CARACTERISATION GEO MECANIQUE DE LA LATERITE DE SAABA (BURKINA FASO) AMELIOREE AU CIMENT EN VUE D'UNE UTILISATION EN CONSTRUCTION ROUTIERE

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

MASTER

SPECIALITE ROUTES ET OUVRAGES D'ARTS

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

Essonam Mazabalo ABISSI

Matricule : 2016 0076

Directeur de mémoire : Pr. Adamah MESSAN enseignant chercheur à 2IE

Encadrant 2iE : Dr Abdou LAWANE enseignant-chercheur à 2IE

Maitre de stage : Mme Marie Thérèse MBENGUE/GOMIS enseignante à 2IE

Structure d'accueil du stage : Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD) 2IE

Jury d'évaluation du mémoire :

Président : Dr. Babacar LEYE

Membres et correcteurs :

Dr. Omar Seick SORE

M. Amadou SIMAL

Promotion 2018/2019

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

- ♥ A toute la famille ABISSI : mes parents, ma petite famille, mes frères, mes sœurs.....
- ♥ Au PDG du groupe d'entreprises CENTRO SA – IBMA SA – ECNC M. BASSAYI Kpatcha

REMERCIEMENTS

Au terme de cette formation je formule mes sincères remerciements :

- A la *Fondation 2IE* pour la formation reçue tout au long de ce parcours
- Au *Pr Adamah MESSAN* mon Directeur de Mémoire, pour le stage offert au Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD) de 2IE et l'attention accordée à nos travaux de recherche.
- Au *Dr Abdou LAWANE GANA* (chef de département GCH-2iE), mon encadrant pour son assistance et son soutien dans l'exécution des travaux au Laboratoire
- A *Madame Marie Thérèse MBENGUE/GOMIS* (enseignant en génie civil à 2iE), mon Maître de stage pour tout le suivi et la disponibilité dont elle a fait preuve au long de ce stage.
- Au *Dr Decroly DJOUBISSIE DENOUWE, Dr Seick Omar SORE, Mr Arnaud OUEDRAOGO, M. Philbert NSHIMIYIMANA, M. Césaire HEMA, M. Christian RAMADJI* pour les différents apports.
- A *Mr Salif KABORE* pour son aide dans la réalisation des essais.
- A *M. BASSAYI Kpatcha PDG* du groupe d'entreprises *CENTRO SA – IBMA SA – ECNC* par qui cette formation a été possible.
- A ma famille professionnelle le personnel du groupe d'entreprises *CENTRO SA – IBMA SA – ECNC*
- A tous les stagiaires du Laboratoire Eco-Matériaux et Habitat Durable (LEMHaD) 2IE
- A toutes ces personnes qui ont participé d'une façon directe ou indirecte à cette formation.

RESUME

Ces travaux de recherche axés sur l'étude des performances mécaniques de la latérite de l'emprunt de SAABA (Badnogo 2), à travers la technique d'amélioration au ciment, nous ont amené à doser progressivement (de 1% à 3% en poids) le ciment et à étudier les variations du comportement mécanique des mélanges y résultants.

Les résultats des différentes manipulations en laboratoire nous ont montré que le ciment avait un effet améliorant, fonction du dosage, sur les propriétés physico-mécaniques des graveleux latéritiques étudiés. Les densités sèches optimales ont légèrement évolué dans toutes les couches étudiées. Ont aussi évolué, les valeurs de CBR de près de 1375%, les valeurs de résistance à la compression de près de 535% et celles du module de Young de près de 630%, en fonction de l'augmentation du ciment. Les variations des caractéristiques mécaniques sont dans l'ensemble linéaires.

De toutes les couches (C1, C2 et M (42% de C1 et 58% de C2)), la couche C2 a présenté des valeurs meilleures pour la plupart dues à sa faible teneur en argile révélée par les essais.

La comparaison des résultats aux valeurs limites indiquées par le CEBTP (1980) exige une amélioration des graveleux latéritiques de cet emprunt avant tout usage. Cependant un minimum de 2% au ciment pour couche de fondation (CBR $\geq$ 30) et de 3% de ciment pour les couches C2 et M avant leur usage en couche de base (CBR $\geq$160), pour une classe de trafic T3 généralement adoptée dans le dimensionnement des routes au Burkina Faso. La couche C1, même améliorée à 3% de ciment n'est pas admise en base car ayant un CBR à 95%OPM = 154 à ce taux de ciment.

Aussi l'étude a révélé que des valeurs de modules prises d'une façon empirique égales à k x CBR (k coefficient constant pour un même traitement) ne sont pas vérifiées sur les matériaux de cet emprunt.

Mots clés *: Latérite améliorée ; carrière de Saaba ; ciment ; chaussée, caractérisation.*

ABSTRACT

This research work, focused on studying the mechanical performance of the laterite of the SAABA loan (Badnogo 2), through the cement improvement technique, led us to gradually dose (from 1% to 3% by weight) the cement and to study the variations in the mechanical behavior of the resulting mixtures.

The results of the various laboratory manipulations showed us that cement had an improving effect, depending on the dosage, on the physico-mechanical properties of the lateritic gravelly materials studied. Optimal dry densities have changed slightly in all the layers studied. The CBR values of nearly 1375%, the compressive strength values of nearly 535% and the Young's modulus values of nearly 630% have also changed, depending on the increase in cement. The variations in mechanical characteristics are generally linear.

Of all the layers (C1, C2 and M (42% C1 and 58% C2)), the C2 layer showed better values for the most part due to its low clay content revealed by the tests.

Comparison of the results with the limit values indicated by the CEBTP (1980) requires an improvement of the lateritic gravelly soils of this loan before any use. However, a minimum of 2% cement for base courses (CBR $\geq$ 30) and 3% cement for C2 and M layers before their use as base courses (CBR $\geq$160), for a traffic class T3 generally adopted in road design in Burkina Faso. The C1 layer, even improved to 3% cement, is not allowed as a base because it has a CBR of 95%OPM = 154 at this cement level.

Also the study revealed that empirically taken module values equal to k x CBR (k constant coefficient for the same treatment) are not verified on the materials of this loan.

Keywords: Improved laterite; Saaba quarry; cement; pavement, characterization.

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

2iE	Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
BCEOM	Bureau Central d'Etudes pour les équipements d'Outre-Mer
CBR	California Behring Ratio
CEBTP	Centre expérimental de Recherches et d'Etudes du Bâtiment et des Travaux Publics.
CPA	Ciment Portland Artificiel
GAL	Grave Argileuse latéritique
GNT	Graves non traité
GTR	Guide de terrassement Routier
HRB	Highway Research Board
LCPC	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
LL	Limite de Liquidité
LP	Limite de Plasticité
IP	Indice de plasticité
LEMHaD	Laboratoire Eco-Matériaux et habitat Durable
SETRA	Service d'Etudes Technique des routes et Autoroutes
NF	Norme Française
OPM	Optimum Proctor Modifié
C1	Première couche
C2	Deuxième couche
M	Mélange de première couche et deuxième couche
W	Teneur en eau
$\boldsymbol{M_h}$	Masse humide
$\boldsymbol{M_s}$	Masse sèche

SOMMAIRE

DEDICACE I

REMERCIEMENTS II

RESUME III

ABSTRACT IV

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES V

SOMMAIRE 1

LISTE DES TABLEAUX 5

LISTE DES FIGURES 6

INTRODUCTION 7

1. CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE : 7

2. OBJECTIF DE L'ETUDE 8

3. STRUCTURE DU MEMOIRE : 8

CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE 9

I.1. LES LATERITES [6,7]: 9

I.1.1. Définition 9

I.1.2. Genèse des sols latéritiques 10

a. Le climat 10

b. La topographie 10

c. La végétation 11

d. Différents types de latérites 11

e. Les sols ferrugineux 11

f. Les sols ferralitiques 11

g. Les ferrisols 12

I.1.3. Les latérites au Burkina Faso 12

I.2. LES CHAUSSEES 12

CHAPITRE I : 12

I.2.1. Types de chaussées 12

a. Les chaussées souples 13

b. Les chaussées bitumineuses épaisses 13

c. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques 13

d. Les chaussées à structure mixte 13

e. Les chaussées à structure inverse 13

f. Les chaussées en béton de Ciment 13

I.2.2. Principales dégradations des chaussées : *14*

a. Les dégradations structurelles 14

b. Les dégradations superficielles 15

I.3. LES DIFFERENTS TYPES DE STABILISATIONS 15

I.3.1. Stabilisation mécanique *15*

a. Litho stabilisation 15

b. Ajout d'un sol fin à un sol grenu 16

c. Ajout d'un sol grenu (ou une fraction granulaire) à un sol fin 16

d. Eliminations des fines et/ ou éléments grossiers d'un sol 16

e. Utilisation des géo synthétiques 16

I.3.2. Stabilisation chimique[10] *16*

a. Traitement aux liants hydrauliques 16

b. Traitement aux liants hydrocarbonés 18

c. Traitement aux produits chimiques 18

d. Traitement mixte 18

I.4. CONDITION D'UTILISATION DE LA LATERITE DANS LA REALISATION DES DIFFERENTES COUCHES DE CHAUSSEE[16] 19

I.4.1. Plate-forme : *19*

I.4.2. Couche de forme *19*

I.4.3. Couche de fondation *19*

I.4.4. Couche de base *20*

I.4.5. Couche de roulement : *20*

CHAPITRE II : MATERIAUX, MATERIELS ET METHODES 21

CHAPITRE I : 21

II.1 MATERIAUX UTILISES : 21

II.1.1. La latérite : *21*

a. Localisation :....21
b. Prélèvement :....22
c. Préparation des échantillons :....23
d. Caractéristiques de la latérite :....23
II.1.2. Le Liant :....23
II.2 ESSAIS REALISES : 23
II.2.1 Préparation des échantillons :....23
II.2.2 Essais pour la détermination des paramètres d'état :....24
a. Les limites d'Atterberg : NF P 94-051....24
b. Teneur en eau initiale....25
c. Essai Proctor Modifié : NF P 94-093, Octobre 1999....25
II.2.3 Essais pour la détermination des paramètres mécaniques :....25
a. Essai de portance CBR (California Bearing Ratio) : NF P 94-078 (1997)....25
b. Essai de compression simple : NF P 94 – 077 (1997)....26
CHAPITRE III : RESULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS....28
CHAPITRE I : 28
III.1 ESSAIS POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES D'ETAT....28
III.1.1. Les limites d'Atterberg :....28
a. Couche C1....28
b. Couche C2....28
c. Mélange....29
III.1.2. Teneur en eau initiale....30
III.1.3. Essai Proctor Modifié :....30
a. Couche C1....30
b. Couche C2....31
c. Couche M....32
III.1.4. Gonflement mesuré....33
III.2 ESSAIS POUR LA DETERMINATION DES PARAMETRES MECANIQUES :....33
III.2.1 Essai de portance CBR après imbibition :....33

III.2.2 Essai de compression simple : *35*

a. Résistance à la compression à 7 jours d'âge :.....35

b. Module de Young :.....36

c. Rapport du module et le CBR : k = E / CBR.....37

CONCLUSION 39

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES 41

BIBLIOGRAPHIE..... 42

ANNEXES 44

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: épaisseur moyenne des couches stratigraphiques 22

Tableau II: Différents échantillons de l'étude 24

Tableau III: Valeurs des teneurs en eau naturelle 30

Tableau IV: valeurs du gonflement 33

Tableau V : usage des différentes couches suivant les valeurs du CBR selon le CEBTP.....34

Tableau VI: modules de la couche mélange 36

Tableau VII: rapport E/CBR 38

Tableau VIII:Optimums Proctor des couches à l'état cru 59

Tableau IX: Valeurs des paramètres mécaniques.....59

LISTE DES FIGURES

Figure 1:Principe des structures routières (http://lycee-cherioux.fr).....12

Figure 2: Carte de localisation de l'emprunt 21

Figure 3: répartition stratigraphique des couches latéritiques à l'emprunt 22

Figure 4: Etats de consistance (www.researchgate.net) 24

Figure 5: éprouvettes CBR imbibées et capteurs pour mesure le gonflement 26

Figure 6: photos de quelques éprouvettes, à gauche : subdivisons pour la pose des capteurs déplacement au tiers central ; à droite : une éprouvette soumise à l'écrasement 27

Figure 7: éprouvettes après écrasement 27

Figure 7: Valeurs des limites d'Atterberg de la couche C1.....28

Figure 8: Valeurs des limites d'Atterberg de la couche C2.....29

Figure 9: Valeurs des limites d'Atterberg de la couche M.....29

Figure 11:Optimums Proctor de la couche C1 31

Figure 12:Optimums Proctor de la couche C2 31

Figure 13: Optimums Proctor de la couche M 32

Figure 14: Valeurs du CBR des différentes couches et dosage au ciment 33

Figure 15:Différentes valeurs de la résistance à la compression à 7j d'âge 35

Figure 16: courbes contrainte-déformation.....36

Figure 17: Valeurs du module de Young.....37

Figure 19: courbes granulométriques de chaque matériau 57

Figure 20: argilosité de chaque matériau.....58

Figure 21: valeur des limites d'Atterberg des matériaux 58

INTRODUCTION

1. Contexte et Problématique :

les formations latéritiques, représentant les plus abondantes ressources de matériaux «économiques» disponibles en Afrique tropicale et équatoriale [1], sont utilisées dans la construction de nombreux ouvrages. Selon que les latérites soient meubles ou indurées, elles sont utilisées en matériaux de remblai (routes, digues de barrages…) ou en blocs (construction des maisons, protection des talus…).

Ces dernières sont disponibles sur les 2/3 de la surface du pays[2], donc assez sollicitées pour les besoins humains. Cette demande de la ressource s'est accrue ces dernières années car avec l'ardent désir de promouvoir le développement économique, l'Etat Burkinabé s'est lancé dans la réalisation d'infrastructures (notamment routes et aménagements hydroagricoles) de qualité comme l'ambitionne le Plan National de Développement Economique et Social (PNDES 2016-2020).

Cette nouvelle dynamique politique crée une pression sur l'utilisation des ressources notamment les latérites puisque faciles d'extraction et ayant une diversité d'usage.

Cependant, vue les avantages qu'offre ce matériau, des travaux de recherches sont entrepris pour lui assurer une utilisation optimale car selon le type d'ouvrage les exigences sur le matériau diffèrent.

Au-delà de ces aspects généraux d'usage du matériau, la particularité des infrastructures routières (consommatrices de la plus grande partie de la ressource) avec le trafic de plus en plus agressif du point de vue chargement et importance des flux exige des matériaux de plus en plus performants. Au point où progressivement les qualités naturelles ne soient plus à la hauteur du service attendu ou que le matériau naturel répondant ne soit plus disponible en quantité suffisante et qu'il faille passer à d'autres techniques pour les rendre utilisables.

Diverses études de caractérisation des graveleux latéritiques ont été réalisées sur des emprunts à la périphérie de Ouagadougou (capitale du Burkina Faso)[3],[4],[5] à travers les techniques de litho-stabilisation et l'amélioration Chimique (ciment et géo polymères).

La nécessité de disposer d'une grande base de données sur la ressource disponible nous a emmené à étendre cette étude sur l'emprunt de Saaba (Badnogo 2) cette étude de caractérisation géo mécanique se fera sur le graveleux latéritique amélioré au ciment en dosage respectifs de 1%, 2%, et 3% en poids de latérite.

2. Objectif de l'étude

La présente étude vise à ressortir les propriétés physiques et mécaniques de la latérite de Saaba (Badnogo 2) améliorée au ciment à différents dosages. Une étude sur les propriétés de cette latérite à l'état cru a été réalisée par Djimet SEID (2019), ainsi nos travaux permettront une comparaison des paramètres de l'état du matériau cru et ceux de son état amélioré au ciment en vue de définir ses usages possibles en construction routière.

L'atteinte de cet objectif principal sus cité se fera à travers :

- une Caractérisation physique du matériau amélioré
- une Caractérisation mécanique du matériau amélioré
- ne étude de l'influence réelle de cette méthode sur la performance du matériau.

3. Structure du mémoire :

Le document décrira l'ensemble des travaux, du prélèvement à l'emprunt, aux essais en laboratoire pour l'obtention des résultats. Ainsi, il suivra dans sa description cette architecture :

Le chapitre suivant (2) traitera des connaissances actuelles sur la latérite et ses différents usages

Le troisième chapitre exposera les différentes méthodes de travail et essais réalisés sur le matériau.

Le quatrième chapitre ressortira les différents résultats obtenus et nos différentes interprétations de ces derniers.

Chapitre I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Les Latérites [6,7]

I.1.1. Définition

Le terme "latérite" fait son apparition dans la littérature scientifique au début du dix-neuvième 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) écrivait que selon Dreyfus (1952), ce terme aurait été employé pour la première fois par un géologue anglais Buchanan (1807), qui le décrivait comme suit : "C'est un des meilleurs matériaux de construction, rempli de cavités et de pores, possédant de grandes quantités de fer, de coloration rouge et jaune. L'intérieur du matériau, s'il est à l'abri de l'air, est si tendre que tout instrument métallique la coupe. Aussitôt taillée à la forme voulue, la masse devient aussi dure qu'une brique et résiste à l'eau et à l'air, bien mieux que toute brique que j'ai vu aux Indes"

Cette définition beaucoup trop restrictive ne présente plus qu'un intérêt historique car elle est loin de décrire le matériau latérite actuellement utilisé pour la construction. L'étude de ces formations se développa au dix-neuvième siècle et les géologues et les pédologues tentent de préciser la définition des latérites sur des bases chimiques, minéralogiques et stratigraphiques.

D'après Autret (1983) le Larousse en six volumes (1975) le définit comme suit : "latérite : n.f (du latin lateris, brique) sol rouge vif ou rouge brun, très riche en oxyde de fer et en alumine formé sous climat chaud". Les latérites sont des sols lessivés, riches en fer (minerai de Guinée) et contenant de l'alumine libre. Dans la forêt équatoriale humide, ce sont des argiles. Au nord et au sud, dès qu'une saison sèche apparait, on observe la formation de carapaces de latérites, roches très dures, affleurant dans les zones les plus arides et totalement infertiles.

Selon le manuel sur les routes en zones tropicales et désertiques (BCEOM-CEBTP, 1972), en se plaçant du point de vue de l'ingénieur, Dreyfus (1952) donne la définition suivante :
"Matériau de structure vacuolaire, souvent bariolé, avec des teintes allant du jaune au rouge, plus ou moins foncé, tirant même au noir, constitué par une croûte continue d'épaisseur et de dureté variables et ayant souvent l'aspect d'une scorie, ou encore contenant des concrétions isolées oolithiques ou pisolithiques de plus ou moins grande résistance et mélangées à une partie argileuse. En dessous de la croûte ou des concrétions, on trouve un sol également bariolé et à structure vacuolaire, mais moins riche en éléments durs et de teintes plus claire". Ces différentes définitions font ressortir déjà la complexité du matériau que nous avons à étudier.

I.1.2. Genèse des sols latéritiques

Le processus de formation des latérites est défini comme suit: "c'est un ensemble de phénomènes qui aboutissent à une altération poussée de la roche mère et à une individualisation des éléments tels que silice, oxydes, hydroxydes et hydrates métalliques, en particulier de fer et d'aluminium, de manganèse et de titane; ces derniers se maintiennent ou s'accumulent dans un horizon de surface ou de faible profondeur, la silice étant, au moins en partie entrainée à la base, hors profil" (ISTED, 1990).

L'analyse du processus fait apparaître les étapes suivantes :

- destruction des minéraux primaires,
- partage entre éléments maintenus sur place et éléments entrainés,
- néoformation des produits minéraux,
- lessivage des bases des silicates et d'une partie de la silice,
- maintien ou précipitation des sesquioxydes métalliques a l'origine des teintes vives,
- gibbsite et kaolinite peuvent coexister ou non (gibbsite + silice = kaolinite).

Ce processus de formation est influencé par plusieurs facteurs naturels qui sont principalement :

- le climat (pluviométrie, température, bilan hydrique),
- la topographie (érosion, drainage),
- la végétation (matières organiques, bactéries, acides humiques).

a. Le climat

Le climat a une action combinée par la température et le bilan hydrique. Une pluviométrie importante est nécessaire pour provoquer l'altération des roches, mais aussi le mouvement de l'eau dans le sol (bilan hydrique) est déterminant sur la nature du produit final. La température catalyse les réactions chimiques et joue sur l'altération en favorisant la formation ou la destruction de l'humus (ISTED, 1990).

Enfin un climat chaud et pluvieux à deux saisons alternées bien marquées est nécessaire pour la formation des sols latéritiques.

b. La topographie

La topographie influe sur le processus de formation des latérites en favorisant ou en défavorisant 1 ' accumulation de 1 'eau. Une zone plate permet l'accumulation de l'eau et évite l'érosion mécanique, alors qu'une forte pente permet le ruissellement. Ces phénomènes influent beaucoup sur le type de latérites formées.

c. La végétation

La végétation permet la formation de la matière organique mais aussi joue sur le ruissellement et le bilan hydrique, favorisant la formation d'un type de latérites spécifiques selon qu'on se trouve en zone de forêt ou de savane.

d. Différents types de latérites

D'une façon générale, les latérites sont formées par lessivage des roches dans des conditions particulières qui règnent sous les tropiques. Selon qu'on se trouve en zone tropicale sèche ou en zone tropicale humide, on rencontre différents types de latérites qui sont :

- les sols ferrugineux
- les sols ferralitiques
- les ferrisols

e. Les sols ferrugineux

Ils se forment dans les régions à climat tropical avec une longue saison sèche. La végétation est de type savane et le drainage est médiocre ou mauvais.

Pendant la saison sèche, les silicates ferreux et les oxydes ferriques libérés pendant la dissolution de la roche mère en saison de pluie remontent grâce à l'intense évaporation entrainant une migration des complexes ferro-siliciques. A l'approche de la surface, leur déshydratation progressive provoque en définitif la formation d'oxydes, sous forme d'alumine (AL_2O_3) et d'hématite (Fe_2O_3) responsables de la couleur rouge brique des latérites.

Les sols ferrugineux se caractérisent par :

- une forte proportion de nodules formés par un ciment ferrugineux.
- les éléments fins comprennent assez peu de minéraux argileux
- l'indice de plasticité reste en général faible (< 25).
- l'abondance de ciment ferrugineux en plus des nodules peut amener A la formation d'une cuirasse dure et continue à certain niveau (BCEOM-CEBTP, 1972).

f. Les sols ferralitiques

Ils se forment en zone tropicale humide sans saison sèche nettement marquée. La végétation est de type forêt et le drainage est médiocre. Le processus est continu et à sens unique. Il n'y a pas de migration vers le haut. Les réactions d'hydrolyse ne sont pas les mêmes qu'en zone sèche, l'altération est plus rapide et plus complète, les couches latérisées sont plus épaisses.

Les sols ferralitiques se caractérisent par :

- une assez importante proportion de nodules mais avec formation de cuirassement rare.
- les éléments fins comprennent une forte proportion d'argile.
- l'indice de plasticité est en général élevé (> 25)

g. Les ferrisols

Ce sont des sols ressemblant aux sols ferralitiques par ce qu'on les rencontre sous les climats les plus humides et que les profils ne présentent pas d'hétérogénéité. Ils en différent par un rapport SiO_2/Al_2O_3 voisin de 2. Ces sols ne se forment qu'en profondeur à cause de l'activité des phénomènes d'érosion.

En somme les sols ferralitiques sont essentiellement des sols de forêt alors que les sols ferrugineux sont au contraire des sols de savane dont la prospection est parfois difficile lorsqu'ils n'apparaissent pas en surface.

I.1.3. Les latérites au Burkina Faso

Le Burkina Faso jouit d'un climat tropical de type soudano-sahélien donc du type tropical sec avec une saison sèche plus longue que la saison des pluies.

La végétation est quant à elle, caractérisée par la savane composée d'arbres et d'arbustes sur un relief relativement plat qui empêche l'écoulement rapide des eaux de pluie.

L'ensemble de ces facteurs naturels au regard de la revue bibliographique sur les types de latérites nous amène à classer les latérites du Burkina Faso parmi les types ferrugineux.

I.2. Les Chaussées

I.2.1. Types de chaussées

Les chaussées sont diverses mais partagent ensemble le même principe (Figure 1) :

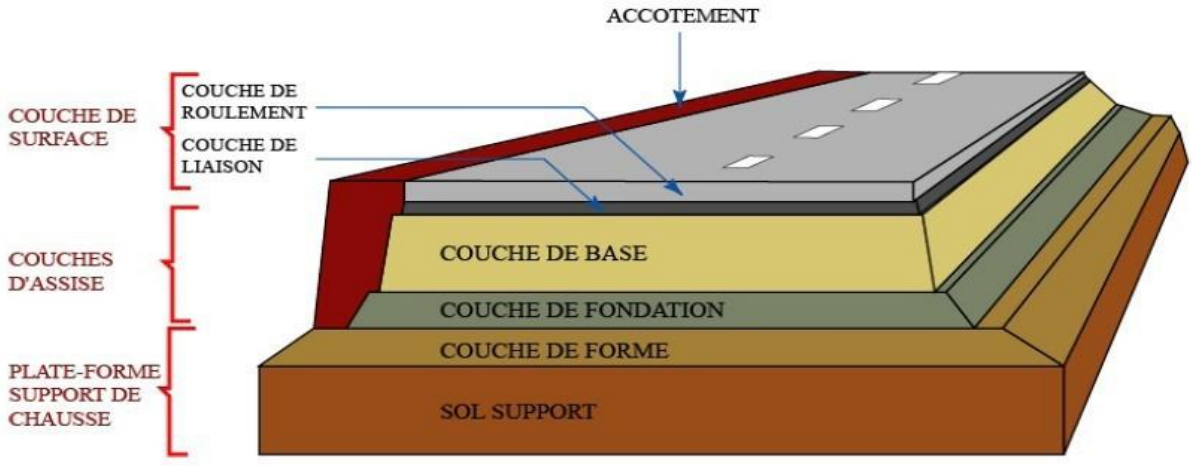


Figure 1:Principe des structures routières (http://lycee-cherioux.fr)

Les chaussés, suivant les matériaux utilisés pour les différentes structures, se classent en ces groupes selon le ***LCPC*** [8]:

a. Les chaussées souples

Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

b. Les chaussées bitumineuses épaisses

Elles se composent d'une couche de roulement bitumineuse sur un corps de chaussée en matériaux traités aux liants hydrocarbonés, fait d'une ou deux couches (base et fondation). L'épaisseur des couches d'assise est le plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.

c. Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques

Ces structures sont qualifiées couramment de "semi-rigide". Elles comportent une couche de surface bitumineuse sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une ou deux couches (base et fondation) dont l'épaisseur totale est de l'ordre de 20 à 50 cm.

d. Les chaussées à structure mixte

Ces structures comportent une couche de roulement et une couche de base en matériaux bitumineux (épaisseur de la base : 10 à 20 cm) sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques (20 à 40 cm). Les structures qualifiées de mixtes sont telles que le rapport de l'épaisseur de matériaux bitumineux à l'épaisseur totale de chaussée soit de l'ordre de 1/2.

e. Les chaussées à structure inverse

Ces structures sont formées de couches bitumineuses, d'une quinzaine de centimètres d'épaisseur totale, sur une couche en grave non traitée (d'environ 12 cm) reposant elle- même sur une couche de fondation en matériaux traités aux liants hydrauliques. L'épaisseur totale atteint 60 à 80 cm.

f. Les chaussées en béton de Ciment

Ces structures comportent une couche de béton de ciment de 15 à 40 cm d'épaisseur éventuellement recouverte d'une couche de roulement mince en matériaux bitumineux. La couche de béton repose soit sur une couche de fondation (qui peut être en matériaux traités aux liants hydrauliques, en béton de ciment, ou drainante non traitée), soit directement sur le support de chaussée avec, dans ce cas, interposition fréquente d'une couche bitumineuse. La dalle de

béton peut être continue avec un renforcement longitudinal ("béton armé continu"), ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints.

Au-delà de cette classification faite par le LCPC, toutes ces structures ont chacune leurs avantages et limites, cependant le choix est opéré à la suite de la prise en compte de certains paramètres :

- Aspects techniques (trafic, le sol support, la qualité des matériaux, les conditions climatiques, les entretiens futurs, durée de vie projetée)
- Aspects économiques (les budgets disponibles)
- Gisements disponibles.

L'ingénieur devra observer ces contraintes en opérer un choix ayant un bon rapport qualité-coût.

I.2.2. Principales dégradations des chaussées :

La dégradation des chaussées est causée par les agressivités qu'elles subissent lors de leur mise en service. Ces agressivités sont dues à l'usage (trafic) ou au climat (pluies, soleil, …). La rapidité de l'évolution des dégradations qui apparaissent est aussi liée à la nature et à l'épaisseur des matériaux utilisés et à leurs conditions de fabrication et de mise en œuvre. Certains désordres consécutifs à l'instabilité du support de la chaussée (remblai ou terrain naturel) peuvent apparaitre indépendamment du trafic et du climat [9].

Principales dégradations des chaussées

On note deux grandes familles des dégradations courantes, structurelles et superficielles[9].

a. Les dégradations structurelles

On distingue essentiellement :

- Fissuration de fatigue des assises de chaussée ou de la couche de roulement due à la répétition des efforts de traction par flexion au passage des charges. Elle apparait dans les bandes de roulement parallèlement à l'axe de la chaussée et évolue vers un faïençage à mailles de plus en plus fines pouvant prendre l'aspect, sur certaines structures, d'une fissuration en dalles.
- Dégradations structurelles dues à un sol support peu portant et insuffisamment protégé par la chaussée, ou à des matériaux de chaussée de mauvaise qualité. Il peut s'agir d'ornière à grand rayon, d'affaissement de rive ou de flache suivant la localisation et l'extension des déformations.

b. Les dégradations superficielles

- Remontées de liant couramment appelées ressuage, elles se produisent sur la couche de roulement en période chaudes.
- Usure de la couche de roulement se traduisant par le polissage des gravillons, leur arrachement ou celui du mortier sous l'effet du frottement des pneumatiques et des efforts tangentiels exercés par les charges roulantes.
- Orniérage par fluage dit à petit rayon de la couche de roulement ou de son support bitumineux sous l'effet du trafic lourd.
- Fissuration de la couche de roulement liée à une mauvaise exécution des joints de construction, su vieillissement du liant ou à une sensibilité du bitume aux contraintes thermiques.

Au Burkina Faso, les plus part des dégradations observées sont des fissures et des nids de poules. Elles ont le plus souvent lieu sur les chaussées aux couches d'assise en latérite dont la base est généralement améliorée au ciment ou litho stabilisée. Sur les chaussées à couche de base en grave bitume ces dégradations sont moins récurrentes. Ce constat nous interpelle sur la connaissance véritable de ce matériau qu'est le graveleux latéritique.

I.3. Les différents types de stabilisations

La stabilisation d'un sol est l'amélioration des performances de ce dernier par adjonction d'un autre matériau. Le procédé rend un sol, au départ inapte pour un usage à raison de défaut de capacité mécanique ou physique, utilisable. Cependant nous distinguons deux grandes catégories de stabilisation : la stabilisation mécanique et celle chimique.

I.3.1. Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique consiste en l'amélioration du squelette granulaire d'un sol par l'ajout d'un matériau afin d'augmenter les possibilités de compactage et la résistance d'un sol. Les techniques de stabilisation mécaniques les plus connues sont : ajout d'un sol fin à un sol grenu, ajout d'un sol grenu (ou une fraction) à un sol fin, élimination des fines ou éléments grossiers d'un sol, la litho stabilisation et l'utilisation des géo synthétiques[10].

a. Litho stabilisation

C'est la stabilisation mécanique qui consiste à l'ajout de concassés (souvent du granite, du basalte, du grès ou de silexite) à un matériau latéritique pour améliorer essentiellement la portance.

b. Ajout d'un sol fin à un sol grenu

Cette technique consiste en l'ajout d'un sol de petite classe granulaire à un de classe plus grande. Ce procédé permet d'avoir une meilleure granulométrie tout en augmentant la résistance du sol.

c. Ajout d'un sol grenu (ou une fraction granulaire) à un sol fin

Ajout du sable et/ou cailloux à un sol fin sert à donner du squelette à ce dernier, ce qui augmente les performances mécaniques. La technique est utilisée surtout pour les plateformes argileuses.

d. Eliminations des fines et/ ou éléments grossiers d'un sol

L'élimination des fines et/ou éléments grossiers d'un sol est une méthode utilisée pour diminuer une fraction prépondérante afin améliorer la granulométrie et la portance d'un sol. Le coté onéreux de la technique limite son usage.

e. Utilisation des géo synthétiques

Les géo synthétiques de renforcement sont les matériaux employés dans ce sens. Ils sont incorporés dans les couches de chaussée pour une meilleure répartition des charges afin de limiter l'effet des charges sur les couches sous-jacentes.

I.3.2. Stabilisation chimique[10]

Le matériau ajouté réagit avec celui à améliorer pour finalement donner de meilleures performances. Cet ajout peut être un liant hydraulique ou liant hydrocarboné selon le résultat escompté. Cependant nous pouvons noter de diverses techniques de stabilisation chimiques.

a. Traitement aux liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des composés à base de silicates et d'aluminates de calcium anhydres. Leur gâchage avec de l'eau provoque leur prise, c'est-à-dire la cristallisation de produits hydratés plus stables. Ces produits hydratés ont des propriétés liantes qui peuvent se développer en l'absence d'air, sous l'eau. Ils s'hydratent en présence d'eau pour former un matériau solide, véritable roche artificielle. Le traitement des sols aux liants hydrauliques est une technique qui consiste à incorporer, au sein du sol, cet élément d'apport avec éventuellement de l'eau et de les mélanger plus ou moins intimement, jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer les propriétés nouvelles.[11]

- **Traitement au ciment**

La réaction du ciment avec le sol offre ces différents avantages :

- Réduction de la compressibilité et du gonflement

- Augmentation de la résistance du sol et de la durabilité

Elle reste une technique assez rependue dans l'espace intertropical où la latérite est assez prépondérante.

➢ **Traitement à la chaux**

La chaux est obtenue par cuisson de carbonate de calcium pur ($CaCO_3$). Elle se présente sous deux formes[10] :

- Sous forme de chaux vive (CaO) : $CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 (T > 900°c)$;
- Sous forme hydratée $(Ca(OH)_2)$: $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Chaleur$.

Le traitement des sols à la chaux est un procédé qui améliore la maniabilité des matériaux limono-argileux et leur confère de meilleures propriétés mécaniques après compactage. Les avantages de cette technique sont surtout connus dans les terrassements et sont mis à profit pour la construction des remblais routiers, autoroutiers, ferroviaires, plates-formes industrielles, etc[12].

➢ **Traitement aux pouzzolanes**

Les pouzzolanes peuvent être à l'état naturel ou artificiel. Les pouzzolanes naturelles sont des matériaux résultant des émissions explosives de laves lors des phénomènes volcaniques alors que les pouzzolanes artificielles ne sont que des résidus de combustion du charbon produits dans les industries et/ou centrales d'incinération. Elles sont utilisées en technique routière pour améliorer l'état hydrique d'un sol et pour réaliser les assises en graves-pouzzolanes.

➢ **Traitement aux cendres volantes**

Les cendres thermiques produisent des quantités importantes de résidus de combustion, dont les cendres volantes récupérées par dépoussiérage des fumées, avant l'évacuation dans les cheminées. Ce sont des matériaux fins (<200 µm) et légers. Ils peuvent être silico-alumineuse (forte teneur en silice et alumine : propriétés pouzzolaniques) ou sulfo-calciques (forte teneur en sulfates et chaux : propriétés hydrauliques). En technique routière, ils sont utilisés pour réaliser les assises en graves-cendres volantes.

➢ **Traitement aux laitiers (métallurgie)**

Dans un haut fourneau, la production de la fonte s'accompagne de celle d'un liquide surnageant où se retrouve la gangue du minerai combinée aux fondants ajoutés. Ce liquide, sous-produit de l'industrie sidérurgique est le laitier. En technique routière, le laitier est principalement utilisé pour la réalisation d'assises en graves-laitiers[10] in Mouton, 1998.

b. Traitement aux liants hydrocarbonés

Les liants hydrocarbonés sont des matériaux constitués essentiellement d'assemblage d'atomes de carbone et d'hydrogène qui, au contact de particules solides telles que les granulats, développent des forces d'adhésion assurant de la sorte une certaine rigidité, des résistances aux déformations en traction, compression et cisaillement.

Les principaux liants hydrocarbonés sont : le bitume et le goudron. Le bitume est un produit de distillation des huiles minérales tandis que le goudron provient de la distillation du charbon. Les graves, si elles ne sont pas trop argileuses, peuvent être stabilisés aux liants hydrocarbonés. Leur grande stabilité mécanique est assurée par le frottement interne élevé dû au squelette minéral et par la forte cohésion apportée par le bitume. Les dosages à respecter varient en fonction du type d'application, de la nature et de la qualité des matériaux à traiter (2%-8%).

c. Traitement aux produits chimiques

Certains produits chimiques à base de chloride de calcium, hydroxyde de calcium, silicates, enzymes, polymers, sont utilisés en construction routière pour améliorer la capacité portante des sols (Bakar et al, 2014). On les trouve aux marchés sous les noms commerciaux : Probase TX-85 (produit du « Probase manufacturing Sdn.Bhd. Company », Malaysia), Termite Saliva (produit du « Norwood hall Pty Ltd », Australia), Renolith (produit du « Renolith technology Corporation », Thailand), Perma-Zyme (Produit du « Global Zyme », Thailand), Con-Aid (produit du « Con-Aid Asia Co. Ltd », Thailand), ANSS (produit du « solid Environmental solutions », Israel), etc in [10].

d. Traitement mixte

Le traitement mixte consiste à améliorer la qualité d'un sol par combinaison de deux ou plusieurs stabilisants en vue d'atteindre les performances mécaniques souhaitées. Il existe plusieurs combinaisons mais, la plus utilisée est celle de la chaux-ciment : Dans le cas où le sol est humide (on préconise la chaux), et peu argileux (on préconise le ciment), on utilise d'abord la chaux à faible dose (0.5 à 2%) et ensuite le ciment, ces liants ayant une action complémentaire. Le traitement préalable à la chaux par son action d'assèchement immédiate du sol amène celui-ci à un état optimal pour la stabilisation au ciment. (Génie Hippique, 2004) in[10]

Le choix du type de stabilisation est un compromis entre ces différents facteurs :

- Exigences ou contraintes techniques auxquelles est soumis le projet ;
- Les contraintes financières ;
- La disponibilité du matériau ;

- Les moyens matériels et techniques disponibles
- La nature du matériau à traiter.

[13].[14].[15].[9]

I.4. Condition d'utilisation de la latérite dans la réalisation des différentes couches de chaussée[16]

I.4.1. Plate-forme :

Elle est la couche des 30 cm supérieurs des terrassements sur laquelle viendront reposer l'ensemble des autres couches de la route. Sa position lui confère une attention particulière dans sa réalisation car un désordre en son sein affectera toutes les autres couches du patrimoine.

Les graveleux latéritiques y sont employés lorsque le sol en place ne présente pas les qualités requises. Cependant ces latérites, avec ou sans traitement, pour être employables doivent avoir ces caractéristiques géotechniques :

- un CBR à 95% OPM> 5
- IP < 40
- LL < 70
- Gonflement linéaire dans le moule CBR < 2%
- Teneur en matière organique < 3%.

I.4.2. Couche de forme

Elle est mise en place pour pallier aux insuffisances du sol en place et les latérites éligibles doivent répondre à ces contraintes :

- un CBR à 95% > 5 et 10 pour les chantier utilisant les très gros engins
- Dmax < 150 mm
- IP < 30
- % de fines (Dmax = 80µm) < 45 %
- Gonflement linéaire dans le moule CBR < 2%
- Teneur en matière organique < 3%.

I.4.3. Couche de fondation

Les graveleux latéritiques qui conviennent à cette couche doivent répondre à ces caractéristiques :

- CBR à 95 % > 25 pour T1, 30 pour T2 et T3 et 35 pour T4 et T5.
- Dmax < 40mm

- % de fines (dmax = 80µm) < 35 %
- IP < 30 pour T1 et T2, 20 pour T3, T4 et T5
- Teneur en matière organiques < 1.5%
- Déflexion < 300/100 mm
- à 95% OPM > 1.8 g/cm^3

I.4.4. Couche de base

Plus exigeante, que la couche de fondation, en capacité portante :

- CBR à 95 % > 160 pour les matériaux améliorés au ciment
- Dmax < 40mm
- % de fines (dmax = 80µm) < 20 %
- IP < 15
- Gonflement linéaire dans le moule CBR < 1 %
- Déflexion < 150/100 mm
- à 95% OPM > 2 g/cm^3

I.4.5. Couche de roulement :

Pour les routes non revêtues, les latérites servent de couche de roulement et cependant elles doivent répondre à ces caractéristiques [16]:

- CBR 30 si trafic > 30v/j et CBR 20 si trafic < 30v/j ;
- Dmax = 20 mm
- % de fines (Dmax = 80µm) < 32 %
- LL < 40
- 15 < IP < 25

Cette première partie du mémoire a déroulé l'état de l'art sur la latérite, ses différents emplois possibles en construction routière et nous a permis d'avoir des références normatives pour les différents essais de notre étude.

Chapitre II : MATERIAUX, MATERIELS ET METHODES

La caractérisation d'un matériau résulte d'essais, qui à termes donneront les informations sur les paramètres essentiels à sa connaissance en vue d'un meilleur usage de ce dernier.

Ainsi les différents essais effectués dans le cadre de la présente étude seront présentés dans cette partie du document.

II.1 MATERIAUX UTILISES :

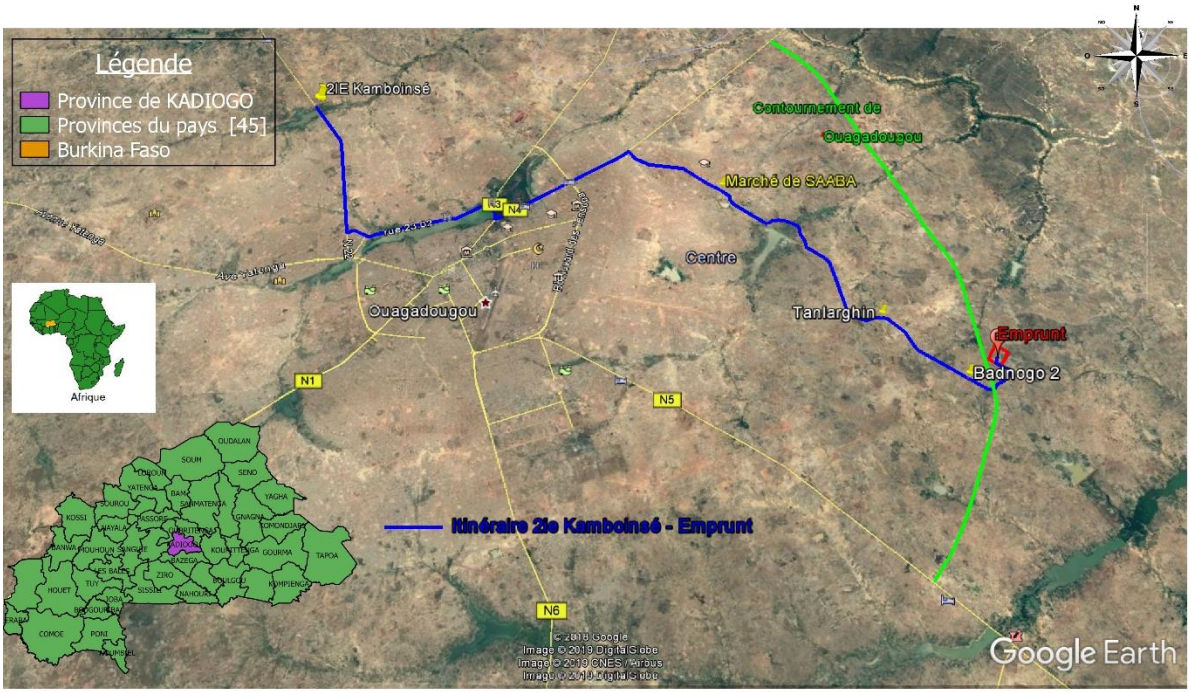
Les matériaux utilisés sont la latérite et le ciment.

II.1.1. La latérite :

a. Localisation :

La latérite faisant l'objet de notre étude est celle de l'emprunt de latérite de Badnogo 2 (Figure 2), situé dans la province du Kadiogo au Sud-Est de Ouagadougou à 21 km de la N4 et à 43 km de 2IE Kamboinsé, elle a servi de matériau de chaussée dans la réhabilitation de l'avenue Président Thomas SANKARA. De coordonnées : Latitude 12°16′25.5" N et Longitude: 1°21′16.4" O.

LOCALISATION DE L'EMPRUNT



Source: SIG ET GOOGLE EARTH

Figure 2: Carte de localisation de l'emprunt

b. Prélèvement :

vLa stratigraphie de cet emprunt ressort trois (03) couches latéritiques (Figure 3), le prélèvement s'est donc fait en suivant cette stratigraphie. Chaque couche a été prélevée de sorte à éviter la contamination par l'autre. Les deux premières couches (C1 et C2) seront prélevées étant donné que la troisième est une cuirasse latéritique. L'ensemble des prélèvements a été effectués avec des pelles, pioches et sacs plastiques.

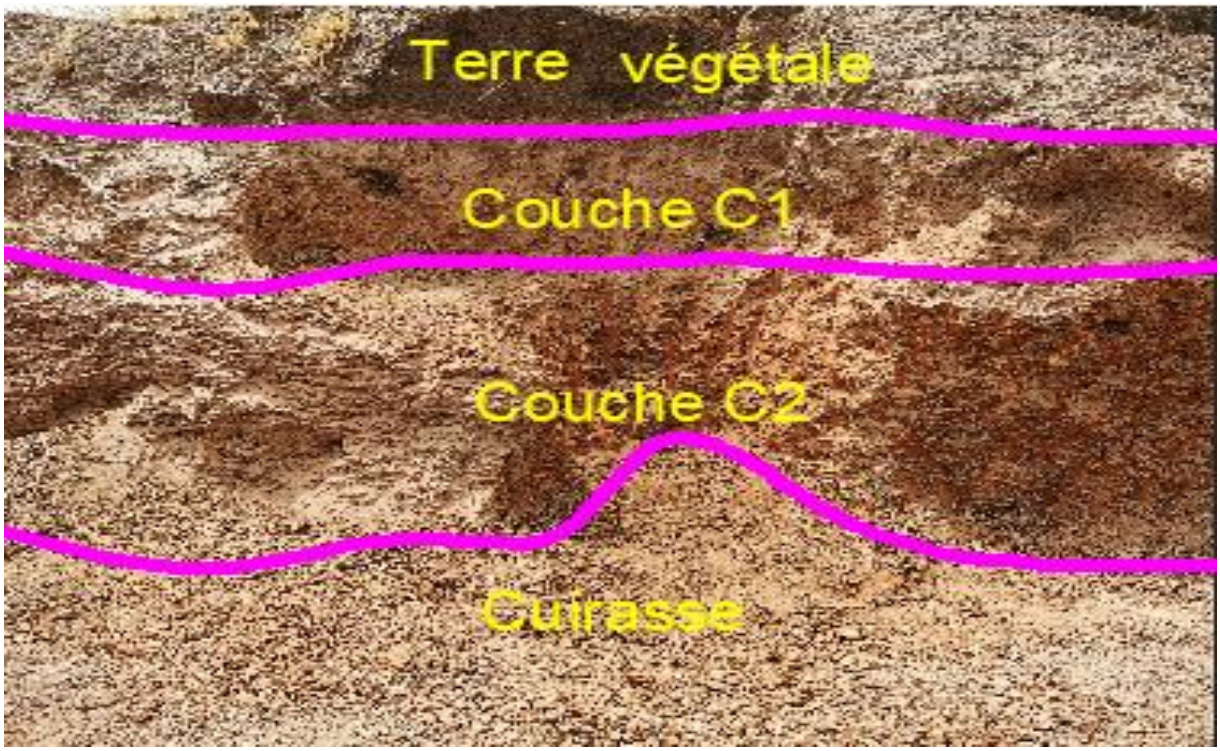


Figure 3: répartition stratigraphique des couches latéritiques à l'emprunt

L'observation du profil géologique nous montre une première couche C1 de couleur de grains marron avec une partie fine de couleur beige. La couche C2 de couleur rougeâtre se montre indurée avec moins de fine et des grains plus friables que ceux de la première C1. La troisième couche qui est une cuirasse est de couleur jaunâtre.

Les profondeurs des couches sont dans le Tableau I.

Tableau I: épaisseur moyenne des couches stratigraphiques

Couche	Profondeur (m)
Terre végétale	0,00 – 0,20
Couche 1	0,20 – 0,70
Couche 2	0,70 – 1,40
Cuirasse	1,40 et plus

c. Préparation des échantillons :

Elle s'est faite au laboratoire. La manœuvre a consisté, pour chaque couche, à malaxer l'ensemble des prélèvements effectués dans les sacs afin d'obtenir un mélange homogène. Les mélanges y résultants sont stockés dans les tonneaux couverts afin d'éviter des variations des teneurs en eau naturelle des matériaux.

La couche mélange (M) est obtenue après un mélange soigné des deux premières couches C1 et C2 respectivement en dosages de 42% et 58% en volume soit cinq (05) doses de C1 pour sept (07) doses de C2.

d. Caractéristiques de la latérite :

La latérite qui fait objet de notre étude a été étudiée dans son état naturel à travers une étude de "Caractérisation géo mécanique de la latérite de Saaba"[17]. Ainsi nous utiliserons ces différents résultats (dont la synthèse se trouve en *annexe v*) afin de juger l'impact de l'amélioration au ciment.

II.1.2. Le Liant :

Celui utilisé pour l'amélioration est le ciment Cimfaso CEMII/A-L 42,5R issu de la cimenterie CIMFASO du Burkina Faso.

Conditionné en paquet de cinquante (50) Kg, il est soigneusement protégé afin d'éviter la perte de ses caractéristiques. Son dosage sera fait suivant 1%, 2% et 3% en poids pour chaque couche.

Les ciment CEMII sont bien adaptés aux travails massifs exigeant une élévation de température modérée comme les routes et le béton manufacturé et est assez disponible sur le marché Burkinabé.

II.2 ESSAIS REALISES :

Ils se regroupent en deux grandes catégories, ceux donnant les caractéristiques physiques et ceux donnant les caractéristiques mécaniques. Notre étude étant axée sur l'amélioration des propriétés physico-mécaniques de la latérite à travers l'ajout d'autres matériaux, les essais se limiterons sur la latérite ciment puisque l'étude sur la latérite crue fait l'objet d'une étude conjointe à la nôtre.

II.2.1 Préparation des échantillons :

Le matériau à étudier étant le mélange de la latérite et du ciment, nous avons procédé à la composition des échantillons à travers la variation du ciment sur chaque couche de latérite et du mélange. Comme nous le montre le Tableau II.

Tableau II: Différents échantillons de l'étude

Latérite (C)	Dosage en ciment (Cim)	DESIGN. ECHANTILLON
Couche 1 (C1)	0%	C1Cim0%
	1%	C1Cim1%
	2%	C1Cim2%
	3%	C1Cim3%
Couche 2 (C2)	0%	C2Cim0%
	1%	C2Cim1%
	2%	C2Cim2%
	3%	C2Cim3%
Mélange (M)	0%	MCim0%
	1%	MCim1%
	2%	MCim2%
	3%	MCim3%

II.2.2 Essais pour la détermination des paramètres d'état :

Ces essais se limiterons aux limites d'Atterberg et à l'essai Proctor modifié.

a. Les limites d'Atterberg : NF P 94-051

Elles sont les teneurs en eau qui délimitent les quatre états de consistance sur la fraction de sol passant au tamis d'ouverture de maille de 400µm. (Voir le protocole d'essai pour détails sur cet essai)

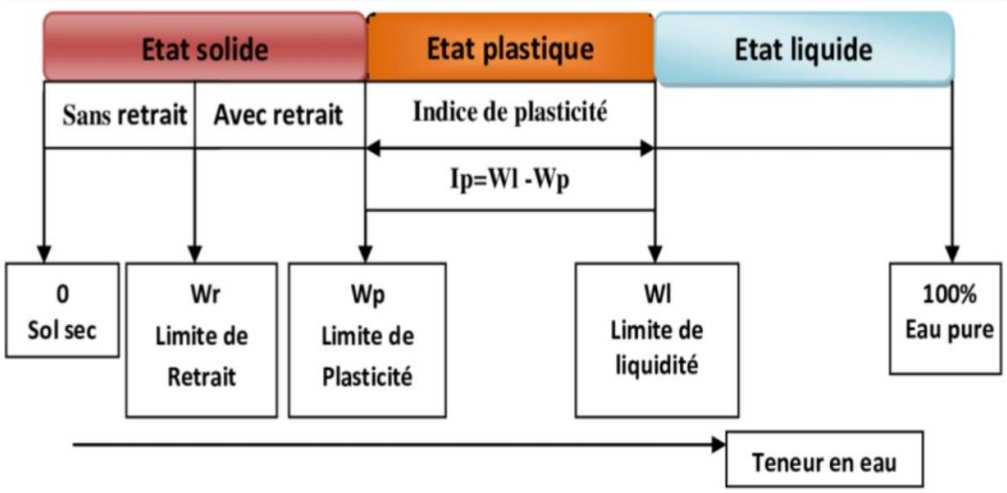


Figure 4: Etats de consistance (www.researchgate.net)

b. Teneur en eau initiale

La teneur en eau initiale est la teneur en eau du matériau à l'état initial, état auquel se trouve le sol ou le matériau en place à l'emprunt. L'essai est fait selon les prescriptions que suggère la norme NF P 94-050. Le matériau est prélevé sur une quantité représentative et pesée, après étuvage et une seconde pesée, on détermine la teneur en eau du matériau à travers cette formule :

$$w\ (\%) = \frac{M_h - M_s}{M_s}\ x\ 100$$

c. Essai Proctor Modifié : NF P 94-093, Octobre 1999

Cet essai a permis la détermination des caractéristiques de compactage de nos différents échantillons. Ces caractéristiques sont la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale.

Le principe de cet essai consiste à compacter dans un moule normalisé, à l'aide d'une dame normalisée, selon un processus bien défini, l'échantillon de sol à étudier et à mesurer sa teneur en eau et son poids spécifique sec après compactage. L'essai est répété à plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à différentes teneurs en eau. On définit ainsi plusieurs points d'une courbe (γd ; ω) ; on trace cette courbe qui représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimale et l'ordonnée la densité sèche optimale.

II.2.3 Essais pour la détermination des paramètres mécaniques :

a. Essai de portance CBR (California Bearing Ratio) : NF P 94-078 (1997)

C'est une grandeur utilisée pour caractériser un sol ou un matériau élaboré en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée. On en distingue deux types, le CBR immédiat réalisé à la teneur en eau naturelle pour mesurer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins de chantier en phase de chantier ; et le CBR après immersion qui caractérise l'évolution de la portance d'un sol compacté à différentes teneurs en eau et/ou soumis à des variations de régime hydrique.

Le principe de l'essai consiste à mesurer les forces à appliquer sur un piston de 19,35 cm² de section, enfoncé à la vitesse constante de 1,27 mm/min dans le matériau placé dans le moule CBR. Les valeurs particulières des deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels (2,5 mm et 5 mm) sont respectivement rapportées aux valeurs des forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements (13,35 kN et 19,93 kN). L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée

en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés. (Voir le protocole d'essai pour détails sur cet essai).

L'imbibition des éprouvettes avant poinçonnement suppose une mise sous condition hydriques défavorables du matériau afin de souscrire à plus de sécurité dans le dimensionnement des chaussées.

Figure 5: éprouvettes CBR imbibées et capteurs pour mesure le gonflement

b. Essai de compression simple : NF P 94 – 077 (1997)

Cet essai a consisté à appliquer une charge axiale sur les éprouvettes cylindriques de D=16cm/H=32cm et à l'augmenter progressivement jusqu'à la rupture. Les dimensions de ses éprouvettes sont choisies de sorte à respecter un élancement compris entre 1,9 et 2,2. La variation de la charge s'est faite de sorte à respecter la même vitesse de déplacement imposée par l'essai CBR (1,27 mm/min). Les éprouvettes faisant objet de cet essai sont conçues dans les conditions optimales obtenues des essais Proctor modifié c'est-à-dire avec une énergie de compactage à 2683 KJ/m^3 soit un équivalent de16 couches compactées à 53 coups chacune. Elles sont stockées à air ambiant pendant sept (07) jour avant écrasement.

La presse Multi-essais Electromécaniques du LEMHad-2iE du fabricant PROETI, d'une capacité de chargement maximale de 300 kN, adaptée aux essais de compression, traction et flexion sera utilisée. Cette presse assistée par un ordinateur est composée d'un cadre d'essai, de capteurs pour les mesures et des petits matériels adaptés à différents essais.

Autres les capteurs intégrés à la presse, nous avons utilisé un dispositif de trois (03) capteurs de déplacement dans la partie du tiers central de l'éprouvette afin d'avoir un déplacement représentatif de l'éprouvette (voir Figure 6 et Figure 7).

Les résultats issus de cet essai nous permettrons de tracer les courbes contraintes-déformations à travers lesquelles le calcul du module de Young (E) sera fait.

Les images ci-dessous illustrent les éprouvettes et l'ensemble du dispositif d'essai.

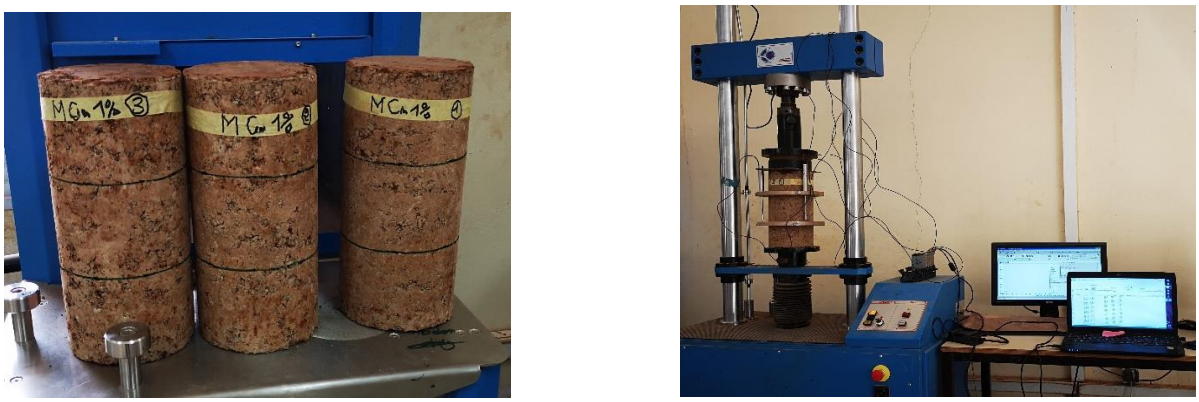


Figure 6: photos de quelques éprouvettes, à gauche : subdivisons pour la pose des capteurs déplacement au tiers central ; à droite : une éprouvette soumise à l'écrasement

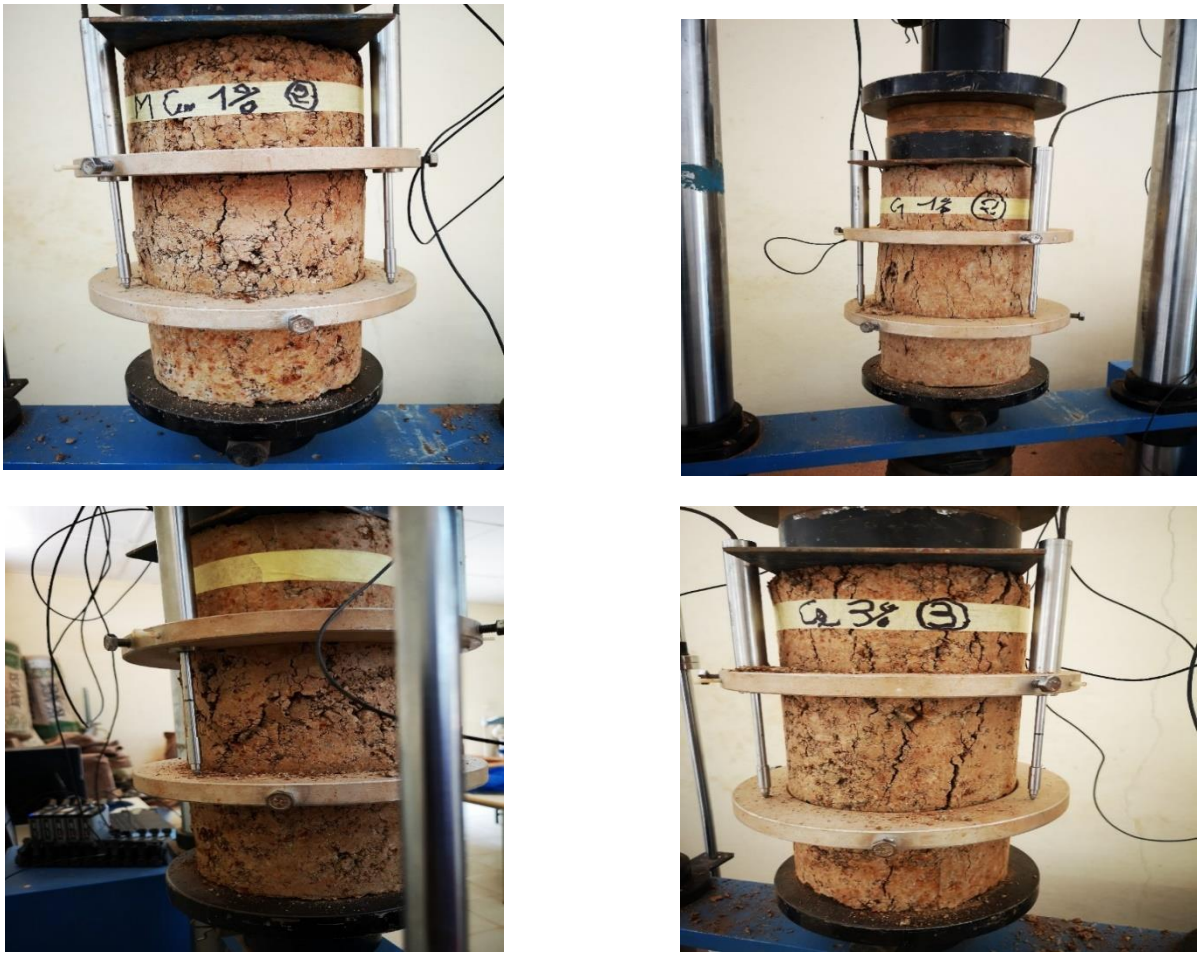


Figure 7: éprouvettes après écrasement

Cette deuxième partie de notre travail, essentiellement pratique, nous a amené à faire les essais en laboratoire suivant les normes (Françaises notamment). Ces différentes manipulations nous ont permis d'avoir des résultats, qui sont présentés dans la partie suivante.

Chapitre III : RESULTATS, ANALYSES ET DISCUSSIONS

III.1 Essais pour la détermination des paramètres d'état

III.1.1. Les limites d'Atterberg :

Elles seront présentées par couche pour mieux apprécier le comportement du ciment.

a. Couche C1

Les résultats sont présentés à travers la Figure 8

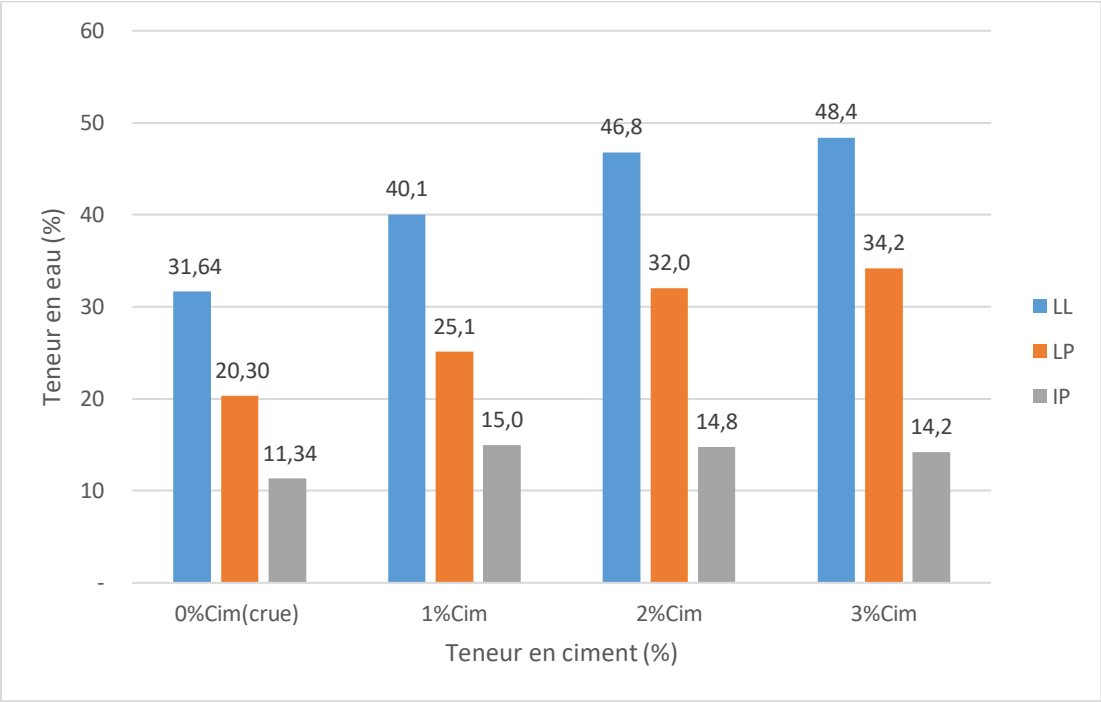


Figure 8: Valeurs des limites d'Atterberg de la couche C1

Les résultats des limites de la couche C1 illustrent une augmentation des limites de liquidité et de plasticité avec l'augmentation du ciment. Par contre pour l'indice de plasticité, la plus grande variation est notée dès le premier dosage de 1% du ciment et est resté plus ou moins inchangé pour les dosages qui ont suivi. La faible variation de l'IP traduit une variation du même ordre des limites de liquidité et de plasticité.

b. Couche C2

Les résultats se présentent comme suit dans la Figure 9

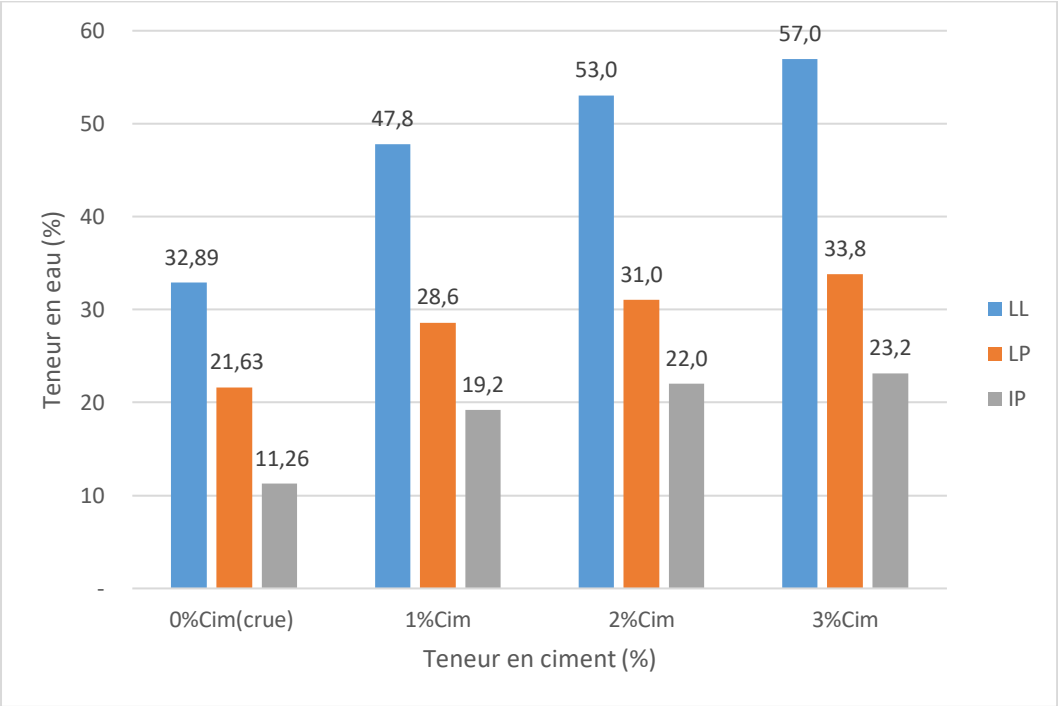


Figure 9: Valeurs des limites d'Atterberg de la couche C2

Sur la couche C2, les mêmes observations que celles de la couche C1 sont faites sur les variations des limites (LL et LP) et les indices de plasticité. Cependant les valeurs des limites de liquidité et de plasticité ont augmenté plus fortement que celles de la couche C1.

c. Mélange

Cette dernière couche reconstituée possède ces valeurs (Figure 10) :

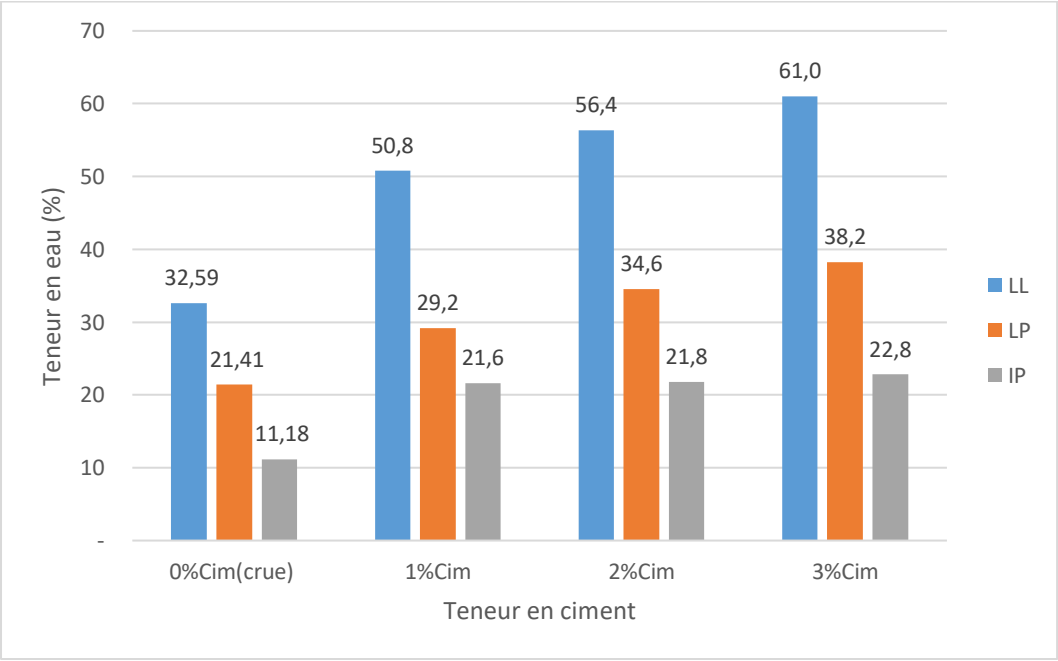


Figure 10: Valeurs des limites d'Atterberg de la couche M

Le matériau M, résultant du mélange présente le même comportement de variation des limites et d'indice de plasticité vis-à-vis de l'augmentation du ciment.

- Synthèse sur les résultats des limites d'Atterberg :

Les trois matériaux ont montré à travers les différents résultats (figures 7 à 9) une sensibilité au ciment. Cela se traduit par les variations des limites observées. Ainsi nous pourrons dire que l'ajout du ciment diminue la sensibilité à l'eau de cette latérite.

L'ensemble des matériaux respectent la limite du CEBTP (1980) qui recommande un indice de plasticité maximal de 20 pour les trafics T3, T4 et T5 et de 30 pour T1 et T2 sur le matériau à l'état cru.

Détails de calculs en *annexe 1*.

III.1.2. Teneur en eau initiale

Elles se regroupent dans le Tableau III suivant :

Tableau III: Valeurs des teneurs en eau naturelle

Couche	w_i(%)
C1	1,3
C2	1,5
M	1,4

Ces faibles valeurs des teneurs en eau naturelle sont dues au fait que le prélèvement s'est opéré en période sèche de l'année. La couche C1 selon la stratigraphie (Figure 3) est exposée au soleil ce qui entraine une perte plus prononcée en eau naturelle. Le mélange étant constitué des couches C1 et C2, il est tout à fait normal que sa teneur en eau naturelle soit comprise entre celles des deux couches.

III.1.3. Essai Proctor Modifié :

Les résultats de cet essai sont affichés par couche :

a. Couche C1

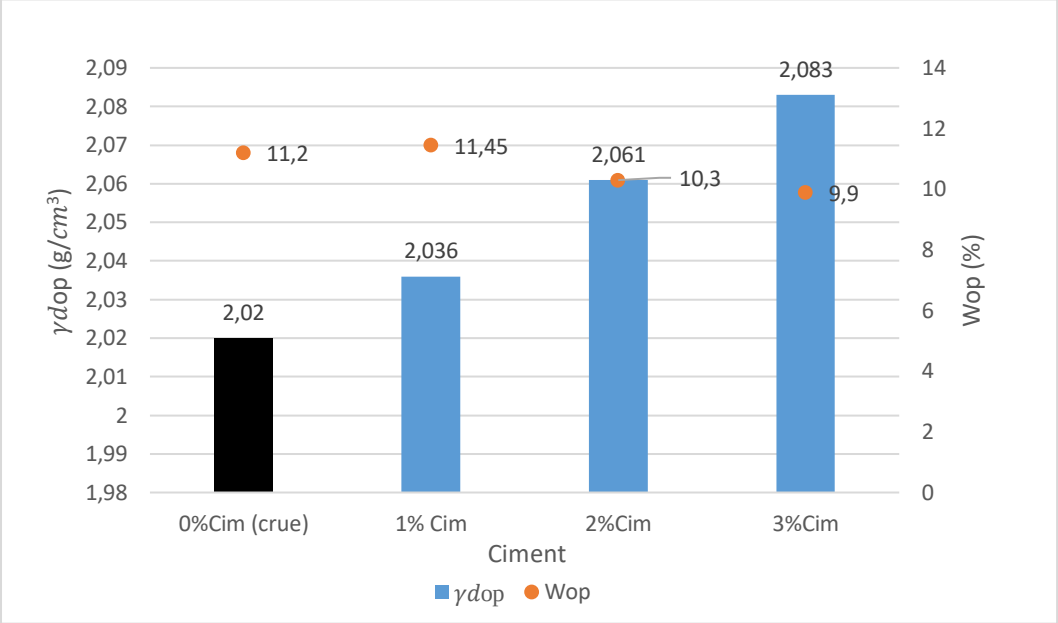


Figure 11:Optimums Proctor de la couche C1

Les figures ci-dessus montrent une croissance linéaire de la densité sèche optimale en fonction du taux d'amélioration au ciment.

La teneur en eau optimale après une augmentation de 11,2% à 11,45% à 1% de ciment, connait une baisse avec l'augmentation du ciment.

b. Couche C2

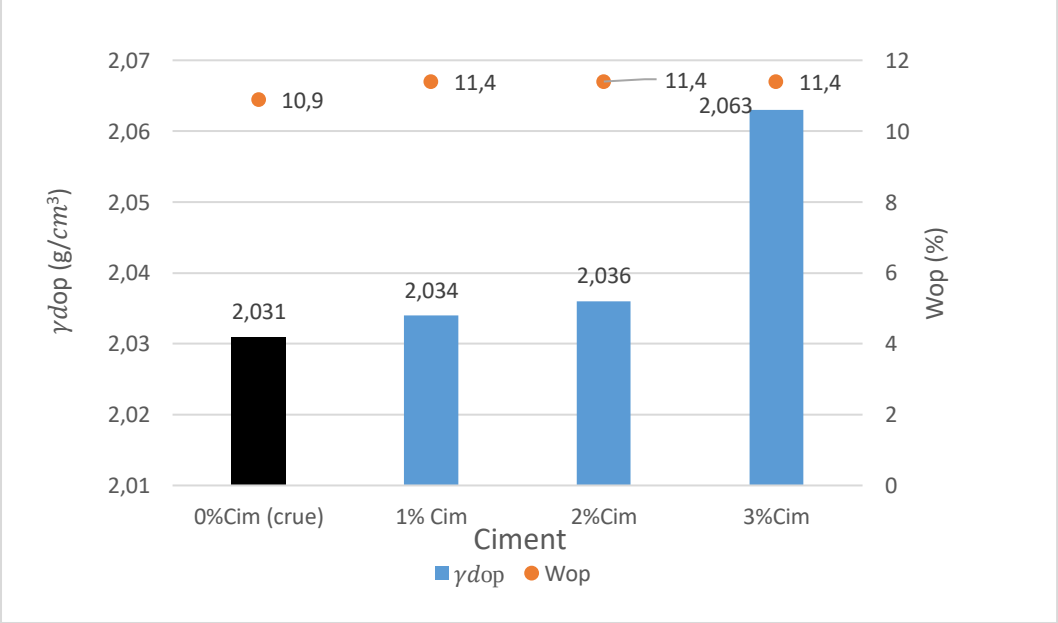


Figure 12:Optimums Proctor de la couche C2

Pour la couche C2 comme l'illustre la figure 11, nous notons également une augmentation de la

densité sèche optimale en fonction de l'augmentation du ciment. Cette variation est très faible de 1% de ciment à 2% de ciment et un peu plus élevée de 2% à 3% de ciment. Par contre la teneur en eau optimale est constante (11.4%) pour les trois dosages en ciment.

c. Couche M

La Figure 13 illustre ces résultats :

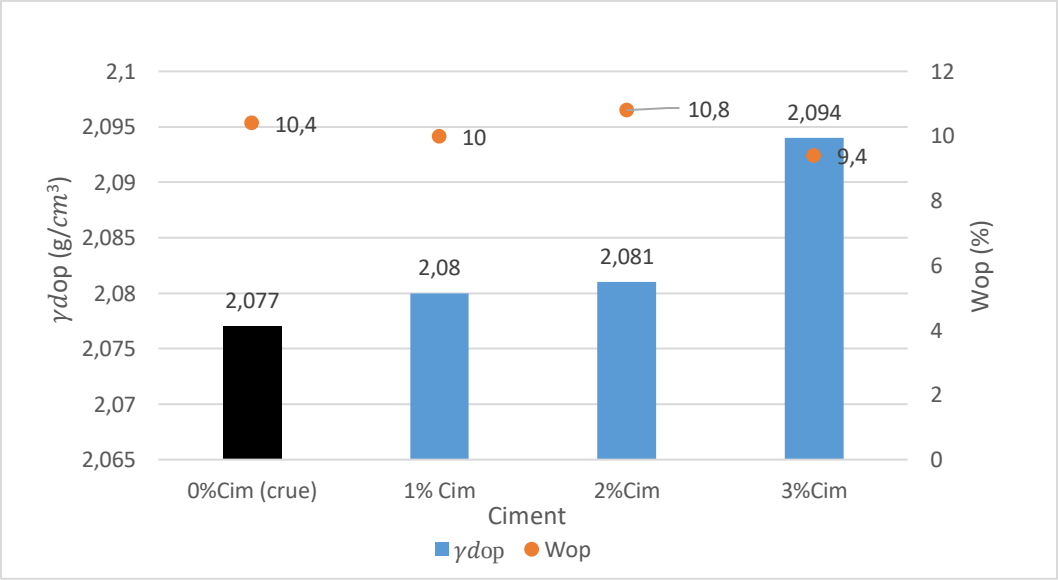


Figure 13: Optimums Proctor de la couche M

Ce troisième matériau du point de vue densité sèche optimale à la même allure que celui de la couche C2 sauf qu'il ressort les valeurs extrêmes (maximales) des densités sèches à chaque dosage en ciment. Les teneurs en eau quant à elles ne dépassent pas 11% comme certaines valeurs enregistrées pour les deux premières couches et s'y retrouve la plus petite teneur en eau optimale de l'essai (9,4%).

- Synthèse sur les résultats des essais Proctor modifié :

Les résultats des trois matériaux étudiés à différents dosages de ciment font ressortir des densités sèches optimales supérieures à 2 (variant de 2,02 à 2,094) ce qui est au-dessus du minimum de 1.8 exigé par le CEBTP (1980). Les faibles variations de densité notées pour la couche C2 et le mélange M pour les dosages de 2% de ciment peuvent résulter de la possible variation de l'énergie de compactage à la dame manuelle lors des essais. Il convient de noter que les résultats des densités sèches de la couche mélange (crue et améliorée au ciment) sont supérieurs à ceux des résultats des couches C1 et C2 qui la composent; alors que l'on était tenté de croire que les résultats du mélange seraient compris entre ceux de C1 et C2. Cette variation de ces résultats du mélange nous amène à dire que le mélange a favorisé une meilleure imbrication des grains.

Détails des essais Proctor *en annexe 2.*

III.1.4. Gonflement mesuré

L'imbibition des éprouvettes confectionnées pour l'essai CBR nous a donné les résultats dans le Tableau IV suivant :

Tableau IV: valeurs du gonflement

Couche	Echantillon	Gonflement (%)		
		56 Coups	25 Coups	10Coups
C1	C1Cim0%	0,09	0,09	0,52
	C1Cim1%	0	0,02	0,02
	C1Cim2%	0,03	0,17	0,25
	C1Cim3%	0,18	0,15	0
C2	C2Cim0%	0,09	0,17	0,43
	C2Cim1%	0	0,01	0,03
	C2Cim2%	0	0	0,02
	C2Cim3%	0,11	0,05	0,09
M	MCim0%	0,09	0,35	0,17
	MCim1%	0,05	0,16	0,06
	MCim2%	0,08	0,04	0,2
	MCim3%	0,17	0,09	0,21

Les plus grandes valeurs du gonflement sont celles obtenues sur les matériaux crus, cela traduit l'effet inhibiteur du ciment sur le caractère gonflant de l'argile. Cependant le gonflement sur l'ensemble des matériaux est très faible et en dessous de la limite maximale de 2 prescrite par le CEBTP (1980).

III.2 Essais pour la détermination des paramètres mécaniques :

III.2.1 Essai de portance CBR après imbibition :

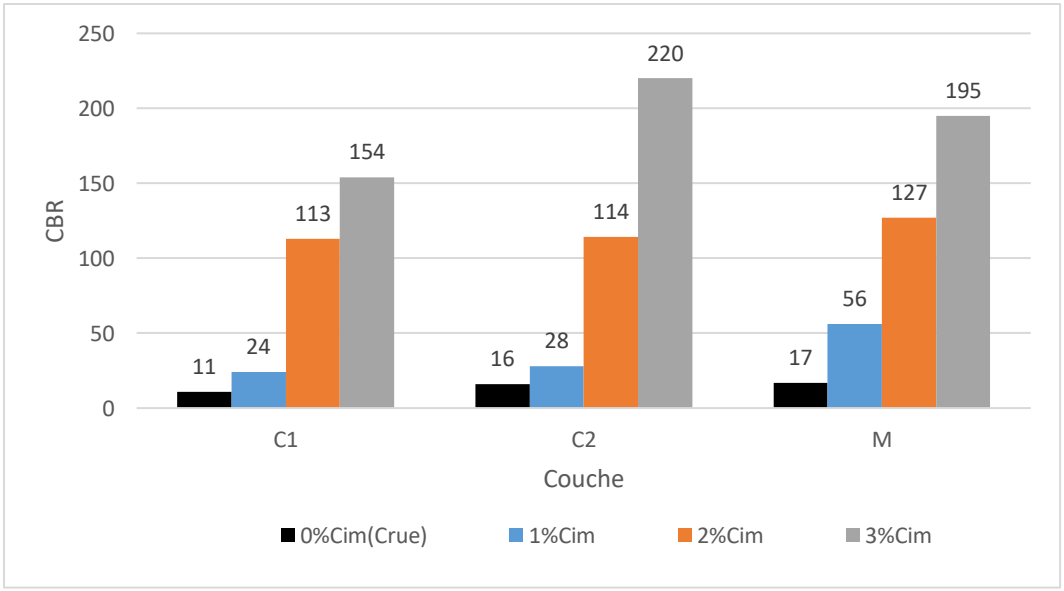


Figure 14: Valeurs du CBR des différentes couches et dosage au ciment

Les résultats de la Figure 14 montrent une augmentation du CBR en fonction de celle du dosage en ciment pour l'ensemble des matériaux :

- **Sur la couche C1** suivant les dosages de 1%, 2% et 3% de ciment nous avons des augmentations respectives du CBR de140%, 570 % et 1100%.
- **Sur la couche C2** la même variation du dosage en ciment a engendré des augmentations respectives du CBR de 175%, 713% et 1375%
- **Sur le mélange** les variations respectives de 329%, 747% et 1147% avec comme particularité une grande valeur du CBR dès le dosage de 1% de ciment.

Les variations relatives du CBR montrent un effet plus accru du ciment sur la couche C2 où l'on note les plus forts taux de variation.

Suivant ces valeurs de CBR des différents matériaux et les recommandations du CEBTP nous pourront juger de l'usage possible de chaque matériau à travers le Tableau V suivant :

Tableau V : usage des différentes couches suivant les valeurs du CBR selon le CEBTP

Couche	Taux d'amélioration	CBR	Recommandation du CEBTP(trafic T3)		Usage en fondation	Usage en base
			Fondation	Base		
C1	Crue	11	>30	>160	Non	Non
	1%	24	>30	>160	Non	Non
	2%	113	>30	>160	Oui	Non
	3%	154	>30	>160	Oui	Non
C2	Crue	16	>30	>160	Non	Non
	1%	28	>30	>160	Non	Non
	2%	114	>30	>160	Oui	Non
	3%	220	>30	>160	Oui	Oui
M	Crue	17	>30	>160	Non	Non
	1%	56	>30	>160	Oui	Non
	2%	127	>30	>160	Oui	Non
	3%	195	>30	>160	Oui	Oui

D'après le Tableau V , après amélioration en ciment l'usage de la couche M est le plus large. Ceci étant, le ciment a eu plus d'effet améliorant sur cette couche dans son ensemble bien qu'elle n'ait pas affiché la meilleure valeur de CBR de l'étude. Détails de calcul en *annexe 3*.

III.2.2 Essai de compression simple :

a. Résistance à la compression à 7 jours d'âge :

Après sept jours à l'air ambiant, l'écrasement des éprouvettes donnes ces résultats de résistance à la compression (Figure 15) :

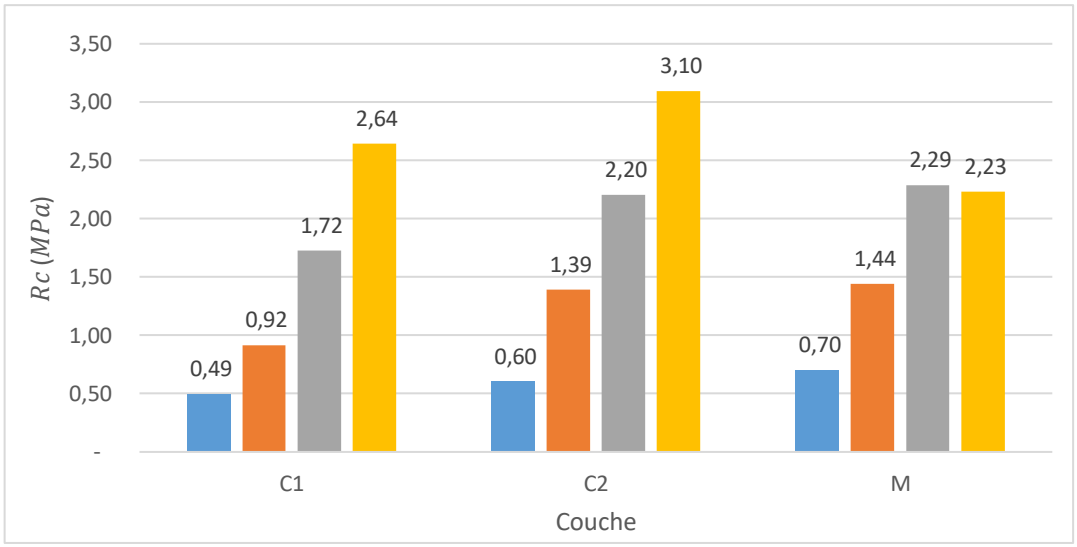


Figure 15:Différentes valeurs de la résistance à la compression à 7j d'âge

Les résultats des résistances à la compression montrent l'influence du ciment sur chaque couche :

- Sur les résultats de la couche C1 nous observons que la résistance à la compression croit linéairement avec le dosage en ciment. Elle évolue d'une valeur de 0.49 MPa (latérite crue) pour une valeur de 2.64 MPa à 3% d'ajout de ciment, soit une augmentation de 539%.
- La même observation faite sur la couche C1 se répète sur la couche C2 avec pour particularité des valeurs de résistances plus élevées. Avec un minimum de résistance de 0.6 MPa du matériau non stabilisé à 3.09 MPa du matériau amélioré à 3% de ciment, soit 515% de variation.
- La couche M jusqu'à 2% d'amélioration présente les meilleures résistances et à 3% indique la plus faible résistance ces dosages.

L'ensemble des résultats montre un effet améliorateur du ciment sur la résistance à la compression. Une amélioration qui est linéaire dans les trois cas. Il convient de noter la résistance particulière observée sur la couche mélange à 3 % de ciment qui n'a pas suivi l'allure des autres dosages. Cette discordance, à notre avis serait dû la faible teneur en eau optimale obtenue lors des essais Proctor modifié (*annexe 2 essais Proctor*) car cette faible quantité d'eau n'a pas favorisé l'effet mécanique du ciment qui est un liant hydraulique.

Le CEBTP (1980) recommande une valeur maximale de résistance à la compression à 7 jours d'âge à air ambiant de 3 MPa à 95% OPM ; ceci étant toutes les couches sont utilisables en base vis-à-vis de la résistance à la compression.

b. Module de Young :

Les valeurs des modules de Young proviennent des courbes contraintes-déformation de l'essai de compression.

- Courbes de compression

Seuls les résultats de l'écrasement des éprouvettes de la couche mélange améliorée au ciment seront présentés ici. Le reste est en ANNEXES 4

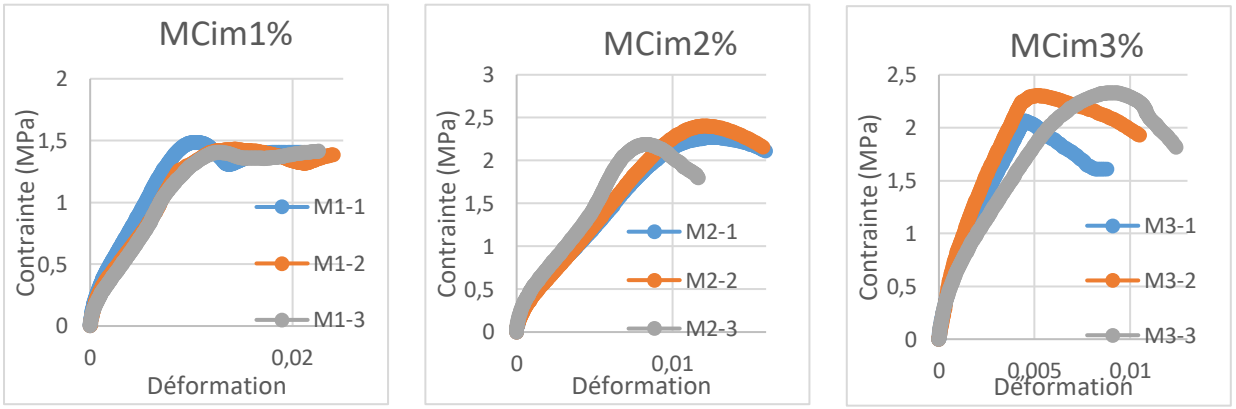


Figure 16: courbes contrainte-déformation

Le module de chaque éprouvette est la pente de la partie linéaire de sa courbe contrainte déformation. Le module du matériau est donné par la moyenne des valeurs obtenues sur les trois éprouvettes confectionnées pour chaque matériau. Comme l'illustre le Tableau VI.

Tableau VI: modules de la couche mélange

Matériau	Eprouvette	E_i	E
MCim1%	1	143,75	123,89
	2	110,09	
	3	117,82	
MCim2%	1	199,03	212,51
	2	214,42	
	3	224,09	
MCim3%	1	383,55	359,38
	2	419,74	
	3	274,85	

Le traitement de l'ensemble des résultats des éprouvettes nous donne les valeurs des différents

modules de Young.

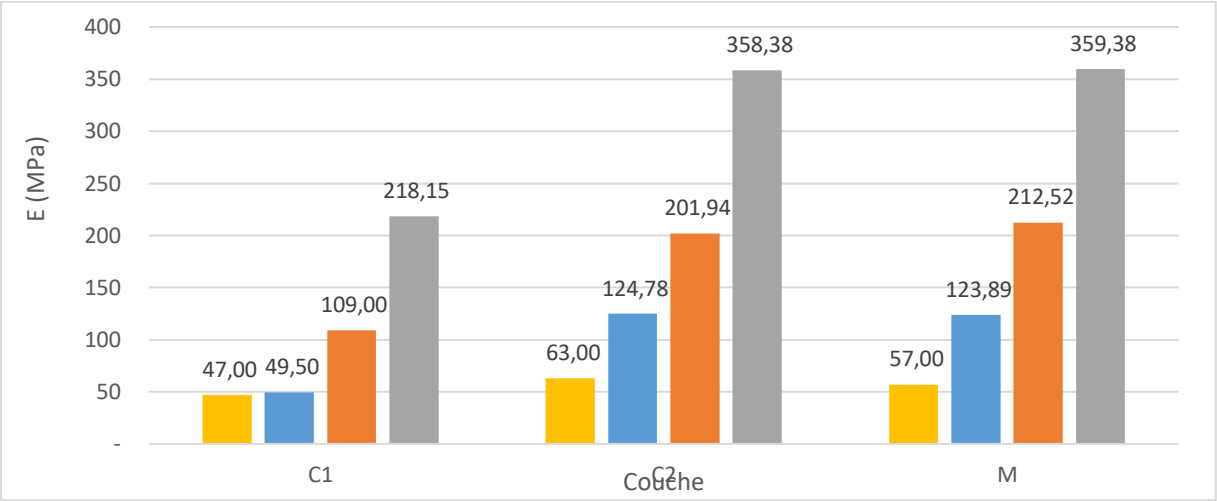


Figure 17: Valeurs du module de Young

La Figure 17 illustre les variations du module de Young par couche et par dosage. Les plus grandes croissances sont remarquées sur les couches C2 et M où elles semblent exponentielles. Dans les deux cas de forte croissance du module de Young, les valeurs à chaque dosage sont du même ordre de grandeur.

Sur la couche C1, la valeur du module au premier dosage de 1% de ciment ne s'est pas démarquée de celle du module du matériau cru et par suite de variation de ciment le module a évolué linéairement.

Cette disparité de valeurs entre la couche C1 et les deux autres couches est selon nous dû à la teneur en argile plus élevée dans la première couche (essai VBS de l'étude de caractérisation géo mécanique de la latérite de Saaba [17]) car l'argile limite ou inhibe l'effet du ciment. Détails en *annexe 4*.

Aussi l'observation des courbes contraintes-déformations fait ressortir un comportement post rupture varié. Plus le ciment est important dans le matériau, les propriétés mécaniques sont élevées et dès la rupture les courbes contraintes-déformations décroissent plus vite. Ce qui nous amène à dire que plus le ciment est ajouté à cette latérite, plus elle perd son comportement souple pour un comportement fragile à la rupture. Ainsi une route réalisée avec ce matériau, amélioré à un fort taux de ciment, connaitra une dégradation rapide dès que les contraintes appliquées seront supérieures à la contrainte limite du matériau. Puisque ces contraintes entraineront une rupture dans le matériau qui à la rupture n'est plus apte à supporter les contraintes.

c. Rapport du module et le CBR : k = E / CBR

Le Tableau VII montre les différentes valeurs de ce rapport.

Tableau VII: rapport E/CBR

Couche	Taux d'amélioration	Echantillon	Module E	CBR à 95%	K
C1	0%	C1Cim0%	47.00	11	4.27
	1%	C1Cim1%	49.50	24	2.06
	2%	C1Cim2%	109.00	113	0.96
	3%	C1Cim3%	218.15	154	1.42
C2	0%	C2Cim0%	63.00	16	3.94
	1%	C2Cim1%	124.78	28	4.46
	2%	C2Cim2%	201.94	114	1.77
	3%	C2Cim3%	358.38	220	1.63
M	0%	MCim0%	57.00	17	3.35
	1%	MCim1%	123.89	56	2.21
	2%	MCim2%	212.52	127	1.67
	3%	MCim3%	359.38	195	1.84

Ce rapport entre le module et la portance CBR est assez disparate entre différents dosages au sein de chaque couche et entre couches. Cependant sur chaque couche ce rapport à une tendance décroissante avec l'augmentation du ciment. De ce constat nous pouvons déduire que plus le CBR à 95% OPM croit plus vite que le module avec l'augmentation du ciment.

CONCLUSION

La présente étude sur l'emprunt de SAABA (Badnogo2) a permis une connaissance morphologique et mécanique de la formation latéritique qui s'y trouve. Cette première étape de la recherche nous conduit, face aux insuffisances constatées sur le matériau à l'état cru, à étudier la possibilité de son usage en construction routière.

La bibliographie existante nous a servi de canevas dans ces travaux de recherche à travers la mise à notre disposition des références normatives sur l'ensemble des techniques routières pour l'aboutissement scientifique de nos travaux.

La latérite de Badnogo 2 dans ses couches stratigraphiques (C1 et C2) et le matériau du mélange (M) (42% de la première couche et 58% de la deuxième) a montré à travers les études antérieures une portance CBR maximale de 20 à 95%OPM. Une valeur de portance qui limite selon les recommandations du CEBTP les matériaux résultants de cet emprunt à un usage en remblai de plateforme et en couche de forme. Le contexte de raréfaction de ressource a donc nécessité une étude d'amélioration afin d'optimiser l'usage du matériau.

Sur l'ensemble des techniques d'amélioration ou stabilisation qui existent nous avons opté pour la plus répandue qui est celle d'avec le ciment. Le ciment ajouté à raison de 1%, 2% et 3% en poids nous conduit à cette ce constat :

- à 1% de ciment l'usage de la couche C1 n'évoluait pas, par contre la couche C2 pouvait être utilisée en fondation en fondation pour une chaussée de classe de trafic T1 (CBR et la couche de mélange M avec un CBR de 82 pouvait être utilisée pour toute couche de fondation.
- à 2% de ciment les valeurs de CBR ont évolué (CBR C1 = 113, CBR C2 = 114 et CBR M = 127) et toutes couches répondaient à un usage pour toutes les couches de fondation.
- à 3% de ciment il n'y a que les couches C2 et M qui pouvaient servir de matériaux pour couche de base, car ayant des CBR respectifs de 220 et 195 supérieurs à la limite minimale de 160 recommandé par le CEBTP pour les couches de Base.

La recherche a aussi permis, à travers les courbes contraintes-déformations résultant des essais de compression uni axiale, de comprendre le comportement de ces matériaux sous l'influence des charges et la détermination du module de Young.

Les valeurs du module de Young nous ont montré les limites de la traditionnelle formule du calcul du module qui consiste à l'avoir en affectant au CBR un coefficient multiplicateur selon

l'auteur et le traitement du graveleux latéritique. L'analyse des résultats indique qu'un tel calcul surévalue le module et donc pénalise le dimensionnement sur cette base.

Le ciment a montré à travers cette étude sa capacité à améliorer les performances les graveleux latéritiques de Badnogo 2. Cette même influence positive sur les propriétés mécaniques est reconnue au ciment dans les littératures consultées sur la technique d'amélioration au ciment des latérites.

Au-delà des raisons financières (coût du ciment) et écologiques (grande pollution lors de la fabrication du ciment), la disponibilité du ciment et la vulgarisation de la technique d'amélioration au ciment sont une alternative à la pénurie des latérites naturellement performantes.

RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES

Les limites de notre recherche nous emmènent à faire quelques recommandations puisque la nécessité de disposer d'un grand nombre de données sur les graveleux assure une suite d'autres recherches :

- que soient faits des essais de cisaillement pour mieux maitriser les conditions à la rupture du matériaux;
- que soient étudiées d'autres techniques de stabilisation comme la litho-stabilisation et la stabilisation aux liants géo polymères pour aboutir à une étude comparative des ces trois techniques;
- que d'autres emprunts fassent office d'autres recherches.
- nos études en laboratoire étant sur du court terme il serait judicieux que les études sur le long terme soient faites pour maitriser le comportement du matériau au fil du temps. Par exemple les matériaux de cet emprunt sont utilisés pour la réhabilitation de la route N4 des observations peuvent être faites sur le cas réel pour une confrontation avec les prévisions faites par les études en laboratoire;
- qu'une étude mécanique avec des charges cycliques complémentaire soit faite pour simuler l'effet du trafic et mieux appréhender le comportement du matériau.
- pour le dimensionnement des chaussées, que le module du matériau réel soit déterminé par essais et non pas à partir du CBR.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ALBTP-CTGA, « Règles techniques pour la construction routière dans les pays africains de la zone intertropicale. » 2018.

[2] G. LAWANE, « Caractérisation des matériaux latéritiques indurés pour une meilleure utilisation dans l'habitat en Afrique », p. 262, 2014.

[3] S. ZOUNGRANA, « Caractérisation de la latérite de KAMBOINSE en vue d'une utilisation durable dans les structures de chaussées », p. 150, 2018.

[4] M. O. DJANDJIEME, « CARACTERISATION DES GRAVEULEUX LATERITIQUES AU CIMENT ET LITHO-STABILISES EN VUE D4UNE CONSTRUCTION ROUTIERE ». 2018.

[5] K. D. E. AZOUMAH, « CARACTERISATION DE LA LATERITE DE KAMBOINSE (BURKINA FASO) STABILISEE PAR DES LIANTS GEOPOLYMERES EN VUE D'UNE APPLICATION DURABLE DANS LES STRUCTURES DE CHAUSSEES ». 2019.

[6] I. TOCKOL, « Contribution à l'étude de la latérite des graveleux latéritiques dans les pays du sahel: cas des routes non revetues ». 1993.

[7] R. MAIGNIEN, « LATERITES ET LATERISATION ». 1982.

[8] SETRA-LCPC, *CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DES STRUCTURES DE CHAUSSÉE: Guide technique*. 1994.

[9] LCPC, « Catalogue des dégradations de surface des chaussées ». 1998.

[10] H. TUYISHIME, « ETUDE COMPARATIVE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE STABILISATION EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE », p. 122, 2015.

[11] L. Saussaye, « Traitement des sols aux liants hydrauliques: aspects géotechniques et physico-chimiques des perturbations de la solidification », p. 318.

[12] G. Herrier, D. Puiatti, S. Bonelli, J.-J. Fry, N. Nerincx, et M. Froumentin, *LE TRAITEMENT DES SOLS À LA CHAUX : UNE TECHNIQUE INNOVANTE POUR LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES HYDRAULIQUES EN TERRE*. 2015.

[13] Z. P. B. Bohi, « Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière: cas de la région de l'Agneby (Côté d'Ivoire) », p. 144, 2008.

[14] M. GUETCHO TAKEDO, « Étude de la stabilisation des chaussées routières à base des latérites avec les extraits du Parkia biglobosa. », p. 89, 2010.

[15] M. BA, « Comportement mécanique sous sollicitation cycliques de granulats quartzitiques de Bakel-Comparaison avec des matériaux de référence du Sénégal et d'Amérique (USA). Application au Dimensionnement Mécanistique-Empirique des chaussées souples. » 2012.

[16] CEBTP, « GUIDE PRATIQUE DE DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES POUR LES PAYS TROPICAUX ». 1980.

[17] D. SEID, « Caractéristion géo mécanique de la latérite de Saaba ». 2019.

Sites internet

http://www.**infociments.fr/types-et-composition** **consulté le 08 juin 2019.**

https://www.google.com/search?ei=gTP8XOzvOsOV1fAPy5-HsA8&q=types+de+Lat%C3%A9rites+au+Burkina+faso&oq=types+de+Lat%C3%A9rites+au+Burkina+faso&gs_l=psy-ab.3..0i71l8.1382546.1386179..1388665...0.0..0.0.0.....0....1..gws-wiz.wyN7FUx-H9sn consulté le 31 mai 2019.

https://www.researchgate.net/figure/Dfinition-des-limites-dAtterberg-et-lindice-de-plasticit-5441-La-limite-de_fig15_309872829 consulté le 02 mai 2019.

https://www.archives-ouvertes.fr mars à mai 2019.

ANNEXES

Sommaire annexe

Annexe I : LIMITES D'ATTERBERG 45

Annexe II : ESSAI PROCTOR.....46

Annexe III : ESSAI CBR 49

Annexe IV : ESSAI DE COMPRESSION 51

Annexe V : SYNTHESE DES RESULTATS DE LA CARACTERISATION SUR LE MATERIAU CRU 57

Annexe I : LIMITES D'ATTERBERG

Limites d'Atterberg de l'étude

Couche C1

	C1	C1Cim1%	C1Cim2%	C1Cim3%
LL	31.64	40.1	46.8	48.4
LP	20.30	25.1	32.0	34.2
IP	11.34	15.0	14.8	14.2

Couche C2

	C2	C2Cim1%	C2Cim2%	C2Cim3%
LL	32.89	47.8	53.0	57.0
LP	21.63	28.6	31.0	33.8
IP	11.26	19.2	22.0	23.2

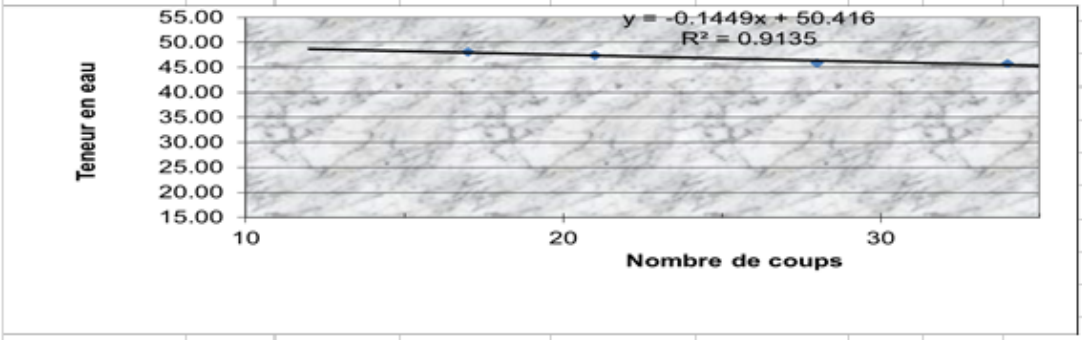
Mel

	M	MCim1%	MCim2%	MCim3%
LL	32.59	50.8	56.4	61.0
LP	21.41	29.2	34.6	38.2
IP	11.18	21.6	21.8	22.8

Exemple de détermination sur l'échantillon C1Cim2%

LIMITES C1Cim2%

	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE			
Nbre de coups	17	21	28	34	-	-	-	-
Numéro tare	1	10	12	14	A	B	D	F
Poids tot. hum.	48.11	46.48	53.9	45.92	29.3	31.3	29.44	30.13
Poids total sec	41.1	40.02	45.27	40.05	28.5	30.3	28.52	29.13
Poids tare	26.52	26.4	26.46	27.23	25.9	27	25.52	26.12
Poids de l'eau	7.01	6.46	8.63	5.87	0.8	1.06	0.92	1
Poids du sol sec	14.58	13.62	18.81	12.82	2.6	3.26	3	3.01
Teneur en eau	48.0796	47.43025	45.87985	45.78783	31.6	32.5	30.67	33.22
RESULTATS	LL =	46.7935	IP =	14.78219			LP	32.01



	C1Cim2%
LL	46.8
LP	32.0
IP	14.8

Annexe II : ESSAI PROCTOR

Couche C1

C1Cim1%

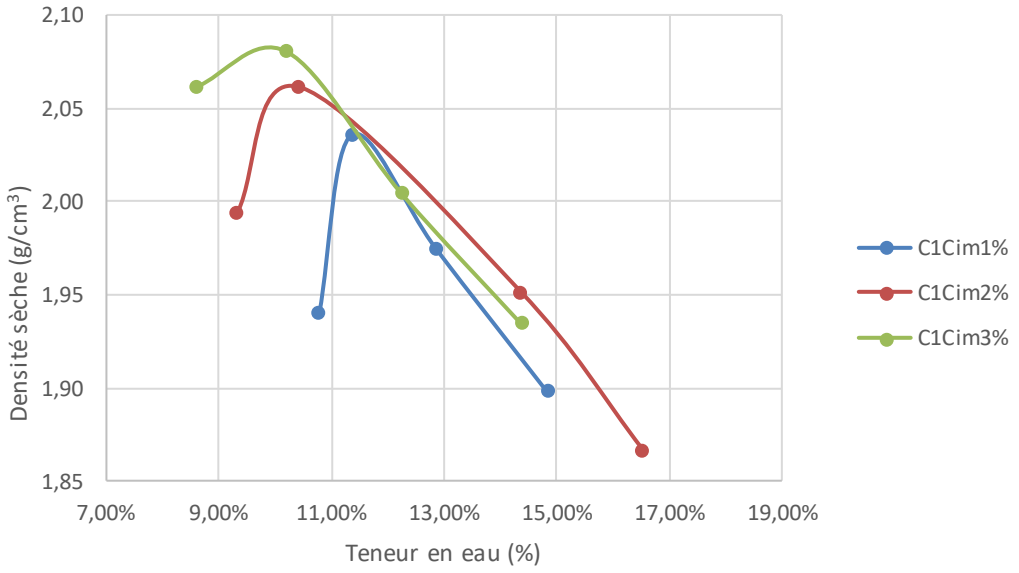
Teneur en eau moyenne (%)	10,77%	11,36%	12,87%	14,84%
Densité humide (g/cm3) :	2,15	2,27	2,23	2,18
Densité seche (g/cm3) :	1,94	2,04	1,97	1,90

C1Cim2%

Teneur en eau moyenne (%)	9,32%	10,42%	14,35%	16,53%
Densité humide (g/cm3) :	2,18	2,28	2,23	2,18
Densité seche (g/cm3) :	1,99	2,06	1,95	1,87

C1Cim3%

Teneur en eau moyenne (%)	8,59%	10,21%	12,26%	14,38%
Densité humide (g/cm3) :	2,24	2,29	2,25	2,21
Densité seche (g/cm3) :	2,06	2,08	2,00	1,93



Matériau	γ_{dop}(g/cm³)	ω_{op}(%)
C1Cim1%	2,036	11,45
C1Cim2%	2,061	10,3
C1Cim3%	2,083	9,9

Couche C2

C2Cim1%

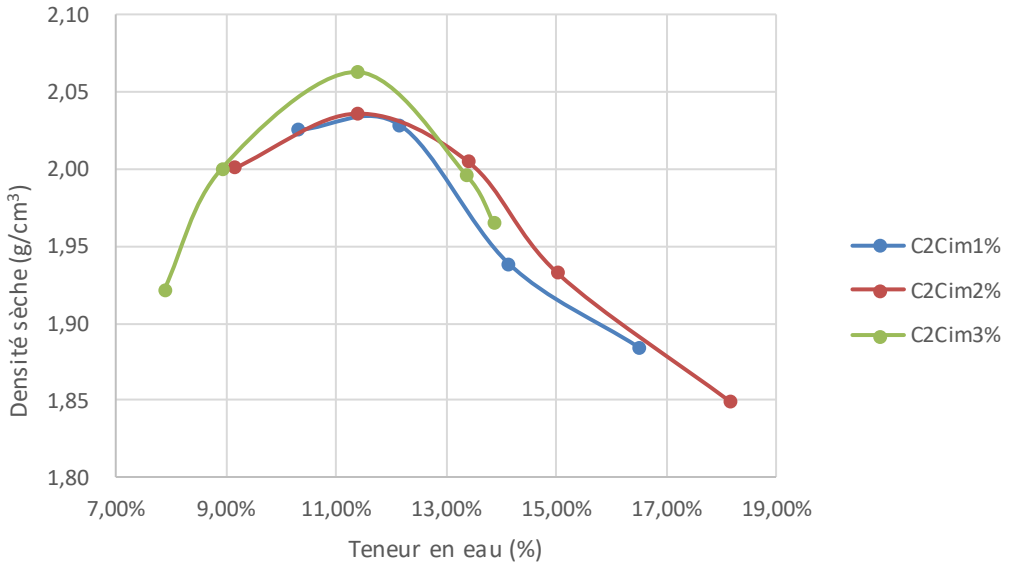
Teneur en eau moyenne (%)	10,31%	12,15%	14,15%	16,51%
Densité humide (g/cm3) :	2,23	2,27	2,21	2,20
Densité seche (g/cm3) :	2,02	2,03	1,94	1,88

C2Cim2%

Teneur en eau moyenne (%)	9,14%	11,37%	13,42%	15,04%	18,18%
Densité humide (g/cm3) :	2,18	2,27	2,27	2,22	2,19
Densité seche (g/cm3) :	2,00	2,04	2,00	1,93	1,85

C2Cim3%

Teneur en eau moyenne (%)	7,88%	8,93%	11,39%	13,36%	13,88%
Densité humide (g/cm3) :	2,07	2,18	2,30	2,26	2,24
Densité seche (g/cm3) :	1,92	2,00	2,06	2,00	1,97



Matériau	γ_{dop}(g/cm³)	ω_{op}(%)
C2Cim1%	2,034	11,4
C2Cim2%	2,036	11,4
C2Cim3%	2,063	11,4

Couche M

MCim1%

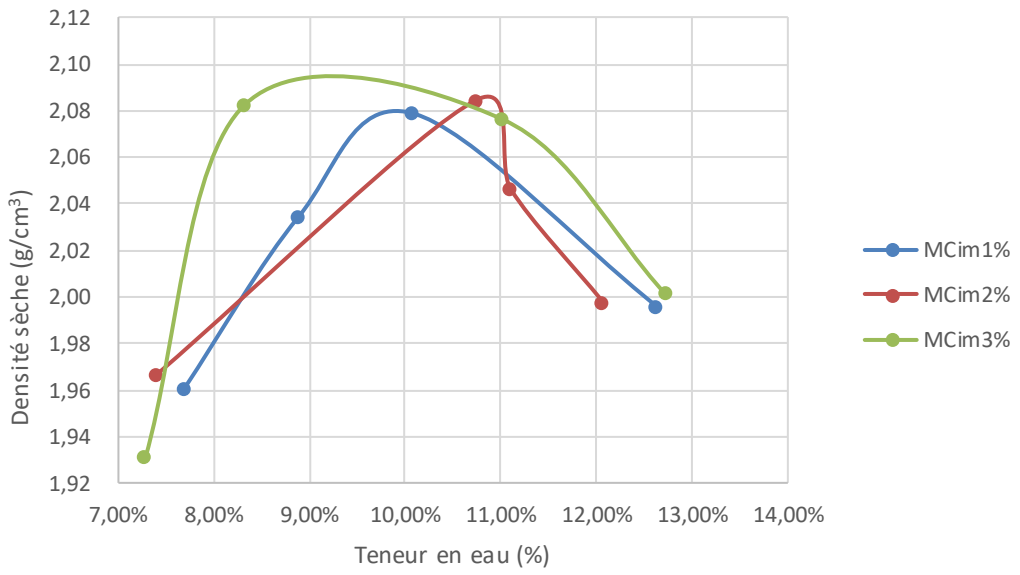
Teneur en eau moyenne (%)	7,69%	8,89%	10,06%	12,63%
Densité humide (g/cm3) :	2,11	2,22	2,29	2,25
Densité seche (g/cm3) :	1,96	2,03	2,08	2,00

MCim2%

Teneur en eau moyenne (%)	7,41%	10,74%	11,10%	12,07%
Densité humide (g/cm3) :	2,11	2,31	2,27	2,24
Densité seche (g/cm3) :	1,97	2,08	2,05	2,00

MCim3%

Teneur en eau moyenne (%)	7,28%	8,32%	11,02%	12,72%
Densité humide (g/cm3) :	2,07	2,26	2,31	2,26
Densité seche (g/cm3) :	1,93	2,08	2,08	2,00



Matériau	γ_{dop}(g/cm³)	ω_{op}(%)
MCim1%	2,08	10
MCim2%	2,081	10,8
MCim3%	2,094	9,4

Annexe III : ESSAI CBR

Un exemple de détermination du CBR

E S S A I C B R

NATURE:	Latérite - Ciment M Cim 1%	PROVENANCE :	SAABA

MOULAGE AVEC GRANDE DAME A 55 COUPS

Nombre de coups	56	25	10
N° Moule	1	2	3
Poids total Humide (g)	10266	10116	9935
Poids Moule (g)	5511	5442	5440
Poids net Matériaux (g)	4755	4674	4495
Volume Moule (cm3)	2123,06	2123,06	2124,06
Densité Humide (t/m3)	2,240	2,202	2,116
Densité Sèche (t/m3)	2,020	1,985	1,908
Compacité (%)	97,1	95,4	91,7

Yd OPM :	2,080
W OPM :	10,00

Gonflement			
56	25	10	
1	9	10	
0,01	0,08	0,09	

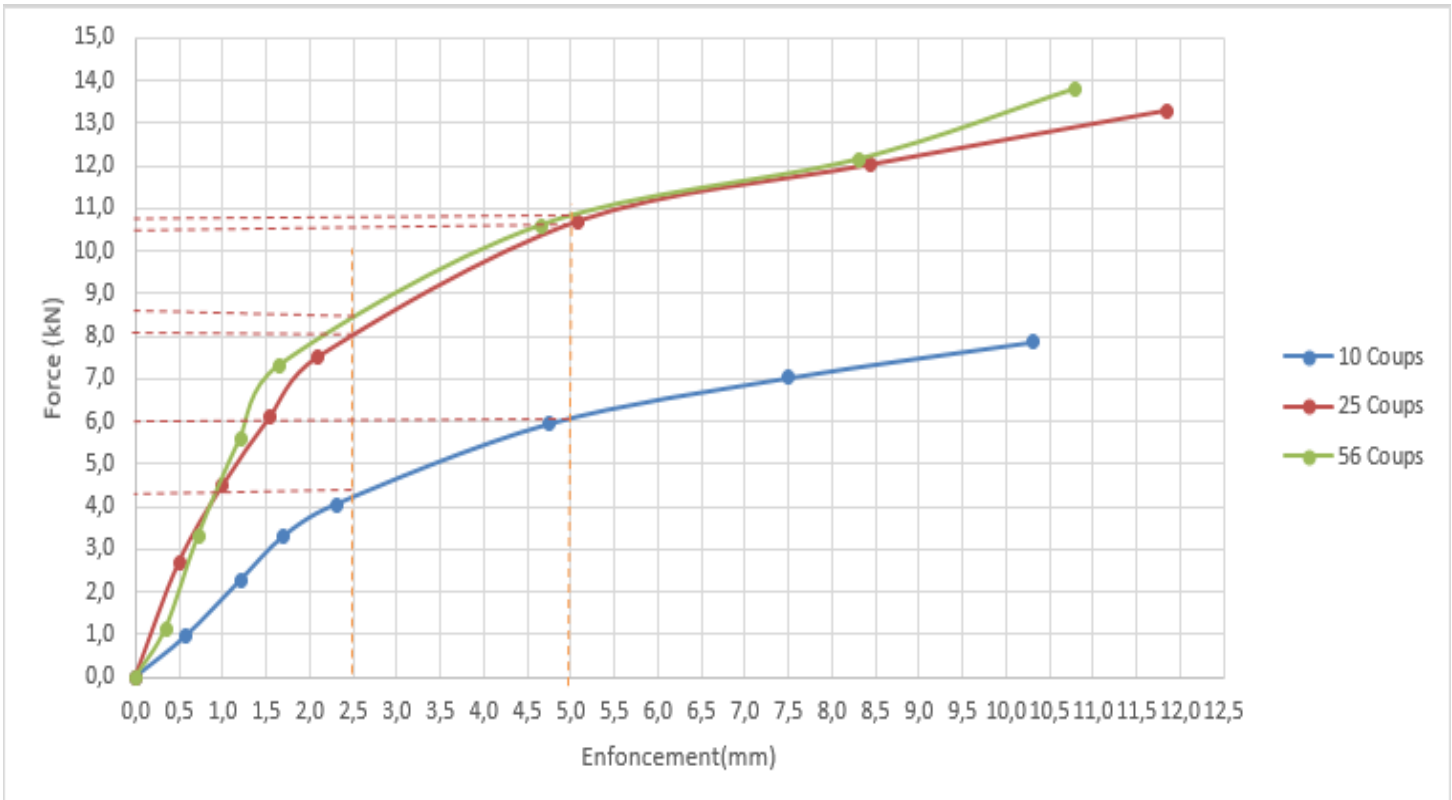
TENEUR EN EAU

	Moulage						Après Imbibition					
Date	5-Feb-19						3-Apr-19					
Nbre de coups	56		25		10		56		25		10	
N°Tare	58	63	51	78	2	62	29	28	I	1	52	74
Poids total Humide (g)	193,48	196,95	170,26	171,37	216,75	194,48	206,17	204,12	218,78	193,47	189,16	182,83
Poids Total Sec (g)	177,19	179,39	155,81	156,54	197,7	179,06	188,24	187,07	199,18	176,57	172,5	166,02
Poids de la Tare (g)	24,24	24,5	25,2	23	27,36	24,98	26,87	25,75	27,47	26,54	24,34	24,5
Poids sec échant.(g)	152,95	154,89	130,61	133,54	170,34	154,08	161,37	161,32	171,71	150,03	148,16	141,52
Poids Eau (g)	16,29	17,56	14,45	14,83	19,05	15,42	17,93	17,05	19,6	16,9	16,66	16,81
Teneur en eau	10,65	11,34	11,06	11,11	11,18	10,01	11,11	10,57	11,41	11,26	11,24	11,88
Teneur en eau moy.%	10,9						10,8		11,3		11,6	

POINCONNEMENT ANNEAU : UNIVERSEL

Enfoncement (mm)	56coups		25coups		10coups	
	Force	CBR	Force	CBR	Force	CBR
0					0,00	
0,63	3,19		3,56		2,34	
1,25	6,49		4,92		5,15	
2	10,15		8,25		7,22	
2,5	8,40	62,9	8,00	59,9	4,30	32,2
5	10,80	54,2	10,80	54,2	6,20	31
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

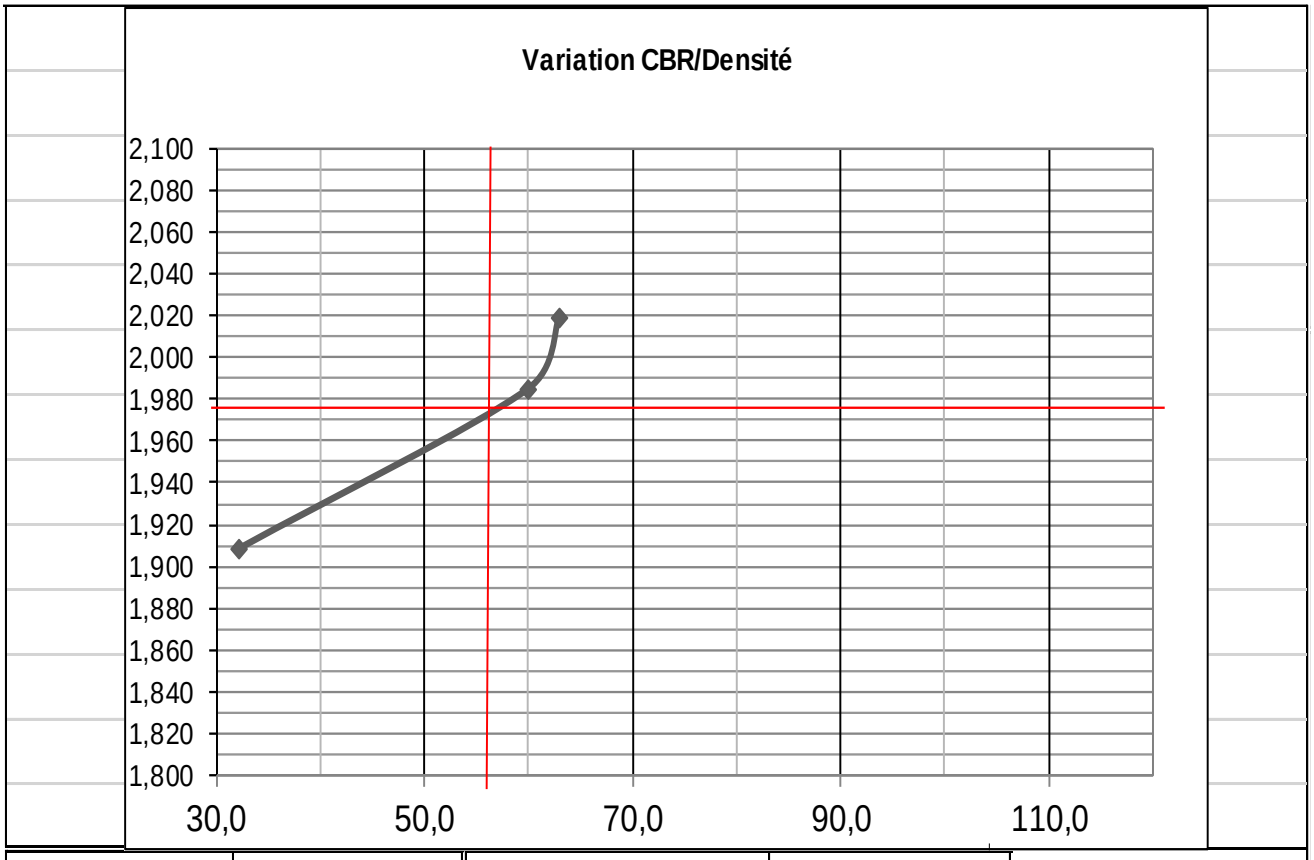
CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	63	60	32
	à 5,0mm	54	54	31
	Maxi.	63	60	32



	N. de Coups					
	10		25		56	
Enfoncement (mm)	2,5	5	2,5	5	2,5	5
Force (kN)	4,3	6,2	8	10,8	8,4	11

DATE :	3-Apr-19	ECHANTILLON:	Latérite-Ciment	Opérateurs:	ABISSI

OPM		N		Ds t/m³	Yd OPM =	95%
Yd =	2,080	10 coups ○	91,7	1,908	2,080	1,976
Wopm (%)	10,0	25 coups ▽	95,4	1,985	CBR	56
W_{sd} =		56coups □	97,1	2,020		

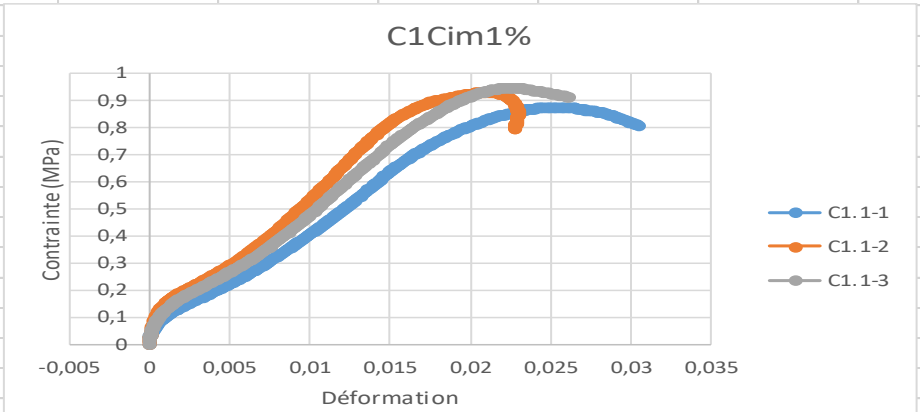


CBR	Nbre coups	56coups	25coups	10coups
	à 2,5 mm	62,9	59,9	32,2
	à 5,0 mm	54,2	54,2	31,1
	Maxi	62,9	59,9	32,2

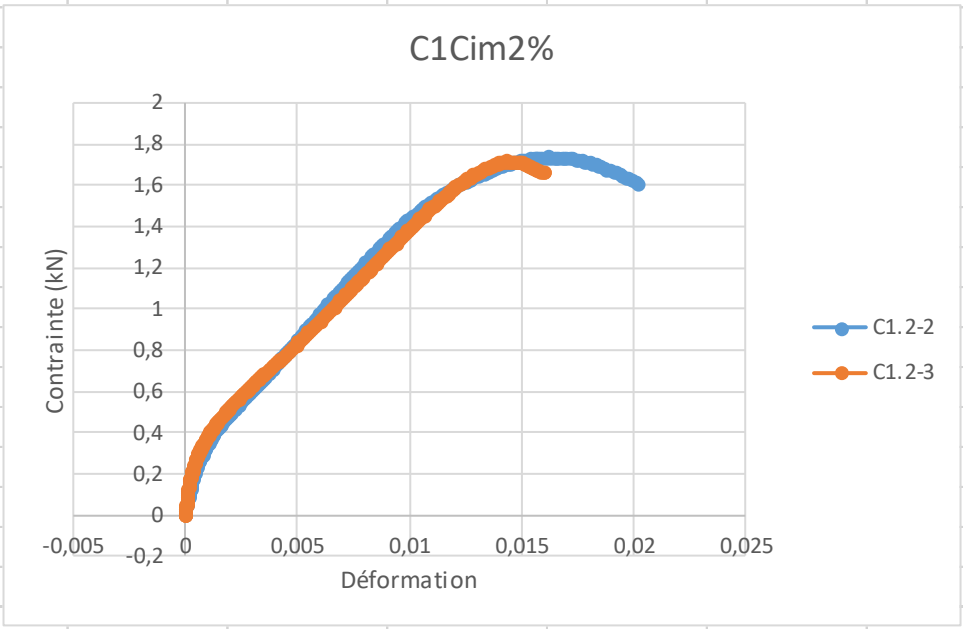
Annexe IV : ESSAI DE COMPRESSION

Résultats des essais de compression sur tous les échantillons

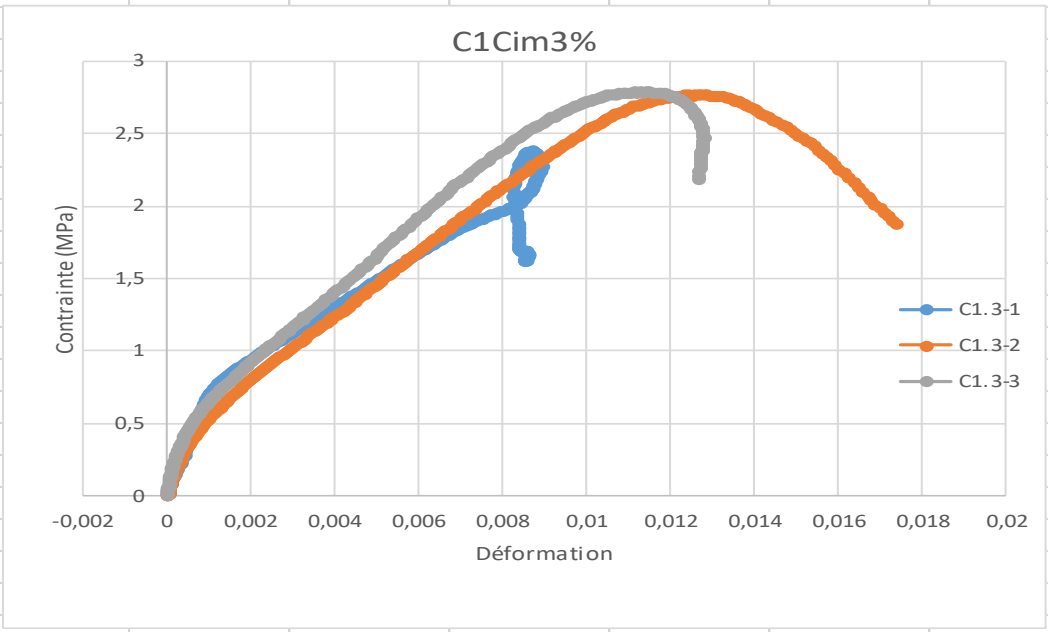
Couche	Dosage	N°	E	d	Em	Ecart Type E	Rc	Rcm	Ecart Type Rc
C1	C1Cim1%	1,00	43,50	2,04	49,50	5,77	0,87	0,92	0,04
		2,00	55,00	2,08			0,93		
		3,00	50,00	2,05			0,95		
	C1Cim2%	1,00			109,00	1,41		1,72	0,01
		2,00	110,00	2,08			1,73		
		3,00	108,00	2,10			1,72		
	C1Cim3%	1,00	182,45	2,12	218,15	34,18	2,38	2,64	0,23
		2,00	221,42	2,09			2,77		
		3,00	250,57	2,11			2,79		
C2	C2Cim1%	1,00	90,67	2,08	124,78	75,35	1,46	1,39	0,06
		2,00	72,51	2,09			1,33		
		3,00	211,15	2,02			1,39		
	C2Cim2%	1,00	166,00	2,11	201,95	32,51	2,20	2,20	0,24
		2,00	229,30	2,09			2,45		
		3,00	210,54	2,10			1,96		
	C2Cim3%	1,00	413,33	2,11	358,38	77,72	3,21	3,10	0,16
		2,00	303,42	2,09			2,98		
		3,00		2,09					
M	MCim1%	1,00	143,75	2,11	123,89	17,63	1,49	1,44	0,04
		2,00	110,09	2,06			1,43		
		3,00	117,82	2,12			1,40		
	MCim2%	1,00	199,03	2,09	212,51	12,64	2,27	2,23	0,11
		2,00	214,42	2,10			2,40		
		3,00	224,09	2,08			2,19		
	MCim3%	1,00	383,55	2,05	359,38	75,41	2,06	2,23	0,15
		2,00	419,74	2,06			2,30		
		3,00	274,85	2,09			2,33		



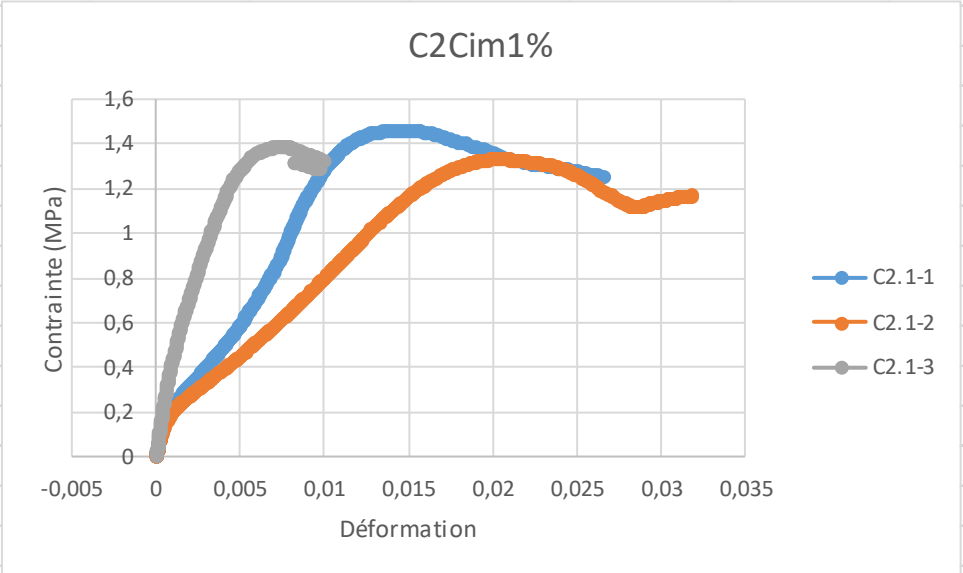
Eprouvette	Ei (MPa)	E (MPa)
E1.1-1	43,5	49,5
E1.1-2	55	
E1.1-3	50	



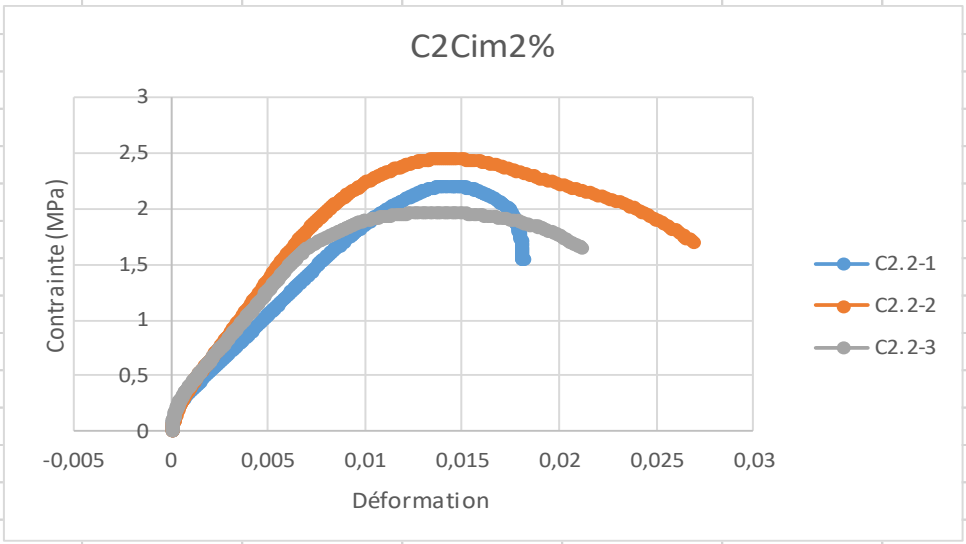
Eprouvette	Ei (MPa)	E (MPa)
E1.2-1		109
E1.2-2	110	
E1.2-3	108	



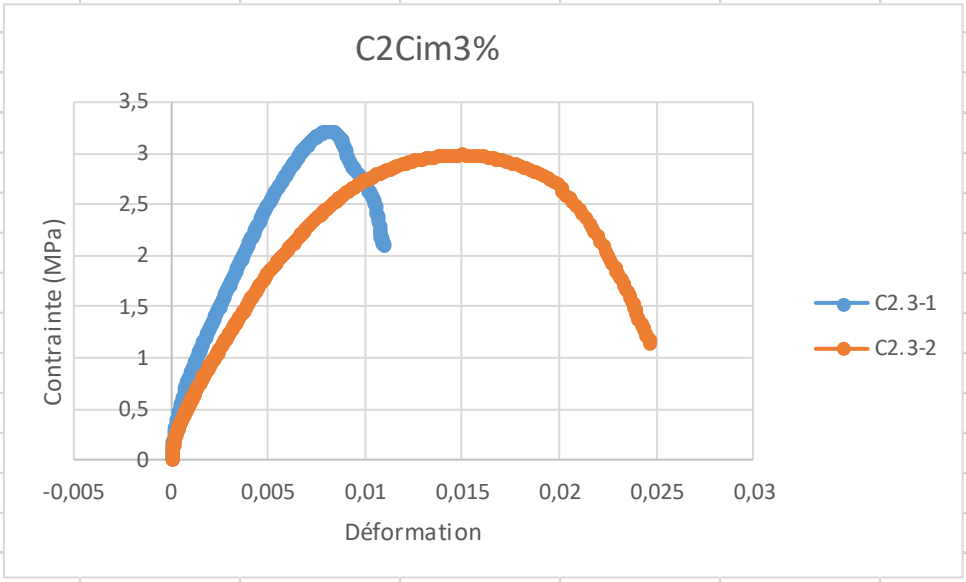
Eprouvette	Ei (MPa)	E (MPa)
E1.3-1	182,46	218,15
E1.3-2	221,42	
E1.3-3	250,57	



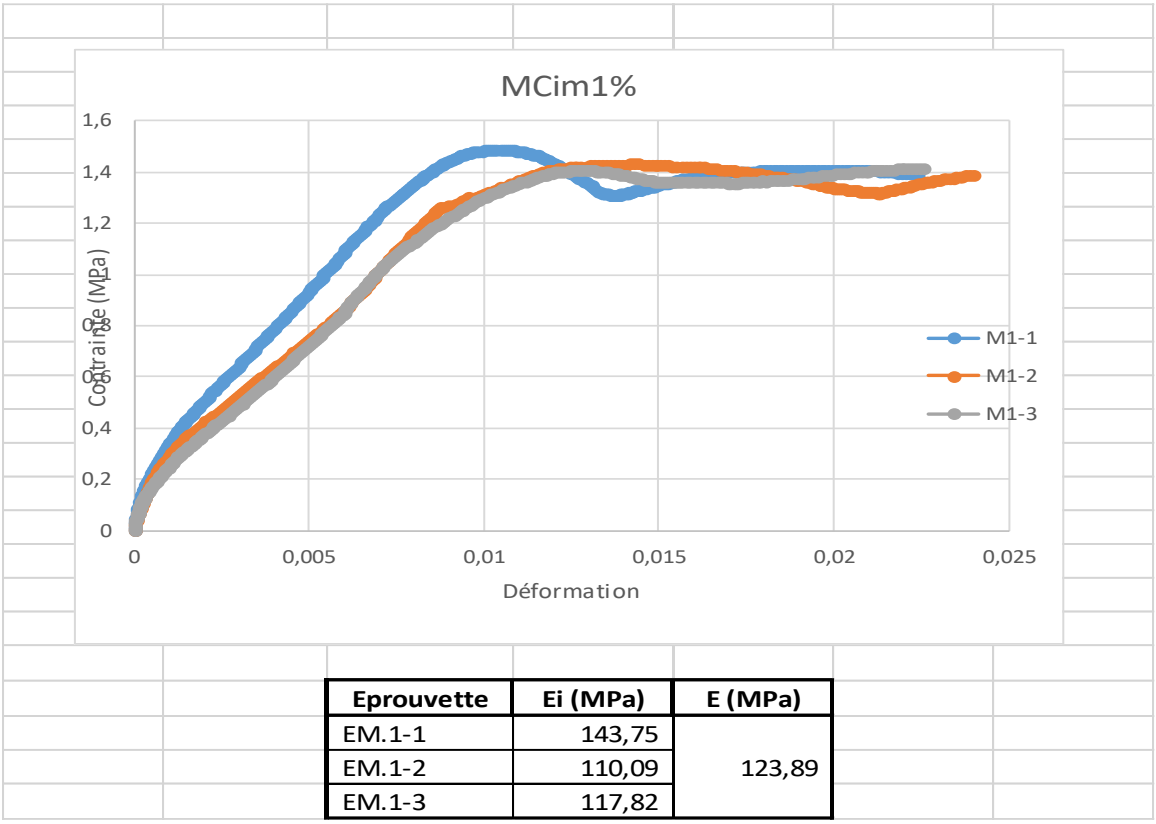
Eprouvette	Ei (MPa)	E (MPa)
E2.1-1	90,67	124,78
E2.1-2	72,51	
E2.1-3	211,16	



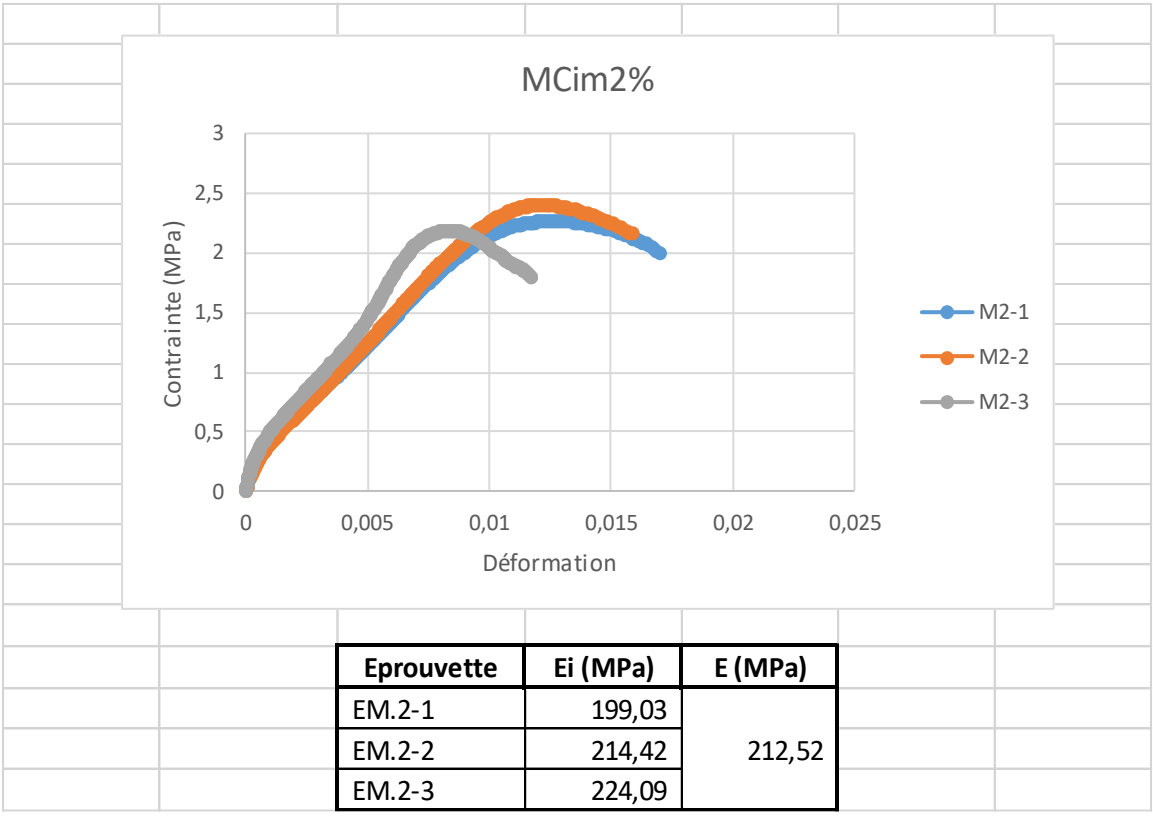
Eprouvette	Ei (MPa)	E (MPa)
E2.2-1	166	201,94
E2.2-2	229,30	
E2.2-3	210,54	



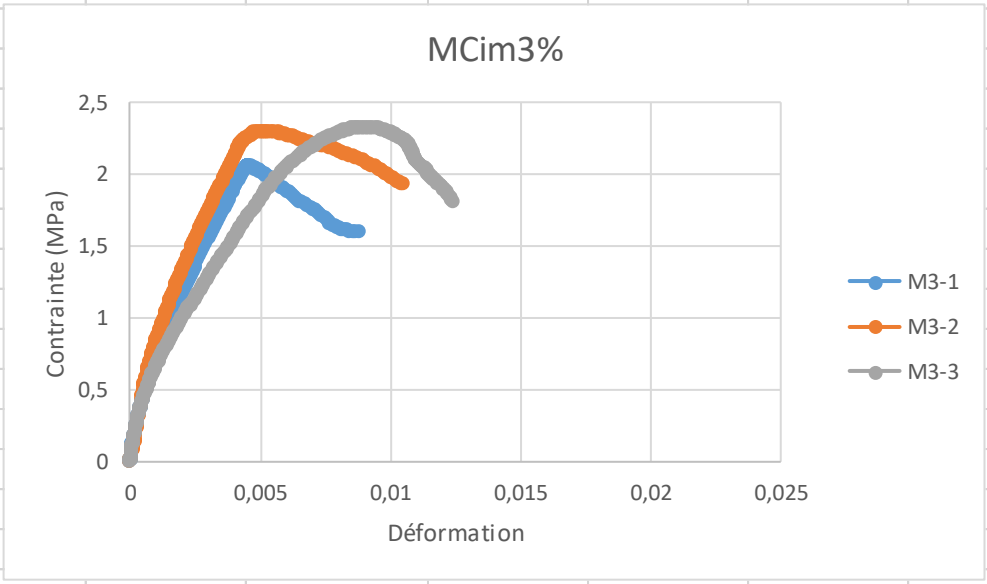
Eprouvette	Ei (MPa)	E (MPa)
E2.3-1	413,33	358,38
E2.3-2	303,42	



Eprouvette	Ei (MPa)	E (MPa)
EM.1-1	143,75	
EM.1-2	110,09	123,89
EM.1-3	117,82	



Eprouvette	Ei (MPa)	E (MPa)
EM.2-1	199,03	
EM.2-2	214,42	212,52
EM.2-3	224,09	



Eprouvette	Ei (MPa)	E (MPa)
EM.3-1	383,55	359,38
EM.3-2	419,74	
EM.3-3	274,85	

Annexe V : SYNTHESE DES RESULTATS DE LA CARACTERISATION SUR LE MATERIAU CRU

- **Paramètres d'état :**

- **La granulométrie :**

Les courbes granulométriques des différentes couches sont présentées sur la Figure 1

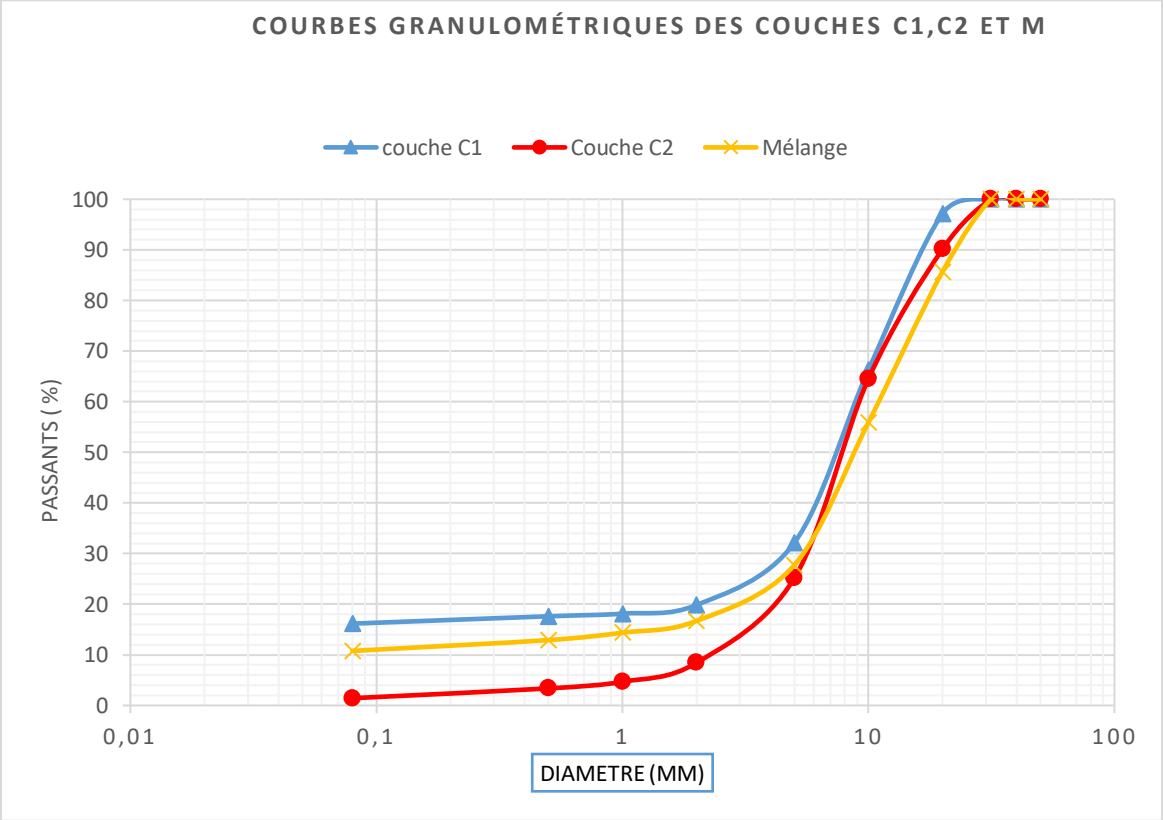


Figure 18: courbes granulométriques de chaque matériau

- **Argilosité :**

Les résultats sur l'argilosité sont présentés sur le Figure 19

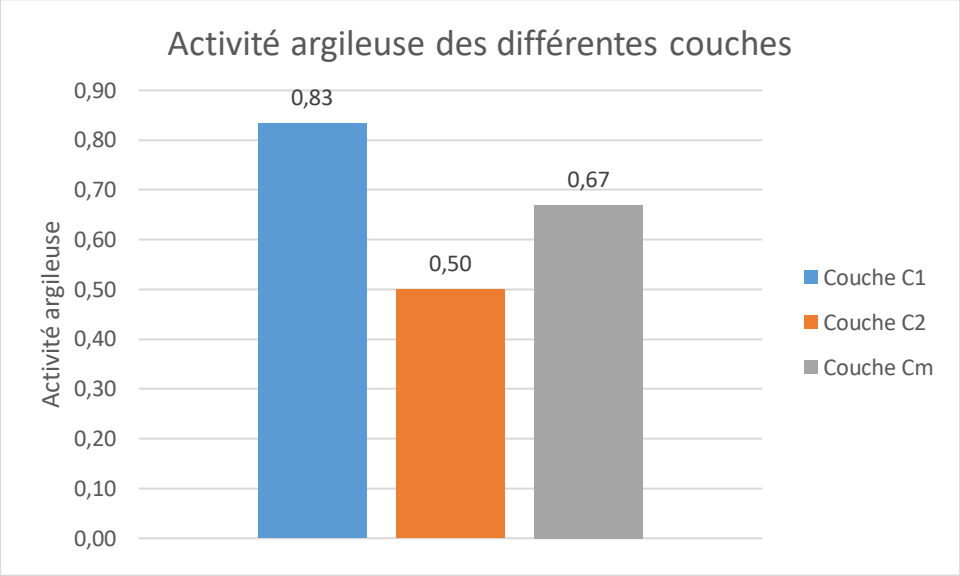
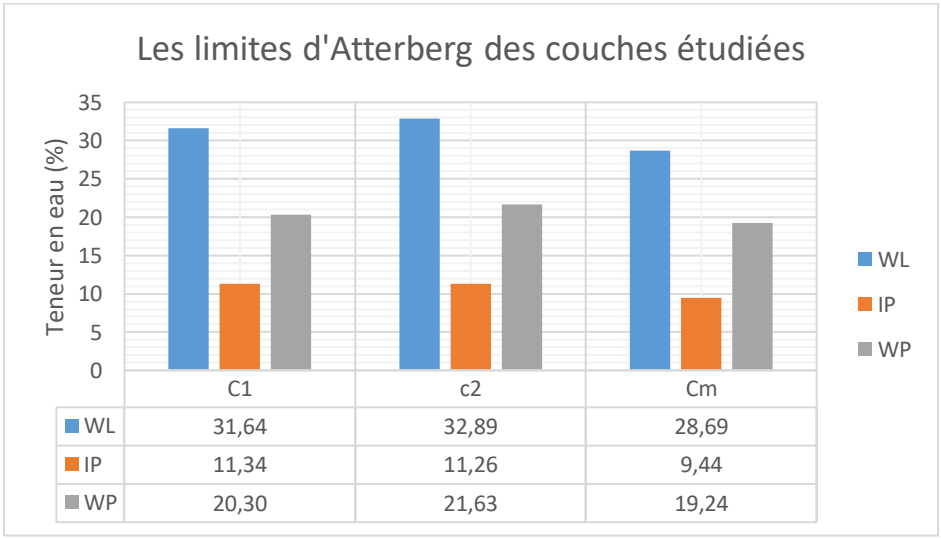


Figure 19: argilosité de chaque matériau

Les résultats montrent la première couche plus argileuse que les autres

- **Les limites d'Atterberg :**

Les valeurs des limites sont présentées sur le graphique de la Figure 20



	C1	c2	Cm
WL	31,64	32,89	28,69
IP	11,34	11,26	9,44
WP	20,30	21,63	19,24

Figure 20: valeur des limites d'Atterberg des matériaux

- **Proctor modifié :**

Tableau VIII:Optimums Proctor des couches à l'état cru

Paramètres	Couche		
	C1	**C2**	**M**
$W_{opt}(\%)$	**11,2**	**9,9**	**11,05**
$\gamma_{dop}(g/cm^3)$	**2,02**	**2,215**	**1,985**

- **Paramètres mécaniques :**

Il s'agit pour chaque matériau de l'indice CBR, de la résistance à la compression et du module de Young Tableau IX

Tableau IX: Valeurs des paramètres mécaniques

Couche	CBR	R_c(MPa)	E (MPa)
C1	11	0,493	47
C2	20	0,601	63
M	15	0,7	57