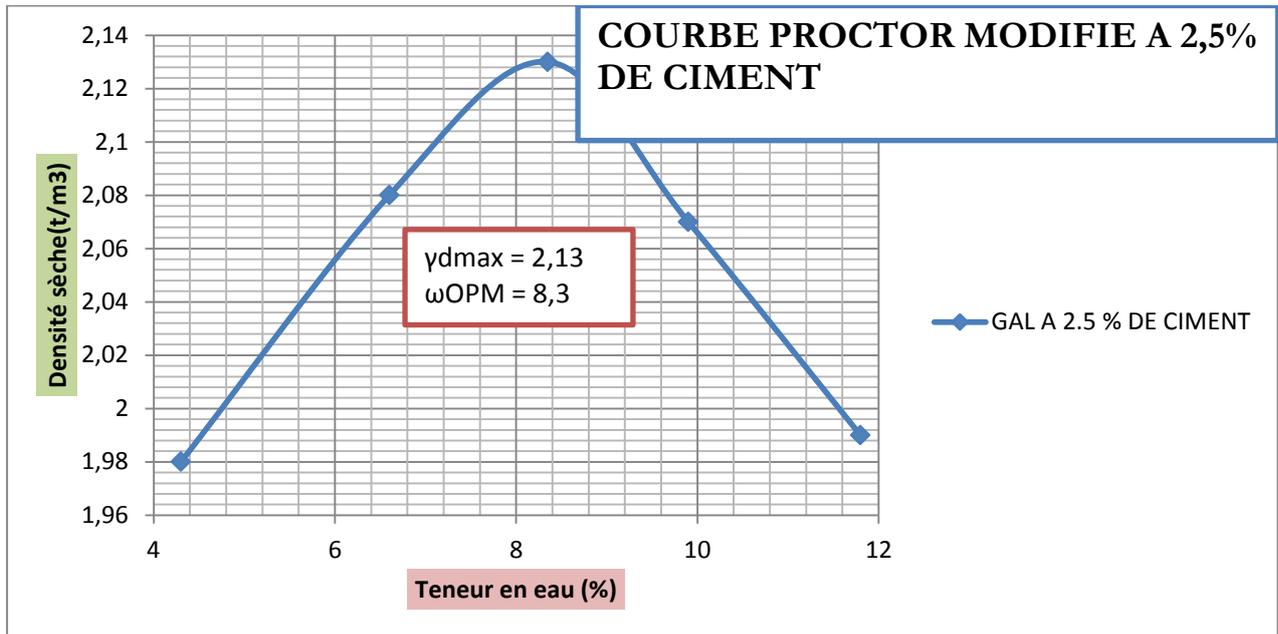
Annexe II.3.3 : Limite de liquidité du matériau amélioré à 2,5% de ciment après compactage



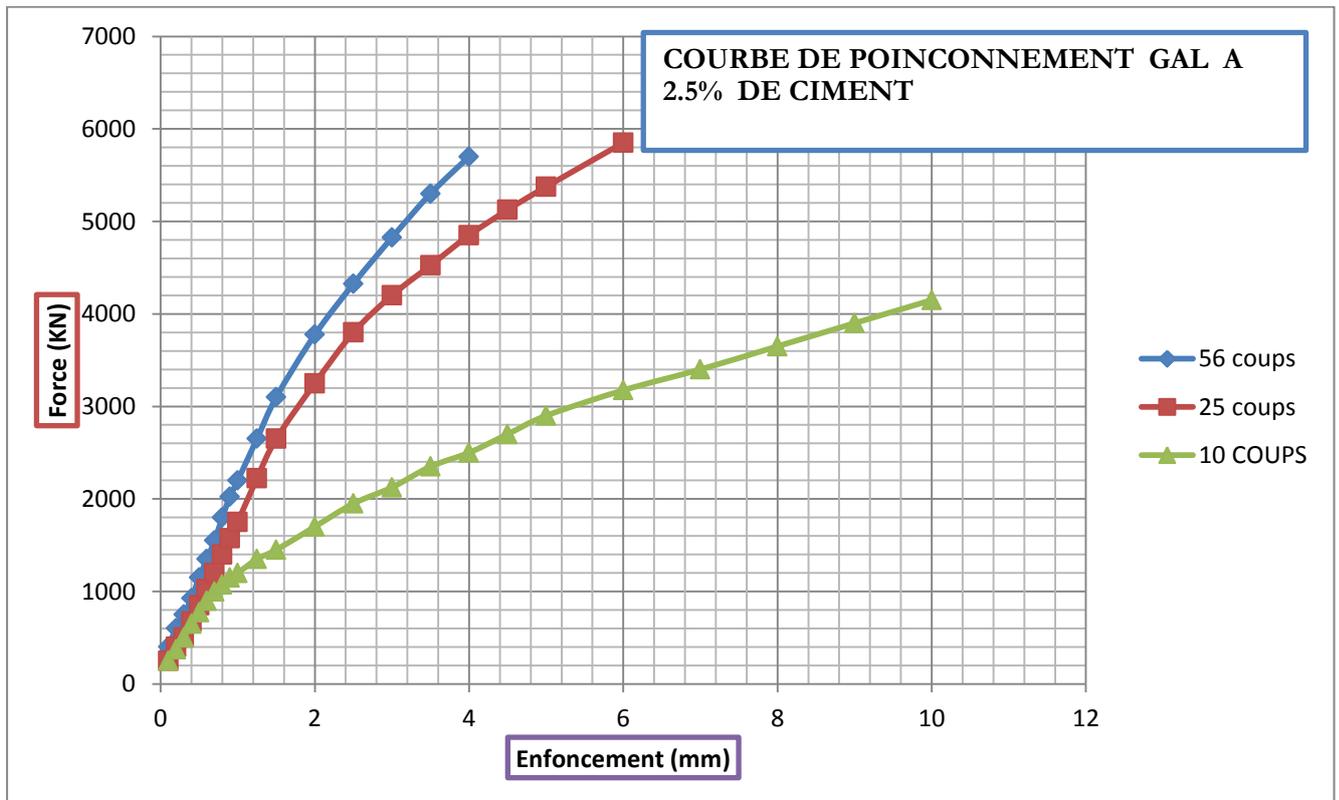
Annexe II.3.4 : Tableau des résultats du Proctor modifié du matériau amélioré à 2,5% de ciment

Teneur en eau de moulage à 2,5%										
Numero de tare	2	37	12	40E	3	23	8	44	21	32
Masse totale humide(g)	498,68	452,21	407,11	458,25	481,3	492,8	461,84	443,02	395,71	388,63
Masse totale sèche(g)	485,93	441,48	390,98	440,11	452,82	464,81	431,1	412,97	365,39	358,17
Masse de la tare(g)	58,12	60,27	57,56	57,16	58,08	57,47	65,71	57,48	65,56	64,21
Masse d'eau(g)	12,75	10,73	16,13	18,14	28,48	27,99	30,74	30,05	30,32	30,46
Masse du sol sec(g)	427,81	381,21	333,42	382,95	394,74	407,34	365,39	355,49	299,83	293,96
Teneur en eau (%)	3,0	2,8	4,8	4,7	7,2	6,9	8,4	8,5	10,1	10,4
Teneur en eau moyenne (%)	4,3		6,6		8,4		9,9		11,8	
Densité de moulage										
Masse totale humide(g)	8079		8297		8528		8521		8406	
Masse du moule(g)	3666		3666		3666		3666		3666	
Masse nette humide(g)	4413		4631		4862		4855		4740	
Volume du moule(Cm ³)	2066		2066		2066		2066		2066	
Densité humide	2,14		2,24		2,35		2,35		2,29	
Densité sèche	1,980		2,080		2,130		2,070		1,990	
Eau de mouillage(g)	2%	138	4%	280	6%	392	8%	547	10%	711
	6924		7017		6536		6840		7114	
Courbe de saturation à 100%	2,379		2,256		2,170		2,099		2,019	
Courbe de saturation à 90%	2,352		2,219		2,127		2,052		1,967	

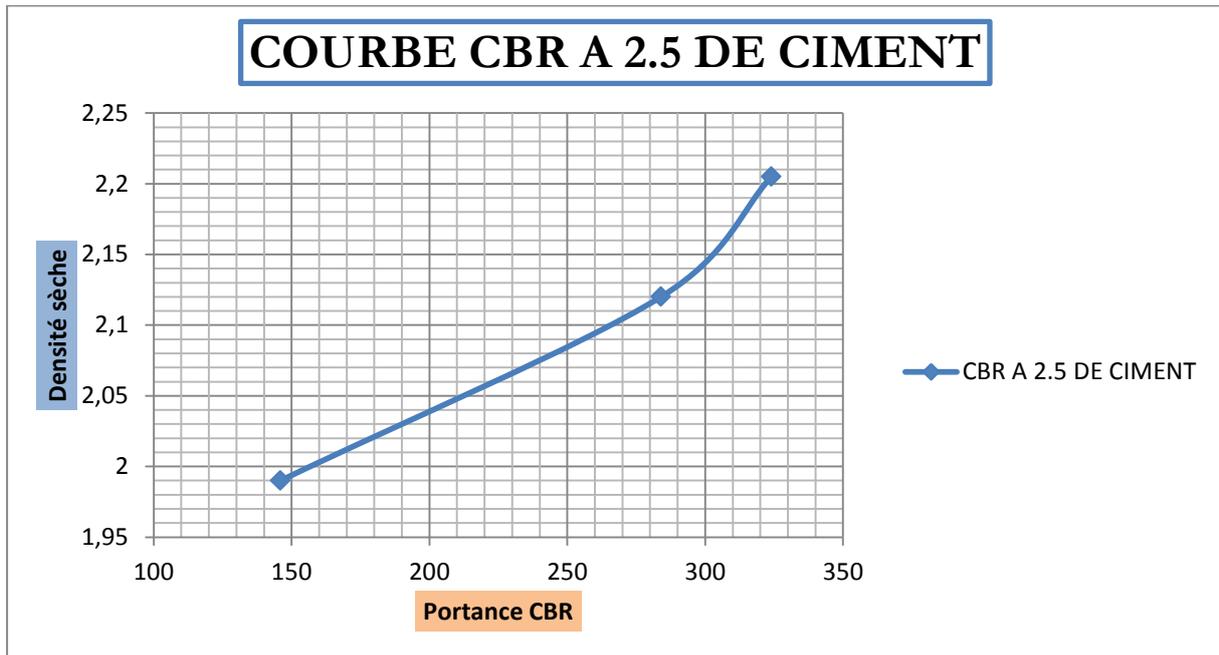
Annexe II.3.5: Courbe Proctor modifié du matériau amélioré à 2,5% de ciment



Annexe II.3.6 : Courbe de poinçonnement du matériau amélioré à 2,5% de ciment



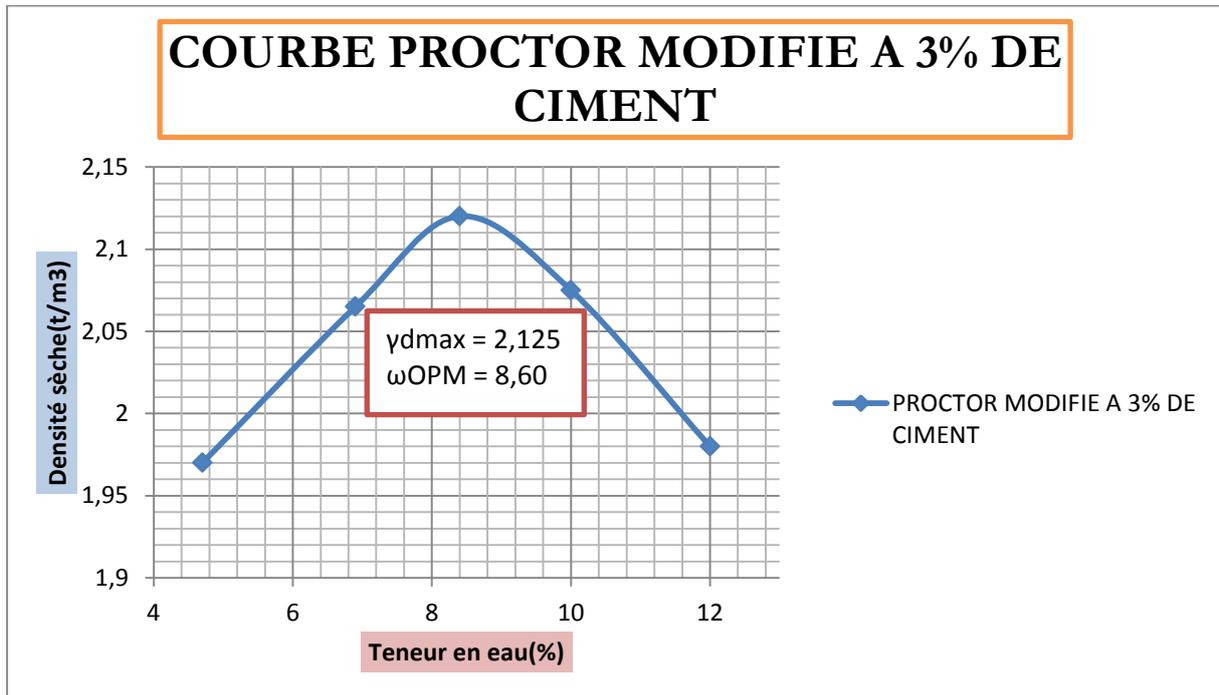
Annexe II.3.7 : Courbe CBR du matériau amélioré à 2,5% de ciment



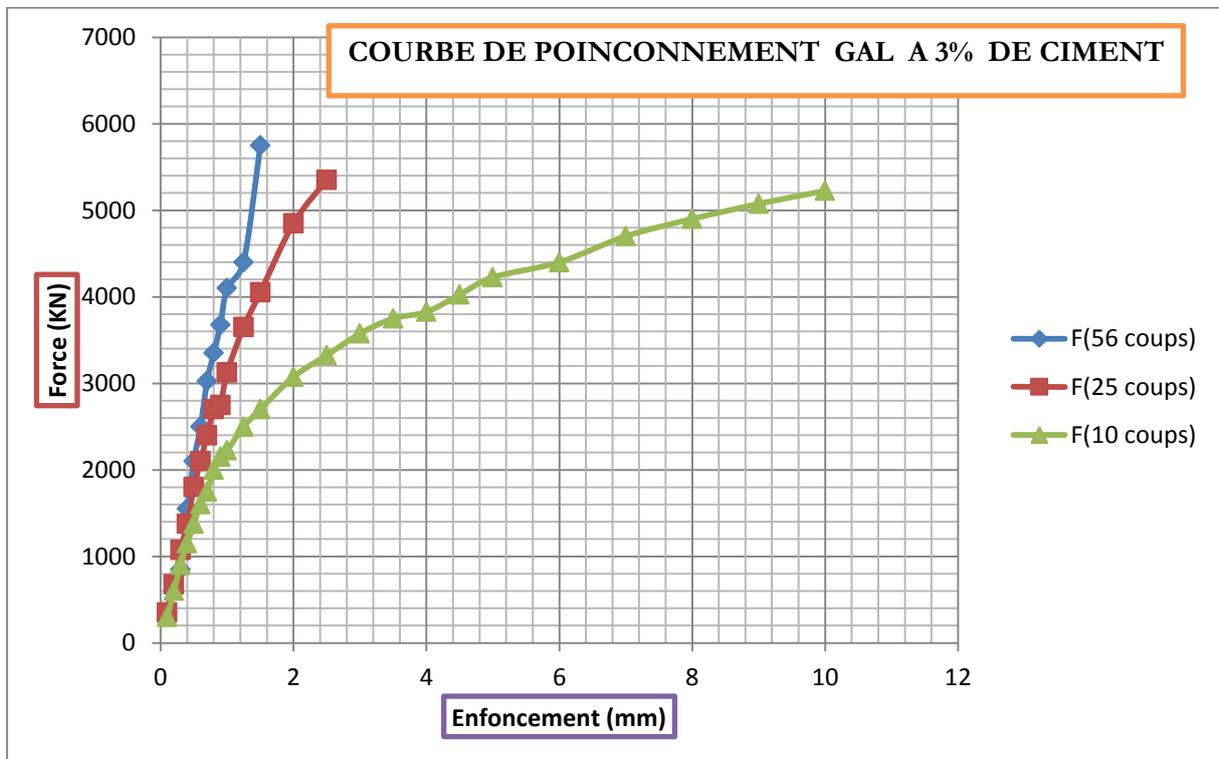
Annexe II.4.1: Tableau des résultats du Proctor modifié du matériau amélioré à 3% de ciment

Teneur en eau de moulage à 3%										
Numero de tare	42	24	10N	27D	H20	13	9	15	36	41E
Masse totale humide(g)	487,7	482,45	477,5	434,5	464,7	480,05	428	424,2	466,05	510,5
Masse totale sèche(g)	469,5	462,55	441,2	418,95	434,4	447,2	395,05	390,7	422,6	462,7
Masse de la tare(g)	55,35	61,35	60,85	60,25	71,9	61,4	62,25	60,5	62,8	62,2
Masse d'eau(g)	18,2	19,9	36,3	15,55	30,3	32,85	32,95	33,5	43,45	47,8
Masse du sol sec(g)	414,15	401,2	380,35	358,7	362,5	385,8	332,8	330,2	359,8	400,5
Teneur en eau (%)	4,4	5,0	9,5	4,3	8,4	8,5	9,9	10,1	12,1	11,9
Teneur en eau moyenne (%)	4,7		6,9		8,4		10,0		12,0	
Densité de moulage										
Masse totale humide(g)	8092		8189		8489		8519		8404	
Masse du moule(g)	3666		3666		3666		3666		3666	
Masse nette humide(g)	4426		4523		4823		4853		4738	
Volume du moule(Cm ³)	2066		2066		2066		2066		2066	
Densité humide	2,14		2,19		2,33		2,35		2,29	
Densité sèche	1,970		2,065		2,120		2,075		1,980	
Eau de mouillage(g)	2%	156	4%	315	6%	455	8%	707	10%	841
	7810		7869		7582		8837		8416	
Courbe de saturation à 100%	2,358		2,238		2,166		2,094		2,010	
Courbe de saturation à 90%	2,329		2,200		2,123		2,046		1,958	

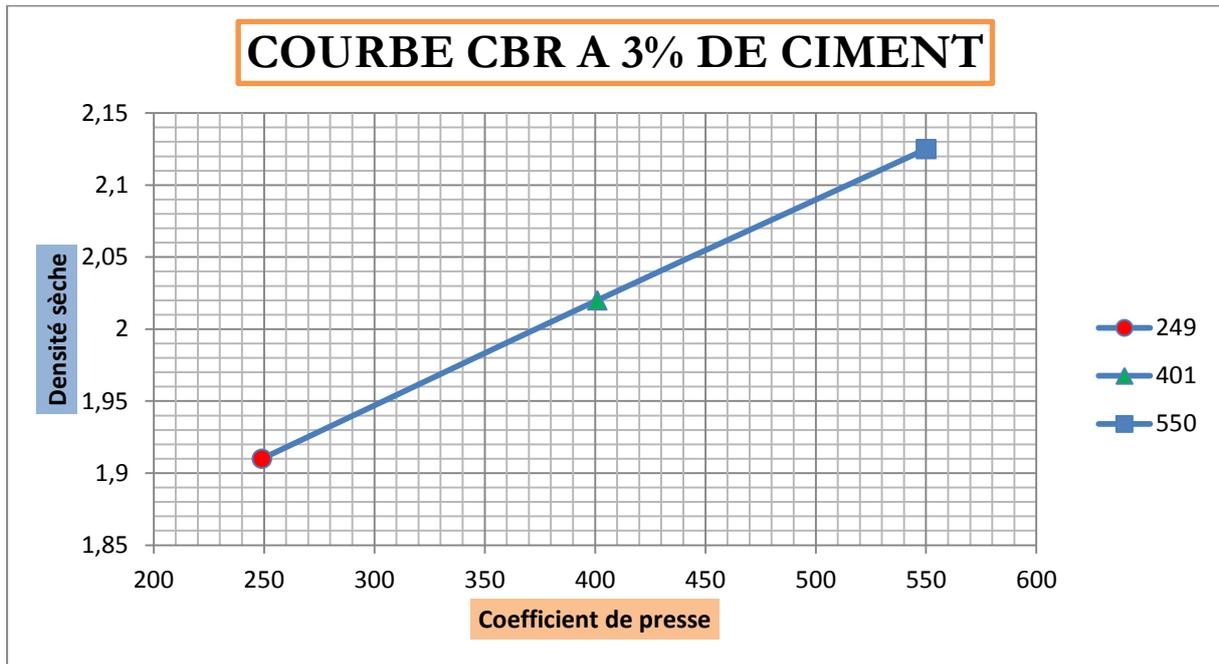
Annexe II.4.2: Courbe Proctor modifié du matériau amélioré à 3% de ciment



Annexe II.4.3 : Courbe de poinçonnement du matériau amélioré à 3% de ciment



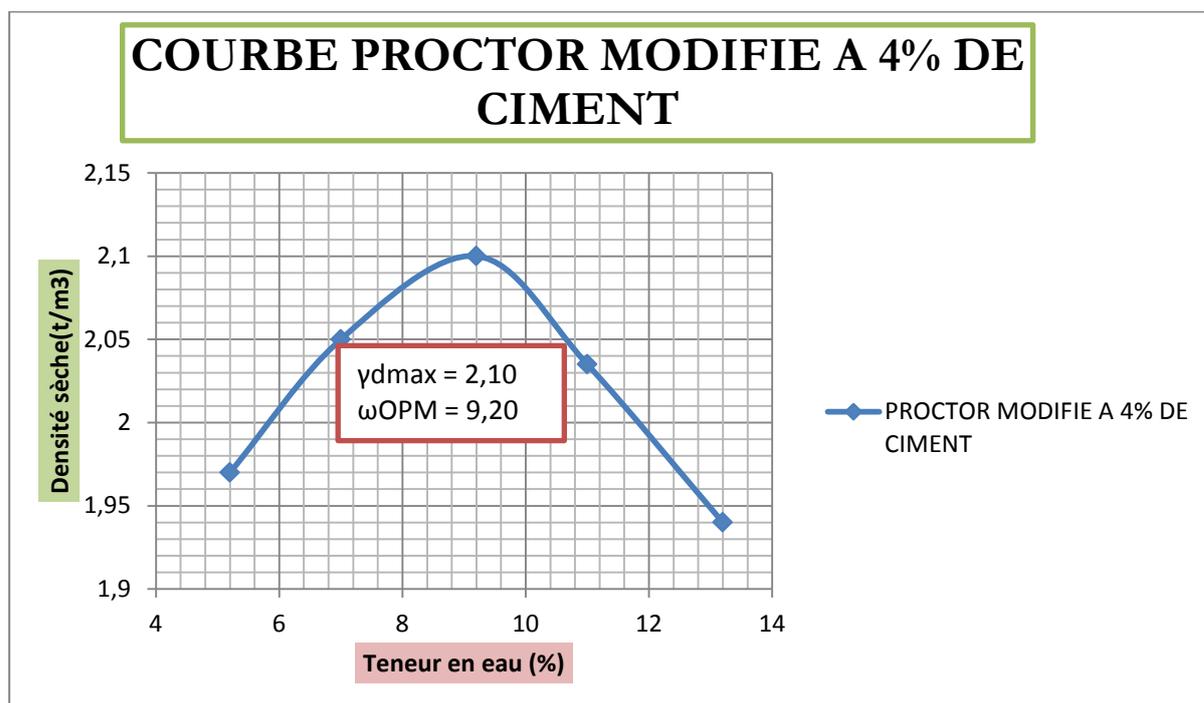
Annexe II.4.4 : Courbe CBR du matériau amélioré à 3% de ciment



Annexe II.5.1: Tableau des résultats du Proctor modifié du matériau amélioré à 4% de ciment

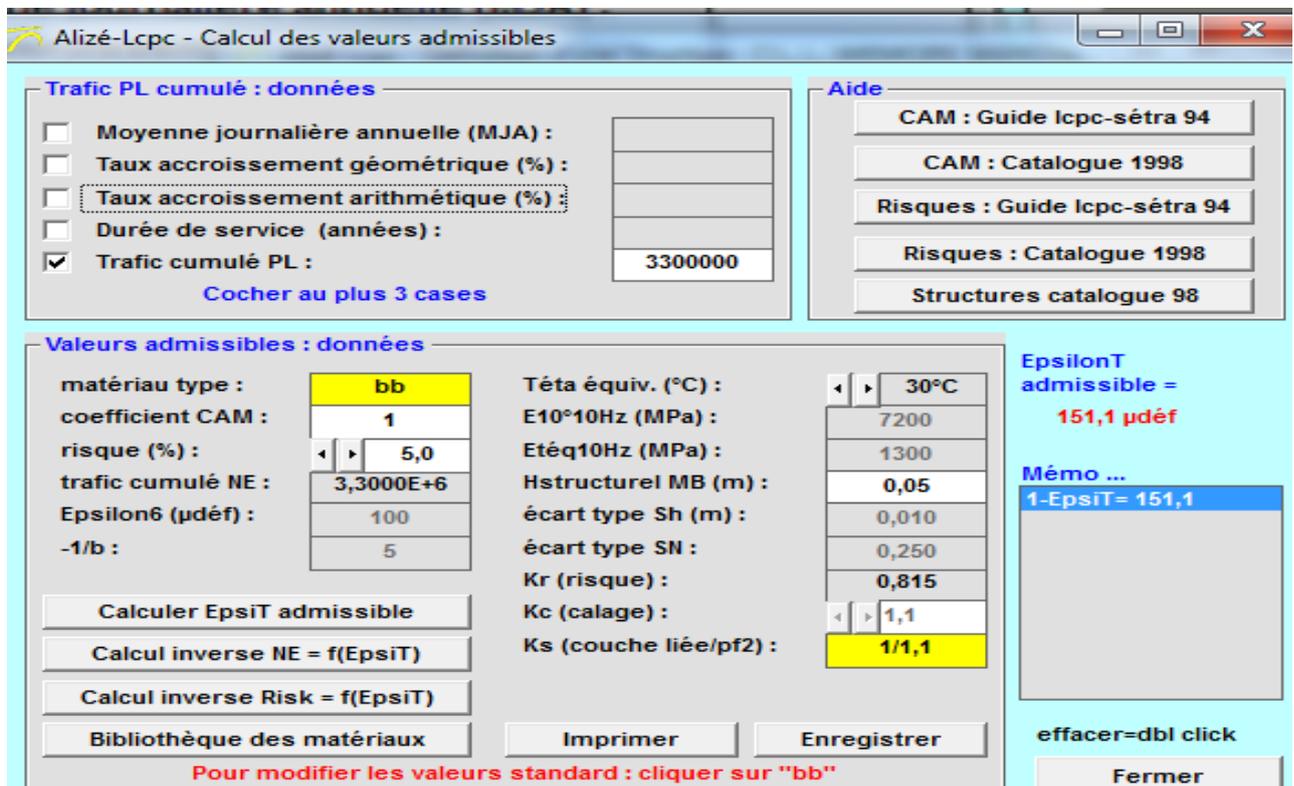
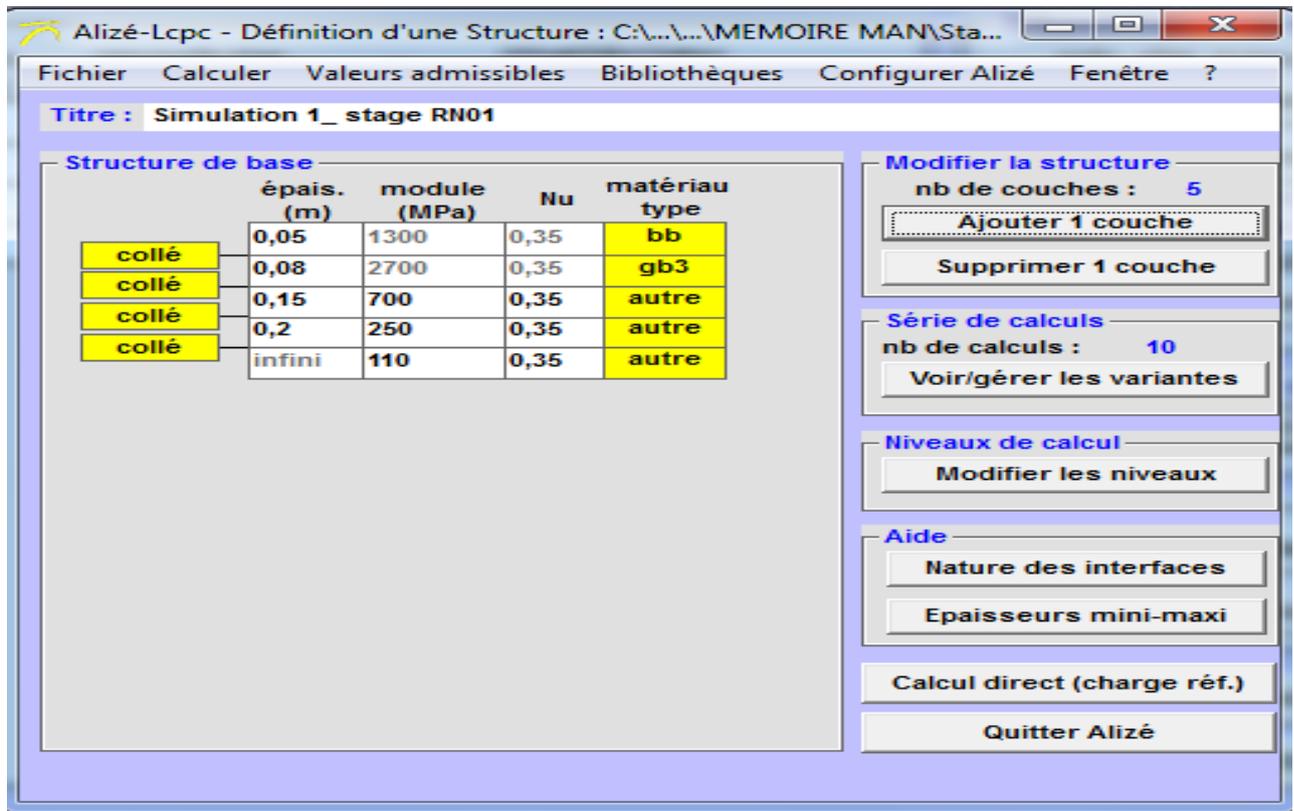
Teneur en eau de moulage à 4%										
Numero de tare	36	41E	H2	48E	H1	H29	37	H30	15	24
Masse totale humide(g)	496,95	492,05	510,78	447,5	512,5	505,85	430	531,35	460,9	435,25
Masse totale sèche(g)	475,1	471	479,8	424,5	475,65	470,5	390,05	490,05	414,45	391,35
Masse de la tare(g)	62,8	62,2	74,35	63,9	71,5	90,15	60,25	73,05	60,5	61,35
Masse d'eau(g)	21,85	21,05	30,98	23	36,85	35,35	39,95	41,3	46,45	43,9
Masse du sol sec(g)	412,3	408,8	405,45	360,6	404,15	380,35	329,8	417	353,95	330
Teneur en eau (%)	5,3	5,1	7,6	6,4	9,1	9,3	12,1	9,9	13,1	13,3
Teneur en eau moyenne (%)	5,2		7,0		9,2		11,0		13,2	
Densité de moulage										
Masse totale humide(g)	8107		8217		8437		8478		8394	
Masse du moule(g)	3666		3666		3666		3666		3666	
Masse nette humide(g)	4441		4551		4771		4812		4728	
Volume du moule(Cm ³)	2066		2066		2066		2066		2066	
Densité humide	2,15		2,20		2,31		2,33		2,29	
Densité sèche	1,970		2,050		2,100		2,035		1,940	
Eau de mouillage(g)	2%	181	4%	361	6%	565	8%	652	10%	936
	9063		9021		9413		8148		9360	
Courbe de saturation à 100%	2,328		2,235		2,130		2,052		1,963	
Courbe de saturation à 90%	2,297		2,197		2,085		2,001		1,908	

Annexe II.5.2: Courbe Proctor modifié du matériau amélioré à 4% de ciment



**ANNEXE N° 3 : PRESENTATION DES
SIMULATIONS SUR LE LOGICIEL ALIZE III -
LCPC**

III. PRESENTATION DES SIMULATIONS SUR LE LOGICIEL ALIZE III - LCPC



Thème : Amélioration des graveleux latéritiques au ciment en couches de chaussée au Burkina Faso : « cas des travaux de renforcement de la RN1 entre Boromo et Bobo - Dioulasso »

Alizé-Lcpc - Calcul des valeurs admissibles

Trafic PL cumulé : données

Moyenne journalière annuelle (MJA) :
 Taux accroissement géométrique (%):
 Taux accroissement arithmétique (%):
 Durée de service (années):
 Trafic cumulé PL : 3300000
 Cocher au plus 3 cases

Aide

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

Valeurs admissibles : données

matériau type : gb3
 coefficient CAM : 1
 risque (%): 5,0
 trafic cumulé NE : 3,3000E+6
 Epsilon6 (µdéf) : 90
 -1/b : 5

Téta équiv. (°C) : 30°C
 E10¹⁰Hz (MPa) : 12300
 Etêq10Hz (MPa) : 2700
 Hstructurel MB (m) : 0,08
 écart type Sh (m) : 0,010
 écart type SN : 0,300
 Kr (risque) : 0,787
 Kc (calage) : 1,3
 Ks (couche liée/pf2) : 1/1,1

Calculer EpsiT admissible
 Calcul inverse NE = f(EpsiT)
 Calcul inverse Risk = f(EpsiT)
 Bibliothèque des matériaux
 Imprimer
 Enregistrer

Pour modifier les valeurs standard : cliquer sur "gb3"

EpsilonT admissible = 140,7 µdéf

Mémo ...

1-EpsiT= 151,1
3-EpsiT= 140,7

effacer=dbl click
Fermer

Alizé-Lcpc - Calcul des valeurs admissibles

Trafic PL cumulé : données

Moyenne journalière annuelle (MJA) :
 Taux accroissement géométrique (%):
 Taux accroissement arithmétique (%):
 Durée de service (années):
 Trafic cumulé PL : 3300000
 Cocher au plus 3 cases

Aide

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

Valeurs admissibles : données

matériau type : gnt et sol
 coefficient CAM : 1
 trafic cumulé NE : 3,3000E+6
 Coefficient A : 12000
 pente b : -0,222

Calculer Epsiz admissible
 Calcul inverse NE = f(Epsiz)

Bibliothèque des matériaux
Imprimer
Enregistrer

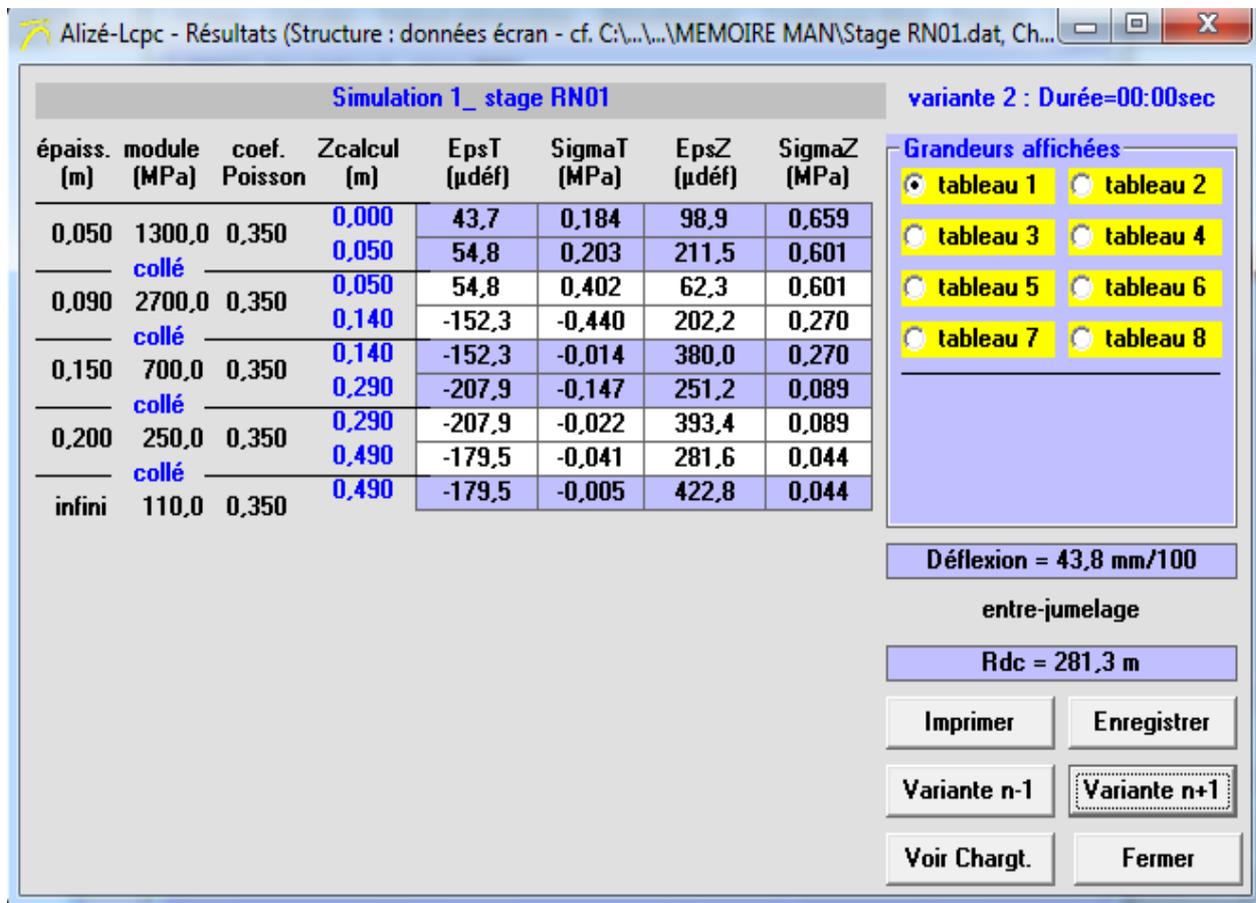
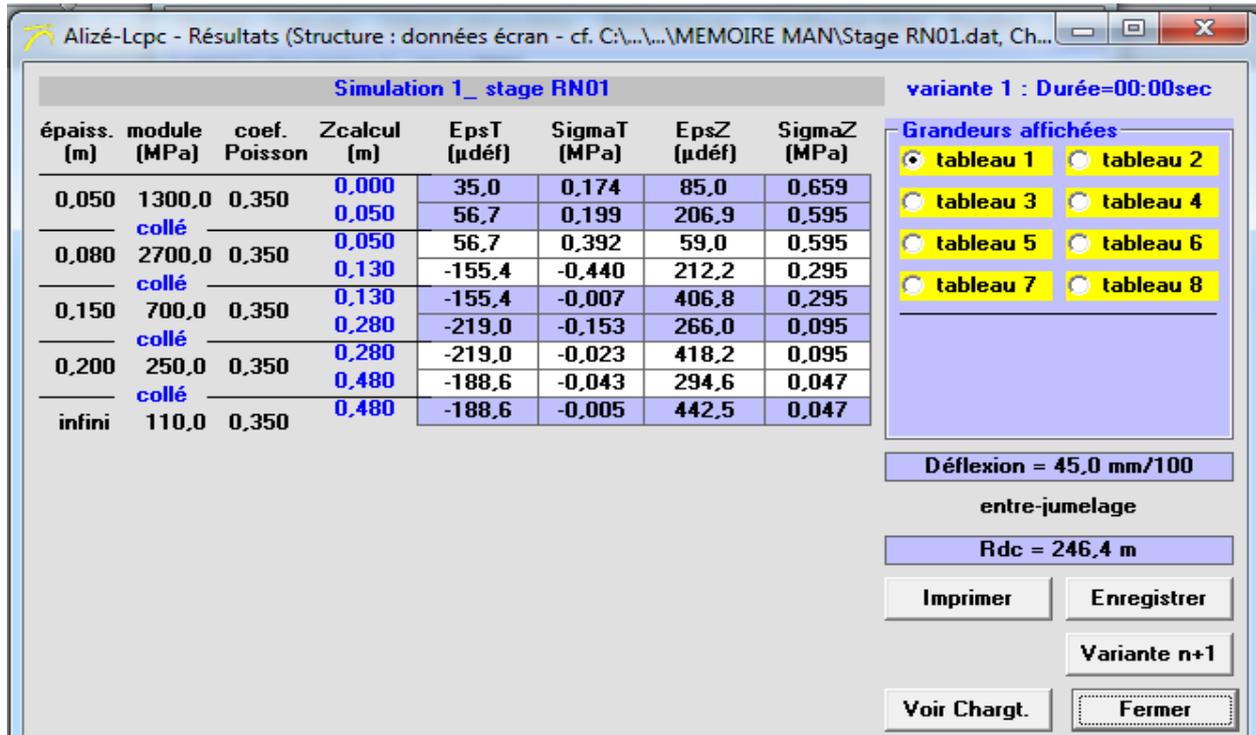
EpsilonZ admissible = 428,6 µdéf

Mémo ...

1-EpsiT= 151,1
3-EpsiT= 140,7
4-Epsiz= 428,6

effacer=dbl click
Fermer

Thème : Amélioration des graveleux latéritiques au ciment en couches de chaussée au Burkina Faso : « cas des travaux de renforcement de la RN1 entre Boromo et Bobo - Dioulasso »



Thème : Amélioration des graveleux latéritiques au ciment en couches de chaussée au Burkina Faso : « cas des travaux de renforcement de la RN1 entre Boromo et Bobo - Dioulasso »

Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran - cf. C:\...\\MEMOIRE MAN\Stage RN01.dat, Ch...

Simulation 1_ stage RN01 variante 3 : Durée=00:00sec

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (μéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	1300,0	0,350	0,000	48,2	0,185	111,3	0,659
			collé 0,050	52,5	0,207	216,5	0,606
0,100	2700,0	0,350	0,150	-148,3	-0,434	192,3	0,247
			collé 0,150	-148,3	-0,020	355,1	0,247
0,150	700,0	0,350	0,300	-197,5	-0,141	237,6	0,083
			collé 0,300	-197,5	-0,022	370,8	0,083
0,200	250,0	0,350	0,500	-170,9	-0,039	269,3	0,042
			collé 0,500	-170,9	-0,004	404,0	0,042
infini	110,0	0,350					

Grandeurs affichées

tableau 1 tableau 2

tableau 3 tableau 4

tableau 5 tableau 6

tableau 7 tableau 8

Déflexion = 42,7 mm/100
entre-jumelage

Rdc = 303,0 m

Imprimer Enregistrer

Variante n-1 Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran - cf. C:\...\\MEMOIRE MAN\Stage RN01.dat, Ch...

Simulation 1_ stage RN01 variante 4 : Durée=00:00sec

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (μéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (μéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	1300,0	0,350	0,000	51,0	0,183	122,3	0,659
			collé 0,050	50,1	0,206	221,4	0,610
0,110	2700,0	0,350	0,050	50,1	0,409	69,8	0,610
			collé 0,160	-143,7	-0,426	182,7	0,227
0,150	700,0	0,350	0,160	-143,7	-0,025	332,1	0,227
			collé 0,310	-187,7	-0,136	226,6	0,079
0,200	250,0	0,350	0,310	-187,7	-0,021	353,2	0,079
			collé 0,510	-162,8	-0,037	257,6	0,041
infini	110,0	0,350	0,510	-162,8	-0,004	386,2	0,041

Grandeurs affichées

tableau 1 tableau 2

tableau 3 tableau 4

tableau 5 tableau 6

tableau 7 tableau 8

Déflexion = 41,6 mm/100
entre-jumelage

Rdc = 325,3 m

Imprimer Enregistrer

Variante n-1 Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

Alizé-Lcpc - Résultats (Structure : données écran - cf. C:\...)\MEMOIRE MAN\Stage RN01.dat, Ch...

Simulation 1_ stage RN01 variante 5 : Durée=00:00sec

épais. (m)	module (MPa)	coef. Poisson	Zcalcul (m)	EpsT (µdéf)	SigmaT (MPa)	EpsZ (µdéf)	SigmaZ (MPa)
0,050	1300,0	0,350	0,000	52,6	0,180	132,2	0,659
			0,050	47,7	0,203	226,1	0,614
0,120	2700,0	0,350	0,050	47,7	0,404	73,6	0,614
			0,170	-138,8	-0,416	173,5	0,208
0,150	700,0	0,350	0,170	-138,8	-0,029	310,8	0,208
			0,320	-178,5	-0,130	217,4	0,075
0,200	250,0	0,350	0,320	-178,5	-0,021	337,5	0,075
			0,520	-155,2	-0,036	246,5	0,039
infini	110,0	0,350	0,520	-155,2	-0,004	369,3	0,039

Grandeurs affichées

tableau 1 tableau 2

tableau 3 tableau 4

tableau 5 tableau 6

tableau 7 tableau 8

Déflexion = 40,5 mm/100

entre-jumelage

Rdc = 347,9 m

Imprimer Enregistrer

Variante n-1 Variante n+1

Voir Chargt. Fermer

**ANNEXE IV.: TABLEAU DES RESULTATS
DES ESSAIS REALISES SUR LE TRONCON
BOROMO BOBO DIOULASSO**

Annexe IV.: TABLEAU DES RESULTATS DES ESSAIS REALISES SUR LE TRONCON BOROMO BOBO DIOULASSO

MATERIAU CRU						MATERIAU AMELIORE						
PK	GRANULO	LIMITES D'ATTERBERG		PROCTOR MODIFIE		CBR		PROCTOR MODIFIE		CBR		POURCENTAGE (%)
	% FINES	WL	IP	ρ_{dmax}	ω_{opt}	95%	98%	γ_d	ω_{opt}	95%	98%	
235+ 125	17,5	44	20	2,21	8,9	34	60					Sondage CO 20
235+ 125	20	31,5	11	2,44	6,8	22	40					Sondage G2035
235+ 125	20,5	30	12,5	2,43	6,5	20	41					Sondage G3550
235+ 125	24	44	18	2,25	9	38	55					Sondage G5070
235+ 125	78	65	32,5	1,83	15,4	2	3					Sondage G-70
305+ 250		42	22	2,2	9	47	88					3
228+ 500	18	52,5	25	2,225	8,6	43	80	2,21	9,2	192	234	2,5
232+ 00	20,5	45,5	22,5	2,21	8,9	60	86	2,235	9,7	172	188	2,5
231+ 500	23,5	45,5	22	2,24	9,5	60	88	2,235	9,7	172	188	2,5
231+ 00	28	46	22	2,29	8,2	51	69					
230+ 500	27,5	43	19,5	2,195	8,9	23	42	2,235	9,7	172	188	2,5
230+ 00	20,5	43,5	19,5	2,315	8,6	34	62	2,235	9,7	172	188	2,5
229+ 500	22,5	46	23	2,295	7,9	33	64					
229+ 00	20	41,5	20	2,21	7,8	29	53	2,21	8,9	124	186	2,5
229+ 00	23	39,5	18,5	2,15	9,4	26	58	2,16	8,6	210	275	2,5
229+ 00	22	42	19,5	2,175	8	46	75	2,16	8,6	210	275	2,5
228+ 00	23,5	39	15	2,255	8,9	34	57	2,21	8,9	124	186	2,5
227+ 450	19,5	43	20	2,36	7,8	19	36	2,235	9,7	172	188	2,5
227+ 050	24	42	25	2,24	7,4	19	49	2,235	9,7	172	188	2,5
247,248	24,5	44,5	21	2,18	9,7	74	113	2,165	10,1	177	225	3

Thème : Amélioration des graveleux latéritiques au ciment en couches de chaussée au Burkina Faso : « cas des travaux de renforcement de la RNI entre Boromo et Bobo - Dioulasso »

274, 278,279	27,5	48,5	24	2,14	10,7	58	87	2,12	11,4	142	187	3
301,302	25,5	53,5	24,5	2,18	10,1	25	51	2,17	10,5	185	235	3
303	19,5	56	31,5	2,21	8,8	19	23					
302+ 750	22,5	55	29	2,225	9,4	56	77	2,2	9,7	195	280	3
303+ 750	23,5	44,5	24,5	2,18	8,1	52	84	2,17	9,6	198	238	3
304+ 250	25,5	55	35	2,185	9,2	37	56	2,09	11,3	172	210	3
246+500 au 246+ 175	22	45	20,5	2,24	9,5	44	65	2,21	10,2	104	144	2,5
247+ 00 au 246+ 500	16	46,5	22,5	2,22	9	44	64					
247+ 500 au 247+ 00	22,5	50,5	24,5	2,19	9,5	28	48					
248+ 500 au 248+ 00	18,5	49	22	2,16	11	49	60					
249+ 00 au 248+ 500	19,5	51,5	23,5	2,23	9	35	60	2,21	9,4	223	283	2,5
249+ 500 au 249+ 00	18,5	47	22	2,2	9,5							
250+ 00 au 249+ 500	17	39,5	18	2,31	7,3	46	106	2,29	8	101	123	2,5
250+ 600 au 250+ 00	15	40	17,5	2,31	7,4	19	32	2,28	7,9	150	196	2,5
251+200 au 250+ 600	21	45,5	21	2,26	8							
251+ 200 au 251+ 725	26	54	28,5	2,155	9,9	19	37	2,14	10,2	86	119	2,5
251+800 au 252+ 200	15	48	21,5	2,2	9,4	46	91	2,18	10,2	168	205	2,5
252+ 200 au 252+ 800	17,5	40	17	2,2	9,5	32	52	2,17	10,8	164	206	2,5
254+ 00 au 253+ 500	20,5	46	19	2,245	8,7	41	74	2,21	10,5	360	500	2,5
270+ 330 au 270+ 460	21	38	20	2,225	9	32	57	2,2	10,3	83	120	2,5
255+ 750 au 255+ 155	18	41,5	18,5	2,29	7,7	46	80	2,27	9	130	246	3
256+ 700 au 256+ 250	15	40,5	14,5	2,36	8,7	49	74	2,34	9	157	218	2,5
257+100 au 256+ 700	14	43	16,5	2,375	7,7	72	108	2,35	8,6	146	184	3
257+700 au 257+ 200	17	40,5	14	2,32	8,6	40	77	2,3	9,3	190	217	3
259+700 au 259+ 200	15,5	53	24,5	2,15	9,5	44	64	2,13	10,4	175	280	3
260+700 au 260+ 200	14	44	19,5	2,2	9,4	71	88	2,19	9,9	234	280	3
261+200 au 261+ 700								2,2	11	300	360	3

Thème : Amélioration des graveleux latéritiques au ciment en couches de chaussée au Burkina Faso : « cas des travaux de renforcement de la RNI entre Boromo et Bobo - Dioulasso »

233+700 au 233+ 200	18	51	25	2,17	8,8	27	35	2,155	9,2	140	192	3
234+200 au 233+ 700	20	48	21	2,17	10,1	32	61	2,15	11,4	235	335	3
234+700 au 234+ 200	16,5	47,5	21,5	2,205	8,3	68	98	2,19	9,2	262	314	3
235+800 au 235+ 300	18	47	25	2,22	8	29	57	2,2	8,5	180	260	3
235+300 au 234+ 700	19	48,5	21,5	2,17	8,5	56	72	2,155	9,3	165	290	3
236+500 au 235+ 800	19			2,17	10	33	71	2,15	10,9	178	216	3
238+00 au 237+ 500	21	46	20	2,23	8,7	24	58	2,21	10,3	250	284	3
237+00 au 236+ 500	18	53	27	2,23	9,4	46	76	2,2	10,2	244	330	3
237+500 au 237+ 00	15	49	21	2,15	9,7	52	73	2,13	10,1	120	158	3
239+525 au 239+ 600	21	47	21	2,195	8,4	56	72	2,165	9,4	190	264	3
241+125 au 240+ 625	25	43,5	19,5	2,175	9,1	26	46	2,16	9,6	170	225	3
238+500 au 238+ 00	17,5	48	21	2,185	9	38	74	2,17	9,7	94	174	3
239+00 au 238+ 500	23	48	19	2,23	9,2	39	71	2,21	9,7	166	214	3
259+200 au 258+ 700	17	39,5	17	2,35	7,4	54	94	2,32	8,6	160	198	2,5
258+700 au 258+ 200	17,5	38	15	2,335	7,5	53	79	2,32	8,1	160	188	2,5
240+125 au 239+ 625	18	48	22	2,18	8,2	67	106	2,14	9,4	150	255	3
241+ 625 au 241+ 125	25,5	44,5	21,5	2,225	9,5	23	54	2,25	9,9	86	121	2,5
240+625 au 240+ 125	24			2,19	9,1	39	72	2,16	9,5	280	342	3
242+125 au 241+ 625	15	45,5	21,5	2,33	8,1	98	156	2,2	8,5	170	194	2,5
244+625 au 244+ 125	17,5	49	23	2,3	8,4	42	64	2,28	8,8	150	194	2,5
244+125 au 243+ 625	13	42	17	2,295	9	70	115	2,285	9,4	222	334	2,5
243+625 au 243+ 125	11,5	44	19,5	2,315	8,6	71	108	2,29	9,4	230	345	2,5
254+600 au 254+ 00								2,14	12,4	387	457	2,5
261+700 au 261+ 200								2,205	10,8	134	192	2,5
262+300 au 261+ 700								2,19	11,6	136	172	2,5
305+220								2,185	9,2	96	156	2,5
303+750 au 304+ 250								2,19	9,4	156	190	2,5

Thème : Amélioration des graveleux latéritiques au ciment en couches de chaussée au Burkina Faso : « cas des travaux de renforcement de la RNI entre Boromo et Bobo - Dioulasso »

277+580 au 277+ 240								2,32	9,4	90	110	2,5
277+580 au 278+ 00								2,32	8	86	130	2,5
279+040 au 278+ 560								2,11	12,4	220	270	3
271+200 au 271+ 550								2,25	9,7	280	385	2,5
281+00 au 280+ 450								2,295	8,7	360	410	2,5
270+700 au 271+ 200								2,24	10,2	145	209	2,5
270+060 au 270+ 700								2,22	9,7	210	320	2,5
264+240 au 263+ 740								2,16	10,8	293	320	3
263+740 au 263+ 240								2,155	10,5	140	215	3
263+240 au 262+ 820								2,1	12	205	332	3
MOYENNE	20,8	45,6	21,2	2,23	8,9	41,8	68,9	2,2	9,6	177,0	232,1	2,8
Maximum	78	65	35	2,44	15,4	98	156	2,35	11,4	360	500	3
Minimum	11,5	30	11	1,83	6,5	2	3	2,09	7,9	83	119	2,5