



**LEMHaD**

**CARACTERISATION GEOMECHANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN**

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

**GRADE DE MASTER**

**SPECIALITE GENIE CIVIL**

OPTION : ROUTES ET OUVRAGES D'ART (ROA)

-----

Présenté et soutenu publiquement le [Date] par

**ALIO BOZARI Mahamadou Nasser (20131486)**

**Directeur de mémoire : Adamah MESSAN, Maître de conférence**

**Encadreur : Abdou LAWANE GANA, Maître-Assistant de conférence**

**Maître de stage : Marie Thérèse MBENGUE/GOMIS (Enseignante à 2IE)**

Structure d'accueil du stage Laboratoire Eco-Matériaux et Habitats Durables (LEMHaD) de  
2iE

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Lawani MOUNIROU

Membres et correcteurs : Mr. Roland YONABA  
Mr. Arnaud OUEDRAOGO

**Promotion 2018-2019**

**DEDICACES**

Premièrement et avant tout je rends grâce à DIEU puissant de m'avoir donné le courage pour achever ce modeste travail que je dédie

**A**

Ma très chère mère,

Qui m'a toujours apportée son amour et son affection

Mon cher père,

Qui m'a toujours encouragé, conseillé et soutenu dans mon travail

Mes frères et sœurs

Pour leur présence constante et leur soutien précieux dans les moments de joie et de difficulté,

Mes tantes et oncles

Qui m'ont toujours aidé, soutenue et encouragé ainsi qu'à toute ma famille.

CITATION

- « VOLONTE, ORDRE, TEMPS : tels sont les éléments de l'Art d'apprendre » **L'Abbé Prévost**, l'art d'apprendre

## REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à :

- ❖ La Fondation 2iE, pour sa disponibilité et la connaissance qu'elle nous a transmise ;
- ❖ Adamah MESSAN, Maître de conférence, mon Directeur de Mémoire pour sa rigueur et son encadrement malgré son emploi du temps chargé ;
- ❖ Abdou LAWANE GANA, Maître-Assistant pour sa collaboration et ses précieux conseils ;
- ❖ Marie Thérèse GOMIS, enseignante à 2IE qui a initié et suivi ce sujet de recherche. Nous disons merci pour la mise à notre disposition du matériel nécessaire et l'accompagnement qu'elle nous a accordé lors du déroulement des essais au laboratoire ;
- ❖ Les doctorants du laboratoire LEMHaD pour leur contribution et collaboration à la réalisation de ce projet de recherche ;
- ❖ Mr Salifou KABORE pour nous avoir aidé à réaliser les essais géotechniques qui étaient d'une importance capitale dans le cadre de notre étude ;
- ❖ Tous nos amis et collègues du cycle master auxquels nous réitérons nos gratitude pour leur soutien et encouragement continus. Que Dieu leur soutienne aussi dans leur effort ;
- ❖ Mes frères et sœurs pour leur sacrifice et contribution financière à ma formation. Que Dieu vous récompense pour tout ce que vous avez fait pour moi.

## RESUME

La présente étude s'intéresse à la caractérisation géo-mécanique et à l'amélioration au ciment des graveleux latéritiques provenant de la carrière de Kamboinsin (connue sous le nom de Sam-tanga). Cette technique d'amélioration consiste à incorporer, au sein du sol, une certaine quantité de stabilisant avec éventuellement de l'eau et à les mélanger plus ou moins intimement jusqu'à l'obtention d'un matériau homogène pour lui conférer les propriétés nouvelles.

En effet une étude stratigraphique est effectuée sur les quatre couches que compose notre profil latéritique. D'après les études menées au laboratoire nous remarquons que le sol sujet de notre recherche est un sol limoneux peu plastique de faible capacité portante CBR (couche 1=55 ; couche 2= 41 ; couche 3=21 et couche 4=10) d'où la nécessité d'une d'amélioration de ses performances mécaniques. Cependant les deux dernières couches de notre profil ont des valeurs CBR très faible à tel point que leur matériau ne puisse pas être utilisé en fondation, c'est pourquoi l'amélioration s'est porté uniquement sur les couches 1 et 2. Le traitement au ciment effectué sur les deux premières couches de notre profil latéritique a augmenté la portance de ses dernières jusqu'à des valeurs de CBR égales à 175 et 108 respectivement pour la première et la deuxième couche.

Selon les recommandations du CEBTP (Centre Expérimental d'Etudes du bâtiment et des Travaux Publics) le matériau de la première couche peut être utilisé en couche de fondation et base tandis que celui de la deuxième couche est utilisable qu'en fondation.

### Mots clés :

1. Graveleux latéritiques
2. CBR
3. Ciment
4. Stabilisation
5. Kamboinsé

## ABSTRACT

This study focuses on the geo-mechanical characterization and cement improvement of lateritic gravelly rocks from the Kamboinsin quarry (known as Sam-tanga) by incorporating a certain amount of stabilizer into the soil with possible water and mixing them more or less intimately until a homogeneous material is obtained to give it the new properties.

Indeed, a stratigraphic study is carried out on the four layers that make up our lateritic profile. According to the studies carried out in the laboratory, we notice that the soil subject of our research is a low-plastic silty soil with a low CBR bearing capacity (layer 1=55 ; layer 2= 41 ; layer 3=21 and layer 4=10), hence the need to improve its mechanical performance. However, the last two layers of our profile have very low CBR values to such an extent that their material cannot be used as a foundation, which is why the improvement was only made in layers 1 and 2. The cement treatment carried out on the first two layers of our lateritic profile significantly increased the bearing capacity of the latter to CBR values equal to 175 and 108 respectively for the first and second layer.

According to the recommendations of the CEBTP (Centre for Experimental Studies and Studies of Building and Public Works), the material of the first layer can be used as a foundation and base layer while the material of the second layer can only be used as a foundation.

### **Keywords :**

1. Lateritic gravelly
2. CBR
3. Cement
4. Stabilization
5. Kamboinsin

## LISTES DES ABBREVIATIONS

**2IE** : Institut International d'ingénierie de l'Eau et de l'environnement

**BF** : Burkina Faso

**AFES** : Association Française de l'Etude des Sols

**AASHTO** : American Association State Highway and Transportation Official

**ACP** : Analyse en Composantes Principales

**CBR** : California bearing ratio

**CEBTP** : Centre Expérimental et d'Etudes du bâtiment et des Travaux Publiques

**GTR** : Guide des Terrassements Routiers

**HRB** : Highway Research Board

**LVDT** : Linear Variable Differential Transformer

**LCPC** : Laboratoire central des ponts et chaussées

**OPM** : Optimum Proctor Modifié

**SETRA** : Service des Etudes Techniques des Routes et Autoroutes

**USCS** : Unified Soil Classification System

**OSTROM** : Office de la recherche scientifique et technique Outre-mer

**GPS** : Global Positioning System

**LEMHaD** : Laboratoire Eco matériaux et Habitat durable

## LISTES DES SYMBOLES

- Acb : activité argileuse
- CC : coefficient de courbure de l'analyse granulométrique
- Cc : indice de compression de l'essai œdométrique
- Cs : coefficient de d'compression
- Cg : coefficient de gonflement
- Cu : coefficient d'uniformité de HAZEN
- Dmax : diamètre max des grains
- E : module de Young œdométrique
- e : indice de vide
- Eoed : Module de Young œdométrique
- hs : hauteurs des grains solides
- IP : indice de plasticité
- LL : Limite de liquidité
- LP : Limite de plasticité
- Vbs : Valeur bleue d'un sol
- $\omega_i$  : teneur en eau initiale
- $\omega_{opt}$  : teneur en eau optimale
- $\omega$  : Teneur en eau
- $\Delta e$  : variation de l'indice de vide
- Ki : coefficient d'ionisation de la latérite
- Rc : résistance à la compression
- e0 : indice de vide initial
- hvo : hauteur des vides d'un sol
- C (0/5) : Coefficient pondérale de la fraction de 0 à 5mm
- $\Upsilon$  : densité sèche d'un sol
- $\Delta h$  : déformation réelle œdométrique
- $\Delta h_1$  : Déformation de l'éprouvette œdométrique sous charge
- $\Delta h_2$  : déformation du système
- Dn : diamètre correspondant n% des passants



# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

II.4.2.5 Usure de la surface de roulement.....	12
II.4.3 Dégradation des dépendances communes a toutes les routes .....	12
II.4.3.1 L'envahissement par la végétation.....	12
II.4.3.2 Les érosions des talus de remblai .....	12
II.4.3.3 Les éboulements de talus de déblais .....	12
III. STABILISATION EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE .....	12
III.1 Stabilisation chimique .....	13
III.1.1 Traitement aux liants hydrauliques.....	13
III.1.2 Stabilisation aux liants hydrocarbonés .....	14
III.1.2.1 Traitement aux produits chimiques .....	14
III.1.2.2 Traitement mixte .....	15
IV. MATERIELS ET METHODES .....	15
IV.1 LOCALISATION DE LA CARRIERE LATERITIQUE DE KAMBOINSIN .....	15
IV.2 DESCRIPTION DES COUCHES LATERIQUES DE NOTRE PROFIL.....	16
IV.2.1 Description du profil .....	16
IV.2.2 Description sommaire des sols des différentes couches de notre profil.....	19
IV.3 DESCRIPTION DES ESSAIS .....	21
IV.3.1 Essai d'identification des paramètres d'un sol.....	21
IV.3.1.1 Analyse granulométrique .....	21
IV.3.1.2 Limites d'Atterberg.....	21
IV.3.1.3 Teneur en eau initiale .....	22
IV.3.1.4 Poids spécifique.....	22
IV.3.1.5 Bleu de Méthylène .....	22
IV.3.1.6 Essai Proctor Modifié.....	22
IV.3.2 Essais d'identification des paramètres mécaniques des sols .....	23
IV.3.2.1 CBR par immersion.....	23
IV.3.2.2 Essai œdométrique .....	23
IV.3.2.3 Essai de compression uniaxiale.....	24
V. RESULTATS ET DISCUSSIONS .....	25
V.1 Paramètres d'état et de nature.....	25
V.1.1 Limites d'Atterberg .....	25
V.1.2 Bleu de méthylène .....	27
V.1.3 Analyse granulométrique.....	28
V.1.4 Poids spécifique.....	31
V.1.5 Teneur en eau initiale des différentes couches .....	32
V.2 Caractéristiques des paramètres mécaniques.....	33

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

V.2.1 Proctor Modifié .....	33
V.2.2 Valeurs du CBR.....	34
V.2.3 Essai œdométrique.....	36
V.2.4 Compression uniaxiale .....	37
V.3 STABILISATION EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE .....	37
V.3.1 Proctor Modifié .....	37
V.3.2 Gonflement .....	39
V.3.3 Valeurs CBR.....	40
V.3.4 Compression uniaxiale .....	41
VI CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	45
VII RECOMMANDATIONS .....	46
BIBLIOGRAPHIE.....	47
ANNEXES 1 : TABLEAUX DES RESULTATS.....	48
ANNEXES 2 : GRAPHIQUES ET DIAGRAMMES .....	69



# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XLV: Résultats de la teneur en eau initiale des différentes couches.....	67
Tableau XLVI: : Résultats des poids spécifiques des différentes couches .....	67
Tableau XLVII: énergie de compactage pour l'essai compression uniaxiale.....	67
Tableau XLVIII: valeurs maximales des modules de Young (en MPa) trouvés à l'essai de compression simple .....	68



## I. INTRODUCTION GENERALE

La route précède le développement ne cesse-t-on de dire. Cela suppose que la route doit être la priorité des priorités pour tout pays qui tient à son développement. Le domaine de la construction routière exige des matériaux de meilleure qualité géotechniques car la durabilité d'une route dépend de la qualité des matériaux utilisés.

En effet il a été observé au Burkina Faso une augmentation généralisée du niveau du trafic routier et une rareté des matériaux latéritiques de bonne qualité. Ceci limite la disponibilité des matériaux qui sont très utilisés dans la réalisation des assises plus précisément la couche de base et de fondation.

Le constat fait est qu'il a toujours été possible de sélectionner des graveleux latéritiques pour une utilisation 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 les caractéristiques géotechniques annoncées lors de l'étude des emprunts. En général, les caractéristiques géotechniques des matériaux baissent après gerbage, approvisionnement, réglage et compactage.

Toutes ces remarques, qui relèvent d'expériences conclues par des contrôles géotechniques de chantiers ont conduit à la nécessité d'améliorer les graveleux latéritiques devant être utilisés en couche de base dans de nombreuses situations.

Alors une vision globale s'est développée dans la plupart des pays ayant les problèmes de construction. Pour la recherche des solutions techniques et économiques en vue de satisfaire aux exigences et aux besoins rencontrés.

Pour remédier aux problèmes de construction routière on fait actuellement recours à :

- ✚ L'amélioration des latérites au ciment afin de réduire l'utilisation des réserves naturelles
- ✚ Faire la litho-stabilisation

Le mémoire actuel présente les résultats et analyses relatives sur les possibilités d'utilisation de la latérite améliorée au ciment en couche d'assise. Cette technique est axée sur les objectifs suivant :

- ✓ Objectif 1 : Etude caractéristique des matériaux lateriques en fonction de la profondeur de prélèvement

## **CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN**

- ✓ Objectif 2 : Etude du comportement mécanique à savoir la durabilité et la sensibilité des sols latéritiques non améliorés et à l'état amélioré face à l'eau
- ✓ Objectif 3 : Impact de la stabilisation sur les paramètres mécaniques en fonction de la profondeur et de la composition minéralogique des matériaux

Le présent mémoire est subdivisé en trois grandes parties présentées comme suit :

La première partie est consacré aux différents types des sols rencontrés dans les carrières latéritiques et à la dégradation des chaussées revêtues et non revêtues.

La deuxième partie est consacrée aux matériels et méthodes ayant permis à aboutir aux résultats des différents essais réalisés au laboratoire.

Et enfin la troisième et dernière partie qui est une synthèse des résultats analyses et discussions

## I.1 Contexte de l'étude

Les sols latéritiques sont des sols résiduels qui résultent d'un processus d'altération de la roche mère. Elles sont présentes en grande partie dans les zones tropicales et s'étendent sur une bande du continent africain d'Est en Ouest entre les isohyètes 700 et 1200 mm (d'Hoore, 1964). Au Burkina Faso, une étude faite par le BUMIGEB révèle que 2/3 de son territoire est constitué par ce matériau.

Ainsi, comme ce matériau est abondant et facile à extraire, les sols d'assise des routes des pays tropicaux sont faits à partir de ce matériau. Vu la surexploitation de la latérite, celle ayant les meilleures caractéristiques se font rares. La plupart des gisements restants ne présentent pas les caractéristiques nécessaires pouvant permettre leur utilisation en couche d'assise.

En plus de cela, même si les sols latéritiques présentent les caractéristiques demandées, les routes construites n'atteignent pas la durée de vie escomptée.

## I.2 Objectifs du travail

L'objectif de cette étude est de faire une caractérisation géo-mécanique et une amélioration au ciment des différentes couches de la carrière de Kamboinsin en vue d'une construction routière durable.

Les résultats de la recherche nous permettront de voir l'évolution de la capacité portante du sol en fonction des différents dosages pour enfin définir le domaine optimum.

## II. ETAT DE L'ART

### II.1 Latérite

Le mot « latérite » a été suggéré pour la première fois par Buchanan en 1807 (Bourgeon et Gunnell, 2005) pour désigner un matériau servant à la construction et exploiter dans les régions montagneuses de Malabar en Inde. Buchanan (1807) indique que « ce matériau a l'aspect d'un dépôt ferrugineux à morphologie vésiculaire. Il est apparemment non stratifié et se situe à faible profondeur dans les sols. Lorsqu'il est frais, il peut être facilement découpé en blocs réguliers à l'aide d'un instrument tranchant. Exposé à l'air, il durcit rapidement et résiste alors remarquablement aux agents météorologiques ».

Plusieurs travaux menés par différents chercheurs se sont succédés, mais la plupart de ces travaux tendent à préciser la définition des latérites sur des bases chimiques, parfois minéralogiques. Ils soulèvent cependant de nombreuses controverses, en particulier sur la nature et les proportions relatives d'oxydes caractéristiques qu'elles renferment. Une latérite

doit contenir plus de 86% de  $Fe_2O_3$  selon (Lacroix, 1914). (Fermor, 1911) porte cette limite à 90%, bien qu'il signale que les constituants des latérites sont des oxydes de fer, aluminium, de titane et de manganèse. Mais la présence d'oxyde de fer reste obligatoire. Cependant cette définition de la latérite selon sa teneur en oxyde n'est pas partagée par les pédologues.

En effet selon des pédologues à l'image de (Slansky, 1964) emploient le mot « latérite » dans le sens très général « ensemble des produits d'altération de la zone intertropicale ».

Le mot latérite couvre alors selon eux des aspects très variés de la pédogenèse tropicale et a une trop grande généralité. Pour (Guerassimov, 1962) le terme englobe l'ensemble des sols des régions intertropicales. Aussi, bon nombre d'entre eux pour éliminer tout risque de confusion, cherchent à éliminer le terme latérisation. (Sirivonor, 1930), (Vine 1949), (G.W. Robinson, 1949) remplacent « latérisation » par le mot connotatif « ferrallitisation » qui évoque le fait que les accumulations alumineuses vont le plus souvent de pair avec des accumulations à dominante ferrique, Bohelo Da Costa qui abonde dans ce sens, indique que ce terme est très utile car il se rapporte à des caractérisations physiques et physicochimiques des sols qui permet de l'employer à un niveau de généralisation élevé (Massamba, 2013).

Retenons un sens plus large qui est admis et désigne « la latérite » comme l'ensemble des matériaux, meubles ou indurés, riches en hydroxydes de fer ou d'alumine, constituant des sols des horizons superficiels et des horizons profonds des profils d'altération.

### II.2 Processus de la latérisation

Le phénomène de latérisation est un processus de formation des sols spécifiques aux régions tropicales chaudes et humides. Il s'agit d'une altération de la roche-mère dont la caractéristique essentielle réside dans la mise en solution puis le départ de la silice. Ce phénomène de lessivage s'accompagne d'un enrichissement en fer et en alumine sous forme d'oxydes  $Fe$  Il s'agit plutôt d'une altération de la roche-mère dont la caractéristique essentielle réside dans une mise en solution puis un départ de la silice, par le phénomène de lessivage, accompagnés d'un enrichissement en fer et en alumine sous forme de sesquioxydes  $Fe_2O_3$  et  $Al_2O_3$  (Autret, 1980). Les facteurs influençant de façon prépondérante l'altération des roches et la formation des sols latéritiques qui en découlent sont : le climat (pluviométrie, température, bilan hydrique), la topographie (érosion et drainage), la végétation (matières organiques, bactéries, acides humiques), la nature de la roche-mère et le temps (Lawane, 2014).

## II.2.1 Le climat

Le climat est considéré comme le plus important des facteurs, qui influence le processus de formation des sols. Les climats tropicaux humides donnent lieu au genre d'altération qui est essentielle à la formation des oxydes de fer et d'aluminium, ainsi qu'au lessivage de la silice soluble, qui sont caractéristiques des latérites et des sols latéritiques. L'influence du climat sur la formation des latérites est multiforme :

- ✓ La température : intervient dans la réaction physique et chimique nécessaire à la formation des sols. (Maignien 1966) remarque que la majorité des sols latéritiques contemporains se développent sous des températures moyennes annuelles qui avoisinent 25 °C, Il n'a cependant pas été possible d'établir un critère thermique définitif pour la formation des latérites.
- ✓ Les précipitations : nécessaires à la formation des latérites relevées dans la bibliographie sont très variables. Cela se justifie par la présence de formation latéritique sur une grande étendue, étendue qui n'ont pas la même pluviométrie. Mais toujours est-il que de l'eau en abondance sous forme de pluies est essentielle pour l'altération chimique en dessous des tropiques. Le rôle de l'eau étant surtout de lessiver le matériau. L'efficacité de son action dépend de la nature de la roche.

## II.2.2 La topographie

Le relief conditionne le drainage et contrôle la vitesse des écoulements qui par la même occasion est la vitesse de l'altération. Nombreux sont les auteurs qui sont généralement d'accord que la latérite durcie est habituellement associée avec des régions plates et avec des plateaux élevés ou ayant des ondulations douces, mais très rarement avec des pentes raides (Stephens, 1946).

## II.2.3 La végétation

La végétation influe sur la teneur en éléments grossiers des horizons superficiels des sols latéritiques en limitant l'érosion (les débris de quartz et gravillons se concentrent par suite de l'entraînement des matériaux fins par les eaux de ruissellement). L'action des racines provoque aussi une certaine homogénéisation de ces matériaux (Savadogo, 2018).

## II.2.4 La roche mère

Les résultats de recherches, faites à travers toute la terre, ont montré que l'on trouve des sols latéritiques sur différents types de roches. Elles ont été trouvées sur des roches basiques ignées, telles que les basaltes, les norites et les diabases, ainsi que sur des roches acides telles que les granites, les granulites, les gneiss, les phyllades et les schistes à séricite. (Stephens, 1946) et

Marbut (1932) ont noté des gites de sols latéritiques sur des schistes de grés et sur d'autres roches sédimentaires, y compris des roches calcaires, et sur des alluvions associées à des nappes phréatiques.

## II.2.5 Le temps

Le temps est également l'un des facteurs prépondérants qui influent sur le phénomène de lessivage. « Nombreux sont les observateurs qui ont remarqué, quelques années après l'ouverture d'une tranchée dans un massif argileux latéritique, un durcissement de surface du matériau, d'où l'idée que le phénomène de latérisation est un processus court portant sur quelques décennies » (Autret, 1983). En effet la présence d'eau dans les pores des roches sur une longue durée contribue à la latérisation (Fatou, 2014).

## II.3 DIFFERENTS TYPES DES SOLS RENCONTRES DANS LES CARRIERES LATERITIQUES

Il est d'usage de définir très précisément tous les sols résiduels tropicaux par des terminologies empruntées de la pédologie et qui regroupent trois grands ensembles qui sont (Meïssa, 1993) :

- Les sols fersialitiques
- Les sols ferrugineux
- Les sols ferralitiques

### II.3.1 Les sols fersialitiques

Ce sont les sols formés principalement en climat subtropical ou à la rigueur sous certaines conditions méditerranéennes, avec une moyenne de température de 13 à 20 °C, une pluviométrie comprise entre 500 et 1000 mm de pluies par an et une saison sèche (Duchaufour, 1983). Sous ces conditions, les horizons supérieurs sont sujets à une décalcification et à l'altération des minéraux primaires pendant la saison humide. Du fait de l'intense altération ces sols contiennent beaucoup d'oxydes de fer Le principal nouveau minéral d'argile formé est la smectite. La kaolinite apparaît sur des surfaces bien drainées et pauvres en silices, comme par exemple le basalte. Selon l'agence pour le développement international 1964, les différents sous-groupe de sol ferisols sont :

- Ferrisols sur des roches riches en minéraux ferromagnésiens
- Ferrisols non différenciés
- Ferrisols humides

### II.3.2 Les sols ferrugineux

Ces types de sols se forment en zones climatiques plus humides, sans saison sèche ou des zones légèrement plus chaudes que la zone méditerranéenne où il y a une prédominance des sols

ferralitiques. Seulement ces sols ont tendance à être beaucoup plus altérés que ces derniers. Les minéraux argileux issus de la latérisation dans les zones humides (sols ferrugineux), sont en grande majorité de la kaolinite (Agence pour le développement international, 1964). On constate fréquemment une séparation manifestée d'oxyde de fer libres sur ces sols. Ces oxydes peuvent être formés dans le profil, soit hors du profil et précipité à l'intérieur du profil sous la forme de noyaux ou de concrétions. Pour ce type de sol on distingue plusieurs sous-groupes qui sont :

- Sols tropicaux ferrugineux non différenciés
- Sols tropicaux ferrugineux sur roches cristallines acides
- Sols tropicaux ferrugineux sur roches riches en minéraux ferromagnésiens
- Sols tropicaux ferrugineux sur matériaux de départ sableux

### II.3.3 Les sols ferralitiques

Ces types de sol se forment généralement en zones tropicales humides ayant une pluviométrie supérieure 1500 mm et une température supérieure à 25° (avec peu ou pas de saison), en climat chaud. Dans ces zones on remarque des profils de sols latéritiques qui montrent de sérieuses hauteurs. Excepte le quartz, tous les minéraux primaires sont hydrolysés dans les conditions neutres. Une bonne partie de la silice restant se combine à l'aluminium pour former la kaolinite, mais généralement il y a un excès d'aluminium, qui forme de la gibbsite. Sur les horizons supérieurs des profils, il y a une acidification faible causée par la décomposition organique qui cause la dissolution et la mobilisation des oxydes de fer et d'aluminium. Ce processus décompose la kaolinite qui évolue vers la gibbsite. En fonction du pourcentage entre les oxydes de fer et d'aluminium, les sols ferralitiques peuvent être divisés en ferrites où les oxydes de fer dominant et qui se produit principalement sur les roches pauvres en aluminium, et en alites où l'oxyde d'aluminium (principalement la gibbsite) prédomine. Selon (Agence pour le développement international, 1964) Les différents types de sous-groupes de sols rencontrés dans ce type de sols sont :

- Les sols ferralitiques, de couleur essentiellement brune jaunâtre sur des sédiments plus ou moins argileux
- Les sols ferralitiques, de couleur essentiellement brune jaunâtre sur des sédiments non différenciés
- Les sols ferralitiques, de couleur rouge, sur des roches riches en minéraux ferromagnésiens
- Les sols ferralitiques, de couleur essentiellement brune jaunâtre sur des sédiments sables meubles

- Sols ferrallitiques avec des horizons sombres
- Sols ferrallitiques jaunes et rouges avec sur des matériaux de départ divers
- Les sols ferrallitiques humides
- Les sols ferrallitiques de couleur rouge non différenciée (Meïssa, 1993).

## II.4 DEGRADATION ROUTIERE

### II.4.1 Dégradation sur les routes non revêtues

La dénomination « routes non revêtues » concerne principalement les routes comportant une couche de roulement en matériaux sélectionnés, si le terrain s'y prête, et, plus rarement, elle concerne des routes présentant une couche de roulement en sol naturel.

On distingue trois (3) groupes de dégradation sur une route non revêtue à savoir : (les déformations, les arrachements et les usures de la couche de roulement en graveleux et des accotements.

#### II.4.1.1 Déformations

Parmi les déformations on distingue :

- Les flaches
- Les ornières
- Tôles ondulées
- Les déformations dans les virages

#### II.4.1.2 Arrachement

- Les arrachements avec frayées en « W » ;
- Le ravinement : Saignées ou ravines de plus ou moins grandes dimensions longitudinales ou transversales.

#### II.4.1.3 Le nids-de-poule

Le nids-de-poule est une petite cavité de forme arrondie à bords, crée à la surface de la couche de roulement par arrachements localisés des matériaux. Les nids-de-poule ont tendance à s'agrandir et à propager en chapelets.

#### II.4.1.4 Usure de la couche de roulement et des accotements

En ce qui concerne l'usure de la route on distingue :

- L'usure de la couche de roulement
- L'usure des accotements

## II.4.2 Dégradation sur les routes revêtues

On peut distinguer 5 groupes principaux de désordres dans une chaussée revêtue :

- Les déformations
- Les fissurations
- Les arrachements
- Les usures du revêtement

### II.4.2.1 Déformations

#### II.4.2.1.1 Affaissement

L'affaissement se caractérise par une dépression très prononcée et souvent assez étendue, se localisant soit en rive, soit en pleine largeur.

L'affaissement se caractérise par une dépression très prononcée et souvent assez étendue se localisant soit en rive, soit en pleine largeur.

#### II.4.2.1.2 Flache

Une flache est une dépression de forme arrondie provenant d'un affaissement localisé causé par un point faible de la chaussée. Une flache peut provenir d'une insuffisance en un point du corps de chaussée ou du sol support : perte drainage insuffisant ou tassement différentiel du matériau ayant servi à reboucher un nid-de-poule.

#### II.4.2.1.3 Bourrelet

Un bourrelet est un renflement apparaissant à la surface de la chaussée, accompagnant généralement un orniérage ou une autre déformation de chaussée. Il existe des bourrelets longitudinaux apparaissant le long de la route et d'autres qui sont transversaux à la route.

#### II.4.2.1.4 Orniérage

C'est une déformation permanente du profil en travers sur d'assez grandes longueurs. Cette dégradation peut apparaître quand les couches supérieures sont sous dimensionnés en regard du trafic et de la faible portance du sol. De même le Traffic joue un rôle par les charges à l'essieu et la canalisation des poids lourds dans une même en trace de la voie de circulation. Enfin les risques d'orniérage augmentent quand les couches de bases sont contaminées ou contiennent trop de fines.

On distingue :

- L'orniérage à petit rayon peut provenir d'un fluage de la couche de roulement (bitume trop mou, sur-compactage) ou de la stabilité insuffisante de l'enrobé. Ils apparaissent sous forme d'une double dénivellation dans les traces des roues des véhicules et intéressant la couche de roulement

- A grand rayon, apparaissant sous le passage des roues et intéressant l'ensemble du corps de chaussée. L'orniérage à grand rayon peut provenir d'un sous dimensionnement du corps de chaussée, d'une fatigue de la chaussée due à une circulation lourde et lente (côte), d'un défaut de compactage à la construction ou d'une perte de portance par présence d'eau dans les couches inférieures de la chaussée.

### II.4.2.2 Les fissurations

Les fissurations interviennent sur la couche de roulement et peuvent intéresser tout ou partie du corps de chaussée. Les fissures sont des cassures du revêtement suivant une ligne, avec ou sans rupture du corps de chaussée ; elles se présentent sous forme de fentes longitudinales ou transversales à l'axe de la chaussée. On distingue différents types de fissures :

#### II.4.2.2.1 Les fissures transversales

Les fissures transversales proviennent d'un retrait des couches traitées au liant hydraulique ou d'un retrait dû à une dessiccation des matériaux en rive. Ces fissures intéressent tout ou partie de la largeur du revêtement.

#### II.4.2.2.2 Les fissures longitudinales

Apparaissent suivant le long du tracé des véhicules, et proviennent des fatigues de la route.

#### II.4.2.2.3 Les faïençages

Les fissures forment des mailles, plus ou moins, produisent un faïençage de la surface de roulement. Le faïençage peut provenir d'une fatigue excessive de la chaussée due à un sous dimensionnement ou à une mauvaise qualité de l'ensemble du corps de chaussée, ou du manque d'imperméabilité de la couche de surface et de remontées d'eau dans le corps de chaussée très rapidement, le faïençage donne naissance à des arrachements, surtout si la couche de roulement bitumineuse est mince.

#### II.4.2.2.4 Epaufre

Une épaufrure est une cassure du revêtement en bord de la chaussée. Les épaufrures peuvent provenir d'une érosion régressive de l'accotement, du mauvais épaulement des rives, d'accotements en dénivellation par rapport à la surface de roulement, d'une chaussée trop étroite avec trafic sur l'accotement (route obstrué par le sable ou les nids de-poule importants) ou d'une stagnation d'eau en bord du revêtement provenant d'une pente insuffisante ou inversée de l'accotement. L'agrandissement de la zone épaufrée réduit localement la largeur de la chaussée et accélère la destruction de la partie restante du revêtement.

### II.4.2.3 Les arrachements

Ces désordres n'affectent généralement que la couche de roulement au début de leur apparition.

## II.4.2.3.1 Décollement

Un décollement est une rupture d'adhésion entre la couche de surface et le corps de chaussée.

## II.4.2.3.2 Désenrobage

Un désenrobage est la disparition du liant ou du mastic (liant + fines) enveloppant les granulats d'une couche de roulement.

## II.4.2.3.3 Plumage

Le plumage d'un revêtement comporte l'arrachement des gravillons à la partie supérieure d'une couche de roulement.

## II.4.2.3.4 Pelade

La pelade est le décollement de la couche de roulement par les plaques plus ou moins grandes.

## II.4.2.3.5 Nids de poule

Le nid-de-poule est une cavité arrondie, à bords francs, créée à la surface de la chaussée par enlèvement des matériaux.

## II.4.2.4 Remontées

Les remontées proviennent généralement des couches inférieures et affectent la couche de surface, à l'exception du ressuage qui se développe à partir de la couche de roulement.

### II.4.2.4.1 Remontées d'eau ou de boue

Les remontées se caractérisent par l'apparition à la surface du revêtement de venues d'eau ou de fines ou de boue qui percolent sous l'effet du trafic, à travers les défauts de la couche de roulement (fissures, faïençage, flaches).

### II.4.2.4.2 Ressuage

Le ressuage est une remontée du liant à la surface d'une couche de roulement (enduit) ou de mortier liant et fines (enrobés).

### II.4.2.4.3 Boursoufflure

Une boursoufflure est un surhaussement du revêtement formant une aspérité sur la surface de roulement avec souvent des fissures et un décollement de la couche de surface.

Les causes de boursoufflures peuvent provenir d'une fondation argileuse ou de nappes de sols salins (zone de chotts ou de sebkas) qui se gonflent lorsque la teneur en eau augmente et qui remontent dans la chaussée en la déformant.

## II.4.2.5 Usure de la surface de roulement

En dehors des dégradations dues à la fatigue de corps de chaussée qui pourraient agir sur le revêtement, l'usure de la couche de roulement se distingue de la façon suivante :

### II.4.2.5.1 Glaçage du revêtement

Le glaçage est l'usure du revêtement par arasement progressif des gravillons. Le glaçage provient d'un granulat trop polissable ou d'une usure très avancée du revêtement.

### II.4.2.5.2 Têtes-de-chat

Les têtes de chat proviennent de la disparition partielle des matériaux de surface non par arrachement mais par usure, permettant la saillie au niveau de la couche de surface, des pierres ou cailloux de la couche de base.

## II.4.3 Dégradation des dépendances communes a toutes les routes

Ces dégradations sont communes au routes revêtues et routes en terre :

### II.4.3.1 L'envahissement par la végétation

La végétation est un phénomène naturel qui diminue considérablement la visibilité et, par conséquent, la sécurité, en particulier dans les virages.

### II.4.3.2 Les érosions des talus de remblai

Cette érosion est la conséquence du ruissellement des eaux de pluie recueillies sur la surface des talus et provenant de la plate-forme.

### II.4.3.3 Les éboulements de talus de déblais

L'origine de cette dégradation est une pente forte avec un sol peu cohésif le mauvais drainage des terrains supérieurs, et l'existence des nappes suspendues ou intercalées (Salomon, 2017).

## III. STABILISATION EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE

Le traitement des sols a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir, sans préparation, à supporter une route. Ainsi, il permet de valoriser les matériaux aux caractéristiques inadaptées et non utilisables à l'état naturel tels que limons, argiles, sables, marnes, matériaux évolutifs, etc. Le procédé a pour finalité :

- Améliorer l'aptitude d'un matériau au compactage ;
- Diminuer la sensibilité au gel et à l'eau ;
- Augmenter la résistance mécanique et la portance (augmentation du frottement interne et de la cohésion).

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

Cependant notre étude se limite à la stabilisation chimique plus précisément l'amélioration au ciment des deux premières couches de notre profil latéritique.

## III.1 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique permet, grâce à la réaction du produit avec les composantes du matériau, une augmentation de la cohésion du matériau. Elle consiste à incorporer au sol les liants hydrauliques routiers ou liants hydrocarbonés. Il s'agit dans tous les cas d'augmenter la cohésion des matériaux en utilisant une réaction chimique provoquée par l'eau et les matériaux eux-mêmes (Massamba, 2013).

### III.1.1 Traitement aux liants hydrauliques

Les liants hydrauliques sont des poudres fines constituées de sels minéraux anhydres réactifs en présence d'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.

#### III.1.1.1 Traitement au ciment

Le ciment est utilisé dans le but d'obtenir un développement rapide et durable des résistances mécaniques et des stabilités à l'eau et au gel. Les réactions du ciment avec un sol consistent essentiellement en une hydratation des silicates et aluminates de calcium anhydres, avec passage par la phase soluté suivie de la cristallisation des produits hydratés : c'est la prise hydraulique.

La stabilisation des sols au ciment trouve son application tant pour les couches de surfaces que pour la zone supérieure de la couche de fondation ou de la sous couche de fondation ou de la sous couche de routes et chemins de toute nature.

#### III.1.1.2 Traitement à la chaux

En techniques routières, la chaux est utilisée comme stabilisant ou pour rendre compactable les sols fins trop humides. Les avantages du traitement à la chaux sont multiples : valorisation des matériaux médiocres, meilleure gestion des ressources naturelles, réduction du trafic poids lourds, réduction des immobilisations pour intempéries, diminution de la durée des travaux, et surtout réduction du coût des travaux.

## III.1.1.3 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.

### III.1.1.4 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 ( $< 200 \mu\text{m}$ ) 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.

### III.1.1.5 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.

## III.1.2 Stabilisation 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 (Isis, 2012).

### III.1.2.1 Traitement aux produits chimiques

Certains produits chimiques à base de chlorure 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

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

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 (Maliki, 2018).

## III.1.2.2 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 immédiat du sol amène celui-ci à un état optimal pour la stabilisation au ciment (Maliki, 2018).

## IV. MATERIELS ET METHODES

### IV.1 LOCALISATION DE LA CARRIERE LATERITIQUE DE KAMBOINSIN

Le profil latéritique faisant l'objet de notre étude se trouve à Ouagadougou plus précisément à kamboinsé. Notre emprunt latéritique est connu sous le nom de Saamtanga est localisé à une altitude de 301m, à une latitude de 12° 29' 23,71'' N et d'une longitude de 1° 32'59,35'' Ouest.

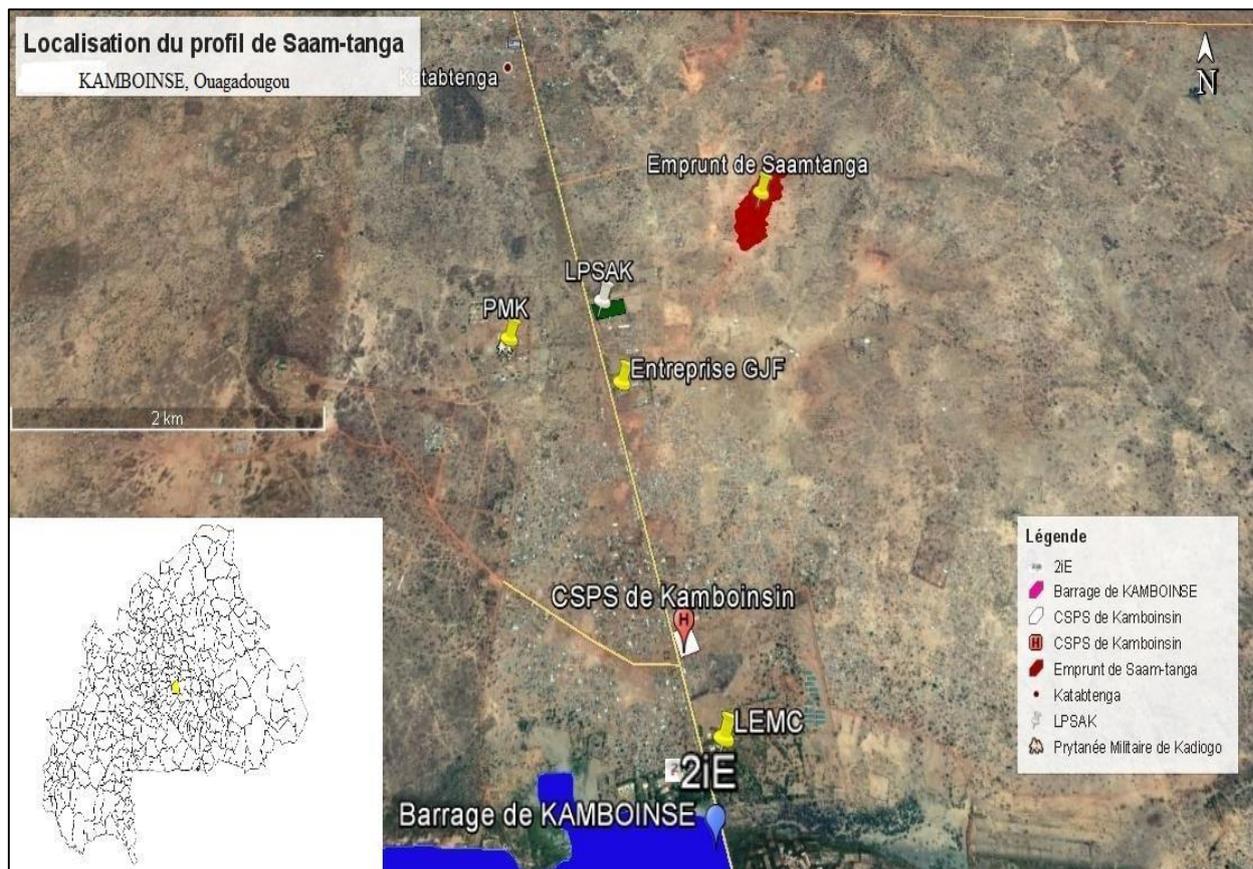


Figure 1: Localisation géographique du profil étudié

## IV.2 DESCRIPTION DES COUCHES LATERIQUES DE NOTRE PROFIL

### IV.2.1 Description du profil

La description d'un sol dans le milieu géologique et géotechnique, est prépondérante et est d'une grande importance dans les travaux d'étude et de réalisation. C'est ainsi que dans le souci de mieux régler celles-ci plusieurs documents sont disponibles dans la bibliographie. Pour ce qui est de notre étude, la norme **XP P 94-011** et l'ouvrage de (MAIGNIEN, Manuel de prospection pédologique, 1969) était le fil conducteur de notre prospection.

Cette norme définit la description d'un sol comme une opération consistant à traduire les caractéristiques qualitatives apparentes d'un sol à partir de son aspect visuel de son odeur, de l'impression ressentie au toucher. (Salomon, 2017).

Une observation comparative à la revue bibliographique nous permet de faire un certain nombre d'hypothèse sur notre profil. En effet la pluviométrie annuelle moyenne dans la zone soudano-sahélienne du BF est comprise entre 600 et 900mm. Cette pluviométrie est inférieure à la limite caractéristique de 1000mm. Nous concluons que notre profil est certainement de la famille des latérites fersialitiques. L'observation du profil nous renseigne de la présence des plans de schistosité sur la couche C2. Cela nous permet d'émettre l'hypothèse selon laquelle la roche mère de notre profil correspondrait probablement à la roche du 3ème type rencontré dans l'Ouest : Les schistes sédimentaires(Bs) ou métamorphique (Bsi).

Enfin il est à retenir que quatre strates latéritiques ont été identifiées afin d'observer les variations des paramètres géotechniques et mécaniques à travers ces couches. Nous avons pu effectuer des essais sommaire d'identification sur les lieux de l'emprunt latéritique. Les résultats des essais qui ont pu être faits sont consignés dans le tableau ci-dessous.

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau I: Description sommaire du profil de Sam-tanga

Couches	Profondeur en (m)	Aspect d'ensemble de l'agglomération	Aspect de particules
Couche C0	0,23	Friable Présence d'odeur couleur noirâtre	Forme irrégulière Etat de surface rugueux Arrêtes arrondies Couleur noire
Couche C1	0,90	Non friable Sans odeur Couleur rouge brun	Forme irrégulière Etat de surface rugueux Arrêtes arrondies Couleur rouge brun
Couche C2	1,90	Non friable Sans d'odeur Couleur rouge brun avec présence de nodule blanc	Forme irrégulière Etat de surface rugueux Arrêtes anguleuses Couleur brun
Couche C3	2,35	Friable Sans odeur Couleur rouge violacé tachetée de blanc	Forme irrégulière Etat de surface lisse Arrêtes arrondies Couleur rouge ocre
Couche C4	2,90	Friable Sans odeur Couleur rouge violacée tacheté fortement de blanc	Forme irrégulière Etat de surface lisse Arrêtes arrondies Couleur roue ocre

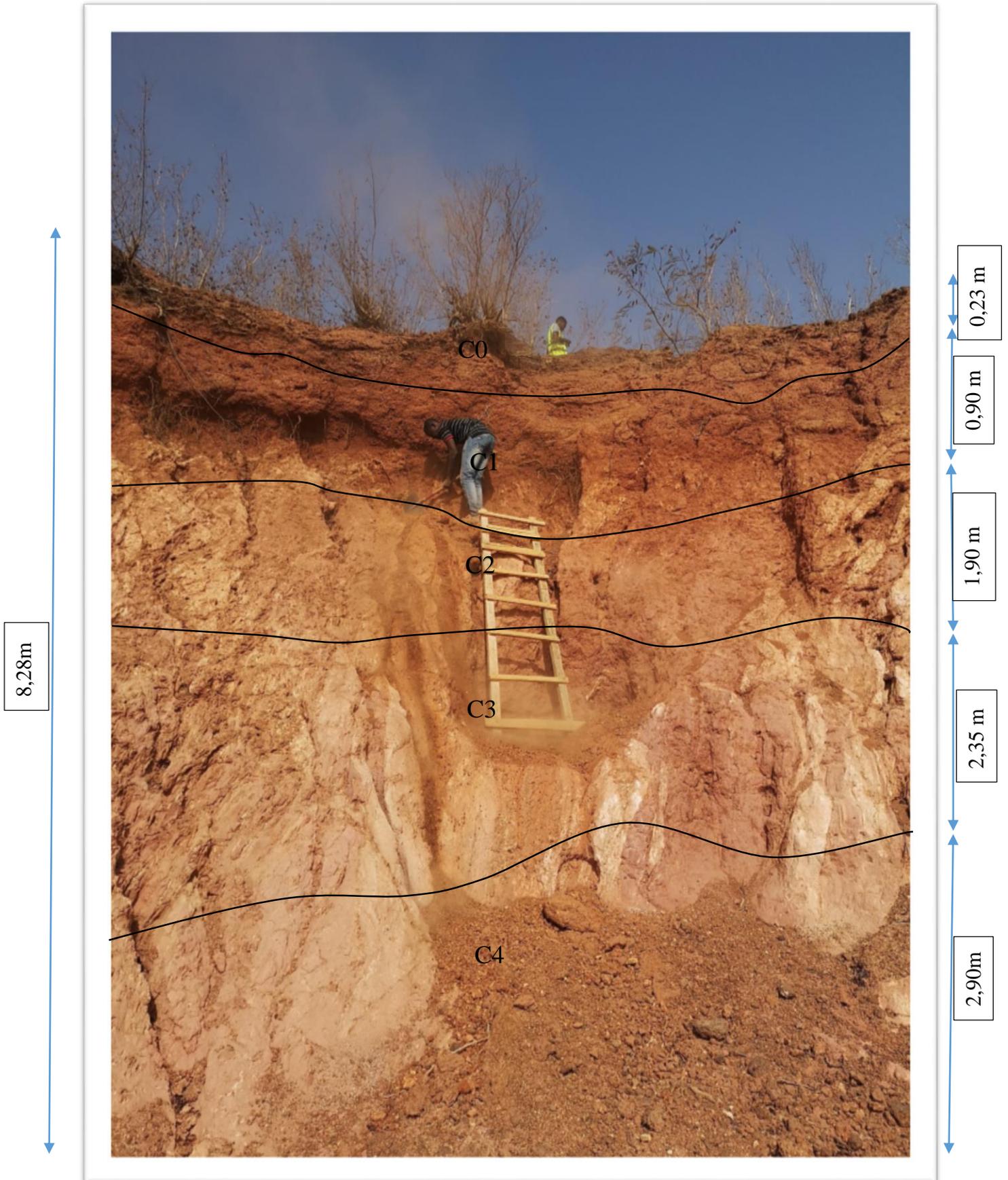


Figure 2: Identification de l'emprunt et de ses couches stratigraphiques

ALIO BOZARI

## IV.2.2 Description sommaire des sols des différentes couches de notre profil

Les matériaux de nos différentes couches étant remaniés nous proposons ainsi une description des sols hors profil.

- Couche 1 : Les matériaux de cette couche sont des gros grains avec comme diamètre maximale égale à 25mm. On remarque aussi que la granulométrie est étalée. Le matériau est un peu sombre avec la présence de quelques racines de plantes. Le sol est dur car le matériau est difficilement cassable à la main.



Figure 3: Matériau provenant de la couche 1

- Couche 2 : Il n'y a pas assez de fines et surtout pas de présence de mottes de terre. La majorité des particules semble être supérieure à 2mm. On remarque la présence de nodules issus d'une altération des feldspaths dans le matériau. Les grains du matériau sont facilement rayés à l'ongle : le sol est friable.



Figure 4: Matériau provenant de la couche 2

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

- Couche 3 : Faible présence des matières organiques et le matériau est de couleur vive. A l'écrasement d'un matériau séché, on remarque une résistance faible. Quant à l'agitation à la main, pour faire une boule, la surface devient brillante mais lentement : il s'agit d'un limon. Le matériau peut être pétri par une légère pression des doigts : le matériau est plastique.



Figure 5: Matériau provenant de la couche 3

- Couche 4 : Les particules de cette couche sont fines. Le matériau est de couleur vive et il n'y a une faible présence des matières organiques. A l'écrasement d'un matériau séché, on remarque une résistance faible. Lorsqu'on l'agite à la main, pour faire une boule, la surface devient brillante mais lentement : il s'agit d'un limon. Le matériau peut être pétri par une légère pression des doigts : le matériau est plastique.



Figure 6: Matériau provenant de la couche 4

## IV.3 DESCRIPTION DES ESSAIS

### IV.3.1 Essai d'identification des paramètres d'un sol

#### IV.3.1.1 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique est un essai qui consiste à déterminer les proportions granulaires d'un matériau. Pour se faire deux essais doivent être réalisés à savoir l'analyse granulométrique par tamisage et l'analyse granulométrique par sédimentation. Par manque de densimètre, seul l'analyse granulométrique par tamisage est effectuée dans notre cas.

- Analyse granulométrique par tamisage

L'analyse granulométrique par tamisage est un procédé par lequel on détermine la proportion de différents constituants solides d'un matériau grenu en fonction de leur grosseur à l'aide de tamis emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Les pourcentages des refus et/ou passants ainsi obtenus sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique qui donne un certain nombre d'indicateurs permettant de caractériser la distribution granulométrique du matériau. La préparation de l'échantillon et le tamisage est fait selon le mode opératoire **NF P 18-560** (Robitaille, 1997).

#### IV.3.1.2 Limites d'Atterberg

##### IV.3.1.2.1 Limite de liquidité

La limite de liquidité (W<sub>l</sub>) est la teneur en eau du sol au passage de l'état plastique à l'état liquide visqueux. Le sol atteint la limite de liquidité lorsque la coupelle de Casagrande tombant d'une hauteur de 10 mm, doit frapper la base 25 fois pour refermer, sur une distance de 13 mm, une rainure qui a été pratiquée dans l'échantillon de sol qu'elle contient. L'essai se fait sur la fraction 0/0.4mm d'un échantillon représentatif de sol totalement remanié. La préparation de l'échantillon et l'exécution de l'essai se fait selon le mode opératoire **NF P 94-051**.

##### IV.3.1.2.2 Limite de plasticité

La limite de plasticité (W<sub>p</sub>) est la teneur en eau du sol au passage de l'état semi solide à l'état plastique (flexible). Le sol atteint la limite de plasticité lorsqu'un rouleau de terre d'environ 3mm de diamètre par 15 à 20 cm de long commence à se fissurer lorsqu'on le soulève de 15 à 20mm. L'essai se fait sur la fraction 0/0.4mm d'un échantillon représentatif de sol totalement remanié. La préparation de l'échantillon et l'exécution de l'essai se fait selon le mode opératoire **NF P 94-051** (Mahamat, 2010).

## IV.3.1.3 Teneur en eau initiale

La teneur eau initiale d'un sol est le rapport entre la masse de l'eau et la masse des grains solides contenu dans un volume de sol. Une quantité représentative du matériau est pesé puis sécher à l'étuve ; après étuvage le matériau est encore pesé pour enfin déterminer sa teneur en eau initiale. L'essai est réalisé suivant les prescriptions de la norme **NFP94-050** (Issiakou, 2015).

## IV.3.1.4 Poids spécifique

Le poids spécifique est un bon indicateur pour l'identification et l'évaluation des roches latéritiques.

L'essai du poids spécifique nous permet de soustraire le volume des vides du volume total du matériau. Cela nous permet d'obtenir le poids spécifique des grains du matériau. Cet essai est fait à l'aide du pycnomètre à air. Le matériau étant saturé nous permet de chasser le vide qui s'y trouve et nous estimons le volume des grains du matériau uniquement (Bohi, 2008). Cet essai a été réalisé selon les prescriptions de la norme **EN 1097-7**.

## IV.3.1.5 Bleu de Méthylène

L'essai consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau. Cette quantité est rapportée par proportionnalité directe à la fraction 0 à 5mm de nos différents matériaux. La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol. L'absorption de la solution du bleu par le matériau nous permet de déterminer à quel point le matériau est argileux. Cet essai est réalisé suivant les prescriptions des normes **NF P94-068** et **NF P 11-300** et **GTR**.

## IV.3.1.6 Essai Proctor Modifié

Cet essai a été fait suivant les recommandations de la norme **NF P 94-093**. Le but est les conditions de compactage fixées pour une meilleure compacité d'un sol déterminé. Le principe de ces essais consiste à humidifier un matériau à plusieurs teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau. Ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor modifié suivant l'essai réalisé.

## IV.3.2 Essais d'identification des paramètres mécaniques des sols

### IV.3.2.1 CBR par immersion

Le CBR (California bearing ratio) est réalisé pour mesurer la résistance au poinçonnement d'un matériau compacté à la teneur en eau optimale obtenue au cours de l'essai Proctor modifié.

#### IV.3.2.1.2 Principe du gonflement

L'objectif visé à travers l'essai CBR par immersion est de mettre le matériau dans les plus mauvaises conditions hygrométriques qu'il est susceptible de rencontrer dans la pratique. Le matériau est compacté avec une énergie de compactage variant de 10 coups, 25 coups et 55 coups par couche pour 5 couches.

La valeur du gonflement est prélevée après les quatre (4) jours d'imbibition.

#### IV.3.2.1.3 Principe du poinçonnement

Une presse munie d'un piston de poinçonnement de diamètre 4,96 cm (section 19,3 cm<sup>2</sup>) est utilisée pour poinçonner le matériau compacté et imbiber pendant 96 heures. Cette presse est pourvue d'un comparateur permettant de suivre les enfoncements au 1/100<sup>ième</sup> de mm près et d'un autre identique qui nous permet d'obtenir la force suite à une conversion à l'aide d'un catalogue. La valeur du CBR est obtenue en traçant la courbe force en fonction des enfoncements ; on projète les valeurs des enfoncements à 2,5mm et 5mm pour déterminer la valeur des forces correspondantes.

Ces deux essais ci-dessus sont complémentaires et sont faits respectivement sur le même matériau (l'enfoncement après l'immersion). Ces essais ont été effectués selon les prescriptions de la norme **NF P 94-078** (Nganansou, 2011).

### IV.3.2.2 Essai œdométrique

L'essai s'effectue sur une éprouvette de matériau placée dans une enceinte cylindrique appelée (œdomètre). Un dispositif permet d'appliquer sur l'éprouvette un effort axial vertical. L'éprouvette est saturée et maintenue en imbibition non drainée au cours de l'essai. Nous avons effectué ces essais sur les différentes couches remaniées de notre profil latéritique.

Dans notre cas le matériau a été compacté sur une énergie de compactage PROCTOR modifié, nous avons par la suite enfoncé l'anneau dans ce sol compacté et taillé selon les mesures de l'anneau. Cet essai est réalisé selon les prescriptions de la norme **XP P 94-090-1**. Le tassement des sols cohérents est un tassement à long terme. C'est pour mieux appréhender les tassements

effectifs de ces sols que l'essai de consolidation œdométrique est effectué dans le cadre de notre étude (Salomon, 2017).

### IV.3.2.3 Essai de compression uniaxiale

Cet essai nous a permis de déterminer la valeur du module de Young. L'essai s'effectue sur une éprouvette placée entre les deux plateaux parallèles d'une presse. L'essai consiste à imposer une vitesse constante de déformation longitudinale et à mesurer la force axiale appliquée à l'éprouvette.

Pour ce faire, des capteurs de déplacements ont été placés tout autour de l'éprouvette via des anneaux cylindriques adaptés au diamètre de notre éprouvette. Bien que la presse utilisée nous donne la force en fonction du déplacement, des capteurs de type LVDT ont été placés autour de l'éprouvette pour écarter les déplacements parasites issus des vibrations de la presse afin de considérer uniquement que les déplacements du tiers central de l'échantillon. Dans le but d'effectuer des essais mécaniques sur les graveleux latéritiques étudiés, les éprouvettes ont été réalisées dans les mêmes conditions de compactage que l'essai Proctor à 95% de l'OPM qui correspond à l'énergie de compactage spécifiée par les couches de bases latéritiques ( $2464 \text{ KJ/m}^3$ ).

Le compactage est effectué avec la dame Proctor Modifié en effectuant une conversion au niveau des énergies de compactage. Ce qui correspond à un compactage de 8 couches en 57 coups chacune sur les éprouvettes de 16/32 cm. L'essai est réalisé avec une vitesse constante de pression de 1,27 mm/mn.

**V. RESULTATS ET DISCUSSIONS**

**V.1 Paramètres d'état et de nature**

**V.1.1 Limites d'Atterberg**

Les résultats des limites des différentes couches de notre profil latéritique sont consignés sur la figure ci-dessous.

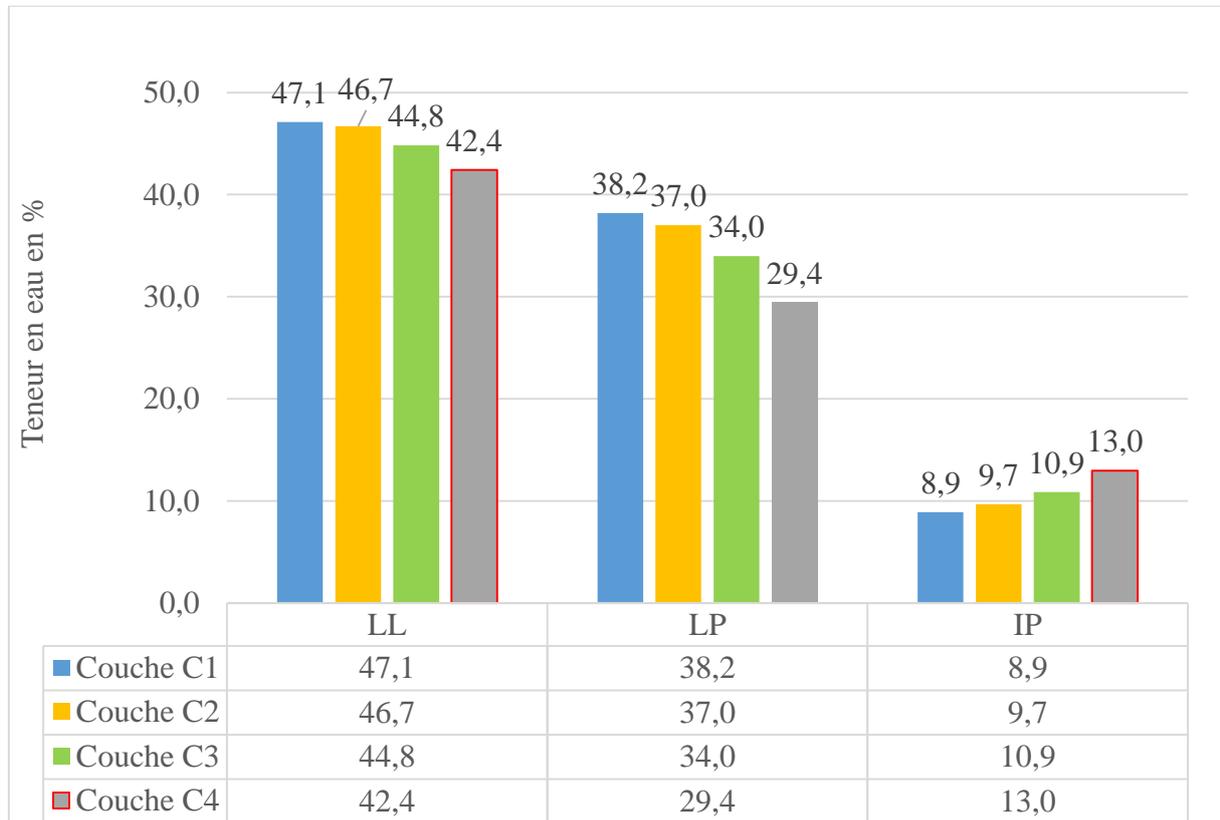


Figure 7: récapitulatif des limites des couches étudiées

Selon les prescriptions de la classification GTR, les sols C1, C2 et C3 sont toutes considérées comme des sols faiblement argileux car leur indice de plasticité est inférieur à 12 ( $IP < 12$ ). L'indice de plasticité va grandissant en fonction de la profondeur du profil. Ces trois couches peuvent être adaptées pour une construction routière car plus le sol possède un IP plus élevé, moins il est adapté pour l'usage routier.

Par ailleurs, la couche C4 qui est la plus fine est considérée comme un sol moyennement argileux selon la Classification GTR car indice de plasticité (13) est inférieur à 25 ( $IP < 25$ ).

Les résultats des limites des deux premières couches de notre profil amélioré au ciment sont consignés dans le tableau ci-dessous.

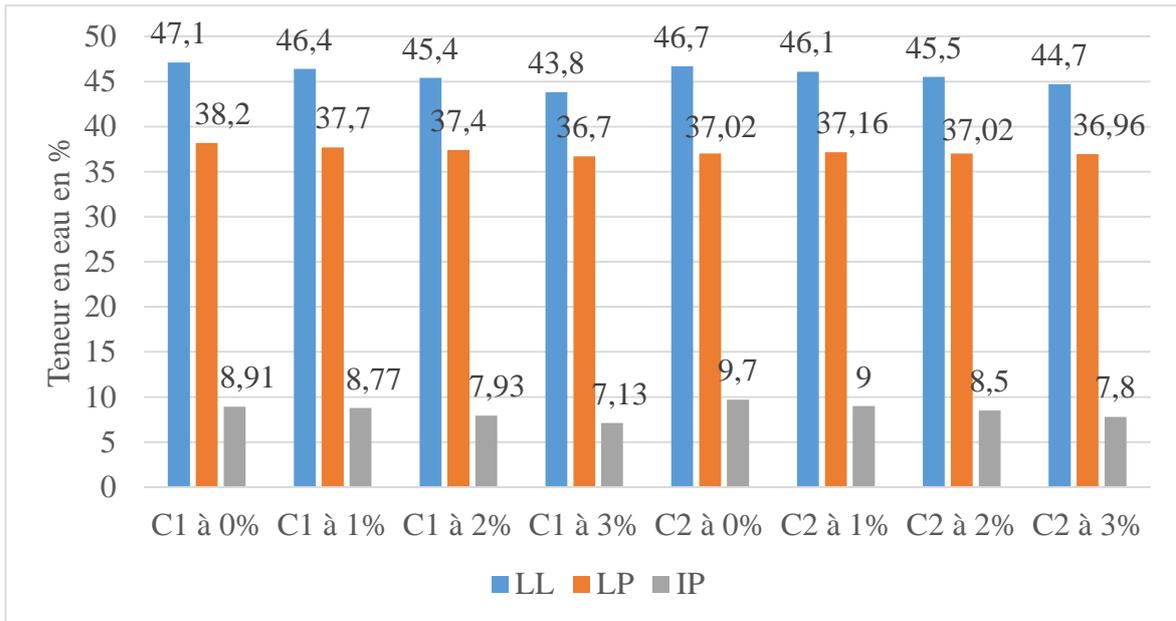


Figure 8: récapitulatif des limites des couches étudiées à l'état amélioré

Nous remarquons que pour les deux premières couches améliorées au ciment les indices de plasticité diminuent progressivement en fonction du taux de ciment dosé. Elles ont en plus de cela des IP inférieures à 12 donc peuvent être utilisées en construction routière. Ces deux couches à l'état crue sont déjà utilisables en construction routière, avec l'apport du ciment ces couches deviennent encore meilleures car leur IP a baissé due la rigidité qu'apporte le ciment sur un matériau.

Cette diminution de l'indice de plasticité en fonction du taux de dosage en ciment est aussi due au fait que le ciment inhibe l'activité argileuse au sein du matériau.

V.1.2 Bleu de méthylène

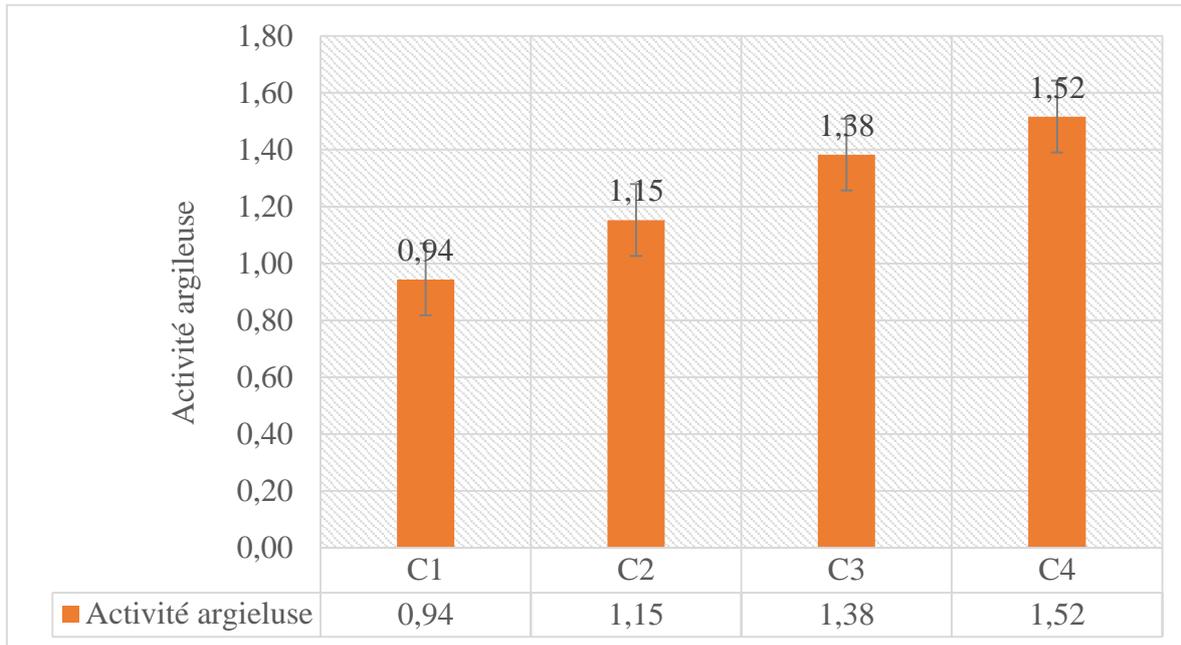


Figure 9: Résultats de l'essai du bleu de méthylène des couches étudiées

Selon la figure ci-dessus, les résultats des valeurs bleues des sols étudiés nous renseignent que l'activité argileuse des sols augmente pendant que nous allons en profondeur de notre profil (de la couche 1 vers la couche 4). Cela peut s'expliquer par le fait que plus on part en profondeur, plus il y'a une quantité importante des particules fines. Cette augmentation des fines influence de manière conséquente l'activité argileuse.

Selon la classification GTR, toutes les couches latéritiques de notre profil sont sensibles à l'eau car leurs activités argileuses sont toutes supérieures à 0,2. Elles sont également toutes reconnues comme des sols limoneux car ( $0,2 < VBS < 2,5$ ).

## V.1.3 Analyse granulométrique

Les courbes granulométriques des couches de notre profil sont tracées sur la figure ci-dessous.

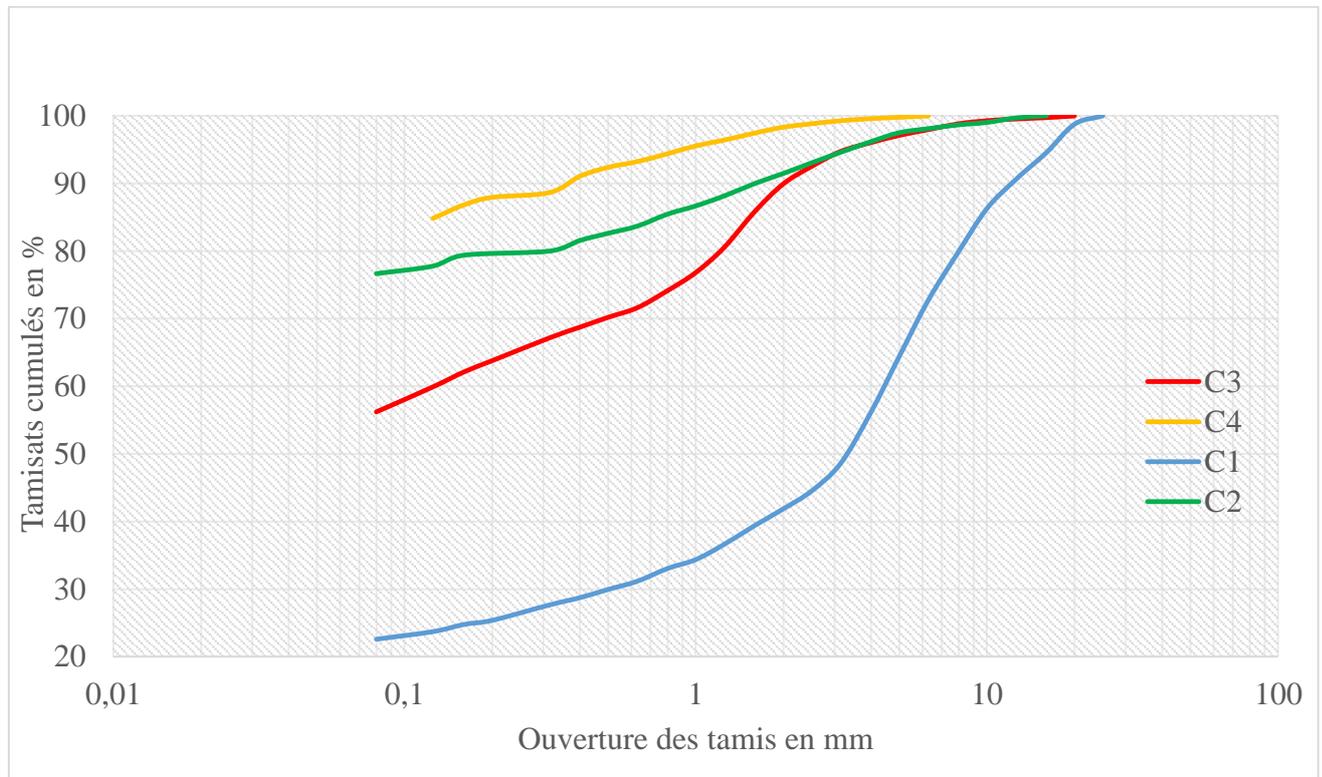


Figure 10 : Courbes granulométriques par voie sèche des différentes couches étudiées

### V.1.3.1 Classification des sols de nos différentes couches suivant AASHTO et GTR

Le système AASHTO classe les sols en huit (8) groupes de A1 à A8 et inclut plusieurs sous-groupes. Les essais nécessaires pour cette classification sont l'analyse granulométrique et les limites d'Atterberg.

On remarque que les deux (2) premières couches C1 et C2 sont chacune de classe A-2 et sous de sous classe A-2-5 ; nous concluons que les matériaux issus de ces deux couches sont de type graviers et sable limoneux ou argileux.

Pour ce qui est des deux dernières couches à savoir les couches C3 et C4, elles sont aussi de classe A-2 avec chacune une sous classe A-2-7. Cela nous permet de dire que ces dernières sont issues d'un matériau type gravier et sable limoneux ou argileux.

En ce qui concerne la classification GTR, toutes les couches de notre profil latéritique ont des diamètres inférieurs à 50 mm et ayant chacune un pourcentage des passants au tamis 80  $\mu$ m inférieur ou égal à 35%.

Nous déduisons suite à cela que toutes nos couches sont de classe B et de sous classe B1 à B6 selon VBS ou  $I_p$  et tamisât.

## V.1.3.2 Projection des quatre couches latéritiques dans le fuseau granulométrique des couches de chaussée (CEBTP)

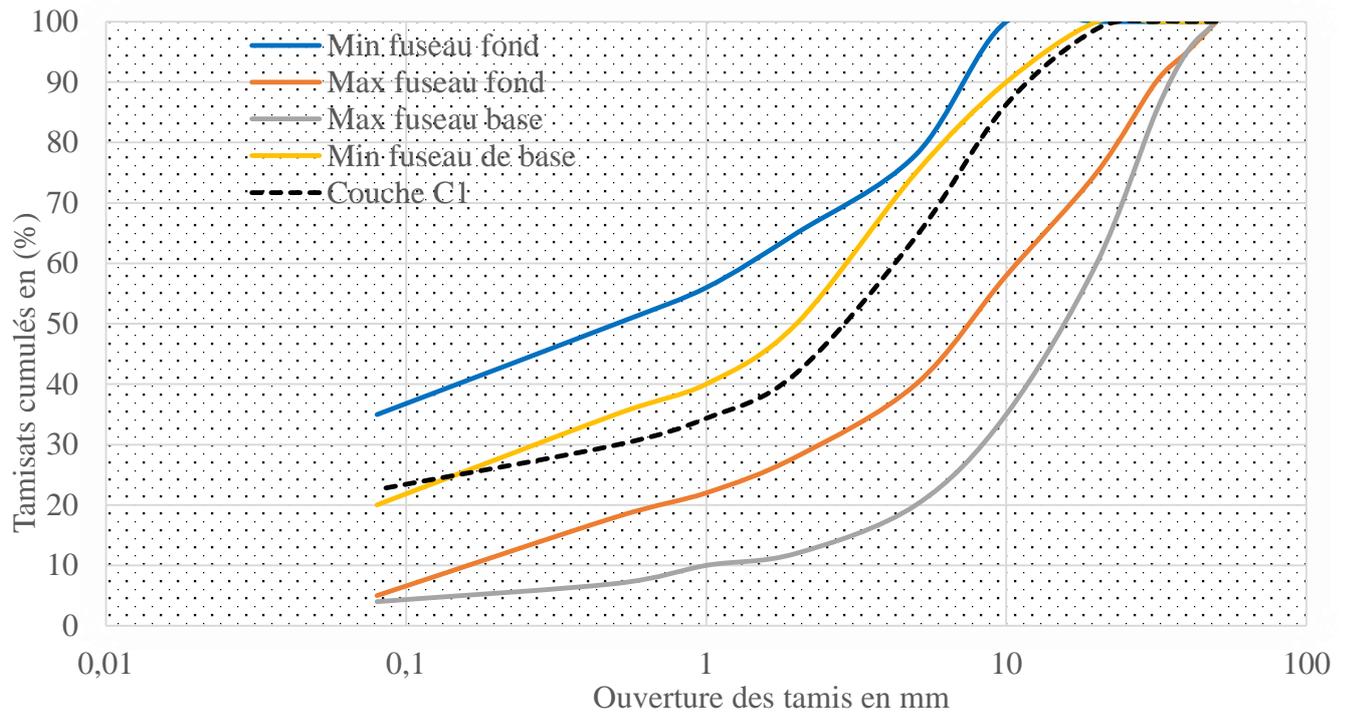


Figure 11: Projection de la couche 1 dans le fuseau de base et de fondation

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

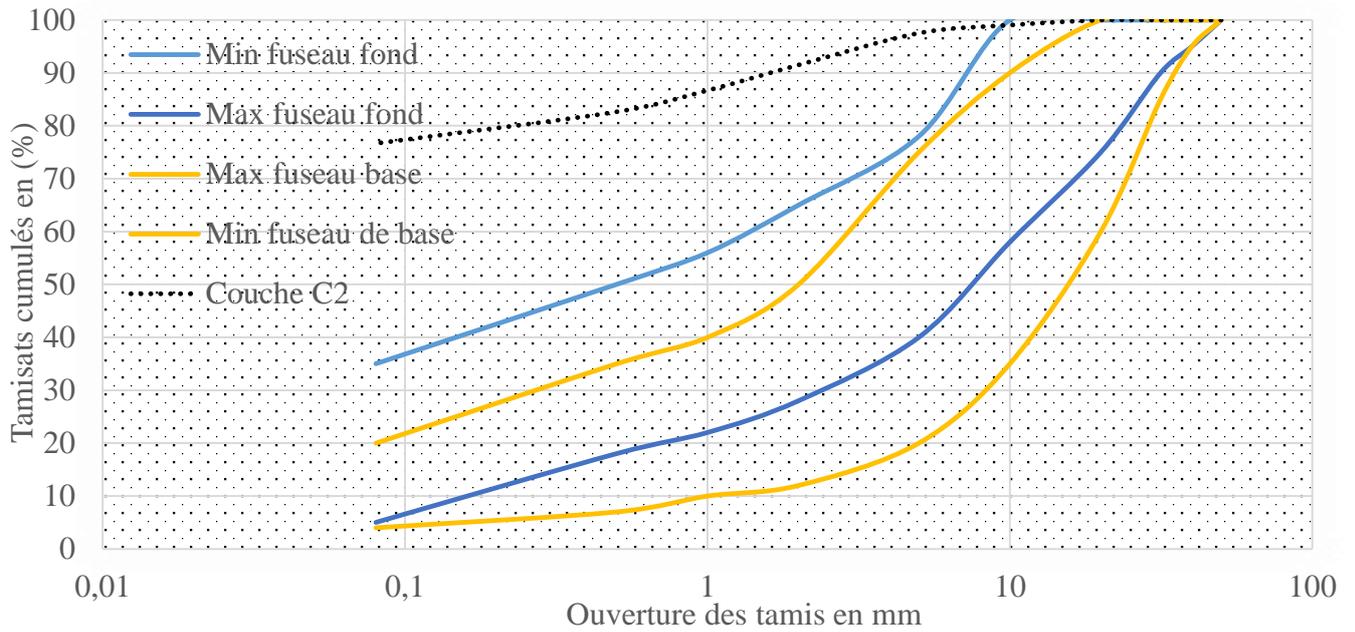


Figure 12: Projection de la couche 2 dans le fuseau de base et de fondation

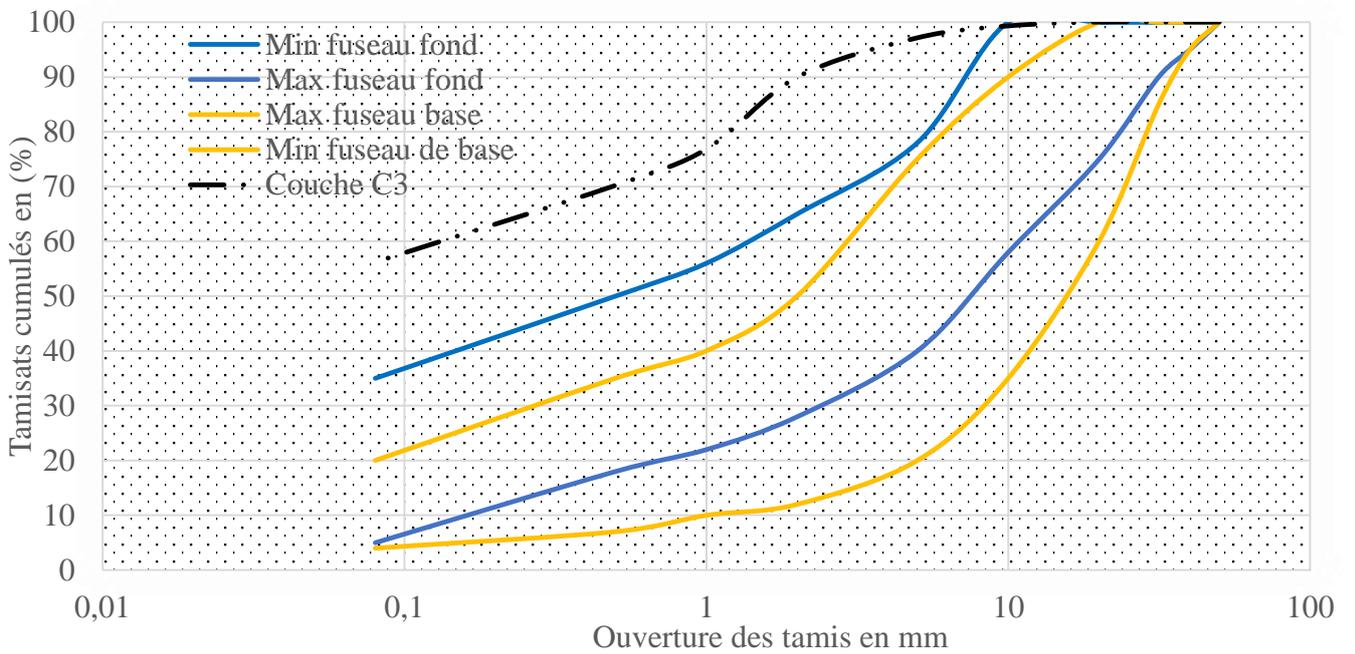


Figure 13: Projection de la couche 3 dans le fuseau de base et de fondation

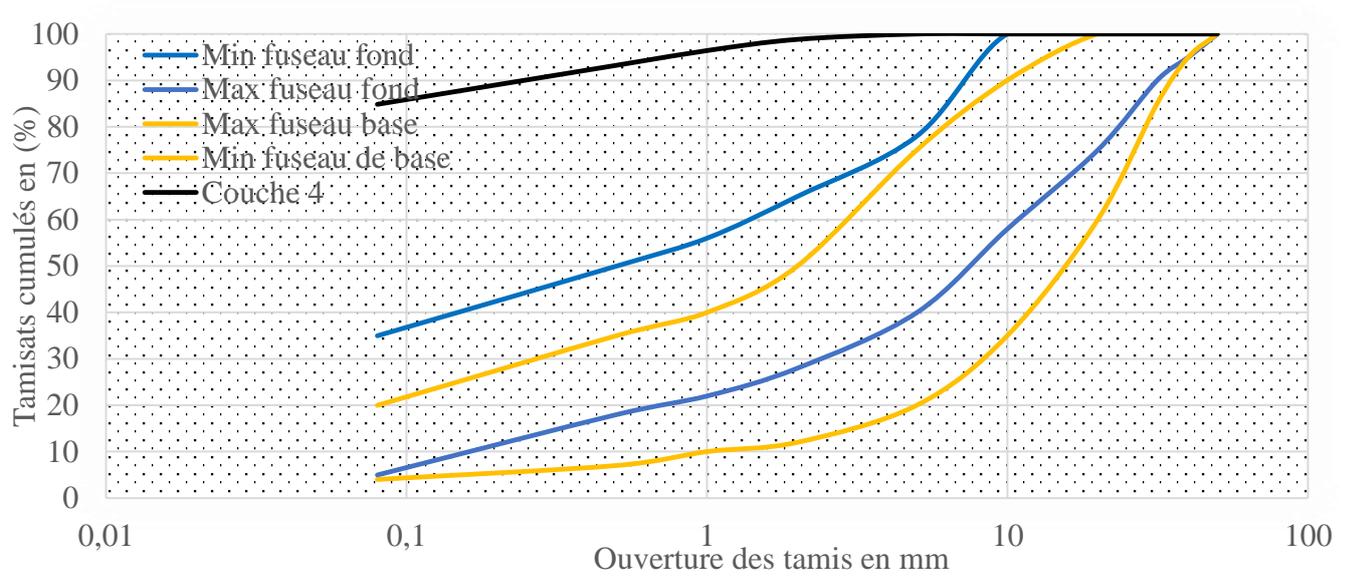


Figure 14: Projection de la couche 4 dans le fuseau de base et de fondation

Une observation des résultats du tamisage projeté dans les fuseaux de couche de base et de fondation, nous laisse voir que seule la couche C1 présente des possibilités d'utilisation en couche de fondation et en couche de base. Les couches C2, C3 et C4 sont dans les limites du fuseau de la couche de fondation.

#### V.1.4 Poids spécifique

Pour chaque couche le poids spécifique est déterminé à partir d'un échantillon, d'une quantité d'eau supérieure ou égale à les 300 ml et trois valeurs de pression lues sur le pycnomètre à air.

Les résultats du poids spécifique des différentes couches sont consignés sur la figure ci-dessous.

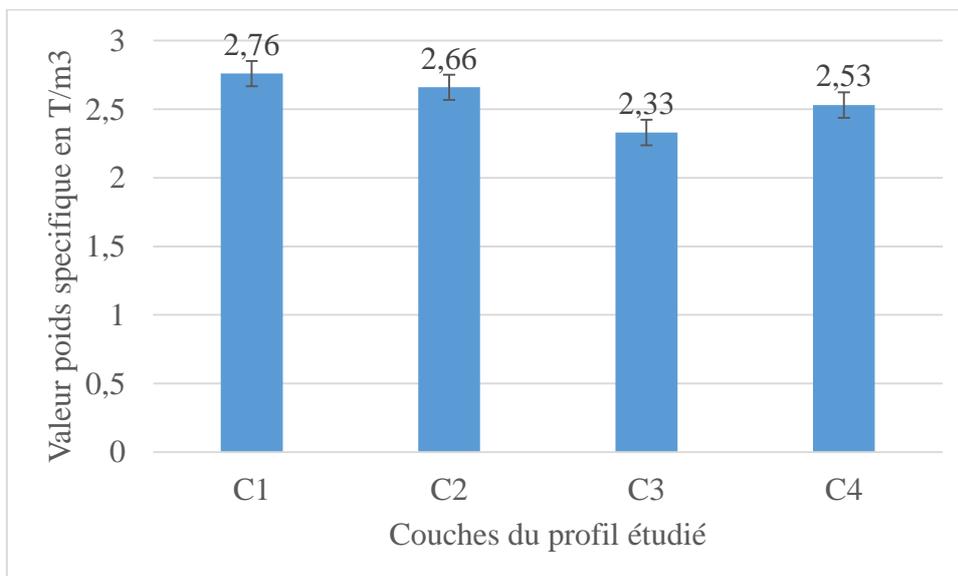


Figure 15: Résultats des poids spécifiques des quatre couches de notre profil

Pour ce qui est du poids spécifique, on remarque que ces valeurs semblent décroître en fonction de la profondeur. Le poids spécifique des sols latéritiques varie entre 2,5 et 3,6t/m<sup>3</sup> en fonction de la composition chimique. Il diminue avec le pourcentage d'aluminium et augmente avec la teneur en fer (Mahamat, 2010). A l'exception de la couche 3 toutes les couches latéritiques étudiées dans notre cas sont dans la plage du poids spécifique de la latérite. Cela nous permet de dire que la couche 3 contient une quantité importante d'aluminium et une faible teneur en fer.

### V.1.5 Teneur en eau initiale des différentes couches

La teneur en eau initiale s'obtient en faisant le rapport de la masse d'eau sur la masse sèche. Celle-ci est calculée dès les premiers jours de l'échantillonnage.

$$Wi = \frac{M_h - M_s}{M_h}$$

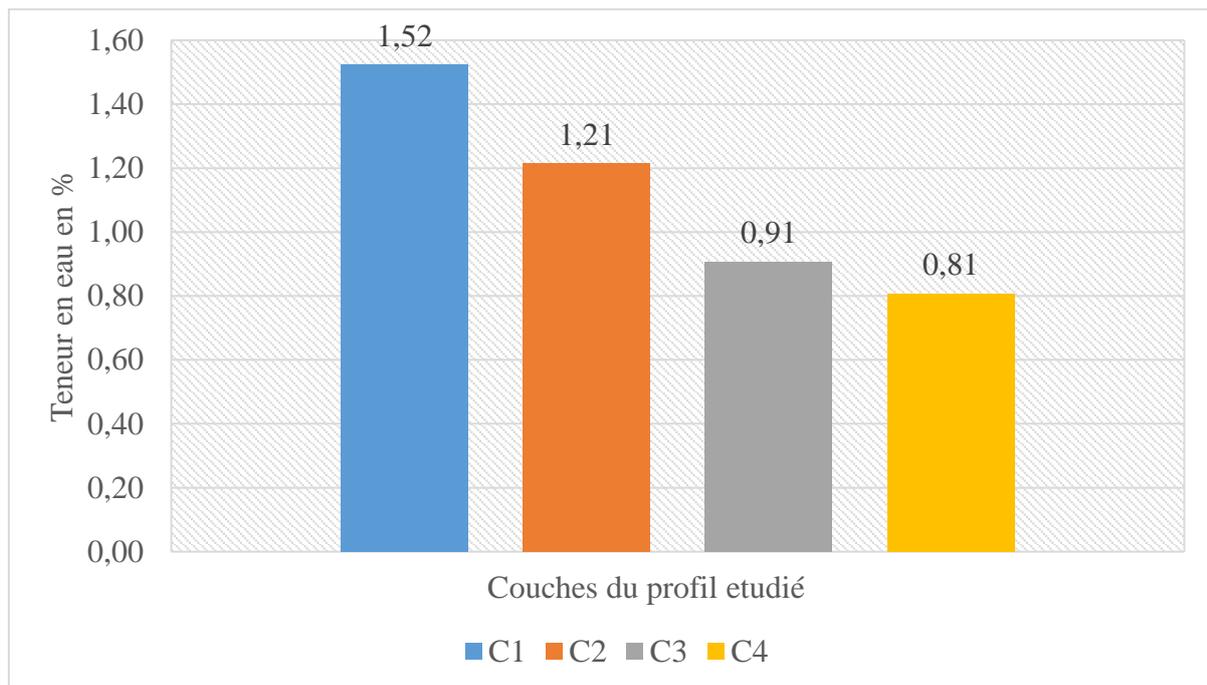


Figure 16: Teneur en eau initiale des différentes couches du profil

La teneur en eau initiale ainsi calculée semble diminuer en fonction de la profondeur. En effet l'épaisseur des couches de notre profil latéritique évolue d'une manière croissante en fonction de la profondeur ; les couches C1, C2, C3 et C4 ont des épaisseurs respectivement égales à 0,9 m ; 1,90 m ; 2,35 m et 2,90 m. Cette décroissance des teneurs en eau en fonction de la profondeur peut s'expliquer par le fait que les premières couches sont celles qui sont contact

avec les premières gouttes de pluie, en d'autre terme elles sont témoin de la majorité de ruissellement des eaux de pluie.

## V.2 Caractéristiques des paramètres mécaniques

### V.2.1 Proctor Modifié

L'essai Proctor nous permet d'obtenir la densité humide et par la même occasion la densité sèche. Le principe de l'essai consiste par une méthode de tâtonnement de trouver la teneur en eau optimale qui nous donne la meilleure compacité du matériau sur une énergie de compactage donnée.

La teneur en eau se calcule de la même manière que la teneur en eau initiale. La densité sèche se calcule en faisant le rapport entre la masse du matériau sur le volume du moule utilisé.

$$\gamma_h = \frac{\text{Masse du materiau}}{\text{Volume du moule}}$$

La densité humide est corrigée en calculant la densité sèche en se servant de la teneur en eau optimale retenue.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + w}$$

Les courbes de l'essai Proctor des quatre couches de notre profil latéritique sont tracés dans sur figure ci-dessous.

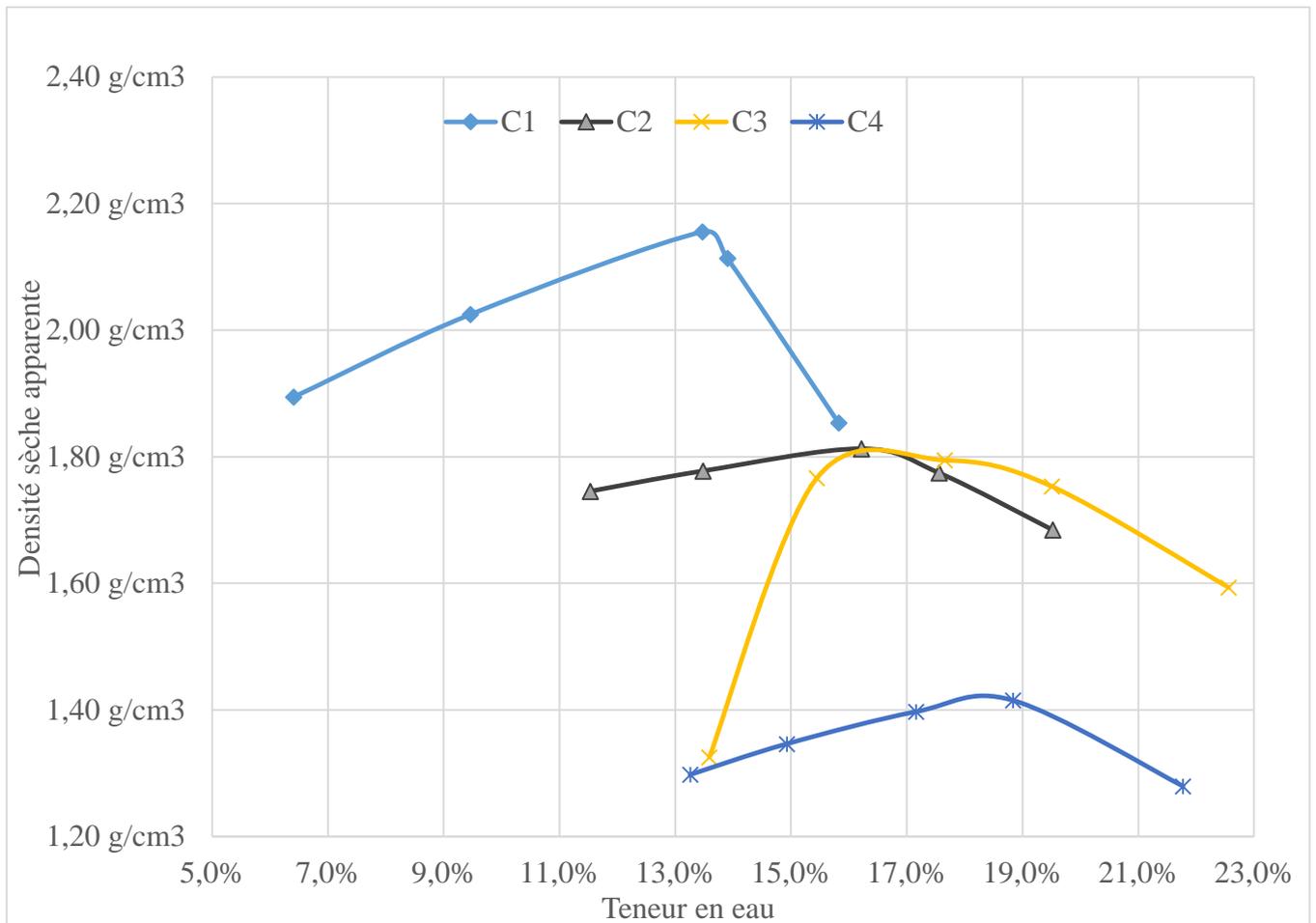


Figure 17: Récapitulatif des résultats de l'essai Proctor des couches du profil étudié

En ce qui concerne nos courbes Proctor, nous remarquons que les densités sèches des différentes couches de notre profil latéritique diminuent en fonction de la profondeur (de la couche 1 qui est la couche de surface à la couche 4 qui est la plus profonde) pendant que la teneur en eau augmente en fonction de la profondeur.

Selon les prescriptions du CEBTP, pour une couche de fondation, seule la couche C2 peut être utilisée. En effet cette couche ayant une densité sèche égale à 1,81 se situe dans la plage de densité sèche prescrite qui est de 1,8t/m<sup>3</sup> à 2t/m<sup>3</sup>.

Pour une application routière, seule la couche C1 est admissible pour une utilisation en couche de base. En effet sa densité sèche qui est de 2,16t/m<sup>3</sup> couvre avec seulement une petite marge les exigences de la densité sèche ( $\gamma_d > 2t/m^3$ ) que prescrit le CEBTP.

### V.2.2 Valeurs du CBR

Cet essai nous a permis de déterminer la résistance au poinçonnement de nos couches étudiées, en fonction de sa densité. Il s'agit donc de déterminer expérimentalement des indices qui

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

serviront à déterminer l'épaisseur des couches de fondation et de base et établir une classification des sols.

Un récapitulatif de tous ces résultats est proposé sur la figure ci-dessous.

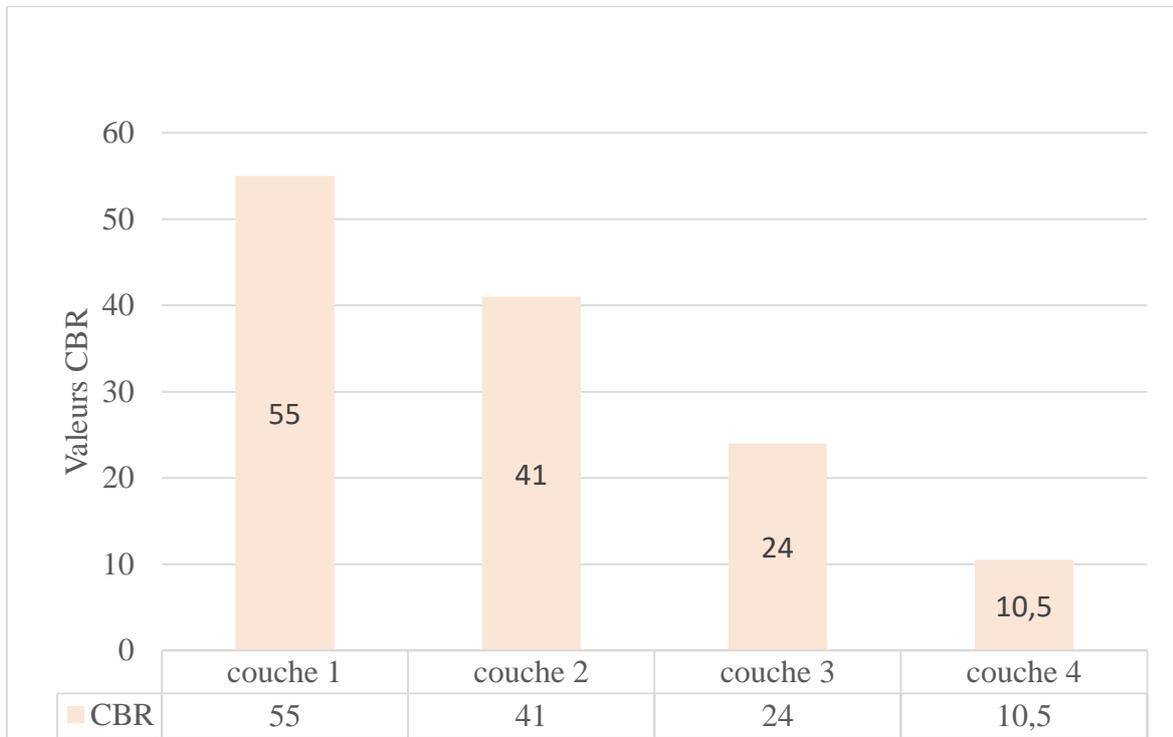


Figure 18: Récapitulatif des valeurs CBR des différentes couches étudiées

D'après le tableau ci-dessus nous remarquons une diminution de la valeur du CBR en fonction de la profondeur. En effet les valeurs obtenues sont de 55 (pour la couche 1), 41 (pour la couche 2), 24 (pour la couche 3) et 10,5 pour (la couche 4). Cela peut s'expliquer par le fait que plus on part en profondeur, plus la quantité des fines augmente.



Figure 19: Moule en immersion pour l'essai CBR

## V.2.3 Essai œdométrique

Les paramètres de compressibilité pour la première et la quatrième couche sont consignés dans les tableaux ci-dessous.

Tableau II: Caractéristique de compressibilité de la couche 1

CARACTERISTIQUE DE COMPRESSIBILITE					
e0	Cc	Cs	Cg	Eoed (MPa)	$\sigma_p$ (Pa)
1,003	0,254	0,10	0,07	500095,24	12000

Tableau III: Caractéristique de compressibilité de la couche 4

CARACTERISTIQUE DE COMPRESSIBILITE					
e0	Cc	Cs	Cg	Eoed ( MPa)	$\sigma_p$ (Pa)
0,783	0,4805	0,0100	0,007	523563,99	10000

La pression de pré-consolidation ( $\sigma'_p$ ) vient après le segment de faible pente. Cette contrainte correspond à la contrainte effective maximale que le matériau dans son dépôt, a connu de toute son histoire géologique.

Le CEBTP dans la partie d'évaluation des charges routières préconise la charge maximale de l'essieu à 13 tonnes avec une estimation des surcharges de 10%. Le fascicule 61 titre II nous renseigne sur les caractéristiques des différents types de surcharges routières. Nous avons choisi le cas le plus contraignant qui est la surcharge du type Bc. Ses caractéristiques que nous avons considérées sont la distance d'axe en axe des deux roues d'un essieu (2m) avec la surface d'impact de la roue (un carré de côté 20 cm pour la roue avant et 25 cm pour la roue arrière). Nous estimons ainsi la surcharge routière à une contrainte de 35,85 kPa.

Les coefficients Cs ou Cg de la couche C1 sont supérieures à ceux de la couche C4. Cela prouve que l'indice de gonflement de C1 est plus considérable que celui de C4. Le pouvoir gonflant œdométrique de la couche C1 est relativement égal à (10) fois celui de la couche C4 (0,07 comparé à 0,007). Ces coefficients Cs et Cg sont relativement faibles. Cela atteste que nos matériaux ne sont pas susceptibles à des grandes valeurs de tassement.

Quant au coefficient Cc, il se manifeste au moment où la pression appliquée sur notre éprouvette dépasse la pression de consolidation estimée. C'est la période où le tassement du sol est grandissant de sorte à réduire conséquemment l'indice des vides. Une analyse comparée entre les coefficients des deux couches, montre que la couche C4 connaît un grand tassement par rapport à celle de la couche C1.

En ce qui concerne l'indice des vides, nous remarquons que sa valeur est plus importante sur la couche C1 que sur la couche C4. En effet les fines réduisent l'indice de vides entre les grains ce qui nous permet de déduire que la couche C4 contient plus des fines que la couche C1.

Enfin, il en ressort également de cette étude que le module de Young Œdométrique est plus important sur la couche C4 que sur la couche C1. On en conclut que la couche C4 connaît plus de déformations dans le temps que la couche C1.

### V.2.4 Compression uniaxiale

Les résultats des essais de compression simple de nos différentes couches à l'état crue réalisés sur des éprouvettes de 16\*32 sont consignés sur la figure ci-dessus. Pour chaque éprouvette d'essai, la courbe contrainte-déformation a été tracée et les photos avant et après essai relevées.

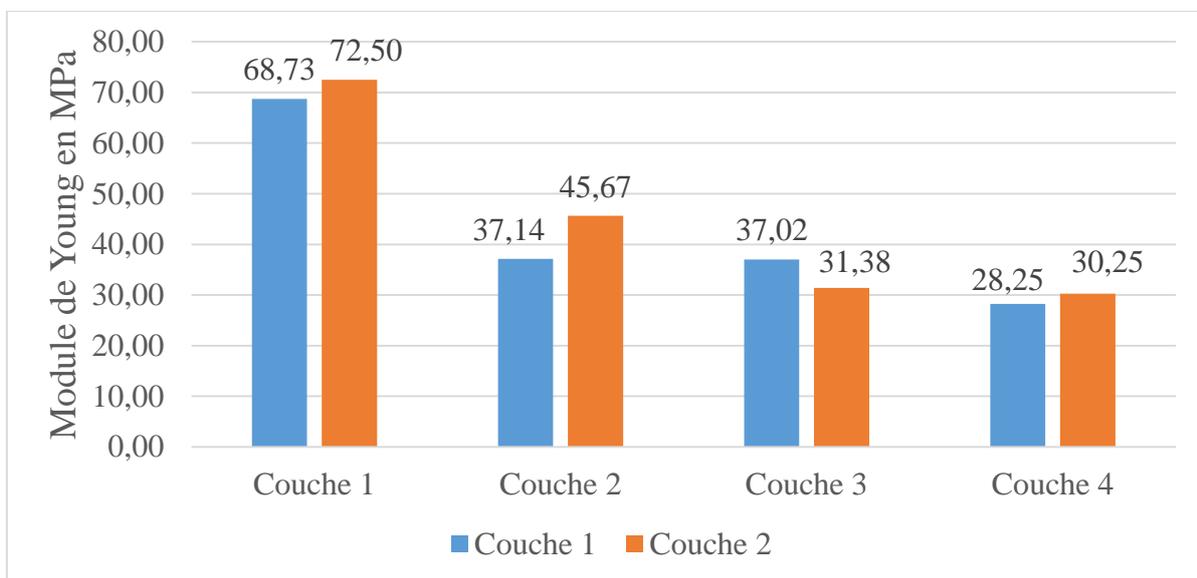


Figure 20: Résultats des essais de compression pour les couches crues

Deux modes de rupture sont observés pour les éprouvettes des matériaux à l'état crue à savoir la rupture par fissuration et la rupture par écrasement de la partie supérieure de l'éprouvette. Par ailleurs les valeurs des modules de chaque couche sont dans la même plage et aussi les valeurs du module diminuent en fonction de la profondeur.

## V.3 STABILISATION EN GEOTECHNIQUE ROUTIERE

### V.3.1 Proctor Modifié

Les courbes Proctor des deux premières couches améliorées au ciment sont consignées sur la figure ci-dessous.

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

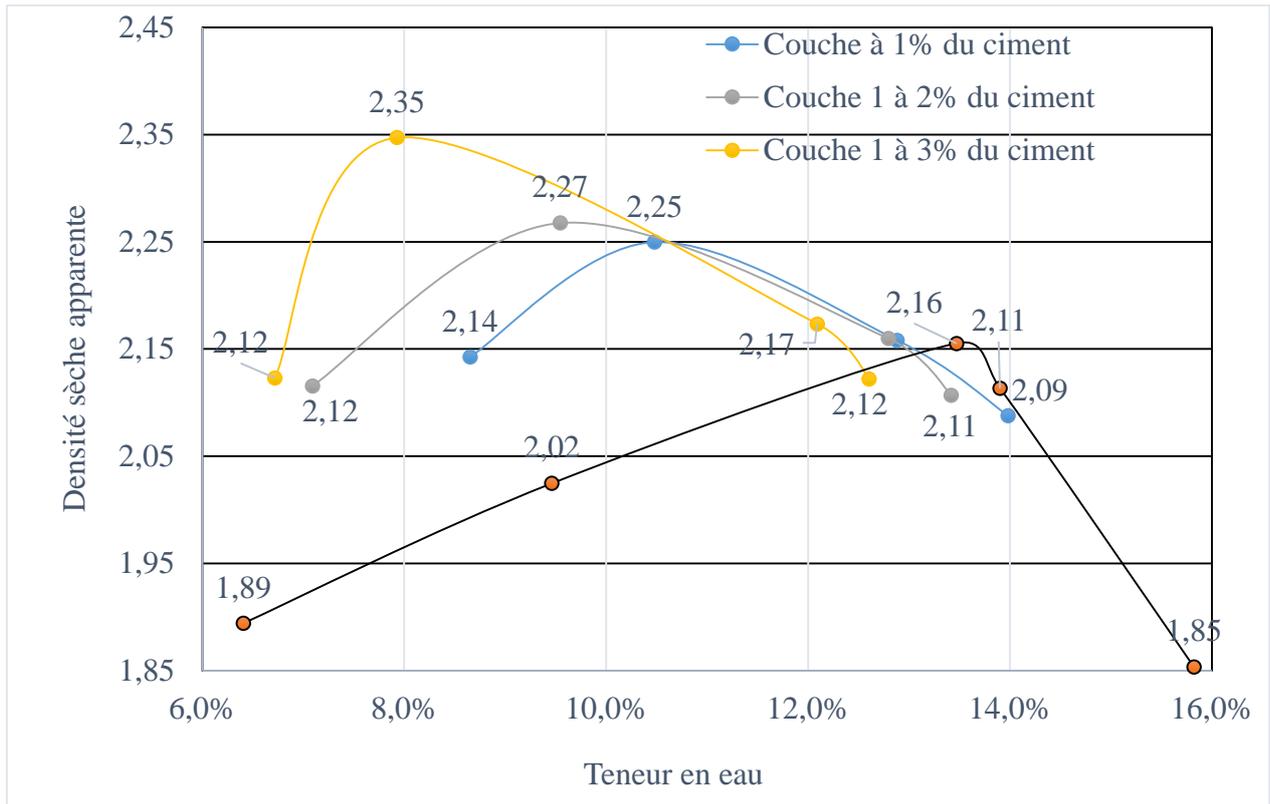


Figure 21: Courbe de l'essai Proctor de la couche 1 amélioré au ciment

- Couche 1 : on observe pour un taux de ciment allant de 0 à 1% une légère diminution de la teneur en eau jusqu'à un taux de ciment de 3%. L'effet contraire se produit au niveau de la densité sèche de chaque matériau amélioré. On remarque une augmentation de la densité sèche en fonction du taux de ciment dans le mélange (de 2,16 à 2,35).

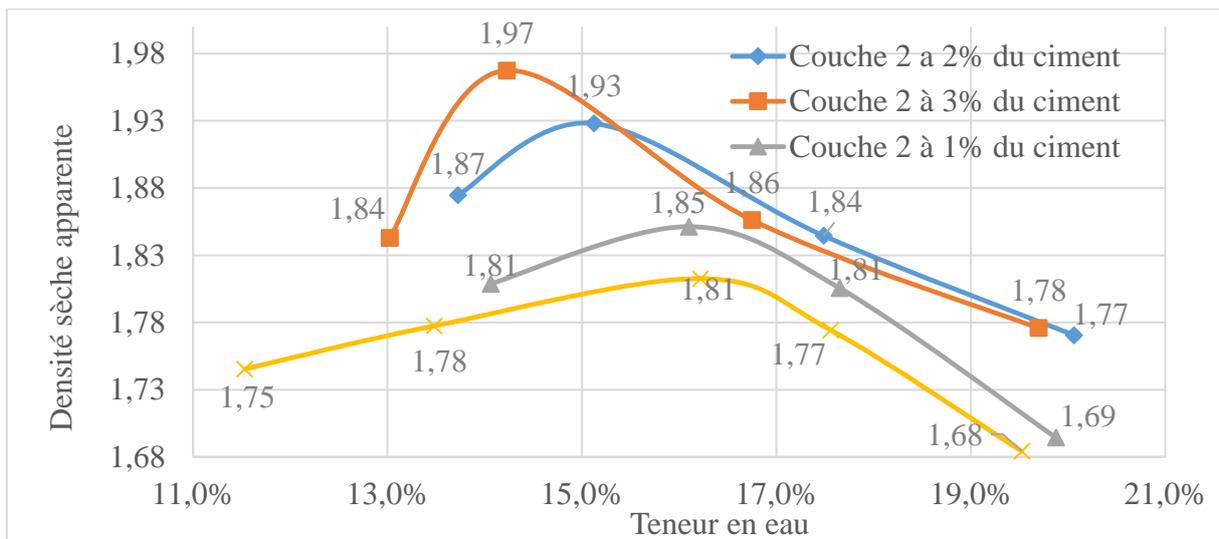


Figure 22: : Courbe de l'essai Proctor de la couche 2 amélioré au ciment

- Couche 2 : les mêmes remarques ont été faites sur la deuxième couche. On observe pour un taux de ciment allant de 0 à 3% une légère diminution de la teneur en eau. L'effet contraire s'est produit au niveau de la densité sèche de chaque matériau amélioré. On remarque une augmentation de la densité sèche en fonction du taux de ciment dans le mélange (allant de 1,80 pour 0% de ciment à 1,97 pour 3% de ciment).

La densité sèche augmente avec l'amélioration du sol au ciment. Cette augmentation est due essentiellement à la propriété de prise hydraulique du ciment ce qui fait que le mélange sol-ciment soit très cohérent et dur. En plus une diminution de la teneur en eau en fonction du pourcentage du ciment nous laisse conclure que le ciment augmente la densité sèche d'un matériau et diminue sa teneur en eau.

### V.3.2 Gonflement

La valeur du gonflement  $g$  s'exprime en pourcentage. C'est le rapport de la hauteur du gonflement mesuré en mm sur la hauteur du matériau mis en immersion pendant 4 jours.

$$g = \frac{\Delta h}{h}$$

Les valeurs de gonflement pour les couches de notre profil latéritique à l'état crue et amélioré au ciment sont consignées sur la figure ci-dessous.

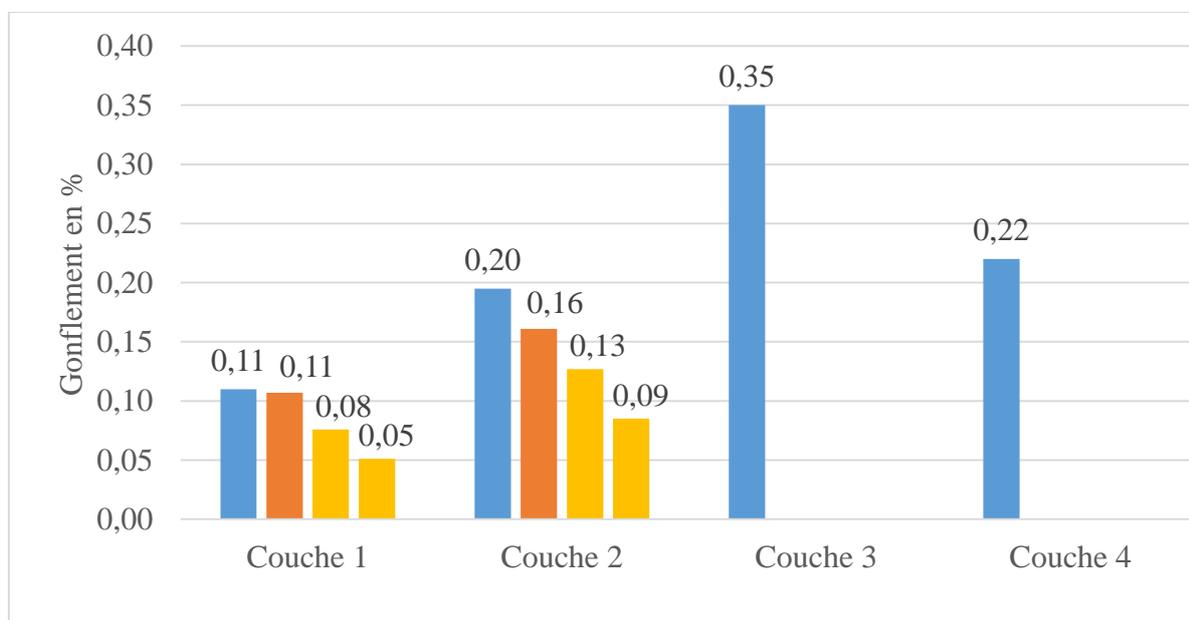


Figure 23: Récapitulatif du gonflement des couches améliorées ou non améliorées au ciment

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Une observation de la figure ci-dessus nous montre que le gonflement semble évolué en fonction de la profondeur des couches de notre profil. Cela se justifie par la présence des matériaux argileux qui est un matériau gonflant retenant l'eau.

Cependant contre toute attente le gonflement de la couche 3 est supérieur à celui de la couche 4. Cela se justifie par le fait que toutes ces deux couches sont constituées de la Kaolinite. La kaolinite étant électriquement neutre. Elle ne retient facilement ni l'eau ni les ions que cette eau contient (Salomon 2017). En effet la couche 4 semble avoir plus de fines et étant fortement tachetés de la couleur blanche (kaolinite) que la couche 3 qui est faiblement tachetée.

Pour ce qui est de l'application routière il est à noter que selon les prescriptions du CEBTP, la valeur du gonflement doit être inférieure à 1% pour ce qui est de la couche de base. En effet toutes les couches de notre profil latéritique ont des valeurs CBR inférieure à 1% donc respecte les critères d'utilisation CEBTP comme couche de base.

Pour ce qui est de la couche de fondation, le guide pratique de dimensionnement des chaussées préconise un gonflement linéaire de 2,5%. Il en ressort que toutes les couches de notre profil présentent les valeurs de gonflement intéressantes pour une utilisation en couche de fondation.

Nous remarquons que les valeurs du gonflement pour les deux premières couches améliorées au ciment ont baissées. Cela peut est due à la rigidité qu'apporte le ciment sur le matériau.

### V.3.3 Valeurs CBR

Les valeurs CBR des différentes couches de notre profil sont consignés sur la figure ci-dessus.

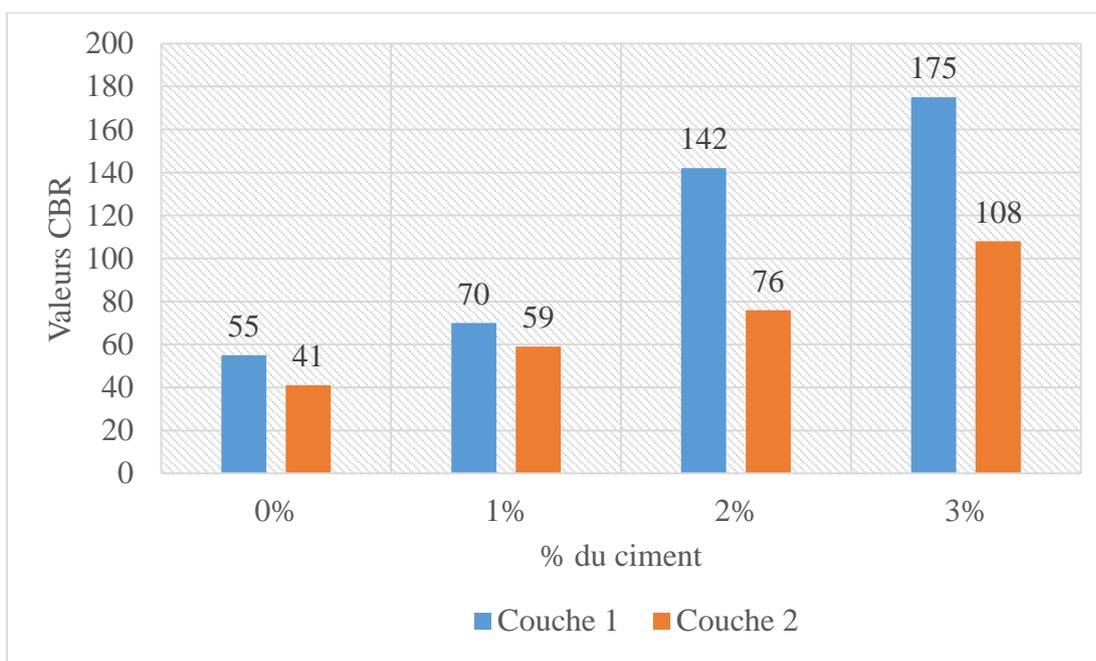


Figure 24: récapitulatif des valeurs CBR de la couche 1 et 2 améliorées au ciment

Les matériaux des deux couches de notre profil ont tous réagi en fonction du pourcentage d'ajout du ciment :

- Couche 1 : on observe une augmentation de la valeur de CBR en fonction du taux de ciment. Plus le pourcentage en ciment augmente plus la valeur de CBR augmente également elle se traduit par une réaction chimique entre le matériau et le ciment qui élève la valeur de CBR de 55 à 175.
- Couche 2 : La même augmentation de la valeur de CBR s'observe sur également et cette fois-ci elle varie de 41 à 108 en fonction de taux d'amélioration en ciment (0%-3%).

Cette augmentation de la valeur CBR en fonction du dosage du ciment est due au fait que le ciment augmente la rigidité d'un matériau. Cela confirme notre hypothèse sur le Proctor.

Compte tenu des recommandations du CEBTP sur les matériaux considérés comme satisfaisants pour la réalisation des couches latéritiques, le tableau ci-dessous présente les valeurs de CBR retenues sur chaque couche et leur utilisation dans la mise en œuvre des différentes couches latéritiques améliorées au ciment.

Tableau IV: valeurs de CBR retenue en fonction des spécifications et le taux de ciment associé

Couches latéritiques	% retenu	Valeur CBR	Spécification technique classe de Traffic T3		Couche de fondation	couche de base
			Couche de fondation	couche de base		
Couche 1	3%	175	> 35	>160	OUI	OUI
Couche 2	3%	108	> 35	>160	OUI	NON

### V.3.4 Compression uniaxiale

Les résultats des essais de compression simple des deux premières couches à l'état amélioré réalisés sur des éprouvettes de 16\*32 sont consignés sur la figure ci-dessous.

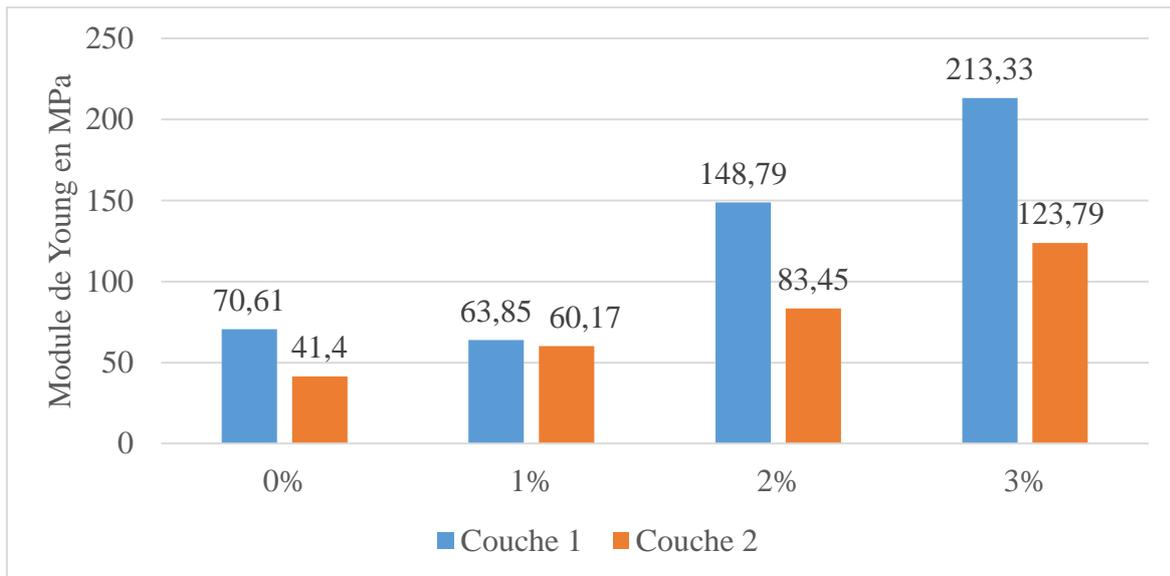


Figure 25: Valeurs du module des deux premières couches à l'état amélioré

- Couche 1 à 1%, 2% et 3% : Le mode de rupture le plus observé est la rupture par fissuration. Les valeurs des modules pour chaque pourcentage de ciment sont dans la même plage. La plus grande valeur du module à 1% du ciment est de 66,01MPa. Cependant la plus grande valeur du module à l'état crue est de 72,50MPa donc supérieure à celle du module à 1% ce qui n'est pas normal. Les plus grandes valeurs des modules de la couche 1 à 2% et 3% sont respectivement 149,79 et 213,33 MPa.
- Couche 2 à 1%, 2% et 3% : Le mode de rupture observé est le même que pour la couche 1. En effet la meilleure valeur du module à 1% est de 67,71 MPa donc supérieure à celle du matériau à l'état crue qui est de 45,67 MPa. Le même constat est fait pour un dosage à 2% du ciment ou les valeurs du module sont dans la même plage. En plus les valeurs du module à 1% et 2% et 3% pour les différentes éprouvettes sont dans la même plage. Le dosage à 3% du ciment donne les meilleures valeurs du module variant entre 103,07et 144,50 MPa.

Les modules d'Young de la latérite crue sur les couches 1 et 2 de la latérite améliorée au ciment augmentent. Cela se justifie par le fait que la rigidité augmente avec le pourcentage de ciment ajouté. Néanmoins certains écarts sont à noter pendant les essais et plusieurs hypothèses peuvent justifier ces écarts :

- Les écarts peuvent être dû à l'énergie de compactage, car il se peut qu'elle ne soit pas identique pour toutes les éprouvettes (Certains compactages ont été faits par des opérateurs différents, or l'énergie de compactage pourrait varier selon l'opérateur).

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

- Elle peut également se justifier par la teneur en eau qui est sensiblement différente d'une éprouvette à l'autre étant donné qu'elle influe beaucoup sur le compactage (cela peut arriver du fait que l'eau s'évapore du mélange effectué en début d'essai pour confectionner l'ensemble des éprouvettes, au fur et à mesure que le compactage se déroule ; et donc, les éprouvettes compactées en dernier enregistrent une perte de teneur en eau qui peut être à l'origine de la perte de densité du matériau).  
Malgré tout, pour les deux premières couches latéritiques des valeurs élevées du module sont notées sur quelques éprouvettes.



Figure 26: photos de quelques éprouvettes pour l'essai de compression

Tableau V: valeur du module de Young en MPa sur l'ensemble des couches

% ciment	Couche 1(MPa)	Couche 2 (MPa)	Couche 3 (MPa)	Couche 4 (MPa)
0%	70,01	41,40	34,19	29,25
1%	63,85	60,17		
2%	148,02	83,45		
3%	213,33	123,79		

Enfin, une comparaison a été effectuée avec les résultats trouvés par Fall, Sawangsuriya, Benson, Tuncer, & Bosscher (2007) (Tableau VI en annexe) et les éprouvettes d'essai réalisés dans le cadre de notre étude avec les mêmes moules utilisées sur les éprouvettes de la couche 1 et de la couche 2 (Fatou , 2014). Les modules comparés semblent être du même ordre de valeur. En effet, les modules des éprouvettes que nous avons testées varient entre 41,404 MPa et 213,333 MPa et ceux des éprouvettes testées par Fall et al. (2007) varient entre 7,69 MPa et 274,74 MPa (Meïssa , 1993).

## **CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN**

Il est remarqué par ailleurs, que les valeurs des modules trouvées par Fall, Sawangsuriya, Benson, Tuncer, & Bosscher (2007) augmentent bien avec le pourcentage de ciment. De même que les valeurs que nous avons obtenues lors de nos travaux.

En conclusion on pourra dire que les écarts entre les valeurs trouvées par Fall et nos valeurs ne sont pas trop éloignés vue les caractéristiques de base de nos différents matériaux il devrait être justifié.

## VI CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Au terme de cette recherche, nous avons d'une part effectué la composition stratigraphique de la carrière latéritique de Kamboinsin (Saam-tanga) et d'autre part l'application d'une technique de stabilisation notamment l'amélioration au ciment sur les quatre couches que compose notre profil latéritique ayant une profondeur allant de 0m à 8,28 m.

En ce qui concerne l'analyse granulométrique, selon la classification AASHTO les deux premières couches de notre profil latéritique appartiennent à la classe A-2 et sous classe A-2-5 donc de type graviers et sable limoneux ; Tandis que les deux dernières couches sont de classe A-2 et de sous classe A-2-7 donc issues d'un matériau de type graviers et sable limoneux ou argileux.

La bibliographie existante nous a permis d'avoir les caractéristiques requises pour les matériaux de chaussées et de parcourir toutes les techniques de stabilisation actuellement utilisées en construction routière. Les essais au laboratoire nous ont donné des caractéristiques différentes des couches latéritiques que compose la carrière de Saamtanga. En effet elle est composée de deux couches de portance élevée et pouvant s'utiliser en couche de fondation (Indice CBR après 4 jours d'immersion égale à 55 pour la couche 1 et 41 pour la couche 2) et de deux couches de portance CBR très faible (Indice CBR après 4 jours d'immersion égale à 21 pour la couche 3 et de 10,5 pour la couche 4).

Les études au laboratoire ont permis d'apprécier les possibilités d'utilisation de latérite traitée au ciment en corps de chaussées notamment en couche de base. Le comportement mécanique du sol latéritique à l'état naturelle ne répond pas à la norme (valeur de CBR<80%) donc nous nous sommes procédé à l'amélioration au ciment à 1, 2 et 3% de poids en ciment ; le traitement de la couche de base à 3% de ciment en poids est meilleure.

Les études caractéristiques de l'amélioration au ciment nous montre qu'elle peut être utilisée dans la stabilisation des matériaux pour usage en construction routière.

Les avantages écologiques et économiques du traitement des sols sont importants à savoir : la limitation des mouvements des camions (évacuation de déblai), la limitation des besoins en matériaux d'apport ou la valorisation de matériaux de déblais pour la création d'une piste de chantier efficace et sans risque dû aux intempéries, etc. les deux techniques sont simples, efficaces mais très réservées aux entreprises spécialisées car toute moindre erreur conduirait à des dégâts importants.

## VII RECOMMANDATIONS

Au vu des résultats issus de cette étude, les recommandations suivantes sont nécessaires pour les recherches ultérieures :

- ✚ Etendre la recherche sur plusieurs types de carrière et leurs couches stratigraphiques afin de faire une étude comparative avec nos résultats ;
- ✚ En plus des essais de CBR compression simple et cisaillement d'autres essais pourront compléter notre étude caractéristique comme l'essai de compression triaxial pour déterminer les modules irréversibles afin de les comparer à celles obtenues par l'essai de compression axiale ;
- ✚ Dans la phase d'exécution il faut insister sur l'homogénéisation des mélanges latérite - ciment en évitant les traînées de ciment non incorporées dans la latérite, tenir compte de la teneur en eau optimale recommandée par la courbe Proctor ;
- ✚ Il est nécessaire de vérifier à long terme la portance des matériaux stabilisés car certains matériaux perdent leurs résistances progressivement au fur et à mesure des temps.
- ✚ Faire de la litho-stabilisation pour enfin faire une étude comparative des résultats obtenus par stabilisation et par litho-stabilisation et déduire laquelle des deux études donnera des meilleurs résultats.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bohi, Z.P.B., 2008. Caractérisation des sols latéritiques utilisés en construction routière : cas de la région de l'Agneby (Côte d'Ivoire) 144.
- Departement d'ingénierie, 2004. Traitement des sols à la chaux ou au ciment 78.
- Fatou SAMB, 2014. Modélisation par éléments finis des chaussées en graveleux latéritiques traités ou non et application au dimensionnement Mécanistique-Empirique.
- Abdou LAWANE GANA, 2014. Caractérisation des matériaux latéritiques indurés pour une meilleure utilisation dans l'habitat en Afrique 262.
- Isis BRABET, 2012. Le traitement des sols pour la couche de forme, plateforme de chaussée 127.
- Mahamadou SOULEY ISSIAKOU, 2015. Étude des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au Niger : méthode d'amélioration 9.
- KENFACK, T. m. (2017). Influence de la classe granulaire des concassés de granite sur le mise en œuvre de la technique de la litho-stabilisation en d'assurer une meilleure durabilité des couches de base. Ouagadougou 2iE.
- Maignien, R. (1964). "Compte rendu des recherches sur les latérites" ORSTOM, UNESCO.
- Maignien, R. (1966). "compte rendu de recherches sur les latérites". Unesco.
- MAHAMAT Nganansou, 2011. 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 » 77.
- Maliki Otiéboame DJANDJIEME, 2018. Caractérisation des graveleux latéritiques améliorés au ciment et litho-stabilisés en vue d'une utilisation en construction routière 84.
- Massamba, 2013. Étude de l'amélioration de latérites du Sénégal par ajout de sable 15.
- Meissa FALL, 1993. Institut national polytechnique de lorraine 240.
- Salomon ZOUNGRANA, 2017. Caractérisation de la latérite de KAMBOINSIN en vue d'une utilisation durable dans les structures de chaussées 150.
- Nebnoma Hassane Clauvis SAVADOGO, 2018. Eudes comparatives des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des blocs de latérite taillée (Blt) de la région du sud-ouest (Burkina Faso).
- Vincent Robitaille, 1997. Mécaniques des sols théories et pratiques 341.
- YACOUB Azibert Mahamat Saleh, 2010. Influence des conditions de mise en œuvre des composites latérite/ciment sur la durabilité des couches de base 65.

**ANNEXES 1 : TABLEAUX DES RESULTATS**

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau VII: Analyse granulométrique par voie sèche de la couche 1

Modules AFNOR	Diamètre tamis	refus partiel en g	refus cumules en g	%refus cumules	% passants cumules	Observations
50	80	0				Cailloux
49	63	0				
48	50	0				
47	40	0				
46	31,5	0	0	0	100	
45	25	0	0	0	100	Graviers
44	20	24	24	1,218521527	98,78147847	
43	16	83	107	5,432575142	94,56742486	
42	12,5	80	187	9,494313566	90,50568643	
41	10	83	270	13,70836718	86,29163282	
40	8	125	395	20,05483347	79,94516653	Sable
39	6,3	141	536	27,21364744	72,78635256	
38	5	165	701	35,59098294	64,40901706	
37	4	162	863	43,81600325	56,18399675	
36	3,15	149	1012	51,38099106	48,61900894	
35	2,5	81	1093	55,49350122	44,50649878	
34	2	52	1145	58,13363119	41,86636881	
33	1,6	48	1193	60,57067425	39,42932575	
32	1,25	56	1249	63,41389115	36,58610885	
31	1	44	1293	65,64784728	34,35215272	
30	0,8	26	1319	66,96791227	33,03208773	
29	0,63	37	1356	68,84646629	31,15353371	
28	0,5	24	1380	70,06498781	29,93501219	
27	0,4	24	1404	71,28350934	28,71649066	
26	0,315	21	1425	72,34971568	27,65028432	
24	0,2	45	1470	74,63444354	25,36555646	
23	0,16	12	1482	75,24370431	24,75629569	
22	0,125	21	1503	76,30991064	23,69008936	
20	0,08	22	1525	77,42688871	22,57311129	
Fond		7	1532	77,78229082	22,21770918	

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau VIII: Analyse granulométrique par voie sèche de la couche 2

Modules AFNOR	Diamètre tamis	refus partiel en g	refus cumules en g	%refus cumules	% passants cumules	Observations
50	80	0				Cailloux
49	63	0				
48	50	0				
47	40	0				
46	31,5	0	0	0	100	
45	25	0	0	0	100	Graviers
44	20	0	0	0	100	
43	16	0	0	0	100	
42	12,5	6	6	0	100	
41	10	13	19	1	99	
40	8	7	26	1	99	Sable
39	6,3	11	37	2	98	
38	5	12	49	2	98	
37	4	26	75	4	96	
36	3,15	31	106	5	95	
35	2,5	31	137	7	93	
34	2	31	168	9	91	
33	1,6	29	197	10	90	
32	1,25	37	234	12	88	
31	1	29	263	13	87	
30	0,8	24	287	15	85	
29	0,63	35	322	16	84	
28	0,5	21	343	17	83	
27	0,4	21	364	18	82	
26	0,315	31	395	20	80	
23	0,16	12	407	21	79	
22	0,125	32	439	22	78	
20	0,08	22	461	23	77	
Fond		8	469	24	76	

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau IX: Analyse granulométrique par voie sèche de la couche 3

Modules AFNOR	Diamètre tamis	refus partiel en g	refus cumules en g	%refus cumules	% passants cumules	Observations
50	80	0				Cailloux
49	63	0				
48	50	0				
47	40	0				
46	31,5	0	0	0	100	
45	25	0	0	0	100	Graviers
44	20	0	0	0,00	100,00	
43	16	5	5	0,25	99,75	
42	12,5	4	9	0,45	99,55	
41	10	5	14	0,71	99,29	
40	8	9	23	1,16	98,84	Sable
39	6,3	17	40	2,02	97,98	
38	5	17	57	2,88	97,12	
37	4	21	78	3,94	96,06	
36	3,15	26	104	5,25	94,75	
35	2,5	44	148	7,47	92,53	
34	2	51	199	10,05	89,95	
33	1,6	80	279	14,09	85,91	
32	1,25	107	386	19,49	80,51	
31	1	73	459	23,18	76,82	
30	0,8	53	512	25,86	74,14	
29	0,63	50	562	28,38	71,62	
28	0,5	28	590	29,80	70,20	
27	0,4	29	619	31,26	68,74	
26	0,315	31	650	32,83	67,17	
24	0,2	67	717	36,21	63,79	
23	0,16	33	750	37,88	62,12	
22	0,125	44	794	40,10	59,90	
20	0,08	73	867	43,79	56,21	
Fond		44	911	46,01	53,99	

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau X: Analyse granulométrique par voie sèche de la couche 4

Modules AFNOR	Diamètre tamis	refus partiel en g	refus cumules en g	%refus cumules	% passants cumules	Observations
50	80	0				Cailloux
49	63	0				
48	50	0				
47	40	0				
46	31,5	0	0	0	100	
45	25	0	0	0	100	Graviers
44	20	0	0	0,00	100,00	
43	16	0	0	0,00	100,00	
42	12,5	0	0	0,00	100,00	
41	10	0	0	0,00	100,00	
40	8	0	0	0,00	100,00	
39	6,3	0	0	0,00	100,00	
38	5	0	0	0,00	100,00	
37	4	4	4	0,20	99,80	
36	3,15	4	8	0,40	99,60	
35	2,5	6	14	0,71	99,29	
34	2	9	23	1,16	98,84	
33	1,6	10	33	1,66	98,34	
32	1,25	17	50	2,52	97,48	
31	1	21	71	3,58	96,42	
30	0,8	17	88	4,44	95,56	
29	0,63	23	111	5,59	94,41	
28	0,5	23	134	6,75	93,25	
27	0,4	17	151	7,61	92,39	
26	0,315	26	177	8,92	91,08	
24	0,2	48	225	11,34	88,66	
23	0,16	14	239	12,05	87,95	
22	0,125	22	261	13,16	86,84	
20	0,08	40	301	15,17	84,83	
Fond		21	322	16,23	83,77	

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XI: Comparaison de la couche 1 et fuseaux de base et de fondation CEBTP

fuseau de couche de fondation			couche C1	Couche de base	
$\phi$ en mm	Max en%	Min en %		Max en %	Min en%
50	100	100	100	100	100
40	95	100	100	95	100
32	90	100	100	85	100
20	75	100	99	60	100
10	58	100	86	35	90
5	40	78	64	20	75
2	28	65	42	12	50
1	22	56	34	10	40
1	18	50	30	7	35
0	5	35	23	4	20

Tableau XII: Comparaison de la couche 1 et fuseaux de base et de fondation CEBTP

fuseau de couche de fondation			couche C2	Couche de base	
$\phi$ en mm	Max en%	Min en %		Max en %	Min en%
50	100	100	100	100	100
40	95	100	100	95	100
32	90	100	100	85	100
20	75	100	100	60	100
10	58	100	99	35	90
5	40	78	98	20	75
2	28	65	91	12	50
1	22	56	87	10	40
0,5	18	50	83	7	35
0,1	5	35	77	4	20

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XIII: Comparaison de la couche 3 et fuseaux de base et de fondation

fuseau de couche de fondation			couche C3	Couche de base	
$\phi$ en mm	Max en%	Min en %		Max en %	Min en%
50	100	100	100	100	100
40	95	100	100	95	100
31,5	90	100	100	85	100
20	75	100	100	60	100
10	58	100	99,29	35	90
5	40	78	97,12	20	75
2	28	65	89,95	12	50
1	22	56	76,82	10	40
0,5	18	50	70,20	7	35
0,08	5	35	56,21	4	20

Tableau XIV: Comparaison de la couche 4 et fuseaux de base et de fondation

fuseau de couche de fondation			couche C4	Couche de base	
$\phi$ en mm	Max en%	Min en %		Max en %	Min en%
50	100	100	100	100	100
40	95	100	100	95	100
31,5	90	100	100	85	100
20	75	100	100	60	100
10	58	100	100	35	90
5	40	78	100	20	75
2	28	65	98,84	12	50
1	22	56	96,42	10	40
0,5	18	50	93,25	7	35
0,08	5	35	84,83	4	20

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XV: Feuille de Calcul des résultats limites de la couche 1

	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE		
	16	21	25	29	-	-	-
Nbre de coups	16	21	25	29	-	-	-
Numéro tare	1	2	3	4	A	B	C
Poids tot. hum.	24,17	21,21	21,62	22,50	19,93	18,99	19,02
Poids total sec	22,38	19,80	20,44	21,04	19,56	18,60	18,60
Poids tare	19,1	16,83	17,7	17,67	18,54	17,62	17,51
Poids de l'eau	1,79	1,41	1,18	1,46	0,37	0,39	0,42
Poids du sol sec	3,28	2,97	2,74	3,37	1,02	0,98	1,09
Teneur en eau	54,57	47,47	43,07	43,32	36,27	39,80	38,53
RESULTATS	LL =	47,1	IP =	8,91	LP	38,2	

Tableau XVI: feuille de calcul des résultats de la couche 2

	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE		
	15	20	25	30	-	-	-
Nbre de coups	15	20	25	30	-	-	-
Numéro tare	1	2	3	4	A	B	C
Poids tot. hum.	29,79	31,02	29,90	27,95	27,62	26,38	26,96
Poids total sec	28,25	29,63	29,02	27,43	27,43	26,10	26,80
Poids tare	25,21	26,87	27,19	26,05	26,97	25,42	26,24
Poids de l'eau	1,54	1,39	0,88	0,52	0,19	0,28	0,16
Poids du sol sec	3,04	2,76	1,83	1,38	0,46	0,68	0,56
Teneur en eau	50,66	50,36	48,09	37,68	41,30	41,18	28,57
RESULTATS	LL =	46,7	IP =	9,7		LP =	37,02

Tableau XVII: feuille de Calcul des résultats des limites de la couche 3

	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE		
	15	19	24	29	-	-	-
Nbre de coups	15	19	24	29	-	-	-
Numéro tare	1	2	3	4	A	B	C
Poids tot. hum.	30,55	28,02	29,50	28,66	27,09	27,76	25,88
Poids total sec	29,05	27,37	28,79	28,29	26,78	27,59	25,68
Poids tare	26,26	25,93	27,17	27,28	25,98	27,04	25,06
Poids de l'eau	1,50	0,65	0,71	0,37	0,31	0,17	0,20
Poids du sol sec	2,79	1,44	1,62	1,01	0,80	0,55	0,62
Teneur en eau	53,76	45,14	43,83	36,63	38,75	30,91	32,26
RESULTATS	LL =	44,8	IP =	10,9		LP	33,97

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XVIII: Feuille de calcul des résultats limites de la couche 4

Nbre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE				LIMITE DE PLASTICITE		
	17	23	29	34	-	-	-
Numéro tare	1	2	3	4	A	B	C
Poids tot. hum.	21,77	23,02	19,59	20,60	19,18	18,06	19,86
Poids total sec	20,70	21,50	18,98	19,96	19,01	17,96	19,72
Poids tare	18,65	17,85	17,40	18,24	18,54	17,63	19,08
Poids de l'eau	1,07	1,52	0,61	0,64	0,17	0,10	0,14
Poids du sol sec	2,05	3,65	1,58	1,72	0,47	0,33	0,64
Teneur en eau	52,20	41,64	38,61	37,21	36,17	30,30	21,88
RESULTATS	LL = 42,4		IP = 13,0		LP = 29,45		

Tableau XIX: Récapitulatif des valeurs des couches étudiées

Couches	C1	C2	C3	C4
LL	47,1	46,7	44,8	42,4
LP	38,2	37,02	33,97	29,45
IP	8,91	9,7	10,9	13

Tableau XX: Résultats de test au Bleu de méthylène

Identification de la couche	C1	C2	C3	C4
Dmax	20 mm	12,5mm	16mm	4 mm
Masse sèche prélevée	5000	5000	5000	2000
Masse sèche passant le tamis de 5mm	3090	2892	2109	1209
Coefficient pondérale C fraction 0/5	61,80%	57,84%	42,18%	60,45%
Poids humide prise n° 2 (en g)	1000	1000	1000	1000
Poids sec prise n°2 (en g)	985	988	992	991
Teneur en eau $\omega$ du matériau	1,52%	1,21%	0,81%	0,91%
Masse sèche 0/5 introduite en solution (en g)	60	60	60	60
Volume de bleu introduit (cm <sup>3</sup> )	35	40	35	55
La valeur bleue VBS	0,583	0,667	0,583	0,917
Activité argileuse	0,94	1,15	1,38	1,52

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XXI: Résultats de l'essai Proctor de la couche 1

Teneur en eau souhaitée		6%		8%		10%		12%		14%	
Eau de mouillage		420		560		700		840		980	
Densité	Poids total humide (g)	8226,00		8634,00		9100,00		9022,00		8493,00	
	Poids du moule (g)	4130,00		4130,00		4130,00		4130,00		4130,00	
	Poids net humide (g)	4096,00		4504,00		4970,00		4892,00		4363,00	
	Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2032,22		2032,22		2032,22		2032,22		2032,22	
Teneur en eau	Numéro tare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Poids tare (g)	17,29	17,67	17,46	18,50	17,66	16,78	17,74	16,42	17,05	17,6
	Poids total humide (g)	131,40	140,31	120,27	126,42	116,99	119,03	118,72	116,11	106,08	116,2
	Poids total sec (g)	124,67	132,78	110,57	117,96	104,70	107,41	106,36	103,98	93,70	103,0
	Teneur en eau (%)	6,27%	6,54%	10,42%	8,51%	14,12%	12,82%	13,95%	13,85%	16,15%	15,5%
Teneur en eau moyenne (%)		6,4%		9,5%		13,5%		13,9%		15,8%	
Densité humide g (g/cm <sup>3</sup> ) :		2,02		2,22		2,45		2,41		2,15	
Densité sèche gd (g/cm <sup>3</sup> ) :		1,89		2,02		2,16		2,11		1,85	

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XXII: Résultats de l'essai Proctor de la couche 2

Densité	Poids total humide (g)	8226,00		8634,00		9100,00		9022,00		8493,00	
	Poids du moule (g)	4130,00		4130,00		4130,00		4130,00		4130,00	
	Poids net humide (g)	4096,00		4504,00		4970,00		4892,00		4363,00	
	Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2032,22		2032,22		2032,22		2032,22		2032,22	
Teneur en eau	Numéro tare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Poids tare (g)	17,29	17,67	17,46	18,50	17,66	16,78	17,74	16,42	17,05	17,6
	Poids total humide (g)	131,40	140,31	120,27	126,42	116,99	119,03	118,72	116,11	106,08	116,2
	Poids total sec (g)	124,67	132,78	110,57	117,96	104,70	107,41	106,36	103,98	93,70	103,0
	Teneur en eau (%)	6,27%	6,54%	10,42%	8,51%	14,12%	12,82%	13,95%	13,85%	16,15%	15,5%
Teneur en eau moyenne (%)		6,4%		9,5%		13,5%		13,9%		15,8%	
Densité humide g (g/cm <sup>3</sup> ) :		2,02		2,22		2,45		2,41		2,15	
Densité sèche gd (g/cm <sup>3</sup> ) :		1,89		2,02		2,16		2,11		1,85	

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XXIII: Résultats de l'essai Proctor de la couche 3

Teneur en eau souhaitée		12%		14%		16%		18%		20%	
Eau de mouillage		720		840		960		1080		1200	
Densité	Poids total humide (g)	7189,00		8274,00		8421,00		8388,00		8099,00	
	Poids du moule (g)	4130,00		4130,00		4130,00		4130,00		4130,00	
	Poids net humide (g)	3059,00		4144,00		4291,00		4258,00		3969,00	
	Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2032,22		2032,22		2032,22		2032,22		2032,22	
Teneur en eau	Numéro tare	5fi	5fs	2fi	2fs	1fi	1s	3fi	3fs	3fs	3fs
	Poids tare (g)	18,50	17,79	18,50	17,79	17,89	17,58	17,08	17,56	18,41	17,00
	Poids total humide (g)	111,93	109,67	111,93	109,67	115,21	107,71	106,66	112,20	105,31	115,39
	Poids total sec (g)	100,49	98,94	100,87	96,01	99,35	95,39	89,86	99,20	90,67	95,8
	Teneur en eau (%)	13,95%	13,22%	13,43%	17,46%	19,47%	15,83%	23,08%	15,92%	20,3%	24,9%
Teneur en eau moyenne (%)		13,6%		15,4%		17,7%		19,5%		22,6%	
Densité humide g (g/cm <sup>3</sup> ) :		1,51		2,04		2,11		2,10		1,95	
Densité sèche gd (g/cm <sup>3</sup> ) :		1,33		1,77		1,79		1,75		1,59	

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XXIV: Résultats de l'essai Proctor de la couche 4

Teneur en eau souhaitée		12%	14%	16%	18%	20%					
Eau de mouillage		720	840	960	1080	1200					
Densité	Poids total humide (g)	7157,00	7423,00	7815,00	8002,00	7693,00					
	Poids du moule (g)	4130,00	4131,00	4132,00	4133,00	4134,00					
	Poids net humide (g)	3027,00	3292,00	3683,00	3869,00	3559,00					
	Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2127,92	2127,92	2127,92	2127,92	2127,92					
Teneur en eau	Numéro tare	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Poids tare (g)	17,46	18,50	17,66	16,78	17,74	16,42	17,05	17,55	17,29	17,7
	Poids total humide (g)	98,33	108,82	109,63	101,79	102,42	103,64	107,32	126,85	105,86	107,8
	Poids total sec (g)	88,55	98,60	98,65	89,88	90,01	90,87	91,93	110,88	89,20	92,6
	Teneur en eau (%)	13,76%	12,76%	13,56%	16,29%	17,17%	17,15%	20,55%	17,11%	23,17%	20,4%
Teneur en eau moyenne (%)		13,3%	14,9%	17,2%	18,8%	21,8%					
Densité humide g (g/cm <sup>3</sup> ) :		1,42	1,55	1,73	1,82	1,67					
Densité sèche gd (g/cm <sup>3</sup> ) :		1,26	1,35	1,48	1,53	1,37					

Tableau XXV: Tableau récapitulatif des valeurs des résultats de l'essai Proctor

Couches	C1	C2	C3	C4
w <sub>opt</sub>	13,5	16,2	17,7	18,8
γ <sub>s</sub>	2,16	1,81	1,79	1,53

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XXVI: Résistance au poinçonnement de la couche 1

Enfoncement (mm)	55coups		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	7,50	56,2	6,00	44,9	5,00	37,5
5	11,30	56,7	9,00	45,2	7,50	38
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

Tableau XXVII: Résistance au poinçonnement de la couche 2

Enfoncement (mm)	55coups		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	5,50	41,2	5,00	37,5	3,50	26,2
5	8,30	41,6	7,50	37,6	6,00	30
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XXVIII: Résistance au poinçonnement de la couche 3

Enfoncement (mm)	55coups		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	4,30	32,2	2,70	20,2	2,00	15,0
5	6,50	32,6	4,30	21,6	3,30	17
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

Tableau XXIX: Résistance au poinçonnement de la couche 4

Enfoncement (mm)	55coups		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	2,00	15,0	1,70	12,7	1,20	9,0
5	3,50	17,6	2,80	14,0	1,90	10
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

Tableau XXX: Résultat CBR de la couche 1

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	56	45	37
	à 5,0mm	57	45	38
	Maxi.	57	45	38

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XXXI: Résultat CBR de la couche 2

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	41	37	26
	à 5,0mm	42	38	30
	Maxi.	42	38	30

Tableau XXXII: Résultat CBR de la couche 3

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	32	20	15
	à 5,0mm	33	22	17
	Maxi.	33	22	17

Tableau XXXIII: Résultat CBR de la couche 4

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	15	13	9
	à 5,0mm	18	14	10
	Maxi.	18	14	10

Tableau XXXIV: Résistance au poinçonnement couche 1 à un 1%

Enfoncement (mm)	55coups		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	10,00	74,9	9,00	67,4	4,20	31,5
5	17,00	85,3	14,30	71,8	7,00	35
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XXXV: Résistance au poinçonnement couche 1 à un 2%

Enfoncement (mm)	55coups		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	16,00	119,9	15,50	116,1	7,60	56,9
5	29,50	148,0	28,50	143,0	10,00	50
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

Tableau XXXVI: Résistance au poinçonnement la couche 1 à 3%

Enfoncement (mm)	55coups		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	22,00	164,8	16,50	123,6	15,00	112,4
5	37,50	188,2	26,00	130,5	23,00	115
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XXXVII: Résistance au poinçonnement la couche 2 à 1%

Enfoncement (mm)	55coups		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	7,60	56,9	6,80	50,9	3,00	22,5
5	12,50	62,7	11,00	55,2	4,30	22
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

Tableau XXXVIII: Résistance au poinçonnement la couche 2 à 2%

Enfoncement (mm)	55coups		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	13,50	101,1	12,00	89,9	6,50	48,7
5	18,50	92,8	16,00	80,3	8,70	44
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

Tableau XXXIX: Résistance au poinçonnement de la couche 2 à 3%

Enfoncement (mm)	55coups		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	17,00	127,3	13,00	97,4	7,70	57,7
5	24,00	120,4	21,00	105,4	11,00	55
7,5	33,70		26,84		14,52	
10	39,18		29,74		22,28	

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XL: valeurs CBR couche1 à 1%

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	75	67	31
	à 5,0mm	85	72	35
	Maxi.	85	72	35

Tableau XLI: Valeurs CBR de la couche1 à 2%

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	120	116	57
	à 5,0mm	148	143	50
	Maxi.	148	143	57

Tableau XLII: Valeurs CBR de la couche 1 à 3%

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	165	124	112
	à 5,0mm	188	130	115
	Maxi.	188	130	115

Tableau XLIII: Valeurs CBR de la couche 2 à 1%

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	57	51	22
	à 5,0mm	63	55	22
	Maxi.	63	55	22

Tableau XLIV: Valeurs CBR de la couche 2 à 2%

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	101	90	49
	à 5,0mm	93	80	44
	Maxi.	101	90	49

Tableau XLV: Résultat CBR couche2 à 3%

CBR :	Nbre de coups	55	25	10
	à 2,5mm	127	97	58
	à 5,0mm	120	105	55
	Maxi.	127	105	58

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XLVI: Résultats de la teneur en eau initiale des différentes couches

couches	Masse sèche en g	Masse humide	teneur en eau initiale en %
C1	0,985	1	1,52
C2	0,988	1	1,21
C3	0,991	1	0,91
C4	0,992	1	0,81

Tableau XLVII: : Résultats des poids spécifiques des différentes couches

N° échantillon (le cas échéant)	Poids sec matériaux mis dans la cuve (g)	Volume d'eau distillé ajouté (cm3)	Pression finale ( P') cuve échantillon + chambres (mWs)				Valeur Vlu (cm3)	ys (T/m3)
			1ère essai	2ième essai	3ième essai	$\bar{P}$ , moyenne (mWs)		
C1	1 078,00 g	387,00 cm3	10,50	10,50	10,45	10,48	777,00 cm3	2,76
C2	930,00 g	341,00 cm3	9,00	8,80	8,95	8,92	690,37 cm3	2,66
C3	919,00 g	329,00 cm3	9,40	9,48	9,43	9,44	722,69 cm3	2,33
C4	816,00	334,00 cm3	8,40	8,51	8,40	8,44	656,53 cm3	2,53

Tableau XLVIII: énergie de compactage pour l'essai compression uniaxiale

Energie Proctor	Nbe de coup/couche	Nbe de couche	Masse de la dame (Kg)	accélération G	Hauteur de chute (m)	Volume utile du moule (cm3)	Energie de compactage (KJ/m3)
Energie Compression	55	5	4,54	9,81 m/s-2	0,457 m	2 272	2 464
	57	8	4,54	9,81	0,457	6433,96813	2464

## CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

Tableau XLIX: valeurs maximales des modules de Young (en MPa) trouvés à l'essai de compression simple

	Déformation au pic (%)	Déplacement au pic (mm)	Module d'Young (MPa)
Lat1_95	3,22	5,7	45,26
Lat1_95-bis*	2,43	4,4	14,38
Lat1_1C-bis	3,26	5,9	40,01
Lat1_2C	3,61	6,8	90,05
Lat3_95	1,71	3	24,02
Lat3_95-bis	2,74	5,1	11,71
Lat3_1C	3,59	6,6	13,80
Lat3_3C	2,00	3,9	113,14
Lat3_2C	3,32	6,4	71,91
Lat4_95	1,60	2,9	43,17
Lat4_95*	2,98	5,5	20,15
Lat4_95-bis	4,20	7,7	19,52
Lat4_1C	2,16	4	48,98
Lat4_2C	2,66	5	118,51
Lat4_3C	2,20	4,4	203,73
Lat5_95	3,18	5,5	12,69
Lat5_95-bis	3,08	5,4	14,93
Lat5_1C	3,51	6,4	39,94
Lat5_2C	1,92	3,5	169,98
Lat5_3C	2,57	4,9	274,74
Lat6_95	2,62	4,3	16,82
Lat6_95-bis	5,42	7,8	7,69
Lat6_1C	2,22	4	40,04
Lat6_2C	2,76	5	103,23
Lat6_3C	2,35	4,5	171,52

**ANNEXES 2 : GRAPHIQUES ET DIAGRAMMES**

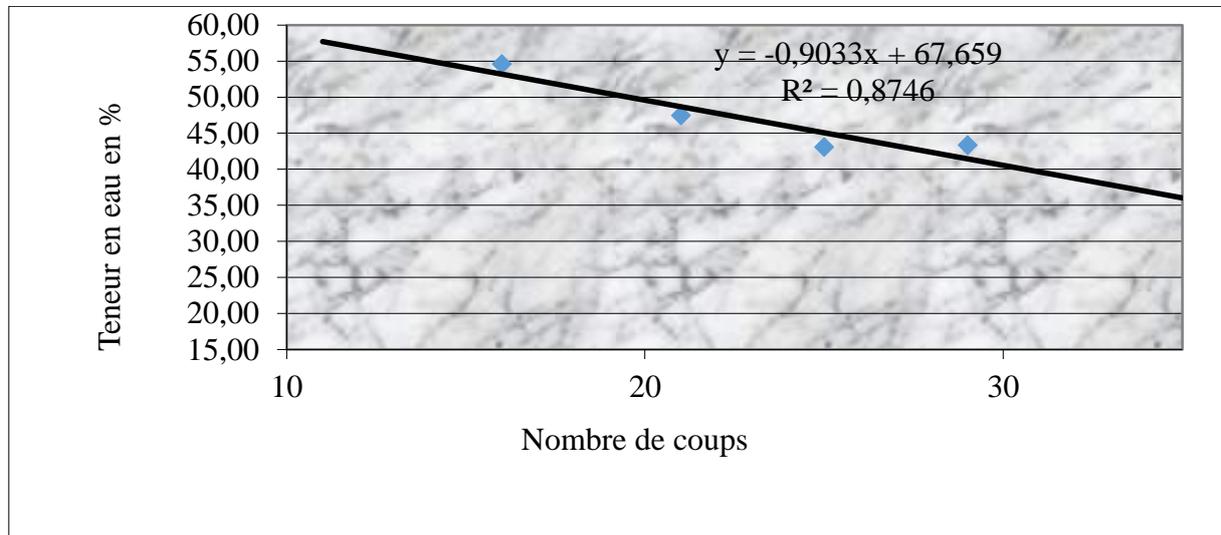


Figure 27: Résultats des essais limites de la couche 1

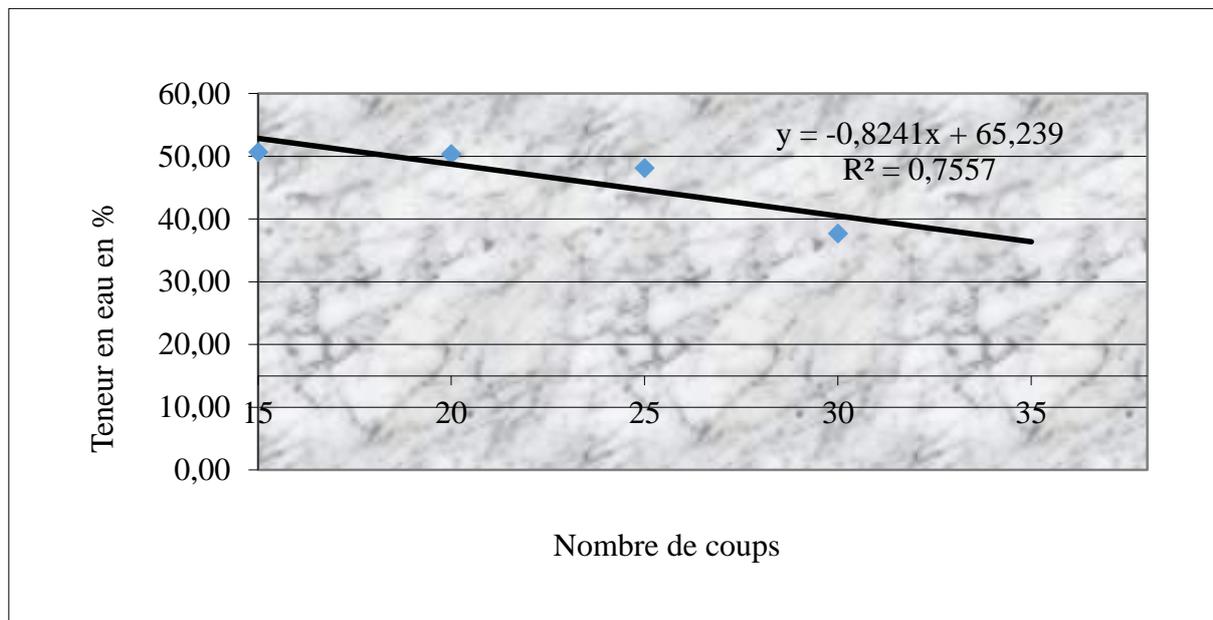


Figure 28: Résultats des essais limites de la couche 2

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

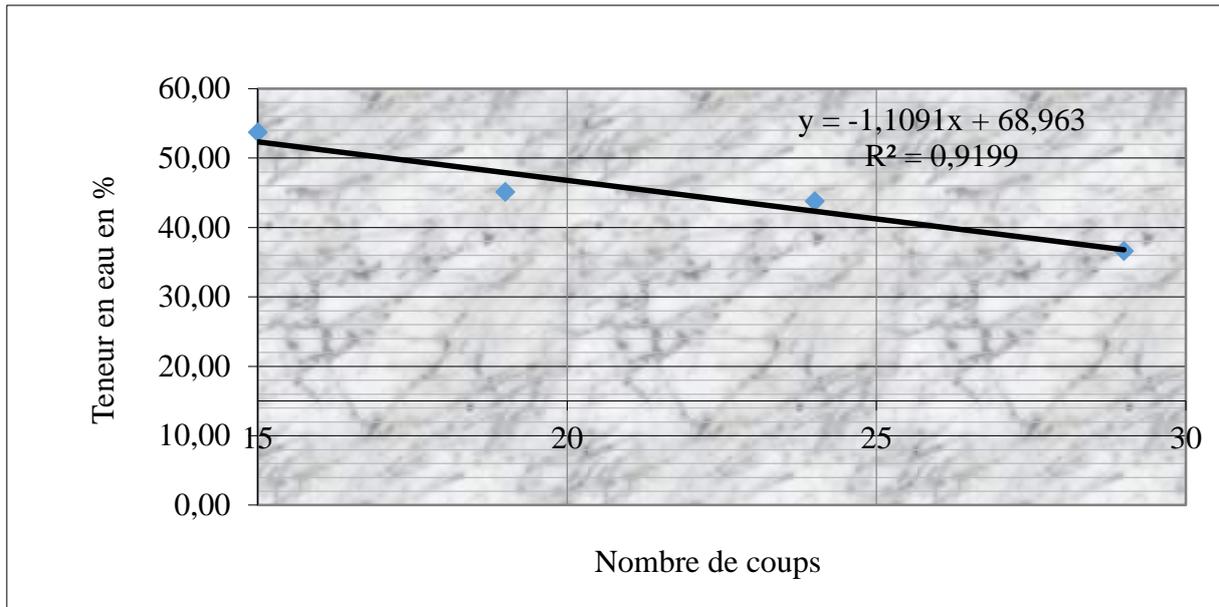


Figure 29: Résultats des essais limites de la couche 3

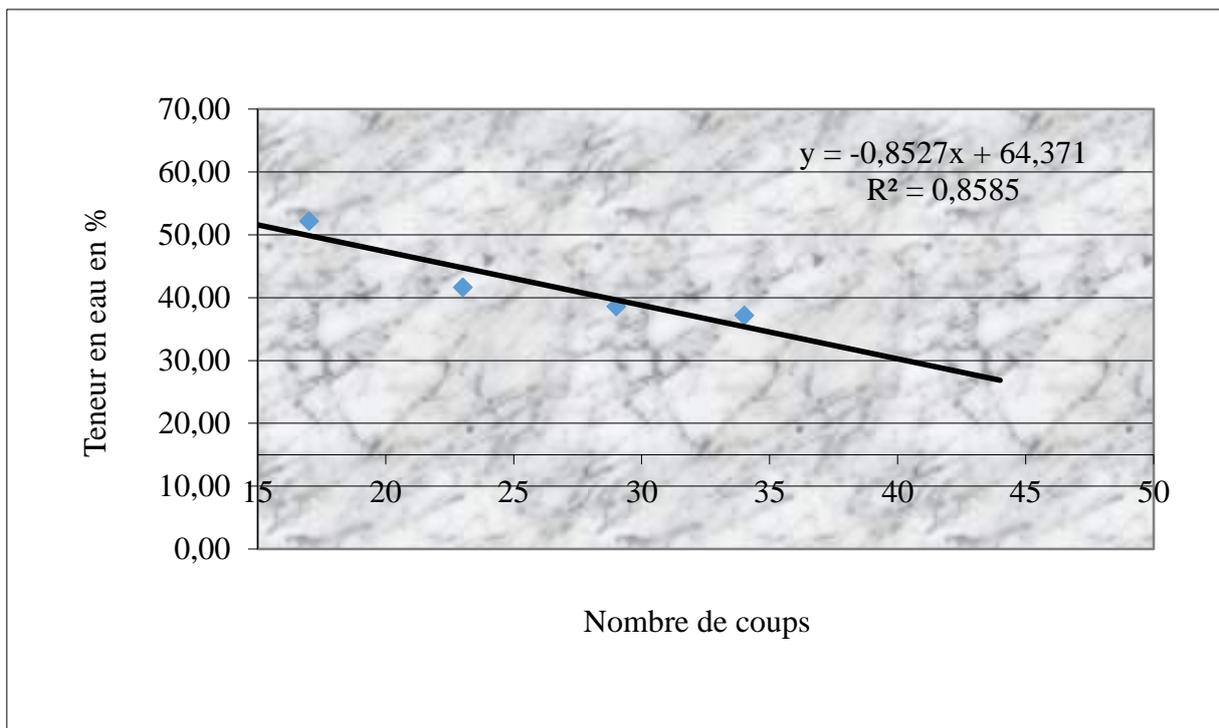


Figure 30: Résultats des essais limites de la couche 4

\*\*\*\*\*

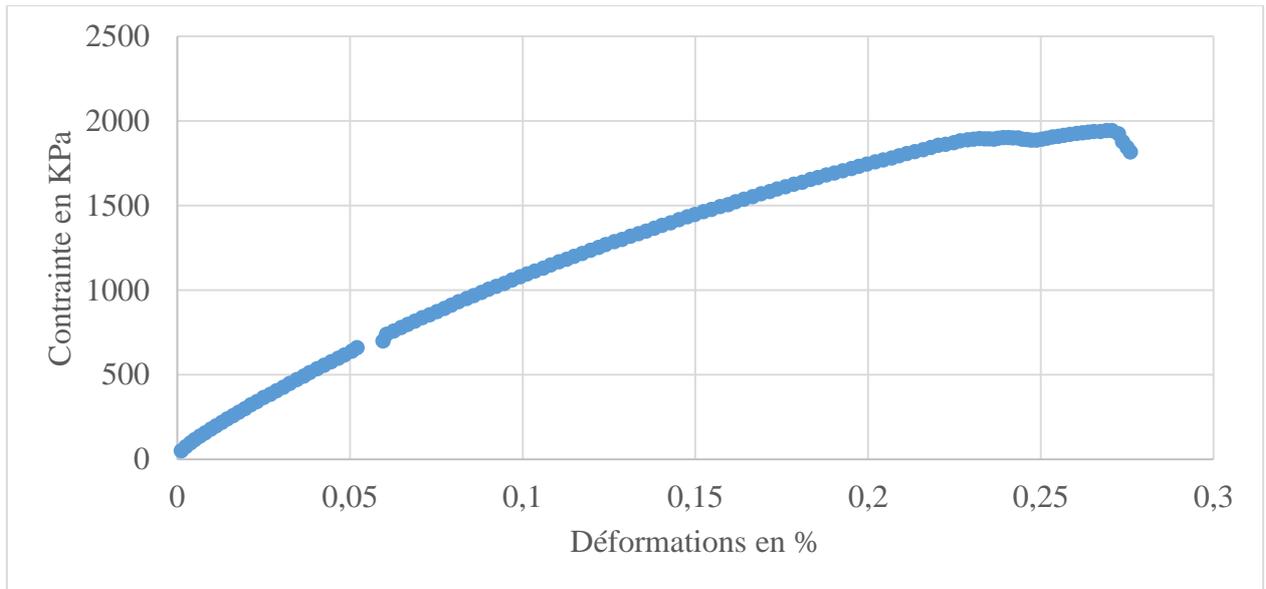


Figure 31: courbe contrainte déformation de la couche 1 crue

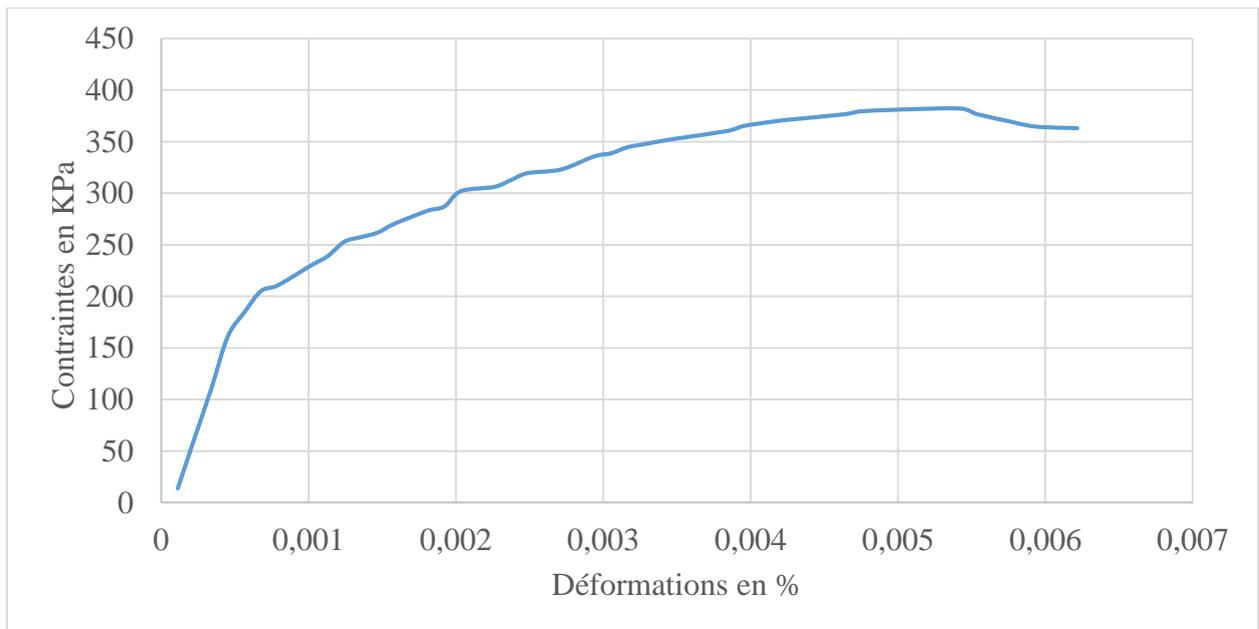


Figure 32: courbe contrainte déformation de l'échantillon 1 de la couche 2 crue

\*\*\*\*\*

# CARACTERISATION GEO-MECANIQUE DE LA LATERITE DE KAMBOINSIN

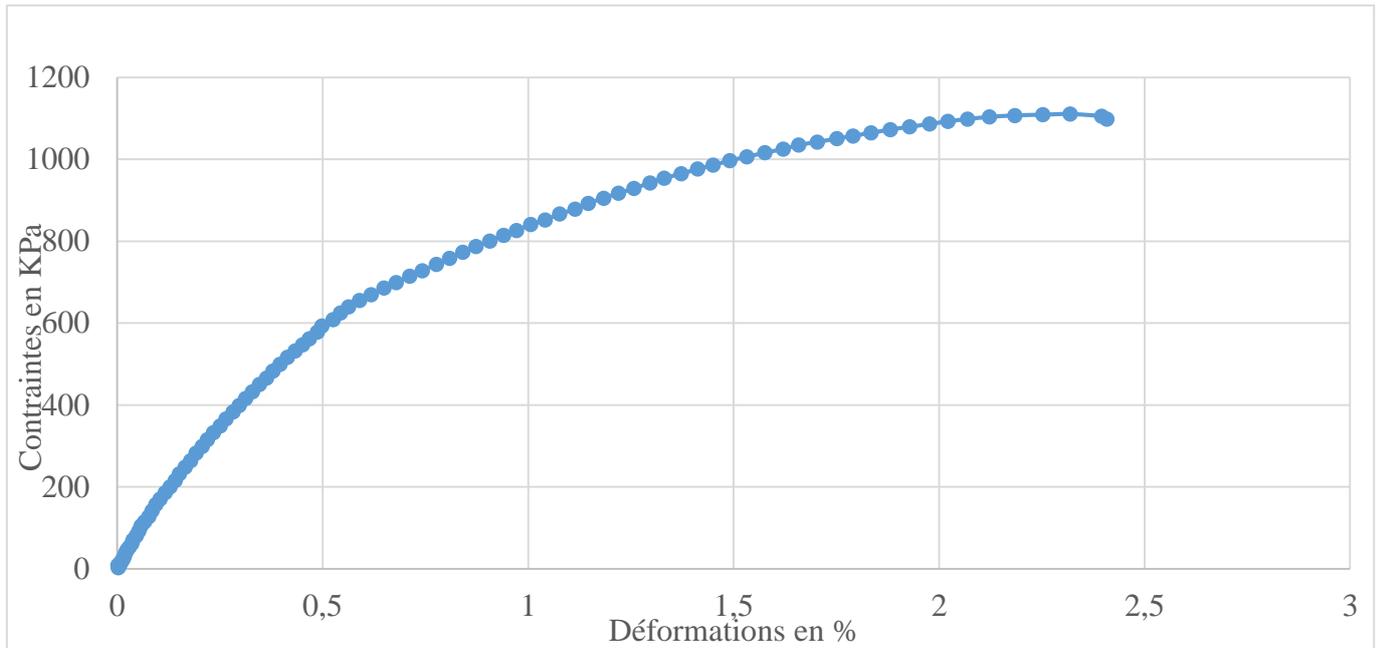


Figure 33: courbe contrainte déformation de l'échantillon 1 de la couche 3 crue

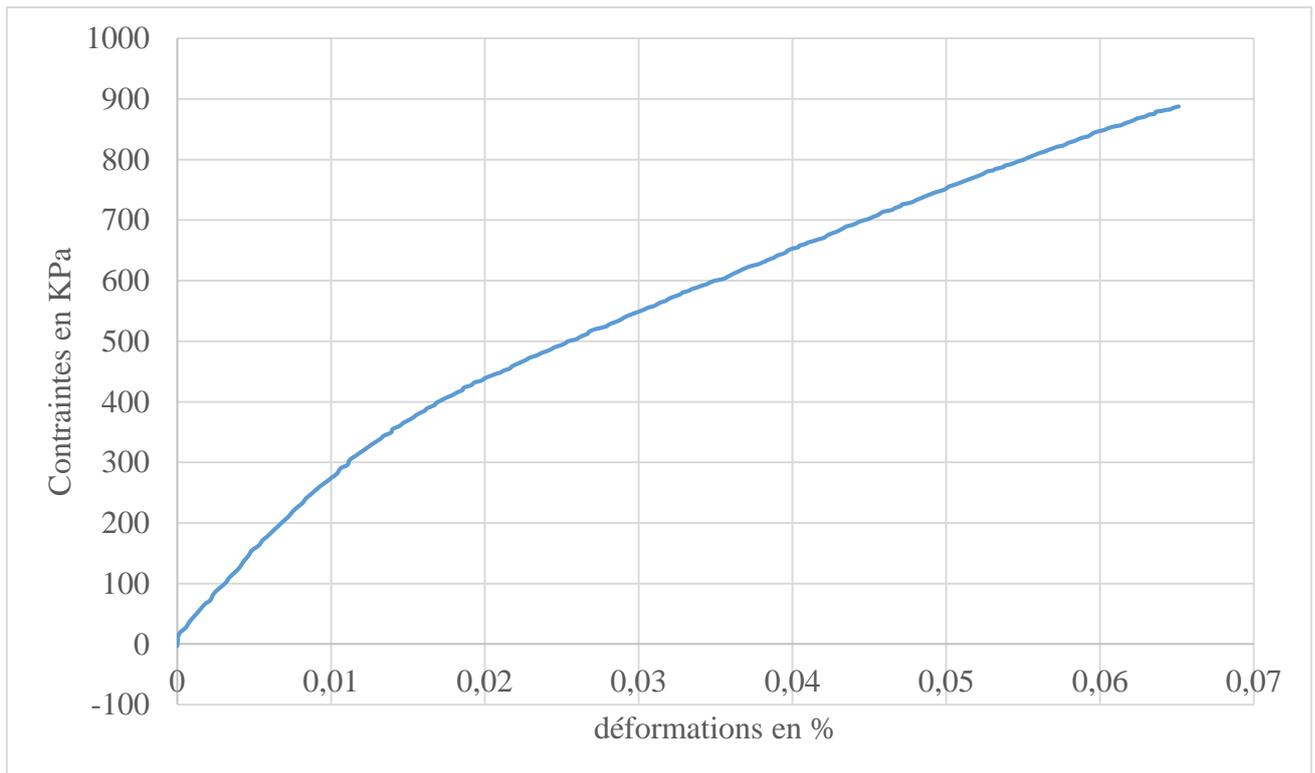


Figure 34: courbe contrainte déformation de la couche 4 crue

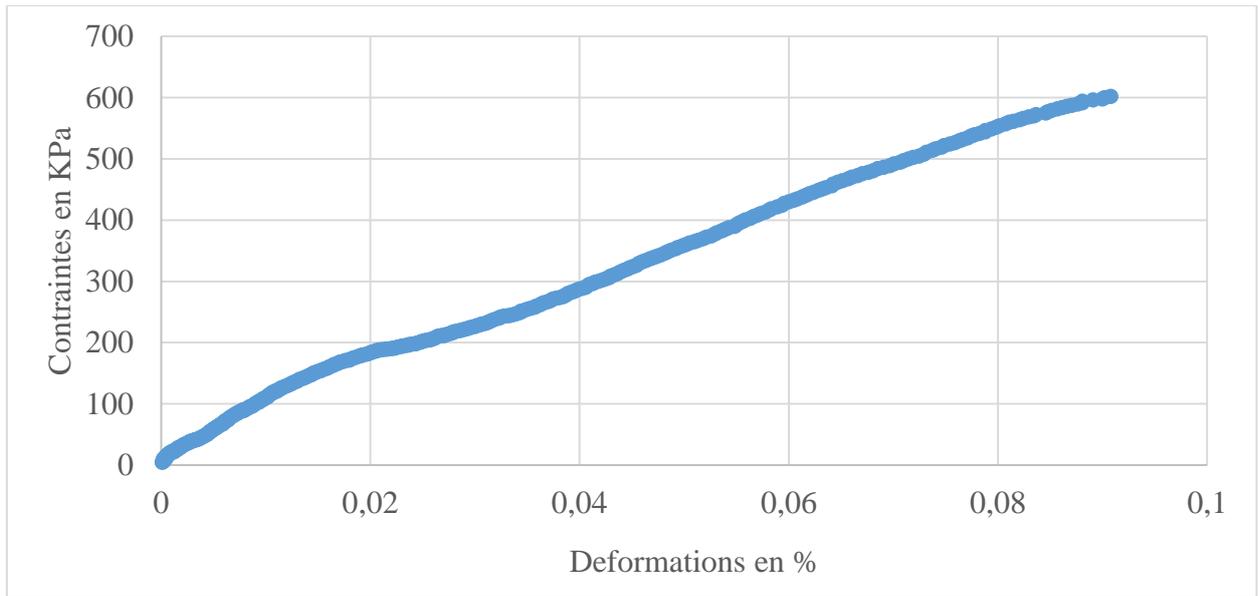


Figure 35: : courbe contrainte déformation de la couche 1 à 1% de ciment

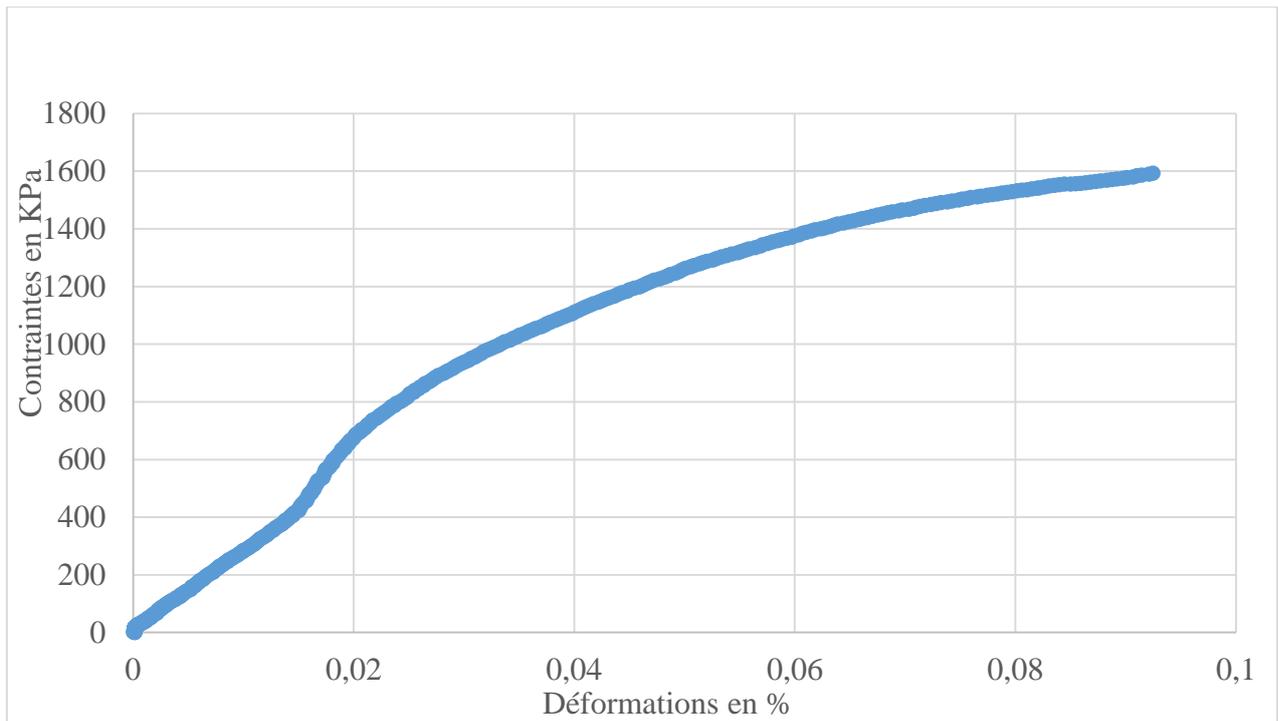


Figure 36: courbe contrainte déformation de la couche 1 à 2% de ciment



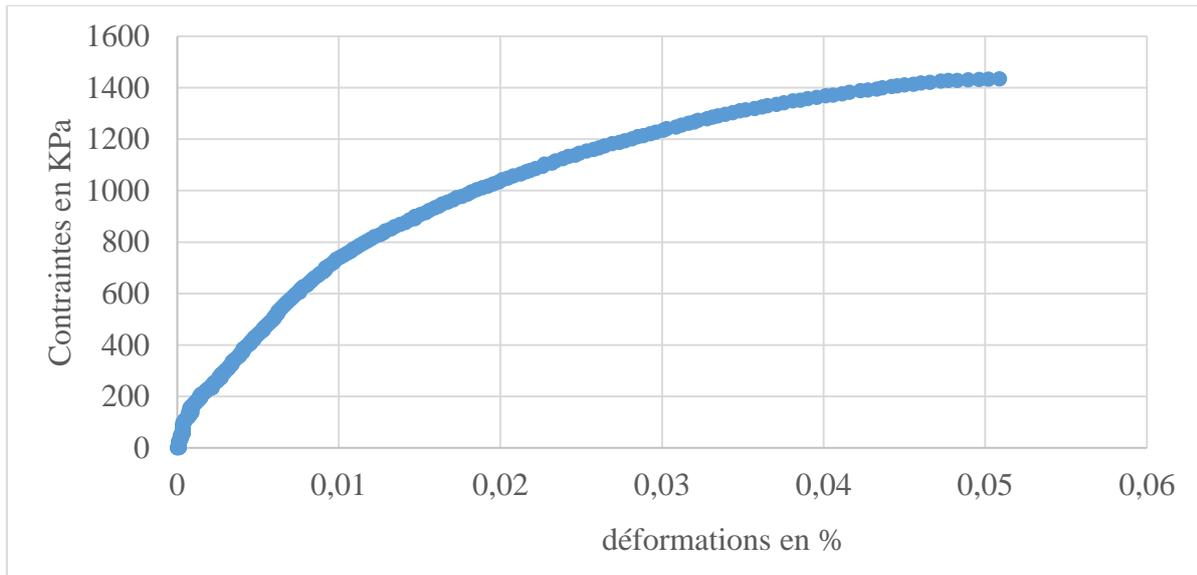


Figure 39: courbe contrainte déformation de la couche 2 à 3% de ciment

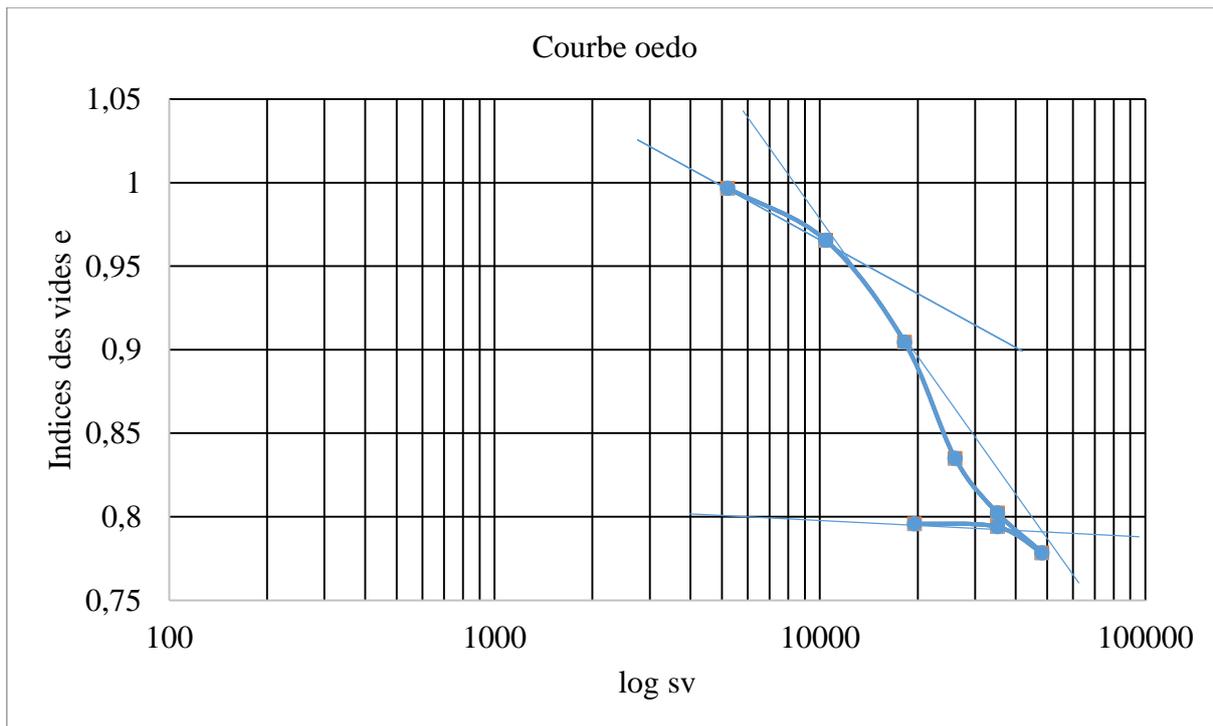


Figure 40: Courbe de l'essai œdométrique de la couche 1 par la méthode de casagrande

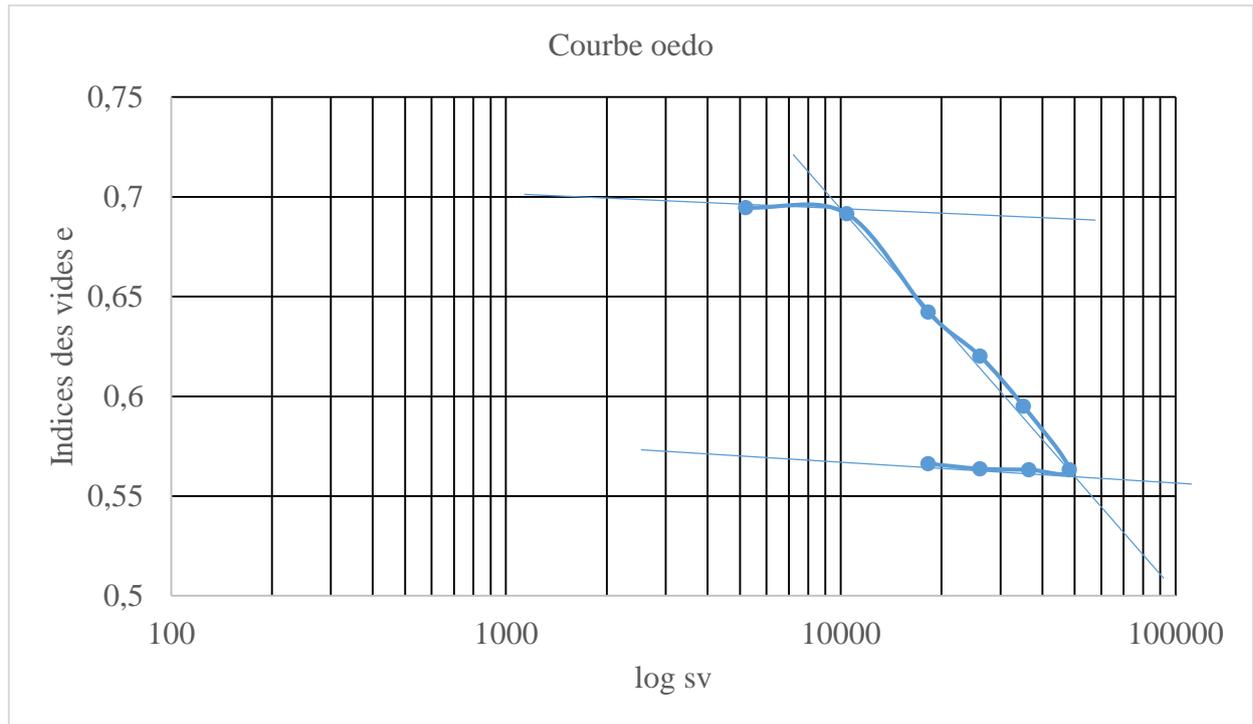


Figure 41: Courbe de l'essai œdométrique de la couche 4 par la méthode de casagrande