

**UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS**

**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**



BP. 368 GOMA

[www.ulpgl.net](http://www.ulpgl.net)

**ETUDE GEOTECHNIQUE DU SOL EN VUE DE  
SON UTILISATION COMME MATERIAU DE  
CONSTRUCTION ROUTIERE : APLICATION  
AUX SOLS DE CARRIERE DE  
KANYARUCHINYA**

Par : **MALO DIDO David**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de  
License en Sciences de l'Ingénieur

**Option** : Génie Civil

**Directeur** : Dr. Ir. **ALINABIWE Ally**

**Encadreur** : Ir **PATERNE CIRHUZA BADESIRE**

**ANNEE ACADEMIQUE 2023 - 2024**

# Epigraphe

*« Les rues sont les artères de la ville »*

**Jan Gehl**

## Dédicace

Notre travail est spécialement dédié à notre grand-père Constantin MALO.

*MALO DIDO David*

## Remerciements

Il serait ingrat de notre part d'affirmer que ce travail est uniquement le fruit de nos propres efforts et nos propres moyens sans reconnaître la grâce et les coups de pouce venant de partout pour cet accomplissement.

Nous remercions l'Éternel Dieu Tout puissant pour les merveilles de sa grâce et sa bonté infini ; sans le souffle de vie, ce travail n'existerait pas.

Nous remercions tout le personnel académique de l'Université Libre des Pays de Grands Lacs en général et la faculté des Sciences et Technologies en particulier pour le partage de la connaissance. Nos sentiments de gratitude s'adressent d'une façon particulière à notre directeur le Dr. Ir ALINABIWE Ally et notre encadreur Ir Paternine BADESIRE pour leur encadrement de qualité, ainsi que leur patience envers nous.

Nos remerciements s'adressent également à nos parents Richard DIDO et Georgine MAGASI, à notre grand-père Constantin MALO, à nos frères et sœurs ainsi que toute la famille MALO pour le soutien inconditionnel.

À nos amis, camarades et compagnons de lutte Pascal CHOKOLA, Jonas KULIMUSHI, Merveille KENA, David MAYEMBE, Gédéon IRAGI, Jacques SIMBA, Dorcas ZO, José RAMAZANI, Prince KIRANGA, Prince CIGOGO, Victor BWANESHE, Ibrahim UWEZO et toute la L3/GC 2023-2024 pour le soutien inébranlable tout au long de ce parcours exigeant ; leur solidarité et amitié ont été d'un grand réconfort.

À tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce travail, recevez ici les sentiments les plus profonds de notre gratitude.

*MALO DIDO David*

## Résumé

Ce travail porte sur l'étude géotechnique d'un sol en vue de son utilisation comme matériau de remblai routier, avec une application spécifique au sol de la carrière de KANYARUCHINYA, située dans le territoire de Nyiragongo. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'aptitude de ces matériaux à être utilisés dans la construction routière. Pour ce faire, des investigations de terrain ont été menées, suivies d'une campagne d'essais en laboratoire portant notamment sur la détermination des caractéristiques physiques et mécaniques tels que la compacité (essai Proctor modifié) ainsi que la portance (essai CBR). Ces essais ont été réalisés au laboratoire de génie civil de l'ULPGL/Goma. Trois échantillons de sol, différenciés par leur couleur (rougeâtre, brun et chocolat foncé), ont été étudiés. Les résultats ont révélé une plasticité non mesurable, probablement liée à l'origine géologique des sols. Les teneurs en eau optimales et les densités sèches maximales obtenues sont respectivement de : 19,34 % et 1,249 g/cm<sup>3</sup> ; 17,14 % et 1,178 g/cm<sup>3</sup> ; 18,2 % et 1,138 g/cm<sup>3</sup>. L'indice CBR le plus élevé enregistré après 4 jours d'immersion est de 17,31 % à 95 % de l'OPM, indiquant une bonne portance. Toutefois, ces matériaux ne peuvent être utilisés à l'état naturel que comme couche de forme ou plate-forme, ou encore dans la construction de routes non revêtues.

Mots-clés : étude géotechnique, sol, remblai routier, portance, CBR, KANYARUCHINYA.

## Abstract

This study focuses on the geotechnical characterization of soil for its potential use as road embankment material, with a particular emphasis on soil extracted from the KANYARUCHINYA quarry, located in the Nyiragongo region. The primary objective is to assess the suitability of these materials for road construction. To achieve this, field investigations were conducted, followed by a series of laboratory tests aimed at determining physical and mechanical properties as compaction characteristics (Modified Proctor test), and load-bearing capacity (California Bearing Ratio, CBR test). These analyses were carried out at the Civil Engineering Laboratory of ULPGL/Goma. Three distinct soil samples, categorized by their colors (reddish, brown, and dark chocolate), were studied. The results revealed a non-measurable plasticity, likely associated with the geological origin of the soils. The optimum moisture contents and maximum dry densities obtained were 19.34% and 1.249 g/cm<sup>3</sup>; 17.14% and 1.178 g/cm<sup>3</sup>; 18.2% and 1.138 g/cm<sup>3</sup>, respectively. The highest CBR value recorded after four days of immersion was 17.31% at 95% of the Optimum Proctor Moisture, suggesting adequate bearing capacity. However, these materials are only suitable in their natural state for use as subgrade layers or platforms, particularly in unpaved road construction.

Keywords: geotechnical study, soil, road embankment, bearing capacity, CBR, KANYARUCHINYA.

## Table de matières

Epigraphe .....	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table de matières .....	vi
Liste de notations et abréviations .....	x
Liste de tableaux .....	xi
Liste de figures.....	xii
<b>0. INTRODUCTION GENERALE .....</b>	<b>1</b>
0.1 Contexte/Généralités sur le thème .....	1
0.2 Identification et formulation du problème .....	2
0.3 Questions de recherche .....	3
0.4 Formulation des hypothèses.....	3
0.5 Justification du choix du sujet et motivations.....	4
0.6 Énoncé des objectifs de recherche .....	4
0.6.1 L'objectif général.....	4
0.7 Méthodologie .....	5
0.8 Structure du mémoire/ Subdivision du travail .....	5
<b>CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SOLS ET ROUTES .....</b>	<b>7</b>
1.1 ORIGINE ET FORMATION DU SOL .....	7
1.2 DESAGREGATION PHYSIQUE DES SOLS.....	7
1.3 PROCESSUS D'ALTERATION CHIMIQUE .....	8

1.4	PHASES CONSTITUTIVES DU SOL [6].....	8
1.4.1	La phase solide ou le squelette solide.....	8
1.4.2	La phase liquide.....	8
1.4.3	La phase gazeuse.....	9
1.5	PRINCIPAUX TYPES DES SOLS.....	9
1.5.1	Les sols à gros grains ou sols grenus [3].....	10
1.5.2	Sols à grains fins.....	11
1.6	DOMAINES D'APPLICATION.....	12
1.6.1	Utilisation du sol comme assise de fondations des ouvrages.....	13
1.6.2	Utilisation du sol comme matériau de construction.....	14
1.6.3	Cas de soutènement des terres.....	14
1.7	GENERALITES SUR LES ROUTE.....	15
1.7.1	Importance et but de la route.....	15
1.7.2	Structure de la route.....	15
1.8	CONCLUSION PARTIELLE.....	18
	<b>Chapitre 2 : LA METHODOLOGIE.....</b>	<b>19</b>
2.1	MATÉRIAU ET ORIGINE.....	19
2.1.1	Matériau.....	19
2.1.2	Origine de matériau.....	19
a)	Aspect géographique.....	20
b)	Coordonnées géographique.....	21
c)	Relief.....	21
d)	Climat et température.....	21
2.2	PLAN EXPÉRIMENTAL.....	22
2.2.1	Objectif de l'étude.....	22
2.2.2	Hypothèse de travail.....	22
2.2.3	Variables étudiées.....	22
2.2.5	Dispositif expérimental.....	23

2.2.6. Méthodologie .....	23
2.2.7. Type de plan expérimental.....	23
2.2.8. Présentation et interprétation des résultats.....	24
2.3. ÉCHANTILLONNAGE .....	24
2.4 CARACTERISATION DES MATÉRIAUX.....	25
2.4.1 Caractérisations physiques.....	25
2.4.2 Caractérisations mécaniques .....	38
2.5 CLASSIFICATIONS .....	46
2.5.1 Classification suivant le CEBTP- 1980 .....	47
2.5.2 Classification GTR.....	50
2.6 ETUDE D'APPLICATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE .....	51
2.6.1 Couche de forme .....	51
2.6.2 Couche de Fondation .....	51
2.6.3 Couche de base .....	52
2.7 CONCLUSION PARTIELLE .....	53
<b>Chapitre 3. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RÉSULTATS ..</b>	<b>54</b>
3.1 LES CARACTERISTIQUES DES SOLS DE CARRIÈRE DE KANYARUCHINYA .....	54
3.1.1 Caractéristiques physiques.....	54
3.1.2 Caractéristiques mécaniques .....	61
3.2 CONFORMITÉ DES SOLS DE LA CARRIÈRE DE KANYARUCHINYA DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE.....	65
3.2.1 Route revêtue .....	65
3.2.2 Route non revêtue .....	66
3.3 CONCLUSION PARTIELLE .....	67
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>68</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>70</b>

a) Analyse granulométrique ECH1 .....	70
b) Teneurs en eau naturelles .....	72
c) Mases volumiques absolues .....	74
d) Masses volumiques apparentes .....	76
e) Essai Proctor modifié .....	77
f) Résultats des essais CBR .....	78
g) Abaque de correspondance CBR .....	79
<b>Bibliographie.....</b>	<b>81</b>

## Liste de notations et abréviations

<b>AFNOR</b> :	Association Française de Normalisation
<b>Cu</b> :	Coefficient d'uniformité
<b>Cc</b> :	Coefficient de courbure
<b>KN</b> :	Kilo Newton
<b>Kg</b> :	Kilogramme
<b>cm<sup>3</sup></b> :	Centimètres cube
<b>mm</b> :	Millimètre
<b>e</b> :	Indice des vides
<b>n</b> :	Porosité
<b>NF</b> :	Norme Française
<b>CBR</b> :	California Bearing Ratio
<b>CEBTP</b> :	Centre d'essais du bâtiment et des travaux publics
<b>GTR</b> :	Guide de Terrassement Routier
<b>LCPC</b> :	Laboratoire Central des Ponts et Chaussées
<b>ULPGL</b> :	Université Libre des Pays de Grands Lacs
<b>Wp</b> :	Limite de plasticité
<b>Wl</b> :	Limite de Liquidité
<b>Ip</b> :	Indice de Plasticité
<b>Ic</b> :	Indice de consistance
<b>Il</b> :	Indice de liquidité
<b>PM</b> :	Proctor Modifié
<b>PN</b> :	Proctor Normal
<b>VBS</b> :	Valeur au bleu de méthylène
<b>W</b> :	Teneur en eau naturelle
<b>Wopt</b> :	Teneur en eau optimale

## Liste de tableaux

Tableau 1-1 Classement des matériaux suivant leur diamètre selon l'A.S.T.M .....	10
Tableau 1-2 Classement des matériaux suivant leur diamètre selon l'A.B.E.M .....	10
Tableau 1-3 Classification dite internationale analogue à celle proposée par ATTEBERG ...	11
Tableau 1-4 Classification du silt à grain fins .....	11
Tableau 2-1 Classe de sol selon le coefficient d'uniformité [11] .....	32
Tableau 2-2 Degré de plasticité de sol [6] .....	33
Tableau 2-3 Classification des sols graveleux [14] .....	47
Tableau 2-4 Classification des sols sableux [14] .....	48
Tableau 2-5 Classification des sols fins .....	49
Tableau 2-6 Classification GTR .....	50
Tableau 2-7 Les valeurs caractérisant la couche de forme [15] .....	51
Tableau 2-8 Fuseau granulométrique couche de fondation .....	52
Tableau 2-9 Différentes valeurs caractérisant la couche de fondation .....	52
Tableau 2-10 fuseau granulométrique couche de base .....	53
Tableau 2-11 Différentes valeurs caractérisant la couche de base .....	53

## Liste de figures

Figure 2-1 Zone d'étude .....	20
Figure 2-2 Carrière de KANYARUCHINYA (Kilima muchanga) .....	24
Figure 2-3 Echantillons remaniés .....	25
Figure 2-4 Série de tamis normalisés .....	30
Figure 2-5 Types des sols en fonction de leur taille [7].....	31
Figure 2-6 Exemple des courbes granulométriques.....	31
Figure 2-7 Etats diverses du sol .....	32
Figure 2-8 Illustration de l'essai au pénétromètre à cône .....	35
Figure 2-9 les moules Proctor .....	40
Figure 3-1 Limite de liquidité ECH1 .....	56
Figure 3-2 Limite de liquidité ECH2 .....	56
Figure 3-3 Limite de liquidité ECH3 .....	57
Figure 3-4 Analyse granulométrique ECH1 .....	58
Figure 3-5 Analyse granulométrique ECH1 .....	59
Figure 3-6 Analyse granulométrique ECH3 .....	60
Figure 3-7 Courbe de tendance Proctor ECH1 .....	61
Figure 3-8 Courbe de tendance Proctor ECH2 .....	62
Figure 3-9 Courbe de tendance Proctor ECH3 .....	63
Figure 3-10 Structure d'une chaussée .....	65

## 0. INTRODUCTION GENERALE

La gestion des infrastructures routières représente un défi crucial pour le développement durable et l'aménagement du territoire [1].

Choisir des matériaux de remblais adaptés est fondamental pour assurer la stabilité et la longévité des constructions [2]. L'analyse géotechnique des sols offre une évaluation de leurs propriétés mécaniques et physiques, qui sont essentielles pour déterminer leur pertinence en tant que matériau de remblais [3]. Ce mémoire se penche sur le sol de carrière de KANYARUCHINYA, une ressource d'approvisionnement précieuse pour des projets d'infrastructure routière dans la ville de Goma.

### 0.1 Contexte/Généralités sur le thème

Avant d'utiliser un sol, que ce soit comme support de construction ou comme matériau de remblai, il est essentiel d'en déterminer les propriétés. Cela implique une phase d'identification et de classification, qui permet de regrouper les sols présentant des caractéristiques similaires et de prédire leur comportement en situation réelle. Ce processus passe par le prélèvement d'échantillons sur lesquels sont réalisés des essais en laboratoire, en vue d'évaluer leur aptitude à l'usage prévu. Cette évaluation permet notamment de déterminer si le matériau peut être utilisé en l'état ou s'il nécessite un traitement préalable.

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'étude du sol de la carrière de KANYARUCHINYA, située à proximité de la ville de Goma. En effet, dans les projets de génie civil, l'usage de matériaux locaux est souvent privilégié afin de réduire les coûts liés au transport des matériaux [4].

## 0.2 Identification et formulation du problème

Certaines classes de sols sont utilisés comme corps de chaussée (couche de base et couche de fondation) suivant leurs caractéristiques qui doivent respecter quelques conditions techniques. L'ingénieur chargé de concevoir et de construire une infrastructure doit connaître parfaitement les différentes propriétés du sol sur lesquelles l'ouvrage doit être érigé [3]. Malheureusement beaucoup de ces sols sont utilisés dans la construction de nos routes étant extraits des différentes carrières ; mais très peu de données géotechniques sont connus et peut être inexistantes dans la région pour servir de guide aux ingénieurs et chercheurs dans le domaine. Cela pourrait être dû au phénomène de compétition des marchés entre les entreprises, qui par confidentialité préfèrent garder privées les données recueillies. Rendre public et accessible celles-là, permettrait aux nouvelles entreprises de gagner en temps et en économie ; plus particulièrement pour les futurs chercheurs (Etudiants de la FST ULPGL/Goma ; souhaitant travailler sur des projets routiers dans le cadre de TFE). S'agissant de ce sol, les données géotechniques étant connues et accessibles (dans la bibliothèque), la perte de temps au laboratoire et les frais y afférents pourront être minimisés.

Malgré la disponibilité du sol provenant de la carrière de KANYARUCHINYA, son utilisation dans les travaux de remblai routier demeure peu documentée, voire absente dans la littérature technique locale. Aucune étude approfondie ne semble avoir été réalisée pour évaluer ses caractéristiques géotechniques en vue de son application en infrastructure routière.

Or, l'utilisation de matériaux non caractérisés présente un risque important pour la durabilité et la sécurité des ouvrages. En l'absence de données précises sur la portance, la compactabilité ou encore le comportement en conditions humides, il est difficile de recommander ce sol pour des usages spécifiques dans la structure d'une chaussée. L'ingénieur chargé de concevoir et de construire une infrastructure doit connaître parfaitement les différentes propriétés du sol sur lesquelles l'ouvrage doit être érigé [3].

Ainsi, la présente étude se donne pour objectif de caractériser ce sol par des essais de laboratoire standards afin de juger de son aptitude à être utilisé comme matériau de remblai routier. Cette démarche vise à valoriser un matériau localement disponible tout en garantissant la qualité technique des infrastructures.

### **0.3 Questions de recherche**

Ce manque d'informations techniques soulève plusieurs interrogations, à savoir si :

- Le sol de KANYARUCHINYA présenterait-il des propriétés géotechniques compatibles avec une utilisation en remblai routier ?
- Ce sol pourrait-il être utilisé tel quel ou nécessite-t-il un traitement ou un mélange avec d'autres matériaux ?
- À quel niveau de la structure de la chaussée (plate-forme, forme, fondation) ce sol pourrait-il être appliqué en toute sécurité ?

### **0.4 Formulation des hypothèses**

Dans le cadre de cette étude, et en réponse aux questions soulevées, les hypothèses suivantes sont proposées :

- Le sol de la carrière de KANYARUCHINYA présenterait des caractéristiques granulométriques et physiques compatibles avec les exigences techniques d'un matériau de remblai routier, notamment en couche de forme ou de plate-forme.
- Ce sol posséderait une portance suffisante, exprimée par un indice CBR  $\geq 10\%$  à  $95\%$  de l'Optimum Proctor Modifié (OPM), conformément aux critères habituellement admis pour les matériaux utilisés en remblai routier.

- Le matériau pourrait être utilisé sans traitement préalable dans certaines couches de la chaussée, à condition d'être correctement compacté dans des conditions proches de l'humidité optimale.

## **0.5 Justification du choix du sujet et motivations**

L'intérêt de notre travail est de contribuer scientifiquement dans l'identification des sols de la carrière de KANYARUCHINYA en vue leur meilleur usage en construction routière dans la ville de Goma et ses environs. Cette recherche pourra servir aux ingénieurs de guide pratique en vue de construire des ouvrages (routes) durables, économiques et également à tout autre chercheur intéressé dans ce domaine.

Le choix de la carrière de KANYARUCHINYA est motivé par le fait qu'elle présente une superficie exploitable importante avec garantie et se trouve également sur la route nationale RN2 (GOMA-RUTSHURU) à environ 10 km au Nord. Cette carrière fait actuellement partie des plus utilisées de la région.

L'utilisation de ce sol localement disponible permettrait de réduire les coûts liés au transport et à l'approvisionnement en matériaux, tout en respectant les performances mécaniques minimales requises pour les travaux routiers.

## **0.6 Énoncé des objectifs de recherche**

### **0.6.1 L'objectif général**

L'objectif général de cette étude est d'évaluer l'aptitude du sol provenant de la carrière de KANYARUCHINYA à être utilisé comme matériau de remblai dans les travaux de construction routière.

### **0.6.2 Les objectifs opérationnels/spécifiques**

Pour atteindre cet objectif global, plusieurs objectifs spécifiques sont définis :

- Caractériser les propriétés géotechniques du sol de la carrière de KANYARUCHINYA, notamment à travers des essais de laboratoire (analyse granulométrique, limites d'Atterberg, essai Proctor modifié, essai CBR, etc.) ;
- Déterminer la portance et la compactabilité du sol, éléments essentiels pour juger de son comportement sous charge et de sa stabilité à long terme ;
- Identifier les utilisations possibles de ce sol dans la structure d'une chaussée routière, en fonction des résultats obtenus, notamment s'il peut être utilisé en couche de forme, de fondation ou uniquement comme plate-forme.

Ces objectifs permettront de formuler des recommandations pratiques pour une meilleure valorisation de ce matériau local, tout en assurant la qualité et la pérennité des infrastructures routières construites dans la ville de Goma.

## **0.7 Méthodologie**

La présente étude adopte une démarche expérimentale visant à caractériser les propriétés géotechniques du sol issu de la carrière de KANYARUCHINYA, afin d'en évaluer l'aptitude à être utilisé comme matériau de remblai routier. Elle s'articule en plusieurs étapes clés, réparties entre les travaux de terrain et les essais en laboratoire. Cela pourra inclure de :

- Faire l'étude documentaire sur les sols ;
- De prélever des échantillons du site (carrière de KANYARUCHINYA) ;
- De procéder aux essais de laboratoire en vue de la détermination des caractéristiques physiques (teneur en eau naturelle, masse volumique, limites d'Atterberg) et mécaniques (indice CBR, l'optimum Proctor).

## **0.8 Structure du mémoire/ Subdivision du travail**

Hormis l'introduction et la conclusion générale, le présent travail est constitué de trois chapitres, dont le premier présente un aperçu général sur les sols, le second parle de la

méthodologie et le troisième basé sur la présentation des résultats obtenus ainsi que leurs interprétations.

# CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SOLS ET ROUTES

Dans ce chapitre, nous parlerons des sols en général ; notamment l'origine et formation des sols, les éléments le constituant, les propriétés, les types des sols et les différents domaines d'application de ce dernier.

## 1.1 ORIGINE ET FORMATION DU SOL

Un sol est un agrégat naturel des grains avec ou sans constituant organiques provenant de l'altération physique ou chimique des roches et pouvant se désagréger facilement dans l'eau. C'est aussi un mélange des particules solides et des vides remplis d'air et/ou d'eau. Les sols sont des matériaux meubles, poreux, hétérogènes et souvent anisotropes. Les matériaux minéraux ou organiques sont généralement à l'état des grains ou des particules dont les formes et les dimensions sont essentiellement variables.

Le sol se forme d'abord à partir d'une roche dure formant la croûte terrestre. On nomme cette roche la 'roche-mère'. Le sol correspond précisément à la couche qui se trouve au-dessus de cette roche-mère [6].

## 1.2 DESAGREGATION PHYSIQUE DES SOLS

Il est important de noter que les mécanismes de désagrégation physique ne modifient pas la nature et la composition minéralogique de la roche mère.

L'humidité est l'agent principal de désagrégation physique. En effet, l'eau qui gèle dans les minces fissures de la roche y exerce une pression suffisante pour en provoquer l'éclatement en surface. Le phénomène répète de gels et dégels agrandissent les fissures et favorisent le découpage de la roche en des débris de plus en plus petits [6].

### **1.3 PROCESSUS D'ALTERATION CHIMIQUE**

Ici, la composition minéralogique ne restera pas intacte, elle sera modifiée contrairement à la désagrégation physique, ce processus est dû essentiellement à l'action de l'eau et de la température qui provoque le phénomène tel que : l'oxydation, la réduction, l'hydrolyse des roches qui donnent des produits dont la structure est différente des roches mères [6]

### **1.4 PHASES CONSTITUTIVES DU SOL [6]**

Un sol est un mélange d'éléments solides constituant le squelette solide d'eau pouvant circuler ou non entre les particules. Il est donc en général constitué de trois phases : Sol- phase solide, phase liquide, phase gazeuse. Entre les grains du squelette, les vides peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz ou les deux à la fois. Le gaz contenu dans les vides entre les particules est généralement de l'air lorsque le sol est sec ou un mélange d'air et de vapeur d'eau lorsque le sol est humide (cas le plus fréquent).

#### **1.4.1 La phase solide ou le squelette solide**

Elle est constituée par des particules minérales ou organiques. Les particules formées par l'altération physique ou mécanique sont généralement constituées des fragments de la roche mère renfermant chacun un ou plusieurs minéraux (leur forme est régulière). Celles de l'altération chimique ont une forme irrégulière.

#### **1.4.2 La phase liquide**

Elle est composée de l'eau se trouvant dans les vides (interstices). Ces interstices peuvent être en partie ou en totalité occupés par de l'eau. On dit que le sol est saturé, lorsque les interstices sont totalement occupés par de l'eau ; cette eau contient des électrolytes dissociés en anions et

en cations des matières organiques et colloïdes en suspension. Dans certains cas, elle contient de gaz dissous, en général cette eau n'est pas pure.

### 1.4.3 La phase gazeuse

Elle est constituée des gaz et des vapeurs d'eau se trouvant dans les interstices. Toutes les particules des sols sont entourées d'une couche des molécules d'eau, la couche d'eau absorbée sous forme de pellicule est une couche d'eau solidement liée à la surface de la partie du sol par les forces électro-moléculaires. En effet, les particules de la fraction très fines des sols sont généralement de nature argileuse. Elles portent à leurs surfaces des charges électriquement négatives. Le champ électrique créé par ces charges oriente les molécules dipolaires d'eau au voisinage de la particule. Les premières couches de molécules d'eau sont fortement liées [7].

## 1.5 PRINCIPAUX TYPES DES SOLS

A la suite de la décomposition physique (mécanique) et chimique des roches, on obtient des sols autochtones, les sols résiduels, et les sols transportés [7].

**a. Les sols autochtones** : sont ceux qui résultent de l'altération du substratum rocheux qu'ils recouvrent.

**b. Les sols résiduels** : ils sont répandus et résultent de la désagrégation de la roche sous-jacente ou des roches ayant de plus en plus disparu par suite d'une décomposition antérieure. Ces sols ne présentent pas de parenté totale avec les substratums actuels.

Ce sont des sols à dominance argileuse.

**C. Les sols transportés** : on en distingue

- Le transport des formations résiduelles par glissement ou écoulement visqueux colluvion de pente. Ce transport se limite dans l'espace.
- Le transport par le vent des lœss, limons et sables éoliens ;

- Le transport par les cours d'eau : il s'agit des dépôts alluvionnaires constitués par les particules transportées par l'eau de ruissellement et des dépôts lacustres ou de marins (très homogènes).

Mis à part cette classification, il existe deux grains des catégories de sol : les sols à grains fins et les sols à gros grains.

### 1.5.1 Les sols à gros grains ou sols grenus [3]

Autrement dénommés sols pulvérulents regroupant les graviers et les sables. Leur identification est basée sur la grosseur des grains selon l'ASTM (American Society of Testing Materials). On a la classification suivante en fonction du diamètre de grains donnée dans le tableau 1.1

Tableau 1-1 Classement des matériaux suivant leur diamètre selon l'A.S.T.M

Matériau	Cailloux	Gravier	Sable gros	Sable moyen	Sable fin
Diamètre	> 20.0 mm	4.75 à 20.0 mm	2.00 à 4.75 mm	0.425 à 2.00 mm	0.075 à 0.425 mm

La Commission Mécanique des sols de l'A.B.E.M (Association Belge pour l'Etude, l'Essai et l'Emploi des Matériaux) classifie selon le tableau 1.2 les sols à gros grains de la manière suivante :

Tableau 1-2 Classement des matériaux suivant leur diamètre selon l'A.B.E.M

Matériau	Cailloux	Gravier	Sable grossier	Sable fin
Diamètre	> 20.0 mm	2 à 20.0 mm	0.2 à 2 mm	0.06 à 0.2 mm

La classification dite internationale (analogue à celle proposée par Atterberg) donne les indications reprises dans le tableau 1.3 :

Tableau 1-3 Classification dite internationale analogue à celle proposée par ATTEBERG

Matériau	Enrochement	Cailloux	Gravier	Sable gros	Sable fin
Diamètre	> 20.0 mm	20 à 200 mm	2 à 20 mm	0.2 à 2 mm	0.02 à 0.2 mm

On peut attribuer à ces limites la signification physique suivante :

- 0.02 mm : A partir de cette dimension, les grains deviennent visibles à l'œil nu.
- 0.2mm : C'est la limite de sable rude au toucher.
- 2mm : C'est la limite des particules portées par l'eau.

### 1.5.2 Sols à grains fins

Sols appelés aussi cohérents, ce sont les silts ou limon et l'argile. D'après les dimensions des grains, le tableau 1.4 donne la classification des deux matériaux et se présente comme suit :

Tableau 1-4 Classification du silt à grain fins

Selon A.B.E.M	Selon la classification internationale
Silt (limon) : $0.02 < \phi < 0.06$ mm	Silt (limon) : $0.002 < \phi < 0.02$ mm
Argile : $\phi > 0.002$	Argile : $0.0002 < \phi < 0.002$ mm
	Colloïde : $\phi > 0.0002$ mm

Toutefois, la différence entre les deux matériaux vient plus de leur comportement que de la grosseur des grains car leurs propriétés ne sont qu'indirectement liées à celles-ci.

En effet, l'argile est un agrégat de particules microscopiques dont les cristaux sont plus ou moins aplatis et est caractérisé par des propriétés colloïdales telles que la cohésion, la plasticité, la tendance à l'adsorption d'ions, etc.

Tandis que le silt est un agrégat de particules n'ayant pas ou presque pas de cohésion et de plasticité.

Ainsi pour distinguer le silt de l'argile, on recourt aux essais suivants :

➤ **Résistance à sec**

En frottant séparément un peu de silt et un peu d'argile entre les doigts, les particules de silt se désagrègent facilement, tandis que celle de l'argile crissent entre les doigts.

➤ **Dilatance ou shaking test**

Cet essai consiste à placer une pâte de silt ou d'argile dans la paume de la main en donnant de petits coups à la main pour la secouer, il apparaît un peu d'eau à la surface de la pâte quand il s'agit de silt et la surface devient brillante. Dans le cas de l'argile, il n'apparaît rien du tout et la surface de la pâte reste terne. Ceci s'explique par le fait que le silt est plus perméable.

➤ **Plasticité**

La plasticité est la propriété d'un sol de se déformer sans désagréger, l'essai consiste à rouler entre la paume de main et une surface plane et bien polie, un cordon d'argile. Si ce cordon se désagrège seulement à une épaisseur d'environ 3 mm ou moins, il s'agit de l'argile ou d'un sol argileux. S'il se désagrège à une épaisseur plus grande, il s'agit du silt.

## 1. 6. DOMAINES D'APPLICATION

Tous les travaux de bâtiment et de génie civil pendant leurs exécutions font intervenir le sol. Il est un matériau de base auquel l'Ingénieur civil ne peut se détourner pour la mise en œuvre de différents ouvrages. On peut citer par exemple :

- Les fondations des bâtiments, des ouvrages d'art, des ensembles industriels ;
- Les ouvrages de soutènement ;
- Les tunnels et travaux souterrains dans les sols ;
- Les barrages et digues en terre ;
- La stabilité des pentes naturelles, des talus et les travaux de stabilisation ;
- Les ouvrages portuaires et maritimes (fondations de quais, comportement des brise-lames,)
- Les terrassements des routes, autoroutes, voies ferrées ;

▸ L'amélioration et le renforcement des sols.

### **1.6.1. Utilisation du sol comme assise de fondations des ouvrages**

Le type des fondations d'un ouvrage dépend en grande partie de la nature du sol, c'est pourquoi avant de fonder sa structure, l'Ingénieur doit savoir à quel sol il doit faire face. Il fera recours à cet effet aux investigations in situ et de laboratoire ; on posera alors une fondation superficielle lorsque le bon sol se trouve à une faible profondeur et une fondation profonde lorsque le bon sol se trouve en grande profondeur.

Il est important de signaler que le sol qui servira d'assise pour la fondation n'est autre que le sol constitutif du terrain sur lequel on veut bâtir, c'est sur ce dernier que toutes les études géotechniques seront faites, par contre si les caractéristiques de ce sol ne sont pas satisfaisantes, pour stabiliser le terrain on amènera un sol d'apport ayant des propriétés améliorées.

Cependant, le problème le plus important à résoudre en matière de fondation est celui de tassement qui est l'enfoncement que subit l'ouvrage dans le sol sous l'action de son poids et des charges appliquées.

Ses causes sont multiples : mauvais drainage, erreur dans l'estimation des caractéristiques mécaniques du sol, sous dimensionnement des assises, etc.

Le tassement peut être total ou différentiel, sa grandeur ne doit pas dépasser une valeur critique donnée, laquelle dépend du type de l'ouvrage et de sa destination, de la nature du sol, etc. Toutefois le danger en cas de tassement total, uniforme, est moindre.

Dans certaines régions du globe en effet, certains immeubles sont encore en état d'utilisation bien que le tassement ait déjà dépassé les mètres, certaines maisons construites sur un sol plutôt marécageux accusent des tassements de plus d'un mètre sans qu'il ait apparition de fissure graves. Par ailleurs, les structures flexibles peuvent enregistrer de tassement sans que cela puisse nuire à leur destination.

Le tassement différentiel est par contre dangereux en ce sens que la différence de niveau qui se crée entre deux éléments verticaux d'une structure engendre les contraintes de gauchement dans les membranes horizontales spécialement au droit des points de liaison et sont à la base de

fissures et cassures subies par les ouvrages. Pour résoudre ce problème de tassement, certaines techniques ont été utilisées avec satisfaction : flottaison totale ou partielle, préchargement, fondations profondes, radier général, rabattement des nappes, etc... A l'opposé de tassement, il y a le problème d'expansion (soulèvement ou gonflement) du sol dont les causes principales sont : la réduction de la charge de confinement ainsi que l'augmentation de la pression interstitielle ou de la quantité d'eau dans le sol. Le soulèvement de sol est fréquent dans les régions arides dans lesquelles le sol sèche en temps aride et gonfle en temps humide, les solutions à apporter dans ce cas peuvent être dans l'alourdissement de la construction, la mise d'un bon système de drainage pour éviter les remontées capillaires, etc. [8]

### **1.6.2. Utilisation du sol comme matériau de construction**

Les cas d'utilisation du sol comme matériau de construction sont très nombreux. Dans le domaine routier par exemple, il sera question d'étudier les caractéristiques physiques et mécaniques des sols de manière à prévoir leurs comportements pour servir d'assises des chaussées. Dans le barrage en terre, l'ouvrage est constitué de couches de graviers, des cailloux et de sable entourant un noyau d'argile compacte. Le cas de réservoir d'huile en terre, les remblais de routes et aéroports, les briques, les tuiles, les céramiques, les techniques de stabilisation des sols, etc.... sont autant d'illustration de l'utilisation des sols comme matériau de construction. Par ailleurs, de nombreuses recherches sont actuellement en cours sur la terre armée, dernière-née en mécanique des sols.

### **1.6.3. Cas de soutènement des terres**

Le problème de soutènement des terres se pose dans le cas des excavations de glissement de terrain ou d'un massif soumis à l'écoulement par suite d'un tremblement de terre, de vibration ou d'explosion de chargement, de construction des tunnels et d'autres ouvrages souterrains etc... Dans tous ces cas, l'ingénieur conçoit un ouvrage de retenue (mur de soutènement, rideau de palplanches, etc.) pour éviter un écoulement éventuel des terres à même d'engendrer des fissures de cisaillement dans le sol [6].

## 1.7. GENERALITES SUR LES ROUTE

Une route est une surface aménagée servant de voie de communication ou de transport terrestre. Elle constitue une infrastructure appropriée pour la circulation des piétons, des véhicules et d'autres engins hormis ceux qui requièrent des voies ferrées. Une route comprend les caractéristiques superficielles irréprochables bordée par des accotements, couverte d'un revêtement dépourvu d'ondulations perceptibles, disposant d'un système d'évacuation d'eau de ruissellement et de drainage et au besoin d'ordre sélectionné pour l'embellissement de l'espace tout entier éventuellement des plantations d'arbres...

### 1.7.1. Importance et but de la route

Une route est une voie de communication de première importance, elle constitue le miroir même du développement socio-économique d'un pays en ce sens qu'elle favorise les échanges interprovinciaux, le désenclavement des zones ou régions enclavées.

La présence d'une route favorise la mobilité des personnes et leurs biens, les découvertes, l'amélioration d'équilibre entre l'offre et la demande, la création de nouvelles activités, la tempérence des inégalités, la mise en valeur d'un territoire, la stimulation des initiatives etc...

Considérée comme un moteur du développement économique d'un état, une route présente l'avantage décisif de permettre la desserte de la quasi-totalité d'un territoire de porte à porte.

#### ● But

Le but de la route est d'assurer dans les conditions de confort et de sécurité la circulation de ses usagers durant tout le long de son exploitation.

### 1.7.2. Structure de la route

La chaussée au sens structural, est l'ensemble des couches de matériaux disposées pour supporter la circulation des véhicules sur le terrain préparé. La chaussée est dite rigide si elle comporte une dalle en béton de ciment ; elle est dite souple dans le cas contraire.

➤ **Les familles de structure des chaussées et leurs fonctionnements**

- ✓ **Les chaussées souples** : couche des matériaux bitumineux inférieure à 15cm, parfois limitée à un enduit, sur une assise composée d'une ou de plusieurs couches de matériaux granulaires non traitées (épaisseur de 30 à 60cm). Les sollicitations dues au trafic se répercutent sur les couches d'assise avec une faible dispersion horizontale. Les efforts conduisent à la déformation de la couche d'assise non liée et à celle de la couche de roulement. Les conditions d'environnement pèsent sur l'intensité des déformations, en effet les variations hydriques d'assises mal drainées favorisent le gonflement en période humide et les fissures de retrait en période sèche.

✓ **Les chaussées bitumineuses épaisses** : couche de roulement bitumineuse sur de Couches de chaussée composées de matériaux traités aux liants hydrocarbonés.

L'épaisseur des couches facilitent la diffusion des efforts verticaux en les atténuant dans les couches d'assise liées. Le collage des couches y est très important, en effet il permet la transmission des efforts et les allongements maximaux à la base des couches les plus profondes de la chaussée. Une absence ou un mauvais collage des couches conduit à une sollicitation de chacune de celles-ci en traction et à une usure très prématurée de la chaussée.

- ✓ **Les chaussées à assise traitée aux liants hydrauliques** : assise traitée aux liants hydrauliques de 20 à 50cm avec une couche de roulement en matériaux hydrocarbonés, ces chaussées sont qualifiées de semi-rigides. La grande rigidité des couches traitée limite les contraintes transmises aux couches de chaussée, elles sont par contre soumises à des contraintes de traction-flexion déterminantes pour leur dimensionnement.

- ✓ **Les chaussées à structure mixte** : couche de roulement et couche de base en matériaux hydrocarbonés (10 à 20), couche de fondation traitée aux liants hydrauliques (20 à 40cm). La couche de matériau traitée aux liants hydrauliques placée en fondation, diffuse et atténue, du fait de sa raideur élevée, les efforts transmis au sol support. Elle

constitue un support de faible déformabilité pour les couches supérieures de matériaux bitumineux. La faiblesse de ces structures tient dans la sensibilité des interfaces aux dilatations différentielles, les couches peuvent alors se décoller et les couches supérieures supporter des contraintes qui produisent leur destruction.

✓ **Les chaussées à structure inverse** : couche de matériaux bitumineux (environ 15cm) sur une couche de matériaux granulaires non traités (d'environ 12 cm) reposant sur une couche de matériaux traités aux liants hydrauliques (épaisseur totale de la structure 60 à 80 cm). La couche intermédiaire en matériaux granulaires non traités est relativement dans le sens horizontal. Elle a pour fonction de limiter les fissures. Ces structures se déforment dans le temps par des orniérages limités et des fissures transversales de fatigue. La mise en œuvre est plus sensible aux imperfections que celles pourvues de couches collées, elles sont particulièrement sensibles à l'eau. En effet, la circulation de l'eau dans la couche intermédiaire conduit rapidement à la ruine des couches supérieures.

- ✓ **Les chaussées à béton de ciment** : ces structures comportent une couche de béton de 15 à 40 cm, éventuellement recouverte d'une couche d'enrobés mince. La couche de béton peut être continue avec un renforcement longitudinal (béton armé continu) ou discontinue avec ou sans éléments de liaison aux joints. Au regard du module d'élasticité élevé du béton armé, les sollicitations déterminantes sont celles de traction par flexion dans la dalle. Ces tractions sont sensibles à la fissuration produite essentiellement par retrait. Elles supportent mal les conséquences de l'évolution des points d'appui aux angles et au droit des fissures qui produisent, à terme, des effets de pompage. La dalle se déséquilibre et bouge au passage du trafic, ce qui amplifie le phénomène.
- ✓ **Accotement** : est la partie de la plate-forme aménagée entre la chaussée et le talus.
- ✓ **Plate-forme** : C'est la surface de la route qui comprend la ou les chaussées, les accotements et éventuellement les terres pleines.
- ✓ **Assiette** : C'est la surface du terrain réellement occupée par la route et ses annexes.

- ✓ **Emprise** : C'est la partie du terrain juridiquement affectée à la route et ses annexes ; elle est généralement de 30m pour les routes et de 70m à 100m pour les autoroutes.
- ✓ **Fossé** : ce sont les excavations aménagées de part et d'autre de la plate-forme, elles sont destinées à assainir la plate-forme en collectant les eaux de ruissellement.
- ✓ **Remblais** : Une route est en remblai lorsqu'elle est construite au-dessus du terrain naturel.
- ✓ **Déblais** : Lorsqu'une route est construite en dessous du terrain naturel, on dit qu'elle est en déblai.
- ✓ **Devers** : C'est l'inclinaison transversale de la route, en alignement droit, elle est destinée à évacuer les eaux superficielles, en courbe elle permet à la fois d'évacuer les eaux de ruissellement et de compenser une partie de la force centrifuge.
- ✓ **Talus** : C'est la partie d'une route comprise entre l'accotement et le fossé, on distingue le talus de remblais et le talus de déblais.
- ✓ **La forme** : est la surface du terrain préparé sur laquelle est édifiée la chaussée et parfois les accotements quand ils sont rapportés.

Dans certains cas (par exemple remblais en sol gonflant ou déblais en sol de faible portance), on peut avoir intérêt à remplacer sur une certaine épaisseur le sol naturel ou le sol rapporté par un meilleur sol sélectionné à cet effet, soit choisi parmi les sols rencontrés dans les terrassements, soit même prélevé dans des emprunts situés à faible distance du chantier. On constitue ainsi une couche de forme qui ne fait pas partie de la chaussée. La chaussée est alors édifiée sur la couche de forme [7].

## 1.8. CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre a tout d'abord passé en revue le contexte général des sols et ensuite nous avons abordé l'origine des sols, ses constituants, ses propriétés ou caractéristiques, les types, les différentes classifications et les domaines d'applications. Par la suite, nous avons également donné une vue générale sur la route.

## Chapitre 2 : LA METHODOLOGIE

Dans ce chapitre, nous allons présenter en détail ce qui fait l'objet de notre recherche ; le matériau, le milieu d'étude et le déroulement détaillé de notre travail, mais aussi les différents essais réalisés au laboratoire dont les essais d'identification (Analyse granulométrique, les limites d'Atterberg) et les essais mécaniques (la détermination des indices Proctor et CBR). Pour chaque essai, nous allons présenter les normes, le but, le principe, le mode opératoire, l'appareillage et l'expression des résultats. Notons que les travaux en laboratoire ont été effectués au laboratoire de la faculté des sciences et technologies de l'ULPGL/GOMA (Laboratoire de génie civil).

### 2.1. MATÉRIAU ET ORIGINE

#### 2.1.1 Matériau

Les sols étudiés se composent des matériaux pyroclastiques grossiers non consolidés assimilable à des lapillis d'origine basaltique. Cette nature volcanique confère au sol une forte porosité et une granulométrie hétérogène, ce qui influence directement ses propriétés géotechniques, notamment sa portance et sa perméabilité. Ces sols peuvent être appelés autrement : « des sols lapilliques » [9].

#### 2.1.2 Origine de matériau

Les sols étudiés dans la zone de KANYARUCHINYA sont d'origine volcanique. Ces dépôts résultent d'éruptions explosives des volcans du Nord – Kivu et se caractérisent par une structure meuble, une forte porosité et une variabilité granulométrique importante. Leur couleurs brun-noir à rougeâtre, leur texture anguleuse et leur faible cohésion traduisent une origine essentiellement téphrique [9].

Notre choix de la carrière de KANYARUCHINYA n'est pas un fruit du hasard. Sa situation géographique par rapport à la ville de Goma offre un accès facile. Le matériau que nous étudions est le plus couramment utilisé dans la ville. Cette carrière couvre une grande superficie ; ce qui fait d'elle une zone d'approvisionnement sûre et durable pour la ville de Goma. La figure 2-1 montre l'emplacement et l'aperçu de la carrière.

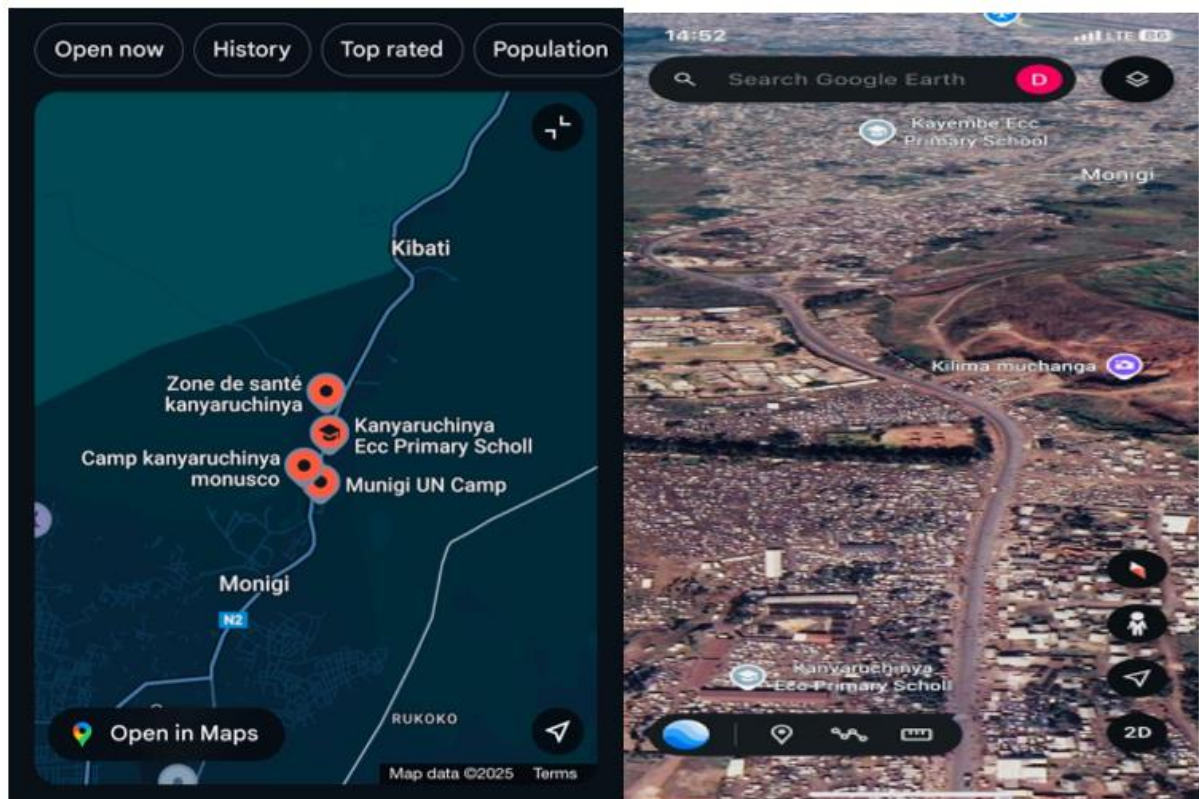


Figure 2-1 Zone d'étude

### a) Aspect géographique

Située en territoire de NYIRAGONGO, la carrière de KANYARUCHINYA se localise dans la province du Nord-Kivu, dans l'est de la République démocratique du Congo (RDC), à environ 10 kilomètres au nord de la ville de Goma, chef-lieu de la province. Le territoire de Nyiragongo est une entité administrative déconcentrée de l'Est de la province du Nord-Kivu en République

démocratique du Congo. Il est célèbre pour son volcan actif du même nom, le mont Nyiragongo et ne compte qu'une seule chefferie dirigée par le Mwami et est divisé en 7 groupements de 58 villages. Kibumba en constitue le chef-lieu. [10]

## **b) Coordonnées géographiques**

Les coordonnées précises de KANYARUCHINYA sont approximativement :

- Latitude : -1.6133 (1°36'48" S)
- Longitude : 29.2325 (29°13'57" E)
- Altitude : environ 1 500 mètres au-dessus du niveau de la mer.

## **c) Relief**

KANYARUCHINYA est situé dans une région caractérisée par un relief varié, dominé par des plateaux légèrement inclinés entourés de montagnes imposantes. Le territoire de Nyiragongo, où se trouve KANYARUCHINYA, est marqué par la présence du volcan actif Nyiragongo, culminant à 3 470 mètres d'altitude. La région est également parsemée de collines et de formations volcaniques résultant de l'activité tectonique de la vallée du Rift Est-Africain.

## **d) Climat et température**

Le climat de KANYARUCHINYA est influencé par l'altitude. À environ 1 500 mètres d'altitude, la température moyenne annuelle est d'environ 19 °C. Les précipitations annuelles varient entre 1 000 et 2 000 mm, avec des saisons des pluies généralement de mars à mai et de septembre à décembre. Les saisons sèches se situent entre janvier et février, ainsi que de juin à août.

## 2.2 PLAN EXPÉRIMENTAL

### 2.2.1. Objectif de l'étude

Cette étude vise à évaluer les caractéristiques géotechniques du sol extrait de la carrière de KANYARUCHINYA, dans le but de déterminer son aptitude à être utilisé comme matériau de remblai dans les travaux de construction routière. Pour ce faire, une série d'essais en laboratoire sera réalisée afin de caractériser ses propriétés mécaniques et physiques selon les normes en vigueur.

### 2.2.2. Hypothèse de travail

Il est supposé que le sol de la carrière de KANYARUCHINYA possède des caractéristiques compatibles avec les exigences requises pour les remblais routiers.

### 2.2.3. Variables étudiées

Dans le cadre de cette étude expérimentale, les variables sont les suivantes :

- **Variable indépendante** : les conditions de traitement appliquées au sol (teneur en eau, méthode de compactage).
- **Variables dépendantes** : les résultats des différents essais géotechniques, notamment la portance (CBR), la densité sèche maximale, l'optimum de compactage, les limites d'Atterberg, la granulométrie et la perméabilité.

### 2.2.4. Prélèvement et préparation des échantillons

Les échantillons seront prélevés à différents emplacements représentatifs de la carrière, en tenant compte de la profondeur, de la texture du sol et de son homogénéité. Chaque échantillon sera séché, puis divisé pour les différents essais. Au total, trois échantillons seront analysés en laboratoire.

### **2.2.5. Dispositif expérimental**

Les échantillons seront soumis à une série d'essais standards afin de caractériser leurs propriétés :

- Teneur en eau naturelle
- Masses volumique (absolue et apparente)
- Analyse granulométrique (par tamisage)
- Détermination des limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité)
- Essai Proctor modifié, pour déterminer la densité sèche maximale et l'humidité optimale
- Essai CBR (California Bearing Ratio), indicateur principal de la portance du sol

### **2.2.6. Méthodologie**

Les essais seront réalisés conformément aux normes en vigueur (normes françaises NF, ou recommandations du CEBTP et le GTR). Chaque paramètre sera mesuré dans des conditions contrôlées, avec des répétitions si nécessaire, afin d'assurer la fiabilité des résultats.

### **2.2.7. Type de plan expérimental**

Il s'agit d'un plan expérimental de type comparatif, dans lequel les propriétés du sol brut sont évaluées, puis comparées à celles exigés. Ce plan permet de déterminer dans quelles conditions se trouve le matériau et de voir s'il peut répondre aux exigences techniques des remblais routiers.

### 2.2.8. Présentation et interprétation des résultats

Les résultats seront présentés puis comparés aux seuils réglementaires ou normatifs définis pour les matériaux de remblais. Des corrélations éventuelles entre certains paramètres (par exemple entre densité sèche et indice CBR) seront également explorées pour affiner l'interprétation.

## 2.3. ÉCHANTILLONNAGE

Les échantillons remaniés ont été prélevés à une profondeur soit  $\geq 6$  m, la carrière étant en déblais (excavation) telle qu'illustre la figure 2.2:

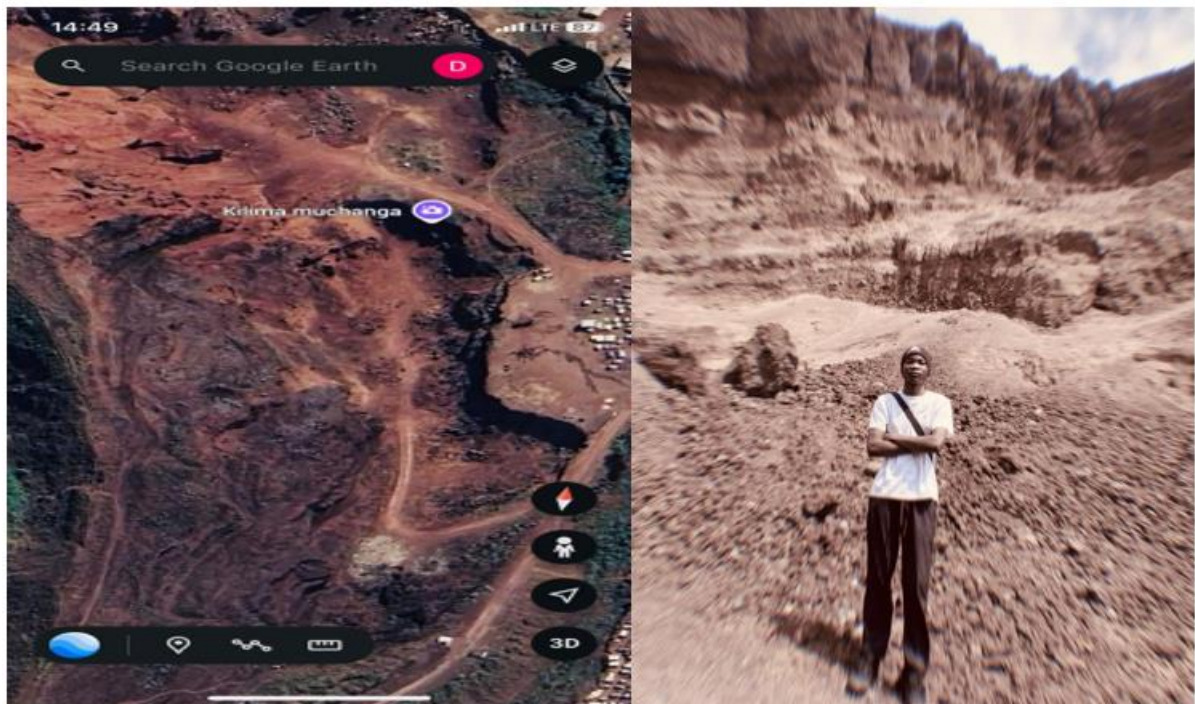





Figure 2-2 Carrière de KANYARUCHINYA (Kilima muchanga)

Trois échantillons ont été prélevés à différents endroits de la carrière. Ces derniers se distinguent par leur couleur tel qu'illustre la figure 2-3:



Figure 2-3 Echantillons remaniés

-  Échantillon 1
-  Échantillon 2
-  Échantillon 3

## 2.4 CARACTERISATION DES MATÉRIAUX

### 2.4.1 Caractérisations physiques

#### 2.4.1.1 Teneur en eau d'un sol

La teneur en eau d'un sol est le rapport du poids de l'eau libre présente dans un certain volume de sol, au poids des éléments solides compris dans ce volume. C'est une caractéristique essentielle, l'eau jouant un rôle déterminant sur les propriétés mécaniques d'un sol. [15].

**a) But :**

Cet essai consiste à exprimer le rapport du poids de l'eau contenue dans le sol par rapport au poids des grains solides.

**b) Principe :**

La perte d'eau d'un échantillon de matériaux est provoquée par étuvage, les masses de l'échantillon humide et sec sont mesurées par pesage.

**c) Appareillage :**

Pour cet essai, les appareils nécessaires sont :

- Etuve,
- Une balance de précision et
- Des tares pour contenir des échantillons

**d) Mode opératoire :**

- Laver la tare puis la peser,
- Prélever l'échantillon, l'introduire dans la tare et peser le tout pour déterminer  $m_1$ ,
- Mettre à l'étuve et après dessiccation complète peser pour déterminer  $m_2$ .

La teneur en eau est définie alors par la formule (2-1).

$$W = \frac{m_h - m_d}{m_d} \times 100 \quad (2-1)$$

Avec : W : la teneur en eau naturelle,

$m_h$  : la masse du sol humide,

$m_d$  : la masse du sol sec.

**e) Norme :**

La teneur en eau est déterminée suivant la norme NF P 94-050 sur un échantillon de sol remanié.

**2.4.1.2 masse volumique absolue ou réelle**

La masse volumique d'un matériau, notée  $f_s$  est la masse d'un mètre cube de ce matériau déduction faite de tous les vides aussi bien des vides entre les grains que des vides à l'intérieur des grains.

**a) But de l'essai :**

Le but poursuivi par cet essai, consiste à caractériser l'état dans lequel se trouve le sol, c'est-à-dire l'état de compacité du squelette ainsi que les quantités d'eau et d'air contenues dans le sol.

**b) Principe :**

La masse volumique est déterminée par la méthode des éprouvettes graduées. Elle est obtenue par la relation (2-2)

$$f_s = \frac{m}{v_2 - v_1} \quad (2-2)$$

- ✓ Avec : m : la masse de l'échantillon sec ;
- ✓  $v_1$  : volume initial de l'eau ;
- ✓  $v_2$  : volume final après introduction du matériau.

**c) Norme :**

La masse volumique absolue est déterminée, selon la norme NF P 94-053

### 2.4.1.3 Analyse Granulométrique (AG)

#### a) But de l'essai :

Le but est de déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension dans un échantillon.

#### b) Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

Les dimensions de mailles et le nombre des tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon et de la précision attendue. Les masses des différents refus ou celles des différents tamisât sont rapportées à la masse initiale de matériau, les pourcentages ainsi obtenus sont exploités, soit sous leur forme numérique, soit sous une forme graphique (courbe granulométrique).

#### c) Appareillage :

- Série de tamis dont l'ouverture est conforme à la norme NFX11-501
- Etuve
- Vibrotamis (pour tamiser mécaniquement)
- Assiettes en porcelaine ou métallique
- Plateaux
- Balance

**d) Mode opératoire :**

- ✓ Prélèvement de l'échantillon remanié (> 500g) sur le site ;
- ✓ Mettre l'échantillon à l'étuve pendant 24heures à une température variante entre 105° et 110° Celsius ;
- ✓ Refroidir l'échantillon et prélever une quantité voulue (3000g pour notre cas) ;
- ✓ Mettre cette quantité dans une assiette en porcelaine pour écraser les mottes à l'aide d'un mortier en caoutchouc afin d'éviter de casser les grains ;
- ✓ Passer au lavage de l'échantillon au tamis de 80um pour séparer les gros éléments des fines ;
- ✓ Sécher à nouveau le sol mouillé à l'étuve pendant 24heures à la température variante entre 105° et 110°Celsius puis le refroidir à l'air ambiant ;
- ✓ Peser l'échantillon (gros grains) ;
- ✓ Passer au tamisage successif (ordre décroissant en fonction de diamètre d'ouverture des tamis) ;
- ✓ Peser les grains retenus dans les différents tamis ainsi que le passant du dernier tamis (le plus bas) ;
- ✓ Tracer un graphique qui représente la répartition des grains en pourcentage selon les différents diamètres ;
- ✓ En fonction de cette courbe, on détermine la nature du sol.

**e) Norme :**

Elle est effectuée suivant la norme NF P 94-056.

Le pourcentage des refus cumulés est calculé par la formule (2-3) et celui des tamisât par la formule (2-4).

$$Rcum\% = \frac{Rcum}{m} \times 100 \quad (2-3)$$

Avec :

- ✓ Rcum% : pourcentage des refus cumulés,
- ✓ Rcum : refus cumulés,
- ✓ m : masse initiale

$$\text{Tamisât \%} = 100\% - Rcum\% \quad (2-4)$$

La figure 2-4 montre une série de tamis normalisés



Figure 2-4 Série de tamis normalisés

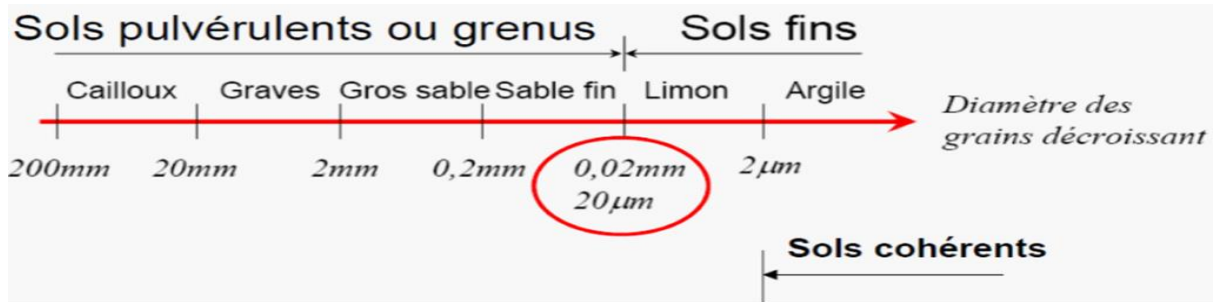


Figure 2-5 Types des sols en fonction de leur taille [7]

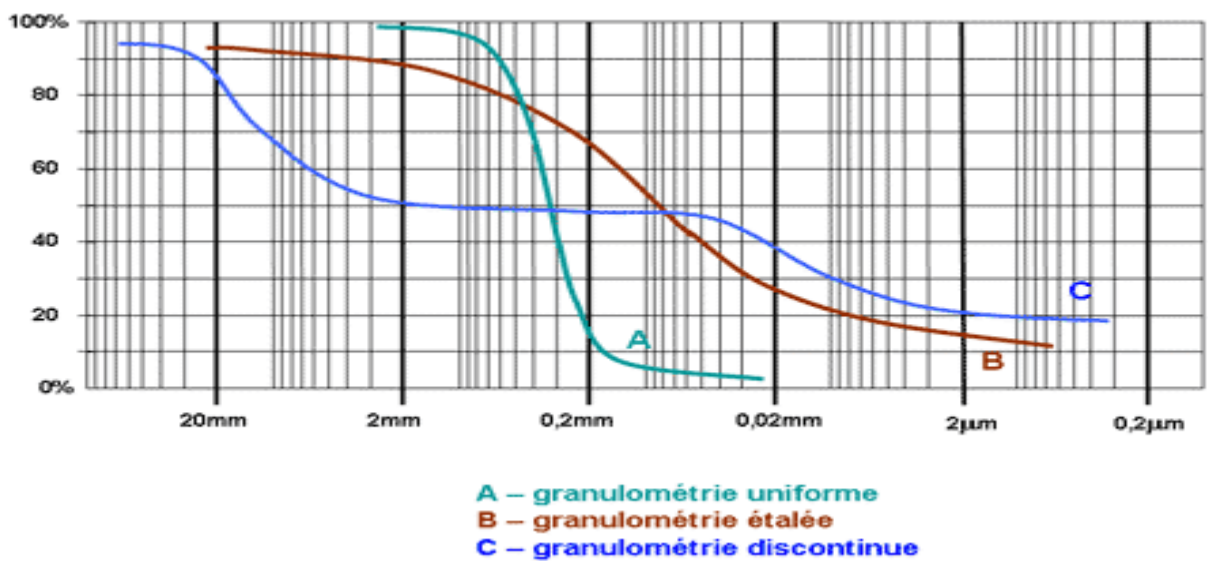


Figure 2-6 Exemple des courbes granulométriques

A partir de la courbe granulométrique, deux coefficients de forme sont calculés pour caractériser la distribution granulométrique :

Le coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) et le coefficient de courbure ( $C_c$ ) ; déterminés par les formules (2-5) et (2-6)

$$C_u = D_{60} / d_{10} \quad (2-5)$$

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) \quad (2-6)$$

Ces deux coefficients sont utilisés dans la classification des sols grenus (sable, gravier etc.). En générale, un sol compact est caractérisé par une granulométrie étalée (la granulométrie étalée lorsque les dimensions des grains s'étalent sur un important intervalle). Les vides sont remplis par les différentes classes de grains que contient ce matériau [6]. Le tableau 2-1 indique les classe des sols selon les coefficients d'uniformité.

Tableau 2-1 Classe de sol selon le coefficient d'uniformité [11]

Coefficient d'uniformité	Classe de granulométrie
$Cu \leq 2$	Granulométrie très serrée
$2 < Cu \leq 5$	Granulométrie serrée
$5 < Cu \leq 20$	Granulométrie semi-étalée
$20 < Cu \leq 200$	Granulométrie étalée
$200 < Cu$	Granulométrie très étalée

#### 2.4.14 Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont des essais qui permettent de définir les indicateurs qualifiants la plasticité d'un sol, et plus précisément de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'actions des variations de teneur en eau. Ces essais se font sur les éléments fins du sol et consistent à faire une classification de ce dernier. La figure 2-7 montre les différents états du sol.

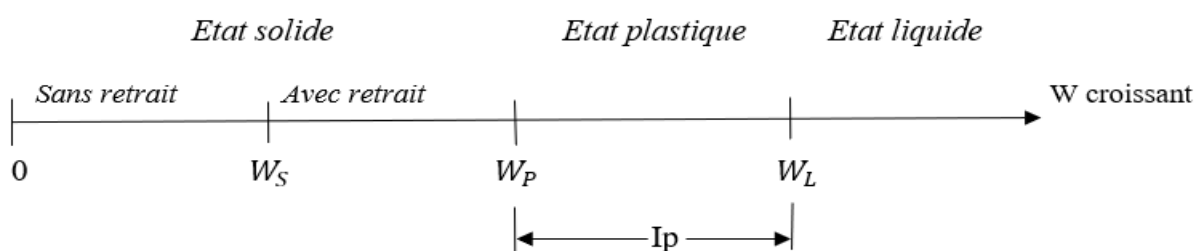


Figure 2-7 Etats diversés du sol

Ici le terme :

$w_L$  est la limite de liquidité qui sépare les états liquides et plastiques ;

$W_P$  est la limite de plasticité qui sépare l'état plastique et semi-solide ;

$I_p$  est l'indice de plasticité

On a également :

( $I_l$ ) qui est l'indice de liquidité et ( $I_c$ ) qui est l'indice de consistance.

Ci-dessous le tableau des degrés de plasticité du sol suivant les  $I_p$  :

Tableau 2-2 Degré de plasticité de sol [6]

Indice de plasticité	Degré de plasticité
$0 \leq I_p \leq 5$	Sol non plastique
$5 \leq I_p \leq 30$	Sol peu plastique
$30 \leq I_p \leq 50$	Sol plastique
$50 \leq I_p$	Sol très plastique

#### a) Appareillage :

Pour notre cas, nous avons utilisé :

- Un tamis de 0.4mm ;
- Le pénétromètre à cône ;
- Une spatule ;
- Un chronomètre

- Des tares
- Une balance

### 1) La limite de liquidité ( $w_L$ )

La limite de liquidité caractérise le passage du sol de l'état plastique à l'état liquide. C'est la teneur en eau qui sépare l'état liquide de l'état plastique.

#### a) But de l'essai

Le but de cet essai est de déterminer la teneur en eau d'un échantillon à son passage de l'état liquide à l'état plastique.

#### b) Principe

L'essai consiste à apprécier en répétition suivant des différentes teneurs en eau les valeurs de la pénétration du cône tombant sous l'effet de son propre poids sur un échantillon (fin passant au tamis 0.4 mm). La lecture de la pénétration est faite après 5 secondes d'enfoncement du cône. En traçant le diagramme, la valeur de la teneur en eau correspondant à 17 mm d'enfoncement est la limite ( $w_L$ ) recherchée.

#### c) Mode opératoire

- ✓ Préparation de l'échantillon (seules les particules passant au tamis de 0.4 mm sont recueillies dans un plateau et seront retenues pour l'essai) ;
- ✓ Malaxer une quantité d'échantillon avec de l'eau afin d'obtenir une pâte homogène ;
- ✓ Avec une spatule, on met la pâte dans une tare propre et sèche, cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner les bulles d'air, ce là jusqu'à avoir une surface plane ;

- ✓ On place la tare contenant la pâte sous le cône du pénétromètre, on rapproche le cône de sa surface en s'assurant qu'il n'y ait pas de vide entre la surface de l'échantillon et la pointe du cône ;
- ✓ Ensuite on laisse tomber le cône pendant 5 secondes ;
- ✓ En fin de pouvoir apprécier la valeur de la pénétration, la tige au-dessus du pénétromètre doit être légèrement enfoncée jusqu'à ce que cette dernière résiste, cette opération fait avancer l'aiguille sur la partie graduée, permettant ainsi à l'opérateur de lire la valeur.
- ✓ Après on récupère une petite quantité (particulièrement dans la zone de la pénétration), dans une tare, après pesage, on la fait sécher et peser à nouveau pour prélever la masse sèche enfin de pouvoir mesurer la teneur en eau ;
- ✓ L'opération est répétée autant de fois en variant la teneur en eau.

La figure 2-8 illustre l'essai au pénétromètre à cône.



Figure 2-8 Illustration de l'essai au pénétromètre à cône

## 2) La limite de plasticité ( $W_p$ )

La limite de plasticité caractérise le passage du sol de l'état liquide à l'état plastique ; c'est la teneur en eau qui sépare l'état plastique à l'état solide.

### a) Principe :

L'essai consiste à déterminer la teneur en eau d'un sol de son passage de l'état liquide à l'état solide. Le principe de l'essai consiste à rouler à la main une pâte contre une plaque, pour former un cylindre avec un échantillon de sol jusqu'à observer l'apparition des fissures et procéder à la détermination de la teneur en eau dès l'apparition de ces fissures [12].

### b) Mode opératoire :

- ✓ Prélever un échantillon de sol fin (passant au tamis de 0.4 mm) ;
- ✓ Ajouter une quantité d'eau pour obtenir une pâte malléable ;
- ✓ Confectionner un cylindre de terre (boudin) enroulé à la main contre une plaque jusqu'à ce qu'il atteigne un diamètre de 3 mm ;
- ✓ On s'arrête dès l'apparition des fissures sur le boudin ;
- ✓ On découpe alors ce boudin en 3 ou 4 parties que l'on partage dans deux ou trois tares ;
- ✓ Répéter l'opération tout en déterminant la masse humide des boudins dans les tares ;
- ✓ Les tares sont ensuite mises à l'étuve pour la détermination de la teneur en eau

### c) Norme :

La limite de plasticité est déterminée suivant la norme NF P 94-051.

### 3) L'indice de plasticité $I_p$

#### a) But :

L'indice de plasticité permet d'établir la plasticité d'un sol donné. C'est-à-dire de déterminer une zone dans laquelle on considérera que le sol est à l'état plastique. Plus l'indice de plasticité est élevé, plus grande est la zone dans laquelle le sol est à l'état plastique, et plus ce sol contient de l'argile.

#### b) Norme :

Il est déterminé suivant la norme NF P 94-057 par la formule (2-7)

$$I_p = W_L - W_p \quad (2-7)$$

Avec :

- ✓  $W_L$  : la limite de liquidité
- ✓  $W_p$  : la limite de plasticité

### 4) Indice de liquidité ( $I_l$ )

L'indice de liquidité correspond à l'écart entre la teneur en eau naturelle et la limite de plasticité sur l'indice de plasticité. Il permet de savoir rapidement si un sol est à l'état liquide, plastique, semi-solide ou solide.

Plus il est élevé, plus l'argile est proche de l'état liquide et plus elle est dangereuse. Il est déterminé par la relation (2-8)

$$I_l = \frac{W - W_p}{I_p} \quad (2-8)$$

Avec

- ✓ W : la teneur en eau naturelle du sol
- ✓ W<sub>p</sub> : la limite de plasticité
- ✓ I<sub>p</sub> : l'indice de plasticité

### 5) Indice de consistance (I<sub>c</sub>)

L'indice de consistance correspond à l'écart entre la limite de liquidité et la teneur en eau naturelle sur l'Indice de plasticité. Il est déterminé par la relation (2-9)

$$I_c = \frac{W_l - W}{I_p} \quad (2-9)$$

Avec

- ✓ W<sub>l</sub> : la limite de liquidité
- ✓ W : la teneur en eau naturelle
- ✓ I<sub>p</sub> : l'indice de plasticité.

## 2.4.2 Caractérisations mécaniques

Ici nous présenterons entre autres l'essai Proctor Modifié et l'essai CBR pour la portance du sol.

### 2.4.2.1 Essais Proctor modifié

#### a) But :

L'essai Proctor a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau naturelle à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité sèche maximale. La teneur en eau ainsi déterminée et appelée « teneur en eau optimum Proctor ».

**b) Principe de l'essai :**

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier et à déterminer la teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage.

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%,4%, 6%,8%, 10%, 12%, 14%, 16%). On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau. On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux. Elle représente un maximum dont l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor », et l'ordonnée « la densité sèche maximum

Proctor »

**c) Appareillage :**

- Le moule Proctor constitué par un tube cylindrique métallique inoxydable d'un diamètre intérieur et hauteur bien déterminés pourvu d'un fond et d'une hausse métalliques amovibles ;
- La dame Proctor ;
- Une étuve ;
- Une règle à araser ;
- Truelle pour malaxage ;
- Une balance ;
- Une éprouvette graduée ;
- De l'eau ;

- Des bacs.

La figure 2-9 montre les moules utilisés pour les essais Proctor



Figure 2-9 les moules Proctor

**d) Mode opératoire :**

- ✓ Prendre une quantité (6kg pour notre cas) ayant des diamètres inférieurs à 20mm ;
- ✓ Y verser une quantité d'eau soit par exemple 2% de 6kg et cela est pris en fonction de la teneur en eau naturelle du sol et de l'état de l'échantillon.
- ✓ Malaxer le mélange jusqu'à l'homogénéisation de ce dernier ;
- ✓ Remplir le moule Proctor en 5 couches et à chaque couche on compacte à l'aide d'une dame Proctor en 55 coups par coulage ;
- ✓ Une fois le moule rempli, on arase avec la règle à araser, on comble les vides laissés à la surface ;

- ✓ Après pesage, on prélève un échantillon du sol à la surface du moule, puis on retire la base de ce dernier afin de prendre un deuxième échantillon d'à peu près du même poids ;
- ✓ A la balance, on évalue les masses de deux prélèvements puis on les met à l'étuve pendant 24 heures pour obtenir la teneur en eau.

Les résultats obtenus sont inscrits dans un tableau. L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%).

#### **e) Norme :**

La teneur en eau optimale et la densité sèche optimale sont obtenues suivant la norme NF P 94-093 à l'aide de l'essai Proctor modifié. La teneur en eau optimale est obtenue à la teneur à laquelle la densité sèche a commencé à diminuer.

#### **2.4.2.2 Essai CBR (California Bearing Ratio)**

L'essai CBR est un essai de portance (aptitude des matériaux à supporter les charges). Il s'agit en fait de comparer la portance du sol que l'on est en train de tester à la portance d'un sol standard de l'Etat de Californie aux Etats Unis.

#### **a) But :**

Cet essai permet de réaliser la caractérisation mécanique des sols naturels et des sols compactés dans des remblais et des couches de forme, de fondations de routes et aéroports. Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol et le gonflement du sol lorsqu'il est immergé dans l'eau pendant quatre jours. Il nous permet de calculer la portance du sol, en estimant sa résistance au poinçonnement. Il s'agit de déterminer des indices portants CBR qui permettent ;

- D'établir une classification des sols (GTR)

- D'évaluer la traficabilité des engins de terrassements (IPI)
- De déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente, l'épaisseur diminue)

### b) Principe :

L'essai consiste à poinçonner l'échantillon du matériau compacté par pénétration d'un poinçon cylindrique à une vitesse constante de (1.27mm/min). Les valeurs des forces correspondant à des enfoncements de 2.5 et 5mm sont reportées à celles obtenues sur un matériau de référence pour en déduire la valeur de l'indice portant recherchée. L'indice de portance CBR immergé (I CBR après quatre jours d'immersion), et indice portant immédiat IPI, sont calculés ainsi par le rapport entre la pression d'enfoncement du sol et celle d'un matériau type référence (en %) par les relations (2-10) et (2-11)

$$\text{CBR}_{2.5} = \frac{\text{Force appliquée à 2.5}}{13.4} \quad (2-10)$$

$$\text{CBR}_5 = \frac{\text{Force appliquée à 5}}{20.1} \times 100 \quad (2-11)$$

Les relations entre (2-10) et (2-11) sont applicables pour le poinçonnement à zéro jour et pour le poinçonnement après quatre jours d'immersion.

Cependant, il existe une relation qui lie le poinçonnement à zéro jour et le poinçonnement après quatre jours d'immersion. Ayant trouvé le CBR à zéro jour, il suffit juste de le multiplier par un coefficient pour obtenir le CBR après quatre jours d'immersion c'est-à-dire le CBR du sol dans les conditions défavorables. La valeur de ce coefficient est de 0.63 [13].

### c) Appareillage :

- 3 moules standard CBR ;
- Disque d'espacement ;

- Dame Proctor modifié ;
- Des disques de surcharge annulaire ;
- Appareil de mesure de gonflement comprenant un trépied pouvant s'adapter sur la face supérieure de moule comparateur ;
- Piston cylindrique ;
- Presse CBR.
- Des bacs ;
- Pelle à main, truelle ;
- Les tares pour la teneur en eau ;
- Une balance
- Une étuve ;
- Des papiers filtres ;
- Un outil à araser ;
- Un bac d'immersion.

**d) Mode opératoire :**

- ✓ Préparation des échantillons

L'essai sera réalisé à la teneur en eau optimale déterminée par l'essai Proctor modifié. De ce fait, il conviendra de préparer le matériau de la même façon que pour l'essai Proctor à savoir :

- ✓ Le matériau est séché à l'étuve à 60° Celsius maximum ;

- ✓ Tamisage des matériaux au tamis de 20mm ;
- ✓ On écrase des mottes de terre en veillant à ne pas briser les graviers ;
- ✓ On réalise moulages à 3 énergies de compactage différent ;
- ✓ Compactage et imbibition
- ✓ Préparation du moule, il faut veiller à ce qu'il soit propre et en bon état. On pèse le

Tout à 5g près, puis on place le disque d'espacement ;

- ✓ On introduit ensuite le matériau selon le processus de l'essai Proctor modifié en 5 couches successives d'égales épaisseurs qui sont chacune compactées avec la même dame Proctor modifié selon les énergies de compactage différentes qui sont en général 10, 25 et 55 coups par couche. Le but est d'obtenir moulages ayant nettement des compacités différentes (les compacités étant en principe et de façon approximative respectivement de l'ordre de 90%, 95% et 100% de la densité sèche maximale du Proctor modifié) ;
- ✓ Une fois le compactage terminé, la dernière couche doit dépasser le moule d'environ 1cm. On arase soigneusement puis on enlève le fond que l'on veut fixer sur la face supérieure du moule après avoir placé un papier filtre à la surface de l'échantillon, on retourne le moule, on retire le disque d'espacement puis après avoir placé également un papier filtre sur cette face, on pèse à 5g près ;
- ✓ Si le sol doit être essayé sans imbibition, on procède immédiatement au poinçonnement. Sinon, on place le disque perforé de gonflement à la surface de l'échantillon puis on dispose une charge annulaire sur le disque. Le moule ainsi chargé est placé dans un bac rempli d'eau de telle sorte que l'eau arrive librement par-dessous et par-dessus l'échantillon ;

- ✓ On place le trépied porte comparateur en s'assurant que les pieds portent bien sur le bord du moule. On fixe le comparateur au trépied ; on règle la hauteur de la tige du plateau de gonflement de façon que le palpeur du comparateur du comparateur vienne reposer sur l'extrémité de cette tige. On note alors la lecture du comparateur (lecture initiale) ;
- ✓ On laisse le moule à imbibition normale pendant quatre jours dans l'eau.
- ✓ Le délai écoulé, on note le gonflement lu au comparateur, on enlève les surcharges et le plateau de gonflement on le porte sous la presse de poinçonnement [13].
- ✓ Poinçonnement
- ✓ Le moule est placé sur le plateau de la presse et centré de telle manière que le piston de poinçonnement soit bien dans le prolongement de l'axe du moule ;
- ✓ La tête du piston est amenée en contact avec la surface de l'échantillon en faisant monter le plateau de la presse. On remet alors les surcharges annulaires. La mise en place du piston de poinçonnement est achevée en manœuvrant lentement le volant de la presse jusqu'au moment où l'aiguille du comparateur de l'anneau dynamométrique commence à bouger. A ce moment le piston est bien en contact avec la surface de l'échantillon ;
- ✓ On fixe alors un comparateur au 1/100 de millimètre derrière le cadran de l'indicateur, de cadence-comparateur qui coulisse le long d'une tige verticale solidaire du bâti de la presse est fixé de telle sorte que la pointe du palpeur du comparateur vienne reposer sur le bord du moule. Le comparateur est amené à zéro, puis l'indicateur de la cadence mis en marche ;

- ✓ L'opérateur se met alors au volant de la presse et commence le poinçonnement au moment où le rayon repère de l'indicateur de cadence vient se superposer à l'aiguille du comparateur, il manœuvre lentement de façon à maintenir en coïncidence l'aiguille du comparateur et le rayon repère. En procédant de cette façon, le poinçonnement s'effectue avec la vitesse constante normalisée (soit 1,27 mm/min) ;
- ✓ Au cours de l'essai on note les pressions lues sur l'anneau dynamométrique qui correspondent aux enfoncements suivants : 0,2-0,4-0,6-0,8-1-1,5-2-2,5-3-3,5-4-4,5-5-6-7-8-9 et 10mm. On arrête alors l'essai quand on atteint ce dernier enfoncement ;
- ✓ Pour les calculs, on s'intéresse aux valeurs de pressions trouvées aux enfoncements de 2,5 et 5mm qu'on divise par 1000 et ensuite on lit sur l'abaque les forces correspondantes.

**e) Norme :**

L'essai CBR est effectué suivant la norme NF P 94-078 pour déterminer la portance du sol.

## **2.5 CLASSIFICATIONS**

Classer un sol consiste à l'identifier grâce à des mesures quantitatives et à lui donner un nom afin de le rattacher à un groupe de sols de caractéristiques semblables. Les différentes classifications des sols dépendent donc de la discipline scientifique concernée, de l'utilisation envisagée et de l'expérience locale. Il n'y a pas et il serait difficile de définir une classification universelle susceptible de satisfaire toutes les exigences [14].

Les paramètres usuels de classifications des sols sont : la granulométrie, la plasticité, la forme des grains, la coloration et la pédogenèse ou l'origine géologique. Ci-dessous quelques classifications :

### 2.5.1 Classification suivant le CEBTP- 1980

Cette classification utilise les paramètres suivants :

- › La nature pédologique des sols ; on distingue ; entre autres : les latérites, les sols alluvionnaires, les sols éluvionnaires, les matériaux d'origine éruptive...etc.
- › La granulométrie notamment les fractions suivantes :
  - Les fractions notées F ou fraction passant au tamis 80µm, exprimées en % ;
  - La fraction sablonneuse notée S, passant au tamis de 2mm et refusé sur le tamis de 80µm en %
  - La fraction pierreuse refusée sur le tamis de 20mm en %
  - L'indice de plasticité IP en %

Cette classification regroupe les sols routiers en 3 grands groupes à savoir :

#### a) Sols graveleux

Ils sont regroupés en 3 familles ; entre autres :

- Les graveleux latéritiques notées GL
- Les graveleux alluvionnaires et éluvionnaires notées G
- Les graveleux d'origine éruptive notés Ge

Le tableau 2-3 présente la classification des sols graveleux

Tableau 2-3 Classification des sols graveleux [14]

Groupe	Sous /Famille	Critères de classification	Genèse
GL	GL1	$F < 20$ et $F \times IP < 300$	Graveleux latéritiques
	GL2	$F < 30$ et $F \times IP < 300$ ou $F < 20$ et $300 < F \times IP < 600$	
	GL3	$F > 30$ ou $F \times IP > 600$	
G	G1	$F < 15$ ou $F \times IP < 180$	

	G2	F>15 ou F×IP<180 ou F<15 et 180< F×IP<500	Graveleux alluvionnaires et éluvionnaire
	G3	F×IP>500	
Ge	Ge1	Idem G1	Graveleux d'origine éruptive
	Ge2	Idem G2	
	Ge3	Idem G3	

### b) Sols sableux

Ces sols sont regroupés en 4 familles notées « S » S1 ; S2 ; S3 ; S4

Dans la page suivante le tableau 2-4 illustratif de ces derniers.

Tableau 2-4 Classification des sols sableux [14]

Groupe	Famille	Critères de classification		Genèse
S1	S1a	(>2mm)>10 et (>500µm)>35,	F<12 et F×IP<250	Sable d'altération du socle précambrien
	S1b	pour toutes les 3 familles	12<F<25 et F×IP<250	Sable d'altération du socle ,alluvions anciens
	S1c		F>25 ou F×IP>250	Sables sédimentaires marins et d'altération du socle
S2	S2a	(>2mm) <10 et 10<	F<14 et F×IP<300	Sables sédimentaires marins et d'altération du socle
	S2b	(>500µm) <35 pour toutes les 3 familles	14<F<26 et F×IP<300 ou F<14 et 50< F×IP<300	Alluvions anciens et modernes
	S2c		F>26 ou F×IP≥300	Sables sédimentaires continentaux ; sables d'altération et Alluvions

S3	S3a	(>500 $\mu$ m) <10 pour toutes les 3 familles	F<20 et F $\times$ IP<50	Sables sédimentaire marins et continentaux
	S3b		F>20 et F $\times$ IP<300 ou F<20 et 50<F $\times$ IP<300	Idem+ Altérations ; arènes et alluvions modernes
	S3c		F $\times$ IP>300	Idem+ Altérations et alluvions anciens
S4	S4a S4b	Idem groupes S1 et S2		Scories volcaniques, cendres d'altération des roches éruptives

### c) Sols fins

Tableau 2-5 Classification des sols fins

Groupe	Famille	Critère de classification	Genèse
A	A1	F $\times$ IP<1300 et F $\times$ IP $\times$ G<800	Argile d'altération du socle cristallin et cristallophyllien
	A2	1300< F $\times$ IP<2500 et F $\times$ IP $\times$ G<800 ou F $\times$ IP<1300 et 800< F $\times$ IP $\times$ G<1500	
	A3	F $\times$ IP>2500 ou F $\times$ IP $\times$ G>1500	
Ae	Ae1	Idem A1	Argiles sédimentaires du crétacé et quaternaire +Argiles d'altération de formations éruptives
	Ae2	Idem A2	
	Ae3	Idem A3	

## 2.5.2 Classification GTR

Tableau 2-6 Classification GTR

$D_{max}$	Classe	Sous classe	Nature
≤50mm	A Sols Fins	A1	Limons peu plastiques, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques, ...
		A2	Sables fins argileux, limons argileux et marnes peu plastiques, arènes,...
		A3	Argiles et argiles marneuses, limon très plastiques,
		A4	Argiles et argiles marneuses très plastiques,...
	B Sols sableux et graveleux avec fines	B1	Sables silteux,
		B2	Sables argileux (peu argileux) ...
		B3	Graves silteuses...
		B4	Graves argileuses (peu argileuse) ...
		B5	Sables et graves très silteux,
		B6	Sables et graves argileux à très argileux
>50mm	C Sols comportant des fines et des gros éléments	C1Ai	Argiles à silex, argiles à meulières, éboulis, moraines, alluvions grossières
		C2Bi	
		C2Ai	Argiles à silex, argiles à meulières, éboulis, moraines, biefs à silex
		C2Bi	
≤50mm	D Sols insensibles à l'eau	D1	Sables alluvionnaires propres, sables de dune
		D2	Graves alluvionnaires propres, sables

>50mm	D3	Graves alluvionnaires propre
-------	----	------------------------------

## 2.6 ETUDE D'APPLICATION DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE

Dans cette partie, nous allons présenter diverses couches de la chaussée et certaines recommandations liées aux caractéristiques des matériaux qui y sont destinés.

### 2.6.1 Couche de forme

Dans le contexte de la valorisation des matériaux locaux, la couche de forme joue un rôle clé en assurant la transition entre le sol de carrière et la structure de la chaussée. Elle permet d'améliorer la portance, de réduire les variations de comportement du sol et de protéger les couches supérieures contre l'humidité. Son efficacité dépend fortement des propriétés du matériau utilisé. Le tableau 2-7 présente les valeurs caractérisant la couche de forme :

Tableau 2-7 Les valeurs caractérisant la couche de forme [15]

Indice de plasticité	CBR
$\leq 25$	$> 5$

### 2.6.2 Couche de Fondation

Située entre la couche de forme et la couche de base, elle assure la répartition des charges vers les couches inférieures, contribue à la stabilité de l'ensemble et joue un rôle très important dans le drainage. Le choix de matériaux locaux pour cette couche peut optimiser les coûts tout en garantissant de performances mécaniques satisfaisantes.

Dans la page suivante, Le tableau 2-8 montre le fuseau granulométrique pour la couche de fondation

Tableau 2-8 Fuseau granulométrique couche de fondation

Granulométrie	Fuseau propose % passant
40mm	95-100
31,5mm	90-100
20mm	75-100
10mm	58-100
5mm	40-78
2mm	28-65
1mm	22-56
0,5mm	18-50
80um	5-35

Tableau 2-9 Différentes valeurs caractérisant la couche de fondation

IP	$D_{max}$	CBR	$C_u$	$W_{opt}$	$\phi_s$ max	$\phi_d$ OPM
$\leq 20$	$\leq 60$ mm	$30 \leq \text{CBR} \leq 80$	$\leq 30$	7 à 13%	1,8 à 2	1,9 à 2,1

### 2.6.3 Couche de base

Juste en dessous des couches de surface, elle a pour rôle principal d'assurer la portance et répartir les charges du trafic vers les couches inférieures. Cette couche est soumise à des sollicitations mécaniques importantes, d'où la nécessité d'utiliser des matériaux résistants, parfois issus de carrières locales pour allier performance et économie.

Le tableau 2-10 présente le fuseau granulométrique pour la couche de base.

Tableau 2-10 fuseau granulométrique couche de base

Maille	% passant
50mm	100
40mm	95-100
31,5mm	85-100
20mm	60-100
10mm	35-90
5mm	20-75
2mm	12-50
1mm	10-40
0,5mm	7-35
80um	4-20

Tableau 2-11 Différentes valeurs caractérisant la couche de base

IP	$D_{max}$	CBR	$C_u$	$\varphi$ OPM
$\leq 25$	$\leq 50\text{mm}$	$\leq 160$	$> 10$	2

## 2.7 CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre, nous avons présenté le corps de notre travail. C'est-à-dire tout ce qui fait objet de notre recherche notamment le matériau et son origine, le plan expérimental, l'échantillonnage, les caractérisations (avec différents essais : physiques et mécaniques) ainsi que quelques classifications y afférant. En gros ce chapitre présente toute démarche liée à ce travail du début à la fin.

## **Chapitre 3. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RÉSULTATS**

Dans ce chapitre, nous allons premièrement présenter les caractéristiques des sols que nous avons étudié, ensuite interpréter leur conformité dans la construction routière. Vu que le travail contient 3 échantillons distincts, ils seront tous présentés séparément avant de pouvoir donner un aperçu général.

### **3.1 LES CARACTERISTIQUES DES SOLS DE CARRIÈRE DE KANYARUCHINYA**

#### **3.1.1 Caractéristiques physiques**

##### **3.1.1.1 Teneur en eau naturelle**

La teneur en eau naturelle du premier échantillon est mesurée à 13,4 % ce qui reflète un niveau d'humidité modéré pour ce sol. Du point de vue géotechnique, cette valeur est révélatrice d'un sol dont l'état hydrique est ni excessivement sec ni saturé. Celle du second est de 11,1 % ; ce sol présente un niveau d'humidité modéré à faible. Pour l'échantillon 3, nous avons mesuré teneur en eau naturelle de 14,8 %. Ce qui indique que le sol est légèrement plus humide. Ce taux peut influencer la consistance du sol, en augmentant sa plasticité ou en modifiant son comportement au compactage. Selon le type de sol, une telle humidité peut améliorer la maniabilité ou au contraire nécessiter un ajustement avant utilisation en remblais. En terme de comparaison, l'échantillon 1 est dans une bonne marge que les autres.

### 3.1.1.2 Masses volumiques (absolue et apparente)

À travers les valeurs de la masse volumique absolue et apparente de l'échantillon 1, on a trouvé l'indice des vides élevé (1,65) et la porosité de 62,26%. Ce qui montre que ce sol a une faible portance à l'état naturel.

En se basant sur ces observations et conformément aux recommandations du GTR, l'échantillon 1 peut être classé en classe B5 à B6.

Il s'agit donc d'un matériau peu compact à compactable, nécessitant une amélioration mécanique pour une utilisation optimale en remblai routier.

Pour l'échantillon 2, l'indice des vides de 1,377 et la porosité de 57,94 % restent élevés, témoignant encore d'un sol faiblement compact. Néanmoins, comparé à l'échantillon 1, celui-ci est légèrement plus dense, ce qui pourrait traduire un meilleur comportement mécanique s'il est correctement traité.

Compte tenu des caractéristiques observées, et selon les critères du GTR, l'échantillon 2 peut être classé en classe B4 à B5. Il représente un matériau moyennement compact, potentiellement utilisable en remblai avec un contrôle minimal.

L'échantillon 3 est le plus dense des trois avec la porosité la plus faible (55,29 %). Cela laisse penser à un comportement plus favorable. Il est donc plus adapté aux usages routiers sans nécessiter d'importants traitements. Vu les résultats obtenus et selon les exigences du GTR, l'échantillon 3 peut être classé en classe B3 à B4.

Il s'agit d'un matériau relativement compact, favorable à une utilisation directe en remblais routiers sans traitement intensif.

### 3.1.1.3 Limites d'Atterberg

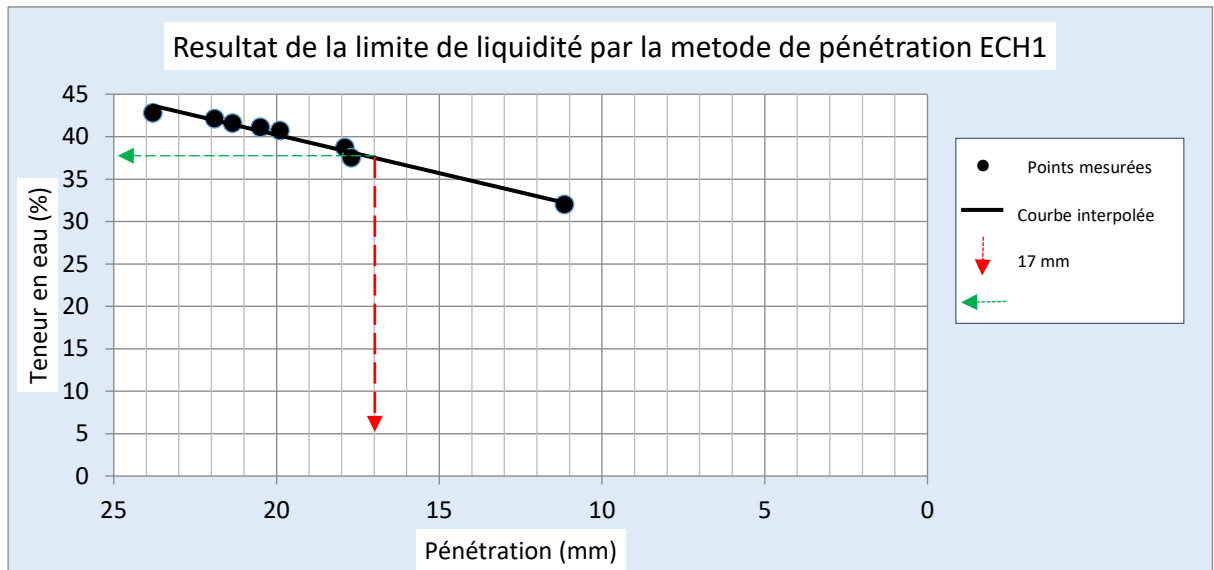


Figure 3-1 Limite de liquidité ECH1

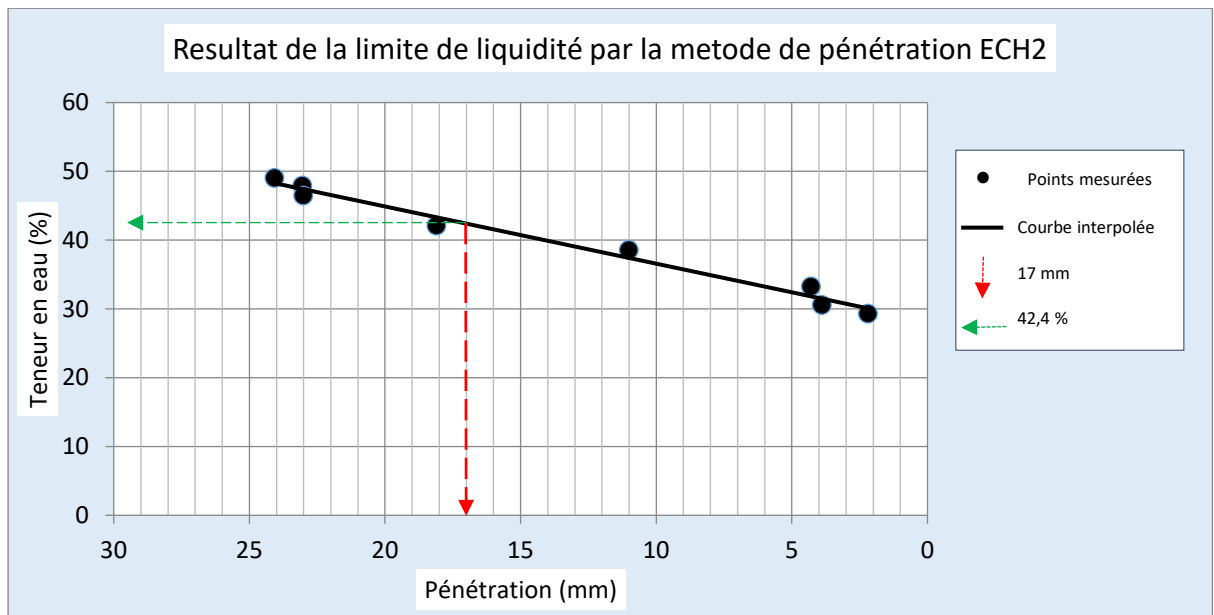


Figure 3-2 Limite de liquidité ECH2

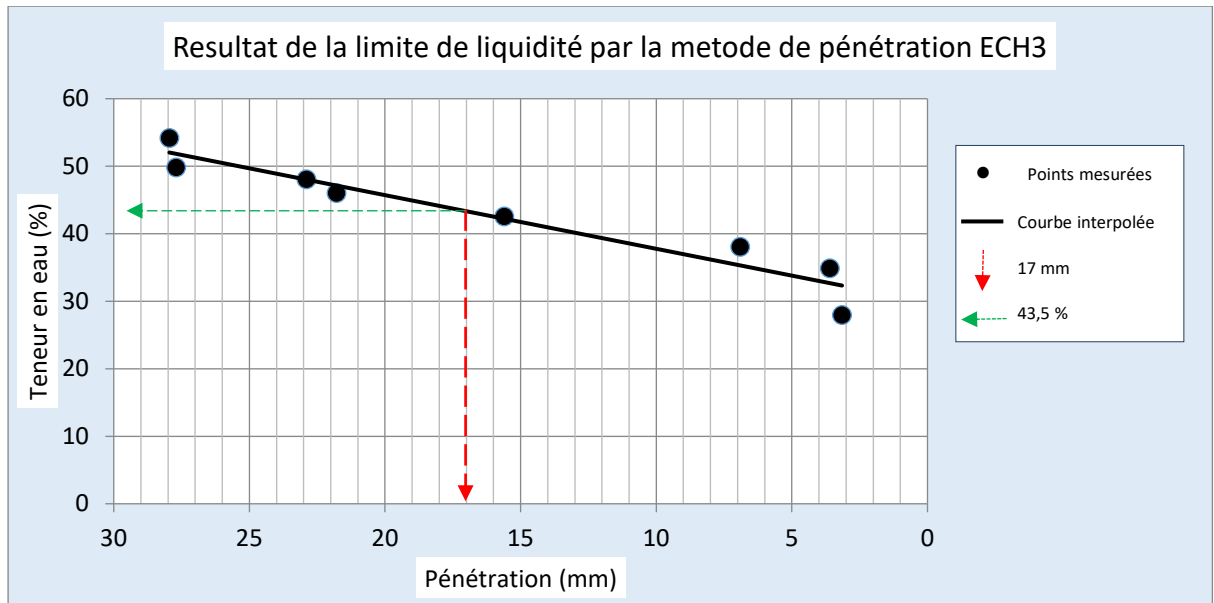


Figure 3-3 Limite de liquidité ECH3

Nous avons trouvé une limite de liquidités de 37,7 % pour l'échantillon 1, 42,4% pour l'échantillon 2 et 43,5 pour l'échantillon 3. Par ailleurs, les autres valeurs ont été ardues à relever face à certaines réalités. La limite de plasticité a été non mesurable ainsi en se basant sur les formules (2-7) et (2-8), on ne peut calculer l' $I_p$  et  $I_L$ . La limite de plasticité étant non mesurable pour ces échantillons, on en déduit que le sol ne présente pas de comportement plastique identifiable. En d'autres termes, le sol passe directement de l'état solide à l'état liquide, sans montrer un comportement plastique intermédiaire. Ce cas est typique de sols non cohérents, comme certains sables ou limons très peu argileux.

### 3.1.1.4 Analyse granulométrique

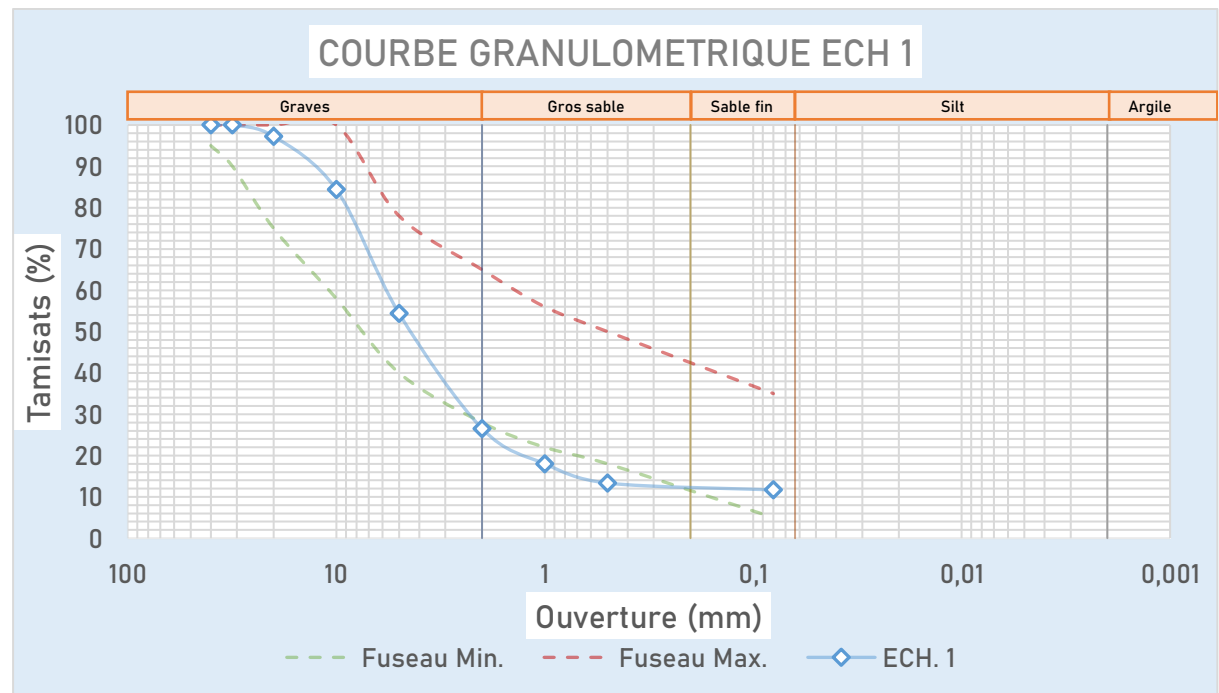


Figure 3-4 Analyse granulométrique ECH1

En suivant les formules (2-5) et (2-6), l'analyse granulométrique de l'échantillon montre une courbe bien étalée, caractérisée par un coefficient d'uniformité  $C_u = 14,4$ , largement supérieur au seuil de 6 requis pour considérer un sol comme bien gradué. Toutefois, le coefficient de courbure  $C_c = 0,71$ , inférieur à l'intervalle optimal  $[1 ; 3]$ , indique une légère irrégularité dans la distribution des particules intermédiaires. Cette courbure relativement faible pourrait traduire un déficit en particules de taille moyenne, susceptible d'affecter légèrement la densification optimale du matériau. Sur base de ces éléments et à l'absence d'une proportion excessive de fines, ce sol peut être provisoirement rattaché à la classe A2 de la famille des (GN) graves non traitées selon le Guide des Terrassements Routiers (GTR).

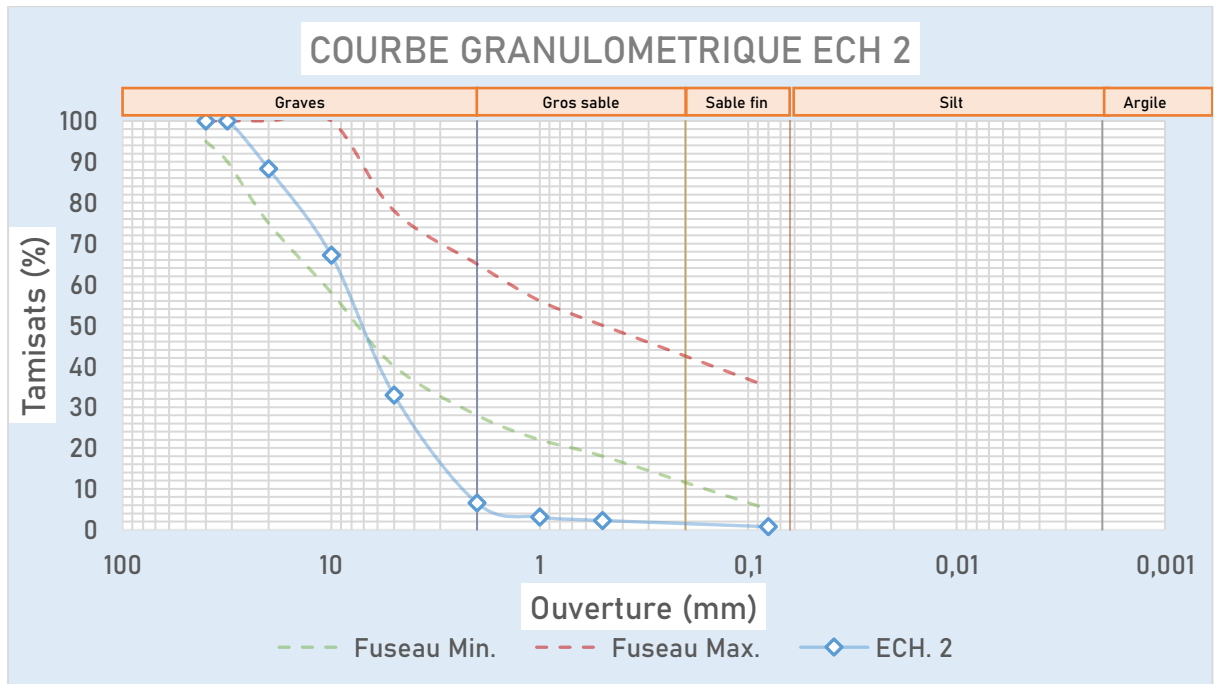


Figure 3-5 Analyse granulométrique ECH1

L'analyse granulométrique de cet échantillon montre une courbe bien étalée avec des diamètres caractéristiques estimés à  $D_{60} = 6$  mm,  $D_{30} = 2$  mm et  $D_{10} = 0,5$  mm. Les coefficients  $C_u = 12$  et  $C_c = 1,33$  indiquent une granulométrie bien graduée, répondant aux critères d'un sol granulaire bien réparti.

Conformément au Guide des Terrassements Routiers (GTR), ce sol est classé comme un sol granulaire de classe C. Ce type de sol est généralement bien adapté aux couches de forme ou aux couches de fondation, sous réserve de compacité et de teneur en eau appropriées.

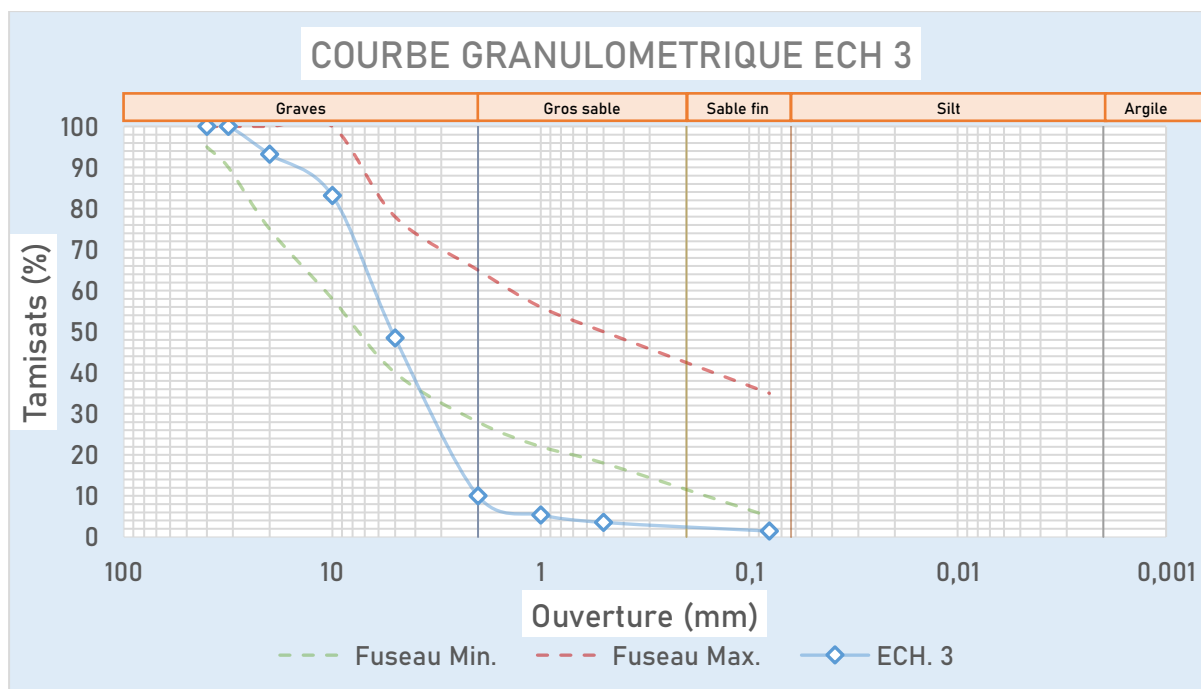


Figure 3-6 Analyse granulométrique ECH3

L'analyse granulométrique du sol 3 montre une distribution majoritairement composée de particules grossières, notamment des gravas et des sables. Les diamètres caractéristiques estimés sont :  $D_{60} = 3,5$  mm,  $D_{30} = 0,7$  mm et  $D_{10} = 0,25$  mm. Les coefficients granulométriques calculés sont :  $C_u = 14$  signifiant une granulométrie bien étalée et  $C_c = 0,56$  qui traduit une courbure non optimale.

Selon le GTR (Guide des Terrassements Routiers), ce sol est classé comme sol granulaire de classe C. Ce type de sol présente de bonnes caractéristiques mécaniques, adapté à des travaux de terrassement en couche de forme ou assise de chaussée, sous réserve d'un contrôle de la compacité et de l'humidité.

### 3.1.2 Caractéristiques mécaniques

#### 3.1.2.1 Proctor modifié

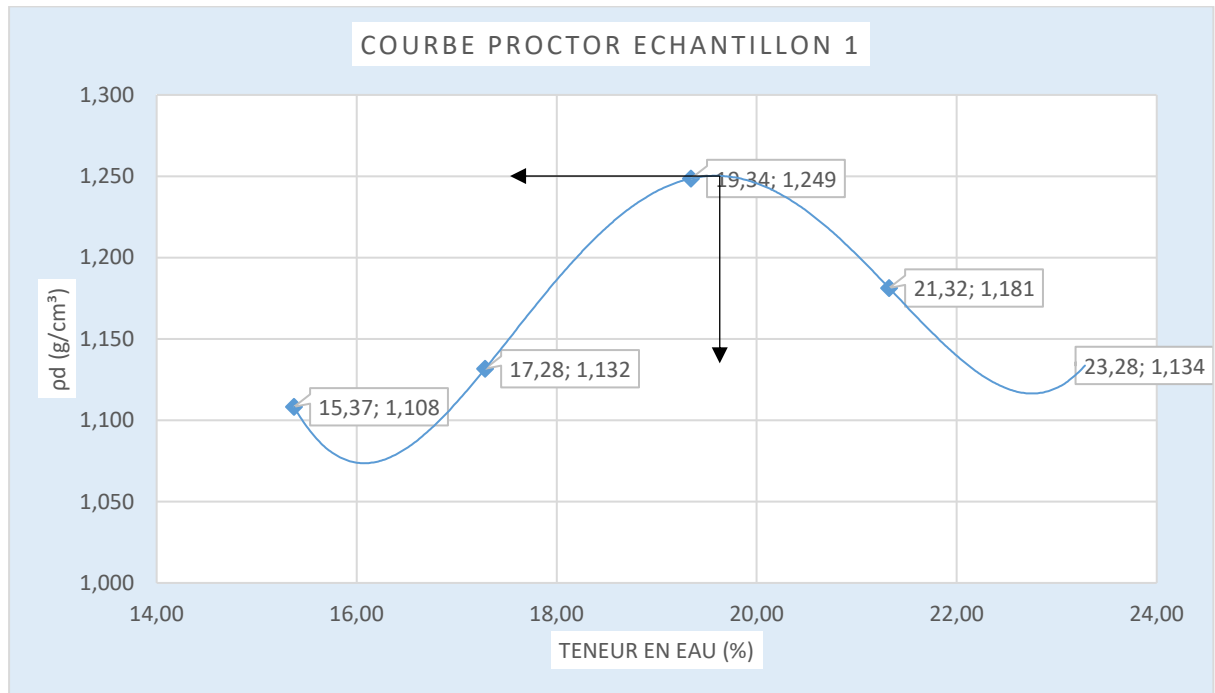


Figure 3-7 Courbe de tendance Proctor ECH1

L'essai Proctor modifié a permis d'obtenir une densité sèche maximale de  $1,249 \text{ g/cm}^3$  à une teneur en eau optimale de  $19,34\%$ . Cette densité relativement faible, obtenue malgré un compactage sous énergie élevée, indique que le sol présente une faible aptitude à la compaction, caractéristique de matériaux légers, poreux ou peu cohérents, comme les sols volcaniques (lapilli, scories volcaniques etc.)

La teneur en eau optimale élevée traduit une capacité d'absorption importante, et suggère que le matériau a besoin d'un ajustement hydrique important pour atteindre sa densité maximale.

Ces résultats confirment que le matériau présente une structure peu dense, ce qui peut limiter son usage en remblai porteur, sauf si des traitements ou une amélioration mécanique sont envisagés.

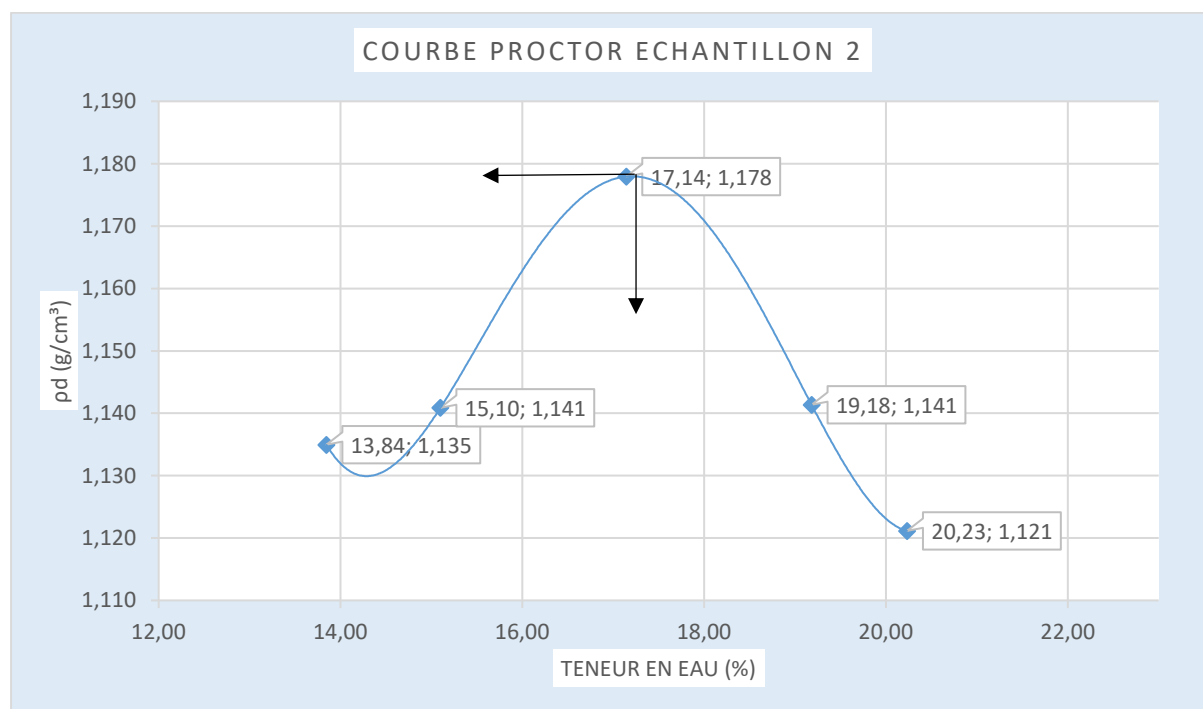


Figure 3-8 Courbe de tendance Proctor ECH2

L'échantillon 2 soumis à l'essai Proctor modifié a donné une densité sèche maximale de 1,178 g/cm<sup>3</sup> pour une teneur en eau optimale de 17,14 %. Cette densité, relativement basse au regard de l'énergie de compactage appliquée, suggère un sol faiblement compactable, soit en raison de sa structure interne poreuse, soit par la présence de constituants légers.

L'humidité optimale modérément élevée indique que le matériau a besoin d'une certaine humidification pour atteindre ses performances de compaction. Ce comportement suggère une utilisation limitée en couche de fondation, sauf en cas d'amélioration du sol.

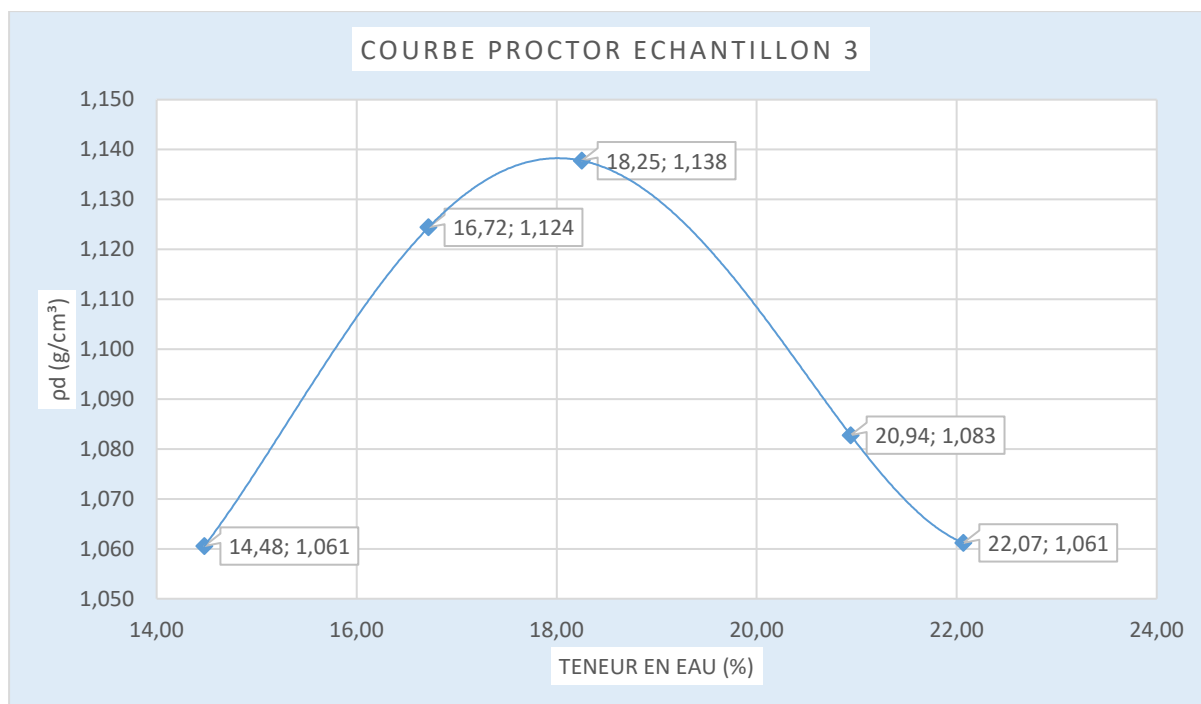


Figure 3-9 Courbe de tendance Proctor ECH3

L'essai Proctor modifié sur cet échantillon révèle une densité sèche maximale de  $1,138 \text{ g/cm}^3$ , atteinte à une teneur en eau optimale de 18,2 %. Cette densité est très faible au regard de l'énergie appliquée, traduisant un matériau à très faible compacité potentielle, probablement lié à une texture très poreuse, une granulométrie grossière, ou une composition volcanique légère.

La teneur en eau optimale relativement élevée confirme la forte capacité de rétention en eau du sol, et implique que sa mise en œuvre en remblais nécessite une gestion spécifique de l'humidité. Ces résultats indiquent une qualité mécanique faible à l'état naturel, et appellent à des précautions avant son emploi dans des structures soumises à des charges importantes.

### 3.1.2.2 CBR

Pour l'échantillon 1, l'essai CBR réalisé sous l'énergie de compactage de 25 coups a permis d'obtenir un indice de 17,31 %, proche de 95% de l'OPM ; ce qui indique une portance moyenne satisfaisante du matériau. Ce niveau de résistance à la pénétration suggère que le sol est apte à être utilisé en remblai ou en couche de forme, notamment pour des structures routières soumises à des charges modérées.

Toutefois, bien que ce résultat soit globalement favorable, l'indice reste inférieur au seuil de 30 % souvent recommandé pour les couches de fondation de chaussées fortement sollicitées. Il conviendra donc d'adapter l'usage du matériau en fonction du type d'ouvrage et des contraintes mécaniques prévues.

Pour l'échantillon 2, à 95 % de l'OPM. L'indice CBR obtenu (8,65 %) indique une faible capacité portante. D'un point de vue géotechnique, ce sol pourrait être utilisé en remblai de second ordre ou en couche de forme, mais non recommandé pour des couches de fondation ou de base sans amélioration préalable (traitement à la chaux ou au ciment, amélioration granulométrique, etc.)

À 95 % de son compactage optimal, l'échantillon 3 présente un CBR de 6,47 %, ce qui montre qu'il a une capacité portante assez faible. En pratique, ça veut dire qu'il n'est pas apte pour supporter de fortes charges ou des trafics lourds. On peut l'utiliser pour des remblais ou des couches de forme où la contrainte est moindre, mais pour les couches structurantes, il faudra penser à l'améliorer, par exemple en augmentant la compacité ou en ajoutant un liant. Bref, c'est un sol correct mais pas encore idéal pour les usages les plus exigeants.

En termes de comparaison, l'échantillon 1 présente un indice le plus élevé que les deux autres. Ce qui fait de lui le mieux adapté du point de vue portance.

## 3.2 CONFORMITÉ DES SOLS DE LA CARRIÈRE DE KANYARUCHINYA DANS LA CONSTRUCTION ROUTIÈRE

### 3.2.1 Route revêtue

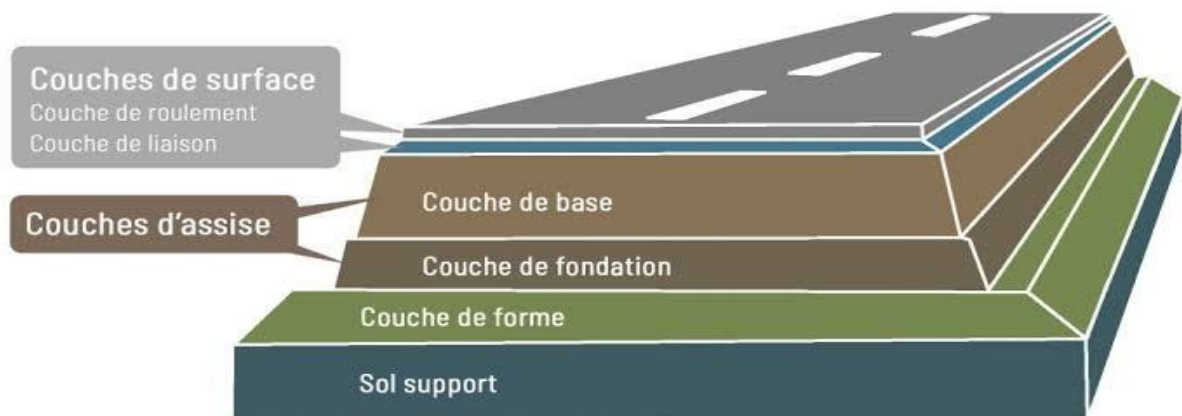


Figure 3-10 Structure d'une chaussée

#### a) Pour la couche de forme :

Selon les règles techniques pour la construction routière pour les pays tropicaux, un  $CBR > 5$  est recommandé. Un  $CBR \geq 10$  est exigé pour des chantiers importants sur lesquels circule des très gros engins, une granulométrie maximale inférieure à 150mm, le pourcentage des fines inférieur à 35 ou 45 % ainsi que l'indice de plasticité inférieur à 20 ou 30% sont retenus pour cette couche [16]. Le sol 1 satisfait à ces conditions avec un CBR de 17,31% et est donc utilisable en couche de forme. Les sols 2 (CBR 8,65%) et sol 3 (6,47%) répondent également

aux critères mais ne peuvent être utilisables pour des routes hautement chargées avant de subir un traitement.

**b) Pour la couche de fondation :**

Quelle que soit la structure dans laquelle ils sont inclus, les matériaux pour couche de fondation doivent avoir un CBR au moins égal à 30 obtenue pour une densité sèche correspondant à 95 % de l'OPM et de moindre granulométrie maximale pour éviter la ségrégation. D'autres critères dépendent des matériaux mis en œuvre [16]. Du point de vue granulométrique, les 3 sols (échantillons) restent acceptables mais avec recommandation d'une légère correction. Par ailleurs ces sols ne répondent pas au critère CBR. Donc ils ne peuvent pas être utilisable en couche de fondation avant un traitement de renforcement mécanique.

**c) Pour la couche de base :**

La couche de base étant soumise à des sollicitations importantes, les matériaux qui la constituent doivent avoir des qualités suffisantes. L'indice portant CBR doit être au moins égal à 80. Aucun sol de nos 3 échantillons n'atteint la moitié de cette exigence. D'où il est fortement recommandé de passer par des améliorations avant d'utiliser ces matériaux en couche de base.

### **3.2.2 Route non revêtue**

Selon les conditions d'utilisation, un matériau utilisé sur des routes non revêtues doit avoir un indice de plasticité inférieur à 40, le pourcentage de passants à 0,08 mm inférieur à 50 et à 2 mm inférieur ou égal à 50.

Ces matériaux peuvent être utilisés pour une route non revêtue (souvent à charge moins importantes).

### 3.3 CONCLUSION PARTIELLE

Les résultats obtenus à partir des essais au laboratoire nous ont permis de dire que les sols de la carrière de KANYARUCHINYA présentent des granulométries bien graduées vu leurs coefficients d'uniformité ( $C_u$ )  $> 6$ . Ce pendant les coefficients de courbure ( $C_c$ ) indiquent une légère irrégularité dans la distribution des particules. Ces sols ont une plasticité non mesurable, ce qui peut être due à leur texture et origine. Concernant la portance, de CBR acceptables et une portance élevée ont été observés. Mais toute fois, ces matériaux ne restent acceptables à leurs états naturels que pour la couche de forme.

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a porté sur l'étude géotechnique du sol en vue de son utilisation comme matériau de remblais routier avec application aux sols de carrière de KANYARUCHINYA en territoire de NYIRAGONGO. L'objectif poursuivi tout au long de l'élaboration de ce travail a été d'étudier les sols de cette carrière afin d'en déterminer les caractéristiques ou propriétés physiques et mécaniques en vue de les utiliser comme matériaux de construction routière.

Pour y arriver différentes méthodes et techniques ont été utilisées. Il s'agit de la méthode documentaire qui a été utile dans le recueil des notions de base sur les sols et leurs emplois, la méthode expérimentale qui s'est résumé par des essais de laboratoire relatifs à la détermination des paramètres de caractérisation et de comportement mécanique des sols utilisés en construction routière.

Les essais au laboratoire ont révélé qu'à part les paramètres d'état tel que les masses volumiques absolues ( $2,2\text{gr}/\text{Cm}^3$ ;  $1,949\text{gr}/\text{Cm}^3$ ;  $1,766\text{gr}/\text{Cm}^3$ ), il a été trouvé que plus de 87 % sont des particules de dimension supérieure à 0.2mm ; ce qui confère à ces sols le caractère des sols grenu particulièrement de sols sableux et graveleux avec fines.

Nous avons trouvé que ces sols ont des plasticités non mesurables ce qui justifie l'absence de certaines valeurs ( $I_p$ ,  $I_l$ ) qui dépendent de  $W_l$  et  $W_p$ . Pour les caractéristiques mécaniques nécessaires et recherchées dans l'application des matériaux à l'état brut de la carrière de KANYARUCHINYA en construction routière, la plus grande valeur sur les 3 échantillons a été le CBR de 17,31% après 4 jours d'immersion à 95% de l'OPM, restant une valeur faible

Ce qui implique leur utilisation seulement en plate-forme et en couche de forme. Cependant selon les recommandations, pour qu'un sol soit utilisé en assise de fondation, il faut qu'il ait un  $\text{CBR} \geq 30\%$ . Ceci implique que les sols de KANYARUCHINYA ne peuvent être utilisés en assise de fondation des chaussées revêtues car ayant des CBR largement inférieurs. Il est à

noter aussi que pour qu'un sol soit utilisé comme plateforme des chaussées il faut que son CBR soit supérieur à 5%. D'où ils peuvent être utilisés pour des routes non revêtues de moindre trafic.

Néanmoins, ce travail étant le fruit de l'œuvre humaine, nous reconnaissons que tous les aspects n'ont pas été abordés dans cette recherche, le sujet étant d'une grande ampleur. Ce mémoire se veut donc être un guide pour les futurs chercheurs qui pourraient aborder d'autres aspects notamment la stabilisation de ces sols au ciment ou à la chaux pour améliorer leurs caractéristiques mécaniques.

## ANNEXES

### a) Analyse granulométrique ECH1

N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	G	%	%
3"	50	76.2	80	0	0	100
2 1/2"	49	63.5	63	0	0	100
2"	48	50.8	50	0	0	100
1 1/2"	47	38.1	40	0	0	100
1 1/4"	46	31.7	31.5	0	0	100
1"	45	25,4	25	0	0	100
3/4 "	44	19,1	20	82	2,73	97,27
2/3"	43	16,9	16	166	5,53	94,47
1/2"	42	12,7	12.5	282	9,4	90,6
3/8"	41	9,52	10	468	15,6	84,4
1/3"	40	7,93	8	670	22,33	77,67
1/4"	39	6,35	6.3	1002	33,4	66,6
3/16"	38	4,76	5	1368	45,6	54,4
5	37	4	4	1696	56,53	43,47
6	36	3,36	3.15	1878	62,6	37,4
8	35	2,38	2.5	2082	69,4	30,6
10	34	2	2	2204	73,46	26,54
12	33	1,68	1.6	2312	77,06	22,94
16	32	1,19	1.25	2406	80,2	19,8
18	31	1	1	245	81,6	18
20	30	0,84	0,8	2476	82,5	17,5
30	29	0,59	0,63	2550	85	15
35	28	0,5	0,5	2600	86,66	13,34
40	27	0,4	0,4	2624	87,46	12,54

50	26	0,315	0,315	2630	87,66	12,34
60	25	0,25	0,25	2635	87,83	12,17
70	24	0,2	0,2	2639	87,96	12,04
100	23	0,16	0,16	2641	88,03	11,97
120	22	0,125	0,125	2645	88,16	11,84
140	21	0,1	0,1	2647	88,23	11,77
200	20	0,08	0,08	2649	88,3	11,7

## b) Teneurs en eau naturelles

## ECH1

Tare	1	2	3
P.tare (g)	14,63	14,63	14,14
P.tare + Ech. h	21,87	20,46	19,85
P.tare + Ech. Sc	20,92	19,32	19,92
W (%)	15	24,3	1,2
Wn (%)	13,4 %		

## ECH2

Tare	1	2	3
P.tare (g)	14,40	14,71	14,27
P.tare + Ech. h	27,43	28,49	28,71
P.tare + Ech. Sc	26,20	27,07	27,21
W (%)	10,1	11,4	11,6
Wn (%)	11,1 %		

**ECH3**

Tare	1	2	3
P.tare (g)	14,40	14,71	14,27
P.tare + Ech. h	28,48	28,18	27,74
P.tare + Ech. Sc	26,68	26,28	26,12
W (%)	14,6	16,4	13,6
Wn (%)	14,8 %		

## c) Mases volumiques absolues

ECH1

Identifiants	m1	m2	m3
Masse sèche	600gr	720gr	800gr
V1	600ml	1200ml	1500ml
V2	880ml	1510ml	1840ml
$f_{abs}$	$2,1\text{gr}/\text{Cm}^3$	$2,3\text{gr}/\text{Cm}^3$	$2,3\text{gr}/\text{Cm}^3$
$f_{abs}$	$2,2\text{gr}/\text{Cm}^3$		

ECH2

Identifiants	m1	m2	m3
Masse sèche	600gr	700gr	800gr
V1	800ml	900ml	1000ml
V2	1100ml	1260ml	1420ml
$f_{abs}$	$2\text{gr}/\text{Cm}^3$	$1,944\text{gr}/\text{Cm}^3$	$1,904\text{gr}/\text{Cm}^3$
$f_{abs}$	$1,949\text{gr}/\text{Cm}^3$		

## ECH3

Identifiants	m1	m2	m3
Masse sèche	500gr	600gr	700gr
V1	700ml	800ml	900ml
V2	980ml	1140ml	1300ml
$f_{abs}$	1,785gr/ $Cm^3$	1,764gr/ $Cm^3$	1,75gr/ $Cm^3$
$f_{abs}$	1,766gr/ $Cm^3$		

### d) Masses volumiques apparentes

ECH1

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_{app}$
0,84 gr/ $Cm^3$	0,82 gr/ $Cm^3$	0,83 gr/ $Cm^3$	0,83 gr/ $Cm^3$	0,83 gr/ $Cm^3$

ECH2

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_{app}$
0,83 gr/ $Cm^3$	0,81 gr/ $Cm^3$	0,82 gr/ $Cm^3$	0,82 gr/ $Cm^3$	0,82 gr/ $Cm^3$

ECH3

$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_{app}$
0,82 gr/ $Cm^3$	0,81 gr/ $Cm^3$	0,77 gr/ $Cm^3$	0,79 gr/ $Cm^3$	0,79 gr/ $Cm^3$

## e) Essai Proctor modifié

Teneur en eau (%)										
Masse du moule (g)	6590		6590		6590		6590		6590	
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2756,769		2756,769		2756,769		2756,769		2756,769	
M.ech.humide+ M.moule	10115		10249		10698		10541		10443	
.volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,279		1,327		1,490		1,433		1,398	
Tare sup et inf (g)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poids tares (g)	15	14	16	14	14,5	15,81	18,48	13,86	15,31	14,06
Poids tares+ ech.humide	39	36,98	35,95	30	33,12	36,74	35,47	32,09	37,15	38,03
Poids tares+ ech.sec (g)	35,81	33,91	33	27,65	30,1	33,35	32,48	28,89	33,01	33,52
Poids de l'eau (g)	3,19	3,07	2,95	2,35	3,02	3,39	2,99	3,2	4,14	4,51
W (%)	15,33	15,42	17,35	17,22	19,36	19,33	21,36	21,29	23,39	23,18
W m (%)	15,37		17,28		19,34		21,32		23,28	
pd (g/cm <sup>3</sup> )	1,108		1,132		1,249		1,181		1,134	

Proctor modifié/ Echantillon 1

M.ech.humide+ M.moule	10152		10210		10394		10340		10306	
.volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,292		1,313		1,380		1,360		1,348	
Tare sup et inf (g)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poids tares (g)	13,72	13,84	14,91	17,5	15,05	12,84	14,29	14,59	14,22	14,83
Poids tares+ ech.humide	29,26	30,96	29,3	29,25	28,19	28,49	30,84	32,59	30,33	34,49
Poids tares+ ech.sec (g)	27,27	28,99	27,35	27,76	26,25	26,22	28,17	29,7	27,5	31,33
Poids de l'eau (g)	1,99	1,97	1,95	1,49	1,94	2,27	2,67	2,89	2,83	3,16
W (%)	14,69	13,00	15,68	14,52	17,32	16,97	19,24	19,13	21,31	19,15
W m (%)	13,84		15,10		17,14		19,18		20,23	
pd (g/cm <sup>3</sup> )	1,135		1,141		1,178		1,141		1,121	

Proctor modifié/ Echantillon 2

Teneur en eau (%)										
Masse du moule (g)	6590		6590		6590		6590		6590	
Volume du moule (cm <sup>3</sup> )	2756,769		2756,769		2756,769		2756,769		2756,769	
M.ech.humide+ M.moule	9937		10208		10299		10200		10161	
.volumique humide (g/cm <sup>3</sup> )	1,214		1,312		1,345		1,310		1,295	
Tare sup et inf (g)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Poids tares (g)	13,47	13,74	14,42	14,15	14,15	14,27	15,45	14	14,51	14,57
Poids tares+ ech.humide	30,31	28,48	28,33	30	30,54	30,34	36,93	32,02	30,33	34,47
Poids tares+ ech.sec (g)	28,21	26,59	26,2	27,89	27,99	27,88	33,14	28,96	27,22	31,2
Poids de l'eau (g)	2,1	1,89	2,13	2,11	2,55	2,46	3,79	3,06	3,11	3,27
W (%)	14,25	14,71	18,08	15,36	18,42	18,07	21,42	20,45	24,47	19,66
W m (%)	14,48		16,72		18,25		20,94		22,07	
pd (g/cm <sup>3</sup> )	1,061		1,124		1,138		1,083		1,061	

Proctor modifié/ Echantillon 3

## f) Résultats des essais CBR

## ECH1

Nombre de coups	Enfoncement	Forces en KN	Effort de pénétration	Indice CBR
25	CBR 2.5	1,96	$\frac{1,96}{13,4} \times 100$	14,62 %
	CBR 5	3,48	$\frac{3,48}{20,1} \times 100$	17,31 %

## ECH2

Nombre de coups	Enfoncement	Forces en KN	Effort de pénétration	Indice CBR
25	CBR 2.5	0,65	$\frac{0,65}{13,4} \times 100$	4,85 %
	CBR 5	1,74	$\frac{1,74}{20,1} \times 100$	8,65 %

## ECH3

Nombre de coups	Enfoncement	Forces en KN	Effort de pénétration	Indice CBR
25	CBR 2.5	0,65	$\frac{0,65}{13,4} \times 100$	4,85 %
	CBR 5	1,3	$\frac{1,3}{20,1} \times 100$	6,47 %

## g) Abaque de correspondance CBR

lecture (mm)	Force (KN)
0,01	0,22
0,02	0,43
0,03	0,65
0,04	0,87
0,05	1,09
0,06	1,3
0,07	1,52
0,08	1,74
0,09	1,96
0,1	2,17
0,11	2,39
0,12	2,61
0,13	2,83
0,14	3,04
0,15	3,26
0,16	3,48
0,17	3,7
0,18	3,91
0,19	4,13
0,2	4,35
0,21	4,57
0,22	4,78
0,23	5
0,24	5,22
0,25	5,43
0,26	5,65
0,27	5,87
0,28	6,09
0,29	6,3

lecture (mm)	Force (KN)
0,57	12,44
0,58	12,67
0,59	12,89
0,6	13,11
0,61	13,33
0,62	13,56
0,63	13,78
0,64	14
0,65	14,22
0,66	14,44
0,67	14,67
0,68	14,89
0,69	15,11
0,7	15,33
0,71	15,56
0,72	15,78
0,73	16
0,74	16,22
0,75	16,44
0,76	16,67
0,77	16,89
0,78	17,11
0,79	17,33
0,8	17,56
0,81	17,78
0,82	18
0,83	18,22
0,84	18,44
0,85	18,67
0,86	18,89

lecture (mm)	Force (KN)
1,14	25
1,15	25,22
1,16	25,43
1,17	25,65
1,18	25,87
1,19	26,09
1,2	26,3
1,21	26,52
1,22	26,74
1,23	26,96
1,24	27,17
1,25	27,39
1,26	27,61
1,27	27,83
1,28	28,04
1,29	28,26
1,3	28,43
1,31	28,7
1,32	28,91
1,33	29,13
1,34	29,35
1,35	29,57
1,36	29,78
1,37	30
1,38	30,22
1,39	30,44
1,4	30,87
1,41	30,87
1,42	31,11
1,43	31,33

lecture (mm)	Force (KN)
1,71	37,56
1,72	37,78
1,73	38
1,74	38,22
1,75	38,44
1,76	38,67
1,77	38,89
1,78	39,11
1,79	39,33
1,8	39,56
1,81	39,78
1,82	40
1,83	40,22
1,84	40,43
1,85	40,65
1,86	40,87
1,87	41,09
1,88	41,3
1,89	41,52
1,9	41,74
1,91	41,96
1,92	42,17
1,93	42,39
1,94	42,61
1,95	42,83
1,96	43,04
1,97	43,26
1,98	43,48
1,99	43,7
2	43,91

0,3	6,52
0,31	6,74
0,32	6,96
0,33	7,17
0,34	7,39
0,35	7,61
0,36	7,83
0,37	8,04
0,38	8,26
0,39	8,48
0,4	8,7
0,41	8,91
0,42	9,13
0,43	9,35
0,44	9,57
0,45	9,78
0,46	1
0,47	1,22
0,48	10,44
0,49	10,67
0,5	10,89
0,51	11,11
0,52	11,33
0,53	11,66
0,54	11,78
0,55	12
0,56	12,22

0,87	19,11
0,88	19,33
0,89	19,56
0,9	19,78
0,91	20
0,92	20,22
0,93	20,43
0,94	20,65
0,95	20,87
0,96	21,09
0,97	21,3
0,98	21,52
0,99	21,74
1	21,96
1,01	22,17
1,02	22,39
1,03	22,61
1,04	22,88
1,05	23,04
1,06	23,26
1,07	23,48
1,08	23,7
1,09	23,91
1,1	24,13
1,11	24,35
1,12	24,57
1,13	24,78

1,44	31,56
1,45	31,78
1,46	32
1,47	32,22
1,48	32,44
1,49	32,67
1,5	32,89
1,51	33,11
1,52	33,33
1,53	33,56
1,54	33,78
1,55	34
1,56	34,22
1,57	34,44
1,58	34,67
1,59	33,89
1,6	35,11
1,61	35,33
1,62	35,56
1,63	35,78
1,64	36
1,65	36,22
1,66	36,44
1,67	36,67
1,68	36,89
1,69	37,11
1,7	37,33

2,01	44,13
2,02	44,35
2,03	44,57
2,04	44,78
2,05	45
2,06	45,22
2,07	45,43
2,08	45,65
2,09	45,87
2,1	46,09
2,11	46,3
2,12	46,52
2,13	46,74
2,14	46,96
2,15	47,17
2,16	47,39
2,17	47,61
2,18	47,83
2,19	48,04
2,2	48,26
2,21	48,48
2,22	48,7
2,23	48,91
2,24	49,13
2,25	49,35
2,26	49,57
2,27	49,78

## Bibliographie

- [1] **World Bank.** (2018). *Infrastructure for Development : A Comprehensive Approach to Sustainable Infrastructure Management.*
- [2] **Giroud, J.-P.** (2004). *Géotechnique : Principes et applications.* Presses Universitaires de France.
- [3] **Raphael, SAFARI MUHIMANYI.** *Etude géotechnique du sol en vue de son utilisation comme matériau de remblais routiers : application au sol de la carrière de MULIRA a KAMANYOLA,* mémoire. Goma : ULPGL, 2021- 2022.
- [4] **S. MABRUKI.** *Caractérisation géotechnique des cendres volcaniques : Cas du mont Goma. Mémoire de diplôme d'ingénieur en génie civil.* Goma : ULPGL 2012/2013
- [5] **Gérard Degoutte et Paul Royet (Cemagref).** *Aide-mémoire de mécanique des sols.* Réédition 2005.
- [6] **NGAPGUE, F.** *Cours de mécanique des sols.* Goma : L3/Génie civil/ULPGL, 2018 - 2019.
- [7] **MUZYUMBA, M. PIERRE.** *Cours de mécanique des sols et des roches.* Kinshasa : Université de Kinshasa, 2007 – 2008.
- [8] **AMBOKO, M.** *Cours de technologie de construction.* Goma : L2/génie civil/ULPGL, 2022 – 2023.
- [9] **A. Poucet.** *Le volcanisme récent des virunga (Kivu, Zaïre.* Bulletin de la société géologique de France, série 7, vol.XVI, n ° 2, pp. 349-359, 1974
- [10] **Wikipédia.** NYIRAGONGO (territoire)
- [11] **B. Younes et D. Amine,** *Caractérisation des sols allégés avec les résidus de bois, 2017.*
- [12] **Elie, KASEREKA MAKASI.** *Caractérisation du sol de Rubaya en vue de son utilisation comme matériau étanche : Application aux installations de stockage de déchets (ISD),* Travail de fin de Cycle. Goma : 2018-2019.
- [13] **Nelly, MLEBING BUSHIRI.** *Etude comparative des caractéristiques du sol par stabilisation au ciment et à la chaux : Application au sol de BUGANGA a MINOVA. Mémoire de diplôme d'ingénieur en génie civil.* Goma : ULPGL, 2020-2021.

[14] **D. I. Pierre**, *mécanique des sols et fondations*, Paris, 1999.

[15] **G. LIAUTAUD & MM.E. BERARD**, *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*, 1984.

[16] **CEBTP**, *Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux*.