

ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET UNIVERSITAIRE
UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
(U.L.P.G.L – Goma)



B.P :368/GOMA
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUEES
Département de Génie Civil

**CONTRIBUTION À LA CARACTÉRISATION DES SOLS DE
RUTSHURU ENVUE DE L'UTILISATION COMME MATERIAU DE
REMBLAI DANS LA CONSTRUCTION DE LA RN4 DU TRONÇON
RUTSHURU-BUNAGANA**

Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du
diplôme d'Ingénieur Civil

Orientation : Structures et Ouvrages d'Arts

Fait par : GWIZA SEKABUHORO Winnie

Dirigé par : Prof. Ir. Chérif BISHWEKA BIRYONDEKE

Encadré par : Msc. Ir. KUBUYA BINWA Patient

Année académique : 2022-2023

Epigraphe

« C'est dans l'effort que l'on trouve la satisfaction et non dans la réussite. Un plein effort est une pleine victoire. »

Mahatma Gandhi

Dédicace

A nos chers parents BENEZETH SEKABUHHORO et YVONNE BAKANGANA

Remerciements

Le présent travail est l'œuvre d'une combinaison de plusieurs apports des différentes personnes qui nous ont tenu la main pendant son élaboration. Celles-ci méritent amplement qu'on leur montre à quel point nous leur sommes suffisamment reconnaissante. C'est ainsi que nous tenons à les remercier, de près ou de loin pour leur assistance.

Nos remerciements vont premièrement à Dieu Tout Puissant pour la force, le courage, la santé et la patience qu'il nous a donnés durant toutes ces longues années d'étude.

Nos chaleureux et respectueux remerciements s'adressent aux autorités académiques de l'ULPGL/Goma, et plus particulièrement à celles de la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées (FSTA) pour tous leurs efforts et leur souci de nous offrir une formation de qualité dès le début de notre formation.

Profonde gratitude à Pain Pour Le Monde (PPLM) pour sa bourse octroyée dont nous avons été bénéficiaire durant trois longues années et qui nous a permis de poursuivre nos études aisément.

Nous remercions particulièrement le Professeur Chérif BISHWEKA pour avoir accepté de diriger ce travail malgré ses multiples occupations. Nos vifs remerciements à notre encadreur Msc. Ir. KUBUYA BINWA Patient pour son bon encadrement et sa disponibilité qui nous ont aidée à alimenter notre réflexion.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à nos parents BENEZETH SEKABUHHORO et YVONNE BAKANGANA qui nous ont toujours accompagnée dans tous nos engagements, tant sur le plan moral, financier que physique.

Nous remercions de tout cœur, toute la famille SEKABUHHORO ainsi que la famille BAKANGANA, et plus particulièrement le Révérend Père Désiré BAKANGANA qui n'a jamais cessé de nous accompagner spirituellement, moralement et financièrement dans toutes nos démarches académiques.

A toute personne qui, de près ou de loin, a contribué à l'élaboration de ce travail mais qui n'a pas retrouvé son nom ci-haut, nous disons merci infiniment.

GWIZA SEKABUHHORO Winnie

Résumé

Ce travail a porté sur la contribution à la caractérisation des sols de Rutshuru en vue d'être utilisés comme matériau de remblai dans la construction de la RN4 du tronçon Rutshuru-Bunagana, étude menée respectivement dans deux sites notamment à Rutshuru centre et à Jomba. L'objectif principal de la présente étude est d'évaluer la faisabilité et l'applicabilité de ces sols en terme de construction routière. Afin d'effectuer les essais, sur chaque site nous avons prélevé deux échantillons. Pour parvenir aux résultats, il a été question en premier lieu de faire la caractérisation qui consiste en l'identification et la classification des sols, deuxièmement, il a été question de déterminer les caractéristiques mécaniques des sols (Proctor, CBR pour trois énergies de compactage : 10, 25 et 55 coups de dame). Des essais de laboratoire, nous avons constaté que les résultats obtenus à la suite de l'analyse granulométrique et des limites d'Atterberg de ces deux sites permettent de classer les sols étudiés parmi les sols grenus, des sables argileux à consistance molle et très molle. En nous basant sur leurs indices CBR, ils ont présenté une portance très faible, soit de 1.93% et 0% respectivement pour la zone de Rutshuru centre et celle de Jomba, ce qui nous permet de constater que ces sols ne sont pas convenables dans la construction routière, cependant ils peuvent convenir en tant que remblai pour la couche de forme pour une route à faible trafic.

Mots clés : Contribution, caractérisation, remblai, construction.

Abstract

This work focused on the contribution to the characterization of the Rutshuru soils for use as backfill materials in the construction of the RN4 of the Rutshuru-Bunagana section, a study conducted respectively in two sites, namely in Rutshuru center and Jomba. The main objective of this study is to assess the feasibility and applicability of these soils in terms of road construction. In order to carry out the tests, at each site we took two samples. To arrive at the results, it was first a question of making the characterization which consists of the identification and classification of the soils, secondly, it was a question of determining the mechanical characteristics of the soils (Proctor, CBR for three compaction energies: 10, 25 and 55 strokes of lady). From laboratory tests, we found that the results obtained from the particle size analysis and the Atterberg limits of these two locations allow the soils studied to be classified as grainy, soft and very soft clay sands. Based on their CBR indices, they showed a very low load-bearing capacity, i.e. 1.93% and 0% respectively for the Rutshuru centre and Jomba areas, which allows us to see that these soils are not suitable for road construction, however they may be suitable as backfill for the shape layer for a low-traffic road.

Keywords: Contribution, characterization, backfill, construction.

Table des matières

Epigraphe	ii
Dédicace.....	iii
Remerciements.....	iv
Résumé.....	v
Abstract	vi
Table des matières	vii
Liste des abréviations.....	ix
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE PREMIER : GENERALITES	4
1.1 Généralités sur les sols [4]	4
1.1.1 Différents types de sol [5]	4
1.1.2 Sables [4]	6
1.1.3. Argiles [6].....	8
1.1.4. Caractéristiques physiques des sols [7]	8
1.1.5. Caractéristiques granulométriques des sols.....	10
1.1.6. Identification des sols [8]	10
1.1.7. Essais d'identification des sols [10]	15
1.2. Généralités sur la route [14]	22
1.2.1. Réseau routier Congolais.....	22
1.2.2. Importance de la géotechnique routière.....	24
1.2.3. Notion générale sur les chaussées [18].....	24

I.3. Généralités sur le milieu d'étude	27
CONCLUSION PARTIELLE	32
CHAPITRE DEUXIEME : MATERIELS ET METHODES DE RECHERCHE.....	33
II.1. Choix du site de prélèvement et échantillonnage réalisé	33
II.2. Essais d'identification, classification et caractérisation.....	35
II.2.1. Teneur en eau naturelle du sol [19].....	35
II.2.2. Analyse granulométrique [4].....	36
II.2.3. Limites d'Atterberg [20]	39
II.2.4. Les essais mécaniques [21]	42
II.2.5. Essai de cisaillement rectiligne [14].....	51
CONCLUSION PARTIELLE	53
CHAPITRE TROISIEME : ANALYSE ET INTERPRETATION DES RESULTATS.....	54
III.1. Teneur en eau naturelle du sol	54
III.1.1. Sol de Jomba	54
III.1.2. Sol de Rutshuru Centre	54
III.2. Analyse granulométrique	55
III.3. Limites d'Atterberg.....	57
III.3.1. Limites d'Atterberg du sol de Jomba.....	57
III.3.2. Limites d'Atterberg du sol de Rutshuru centre.....	60
III.4. Les essais mécaniques.....	63
III.4.1. Essai Proctor Modifié	63
III.4.2. Essai CBR	65
III.5. Essai de cisaillement rectiligne	67
CONCLUSION PARTIELLE	68
CONCLUSION GENERALE	69
BIBLIOGRAPHIE.....	71
ANNEXES	74

Liste des abréviations

° : Degré

% : Pourcent

AFNOR : Association Française de Normalisation

AG : Analyse granulométrique

CBR : California Bearing Ratio (Indice portant Californien)

Cm: Centimètre

FSTA : Faculté des Sciences et Technologies Appliquées

g : Gramme

GTR : Guide de Terrassement Routier

Ic : Indice de consistance

Il : Indice de liquidité

Ip : Indice de plasticité

Kg : Kilogramme

LCPC : Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

m : Mètre

Md : Masse sèche de l'échantillon

Mh : Masse humide de l'échantillon

mm : Millimètre

m³ : Mètre cube

MO : Matières Organiques

NF : Norme Française

RDC : République Démocratique du Congo

RN : Route nationale

t : Tonne

UCCS : Unified Soil Classification System

ULPGL : Université Libre des Pays des Grands Lacs

µm : Micromètre

W : Teneur en eau

Wl : Limite de liquidité

Wopt : Teneur en eau optimale

Wp : Limite de plasticité

ρ : Masse volumique

ρ_d : Masse volumique sèche

ρ_s : Masse volumique des grains solides

ρ_{dmax} : Densité sèche maximale

Liste des tableaux

Tableau 1. 1 Classification LC.P.C. des sols grenus. [8].....	12
Tableau 1. 2 Tableau simplifié de la classification des sols GTR. [8].....	13
Tableau 1. 3 Classement des matériaux selon leur diamètre [11].....	16
Tableau 1. 4.4. Valeur de l'équivalent sable avec nature et qualité de sable [12].....	17
Tableau 1. 5 Caractérisation des sols à partir de la valeur de ES	17
Tableau 1. 6 Compacité d'un sol en fonction de la densité relative [9].....	17
Tableau 1. 7 Différents états des limites d'Atterberg [13].....	18
Tableau 1. 8 Types de sol en fonction de l'IP [13]	19
Tableau 1. 9 Classification de Sanglerat (gonflement libre en fonction de IP) [11]	19
Tableau 1. 10 Echelle de classification des sols suivant les valeurs de I_c	20
Tableau 1. 11 Etat de consistance de sol en fonction de l'indice de liquidité [9].....	20
Tableau 1. 12 Types de sol en fonction du pourcentage en $CaCO_3$	21
Tableau 1. 13 Type de sol en fonction du % en matières organiques.....	21
Tableau 1. 14 Le réseau routier congolais. [16].....	23
Tableau 2. 1 Echelle de classification des sols suivant les valeurs de I_c	42
Tableau 2. 2 Pourcentage de CBR et sa classe de portance [11]	50
Tableau 2. 3 CBR selon l'utilisation des sols	50
Tableau 2. 4 Valeurs typiques des propriétés mécaniques des sols sur l'essai de cisaillement [26].....	52
Tableau 3. 1 Teneur en eau naturelle du sol de Jomba	54
Tableau 3. 2 Teneur en eau naturelle du sol de Rutshuru centre	55
Tableau 3. 3.a. Valeurs de W , W_L , W_P , I_P , I_C du sol de Jomba, échantillon 1.....	58
Tableau 3. 4.a. Valeurs de W , W_L , W_P , I_P , I_C du sol de Rutshuru centre, échantillon 1.....	60
Tableau 3. 5 Indice de portance du sol de Rutshuru centre	66
Tableau 3. 6 Indice de portance du sol de Jomba	66
Tableau 3. 7 Cohésion et angle de frottement interne du sol de Rutshuru centre.....	67
Tableau 3. 8 Cohésion et angle de frottement interne du sol de Jomba.....	67

Liste des figures

Figure 1.1 Sol argileux.....	5
Figure 1.2 sol calcaire.....	5
Figure 1.3 Sol humifère.....	6
Figure 1.4 Sol sablonneux.....	6
Figure 1.5 Classification des sols à granulométrie uniforme [9].....	10
Figure 1.6 Abaque de Casagrande utilisable dans la classification L.C.P.C. des sols fins.....	14
Figure 1.7 Classification triangulaire des sols fins [8].....	15
Figure 1.8 Structure d'une chaussée.....	27
Figure 1.9 Bunagana City.....	28
Figure 1.10 RN2 Goma-Rutshuru.....	29
Figure 1.11 RN4 Rutshuru-Bunagana.....	29
Figure 1.12 Rutshuru City.....	30
Figure 1.13 Rutshuru-Tshengerero-Bunagana.....	31
Figure 1.14 Rutshuru Centre.....	31
Figure 2. 1 Zone d'étude 1, Rutshuru Centre	34
Figure 2. 2 Zone d'étude 2, Jomba.....	34
Figure 3. 1 Courbe granulométrique du sol de Jomba, échantillon 1	55
Figure 3. 2 Courbe granulométrique du sol de Jomba, échantillon 2.....	56
Figure 3. 3 Courbe granulométrique du sol de Rutshuru centre, échantillon 1.....	56
Figure 3. 4 Courbe granulométrique du sol de Rutshuru centre, échantillon 2.....	57
Figure 3. 5 Limite de liquidité du sol de Jomba, échantillon 1.....	58
Figure 3. 6 Limite de liquidité du sol de Jomba, échantillon 2.....	59
Figure 3. 7 Limite de liquidité du sol de Rutshuru centre, échantillon 1.....	61
Figure 3. 8 Limite de liquidité du sol de Rutshuru centre, échantillon 2.....	62
Figure 3. 9 Courbe Proctor modifié du sol de Rutshuru centre, échantillon 1.....	63
Figure 3. 10 Courbe Proctor modifié du sol de Rutshuru centre, échantillon 2.....	64
Figure 3. 11 Courbe Proctor modifié du sol de Jomba, échantillon 1.....	64
Figure 3. 12 Courbe Proctor modifié du sol de Jomba, échantillon 2.....	65

INTRODUCTION GENERALE

La construction des routes est un élément crucial du développement économique et social d'une région ; et la qualité du sol est un facteur déterminant pour la durabilité de la route. Elle nécessite ainsi la connaissance des propriétés du sol sur lequel les routes seront construites. Le sol peut en effet avoir des caractéristiques variées selon les régions, et il est important de les connaître pour adapter les techniques de construction et assurer la durabilité de la route. Dans le contexte de la région de Rutshuru en République Démocratique du Congo, la construction de la RN4 du tronçon Rutshuru-Bunagana est un projet majeur qui vise à améliorer l'accessibilité et la connectivité de la région. Cependant, la région de Rutshuru est caractérisée par un sol hétérogène, ce qui rend la caractérisation du sol particulièrement importante pour la réussite du projet. Ainsi donc, cette étude vise la détermination des propriétés physiques et mécaniques du sol de Rutshuru, l'évaluation de sa capacité à supporter le trafic routier et à identifier les éventuelles limitations ou risques associés à l'utilisation de ce sol dans la construction routière.

De même, cette caractérisation est importante en raison des risques géologiques potentiels de la zone. Cette dernière est sujette aux glissements de terrain et aux éboulements, ce qui peut compromettre la stabilité de la route. Il est donc essentiel de bien comprendre les propriétés du sol afin de concevoir une route qui résistera aux conditions environnementales de la région [1].

Les routes sont des infrastructures de transport vitales pour le développement économique et social d'un pays en général, et d'une région en particulier. Cependant, la qualité des routes dépend fortement des matériaux utilisés [2].

La caractérisation géotechnique du sol de Rutshuru permettrait de mieux comprendre les propriétés physiques et mécaniques du sol telles que la densité, la teneur en eau, la résistance à la compression, etc. L'utilisation de matériaux locaux pour la construction de routes contribuerait à réduire les coûts de construction et à stimuler l'économie locale ; Cette étude pourrait également aider à identifier les matériaux locaux les plus appropriés pour la

construction de la RN4 du tronçon Rutshuru-Bunagana par la caractérisation du sol en fonction de différentes zones afin de s'assurer que la construction soit optimale.

Elle permettrait également d'identifier les éventuelles contraintes géotechniques à prendre en compte lors de la construction de la route, telles que la présence d'argile ou des roches dures qui peuvent nécessiter des techniques spéciales de construction.

Les résultats de la caractérisation du sol de différents sites de Rutshuru peuvent être utilisés pour élaborer des modèles de prévision de la durabilité de la route, ce qui est important pour assurer la sécurité et la longévité de la route dans le temps.

Face à la méconnaissance des propriétés physiques et mécaniques des sols de Rutshuru, nous nous sommes posés une série de questions suivantes :

- Quelles sont les techniques de caractérisation du sol les plus appropriées pour évaluer la qualité de remblai routier ?
- Quel est l'impact des propriétés mécaniques des sols de Rutshuru dans la construction routière ?
- Quels sont les défis et les risques potentiels liés à l'utilisation du sol de Rutshuru dans la construction de la RN4 du tronçon Rutshuru-Bunagana et comment peuvent-ils être surmontés ?

Des études ont montré que le sol de Rutshuru présenterait des variations significatives dans ses propriétés géotechniques en fonction de la localisation et de la profondeur [3]. Il nous est donc nécessaire d'effectuer des tests géotechniques sur plusieurs échantillons de sol à différents emplacements pour obtenir une caractérisation précise du sol.

La présente étude présente comme objectifs, d'effectuer les différents essais sur les sols de Rutshuru et fournir des données précises et fiables pour la planification et la construction à partir des résultats qui seront obtenus afin contribuer à l'amélioration de l'infrastructure de transport dans la région.

Afin de parvenir à atteindre ces objectifs, nous nous proposons de commencer par une étude du milieu en effectuant les différentes localisations des sites par lesquels les prélèvements seront effectués ainsi que faire des sondages pour mieux aborder la suite du travail.

Le présent travail s'articule autour de trois chapitres, mis à part l'introduction et la conclusion générales.

- Le premier chapitre est consacré au contexte général et comprend deux points dont : l'importance de la caractérisation du sol dans la construction de routes ainsi que du contexte spécifique de Rutshuru et du tronçon en étude ;
- Le deuxième chapitre présente les méthodologies et les matériels utilisés : il s'agit de la description détaillée des méthodologies utilisées pour caractériser les sols de Rutshuru par la sélection des sites d'échantillonnage, les techniques d'analyse, etc., présente les propriétés physiques et mécaniques du sol, classification du sol selon les normes internationales, etc.
- Enfin, le troisième chapitre porte sur la présentation des résultats d'étude, leur analyse qui consiste en une évaluation de la capacité du sol de Rutshuru à être utilisé dans la construction de la RN4 du tronçon Rutshuru-Bunagana ainsi que l'identification des éventuelles limites.

CHAPITRE PREMIER : GENERALITES

Introduction

Le présent chapitre traite des généralités sur les sols comprenant les différents types de sols, la notion sur les sables et les argiles, les caractéristiques physiques et granulométriques des sols, l'identification ainsi que les essais d'identification des sols. Il présente également les généralités sur la routes dans lesquelles on trouve un aperçu sur le réseau routier congolais, l'importance de la géotechnique routière ainsi qu'une notion générale sur les chaussées. Enfin, ce chapitre présente une brève généralité sur le milieu d'étude.

1.1 Généralités sur les sols [4]

Les définitions du sol sont liées à son utilisation. Le sol est une formation naturelle et un milieu qui se transforme continuellement sous l'influence de processus physiques, chimiques, biologiques et humains.

Pour un ingénieur civil, le sol est un support sur lequel sont construites les routes et sont fondés les bâtiments. Le sol est le support de la vie terrestre. Il résulte de la transformation de la couche superficielle de la roche-mère, la croûte terrestre, dégradée et enrichie en apports organiques par les processus vivants.

I.1.1 Différents types de sol [5]

- **Sol argileux** : Avec comme principal composant l'argile, c'est une terre lourde qui retient énormément l'eau. Elle est difficile à travailler mais est généralement assez fertile.

La figure 1.1 présente la structure d'un sol argileux.



Figure 1.1 Sol argileux

- **Sol calcaire** : Appelé également terre crayeuse, le principal composant est la chaux. Terre peu appréciée des jardiniers, elle est également détestée par de nombreux végétaux.

La figure 1.2 présente la structure d'un sol calcaire.



Figure 1.2 sol calcaire

- **Sol humifère** : C'est une terre très riche en humus qui est le résultat de la décomposition de matières organiques végétales. Facile à travailler, elle présente peu d'inconvénients.

La figure 1.3 présente la structure d'un sol humifère.



Figure 1.3 Sol humifère

- **Sol limoneux** : Avec le limon comme composant principal, c'est une terre riche et facile à travailler. Par contre, elle est instable et fragile.
- **Sol sableux ou sablonneux** : Appelé également sol siliceux, c'est une terre principalement constituée par du sable. Si elle est facile à travailler, c'est une terre instable et peu fertile.

La figure 1.4 présente la structure d'un sol sablonneux.



Figure 1.4 Sol sablonneux

I.1.2 Sables [4]

Ce point présente les généralités sur les sables, notamment la définition, les différents types ainsi que les caractéristiques spécifiques.

I.1.2.1. Définition :

Le sable est un matériau granulaire constitué de petites particules provenant de la désagrégation d'autres roches dont la dimension est comprise entre 0,063 (limon) et 2 mm (gravier) selon la définition des matériaux granulaires en géologie.

I.1.2.2. Les différents types de sables :

On distingue les sables naturels et les sables artificiels.

a) Sables naturels :

Les sables naturels peuvent être issus des rivières. Également appelé « sable des rivières » ou « sable alluvionnaire », il se caractérise par sa forme arrondie et sa dureté, et il provient de l'action de l'eau sur les rochers.

b) Sables artificiels :

Les sables artificiels comprennent les sables résultant du concassage de blocs de laitier des hauts-fourneaux, le sable concassé obtenu de façon identique mais sans filler, le laitier granulé ayant subi un refroidissement rapide, et le laitier broyé obtenu à partir du concassage du laitier granulé.

I.1.2.3. Quelques Caractéristique spécifiques des sables :

Une particule individuelle est appelée grain de sable. Les sables sont identifiés grâce à la granulométrie (la grosseur des grains). Le sable se caractérise par sa capacité à s'écouler. Plus les grains sont ronds, plus le sable s'écoule facilement.

On peut également différencier un sable qui a été transporté par le vent d'un sable transporté par l'eau. Le premier est de forme plus ronde, sphérique, alors que le deuxième est plus ovoïde.

Le sable est souvent le produit de la décomposition du micaschiste du fait de l'érosion. Ainsi, le plus fréquent de ses composants est le quartz, constituant le moins altérable du granite, ainsi que des micas et feldspaths. Un sable issu d'une roche volcanique est plutôt noir tandis qu'un sable marin s'enrichit de débris de coquillages.

I.1.3. Argiles [6]

Ce point traite d'une brève généralité sur l'argile, entre autre sa définition ainsi que quelques caractéristiques spécifiques de l'argile.

I.1.3.1. Définition

L'argile désigne une matière rocheuse naturelle à base de silicates et/ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths.

Dans un sens étendu, il s'agit aussi d'un sédiment composé de particules fines issues de l'altération de diverses roches, parfois des roches sédimentaires argileuses métamorphisées en schistes.

I.1.3.2. Quelques Caractéristiques spécifiques d'argile

Les sols dits « argileux » comprennent les limons (silts) et les argiles qui sont par définition des sols à grains fins dont plus de 50 % de leur poids sec est constitué de particules inférieures à 0,075mm. Leur consistance peut varier de très molle à dure. Ils sont caractérisés par des teneurs en eau habituellement élevées, ce qui les rend généralement compressibles, indépendamment de leur consistance.

De plus, ils sont sensibles au gel et peuvent subir des variations de volume lors de modifications climatiques comme en période de sécheresse.

Une terre argileuse peut être lourde et compacte, résistante et difficile au labour, se durcissant en croûtes épaisses parfois plus ou moins craquelées lors des sécheresses. L'argile a une texture lisse et collante, une faible densité, une capacité d'absorption élevée, une capacité de rétention d'eau et une grande plasticité, ce qui peut les rendre facilement malléable. Elle peut être de différentes couleurs, allant du rouge, au jaune, au gris ou au brun, selon les minéraux qui la composent et les conditions environnementales de sa formation.

I.1.4. Caractéristiques physiques des sols [7]

Avant d'analyser le comportement mécanique des sols, il est nécessaire de définir certains paramètres qui se rapportent aux diverses proportions dans lesquelles se trouvent les squelettes solides, l'eau et l'air constituant le sol.

I.1.4.1. Les paramètres dimensionnels (poids volumiques)

- **le poids volumique des particules solides** : (de la matière constituant les grains solides), noté γ_s ; sable et argile = 26 à 27 kN/m³
- **le poids volumique du sol** : (ou poids volumique apparent ou poids volumique humide), noté γ . sable = 17 à 20 kN/m³, argile = 16 à 22 kN/m³
- **le poids volumique du sol sec**, noté γ_d : sable = 14 à 18 kN/m³, argile = 10 à 20 kN/m³ Si le sol est sec : $\gamma = \gamma_d$.
- **le poids volumique du sol saturé**, noté γ_{sat} : lorsque tous les vides sont remplis d'eau. γ_{sat} ; sable et argile = 19 à 22 kN/m³
- **le poids volumique du sol déjaugé, noté γ'** : Il est pris en compte lorsque le sol est entièrement immergé. Il tient compte de la présence de l'eau qui remplit tous les vides et de la poussée d'Archimède ; sable et argile = 9 à 12 kN/m³

I.1.4.2. Les paramètres sans dimensions (paramètres d'état)

Les paramètres les plus importants des sols sont présentés et expliqués ci-dessous :

- **La porosité** : notée n , qui permet de connaître l'importance des vides c'est-à-dire de savoir si le sol est dans un état lâche ou serré. Elle est définie comme étant le rapport du volume des vides au volume total ; sable : $n = 0.25$ à 0.5 , argile : $n = 0.20$ à 0.80

La porosité est toujours inférieure à 1. Elle peut aussi être exprimée en pourcent.

- **L'indice des vides** : noté e , dont la signification est analogue à celle de la porosité ; sable : $e = 0.5$ à 1 , argile : $n = 0.3$ à 1

L'indice des vides peut être supérieur à 1 et même atteindre la valeur 13 (cas extrême des argiles de Mexico).

- **La teneur en eau** : notée w , est définie par le rapport du poids de l'eau au poids des particules solides d'un volume donné de sol ; sable : $w = 1$ à 15% , argile : $w = 10$ à 20%
- **Le degré de saturation** : noté S_r , indique dans quelle proportion les vides sont remplis par l'eau. Le degré de saturation peut varier de 0% (sol sec) à 100% (sol saturé).
- **Densité relative ou indice de densité** : L'indication de l'indice de densité permet d'avoir une idée sur l'état de compacité d'un sol donné : $I_d = 0$ pour l'état le plus lâche ($e = e_{max}$) et $I_d = 1$ pour l'état le plus compact ($e = e_{min}$).

I.1.5. Caractéristiques granulométriques des sols

Pour bien décrire un sol, il faut donc connaître sa granulométrie, c'est-à-dire la répartition de ses particules suivant leurs diamètres équivalents. Deux essais de laboratoire permettent d'établir la granulométrie des sols

- l'analyse granulométrique par tamisage ;
- l'analyse granulométrique par sédimentation.

I.1.6. Identification des sols [8]

L'identification d'un sol nécessite la détermination des paramètres de nature et des paramètres d'état. Les paramètres d'état sont fonction de l'état du sol et caractérisent le comportement du sol sous l'effet d'un chargement donné (teneur en eau, indice des vides, etc.). Les paramètres de nature eux, indiquent les caractéristiques intrinsèques du sol et ne varient pas au cours du temps (poids volumique, granularité, limites d'atterberg, etc.)

Selon l'arrangement des grains dans le sol, on distingue les sols à granulométrie uniforme et ceux à granulométrie non-uniforme.

I.1.6.1. Classification des sols à granulométrie uniforme

Nombreuses classifications granulométriques peuvent être trouvées dans la littérature de géo-ingénierie.

Suivant la taille des grains, on distingue les catégories de sols suivants :

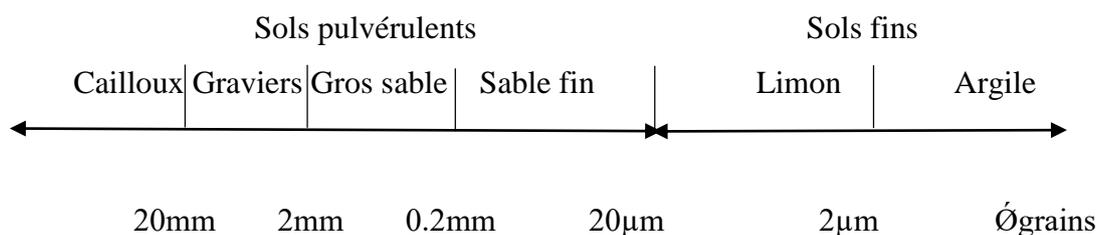


Figure 1.5 Classification des sols à granulométrie uniforme [9]

I.1.6.2. Classification des sols à granulométrie non uniforme

Suivant les propriétés physiques et chimiques des grains ; on distingue trois grands types de sols, chacun est classifié par un ou plusieurs systèmes de classification :

- Classification pour les sols grenus, où plus de 50% des éléments en poids sont $>$ à $80 \mu\text{m}$;
- Classification pour les sols fins, où plus de 50% des éléments en poids sont $<$ à $80 \mu\text{m}$;
- Classification pour les sols organiques, dont la teneur en matière organique dépasse les 10%.

a) Classification des sols grenus

Il existe de nombreux systèmes de classifications pour les sols grenus, les plus connus sont : LCPC, USCS, GTR, etc. Ils diffèrent les uns des autres par les valeurs des paramètres pris en compte dans la classification (granulométrie et limites d'Atterberg), et par la branche de la géologie de l'ingénieur qui les exploite.

- **Classification de Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C.)**

La classification (L.C.P.C.) s'appuie essentiellement sur l'analyse granulométrique et sur les caractéristiques de plasticité de la fraction fine, complétée par des essais très simples (couleur, odeur, effets de l'eau, etc.).

Lorsque le pourcentage de la fraction inférieure à $0,08 \text{ mm}$ est compris entre 5 % et 12 % ; on utilise un double symbole :

- pour les graves : Gb-GL, Gb-GA, Gm-GL, Gm-GA ;
- pour les sables : Sb-SL, Sb-SA, Sm-SL, Sm-SA.

La classification LPC classe les sols grenus d'après leurs granulométries et, les sols fins d'après l'abaque de Casagrande.

Le tableau 1.1 présente la classification LCPC des sols grenus

Tableau 1. 1 Classification LC.P.C. des sols grenus. [8]

GRAVES	Plus de 50% d'éléments >0.08mm ont un diamètre >2mm	Moins de 5% d'éléments <0.08mm	Gb	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ et $C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	Grave propre bien graduée
			Gm	Une des conditions de Gb non satisfaite	Grave propre mal graduée
		Plus de 12% d'éléments <0.08mm	GL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A de l'abaque de plasticité de Casagrande	Grave limoneuse
			GA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A de l'abaque de plasticité de Casagrande	Grave argileuse
SABLES	Plus de 50% d'éléments >0.08mm ont un diamètre <2mm	Moins de 5% d'éléments <0.08mm	Sb	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \cdot D_{60}}$ compris entre 1 et 3	Sable propre bien gradué
			Sm	Une des conditions de Sb non satisfaite	Sable propre mal gradué
		Plus de 12% d'éléments <0.08mm	SL	Limites d'Atterberg au-dessous de la ligne A de l'abaque de plasticité de Casagrande	Sable limoneux
			SA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A de l'abaque de plasticité de Casagrande	Sable argileux

- **Système de classification Unified Soil Classification System (USCS)**

Le système de classification unifié a été élaboré par Casagrande en 1952. Il est la base de la majorité des autres systèmes de classification postérieurs, tel que LPC. Ce système est applicable aux projets de barrages, aux fondations et aux pistes d'atterrissage, etc. Le principe de base de ce système consiste à classer les sols à gros grains d'après leurs granulométries et, les sols à grains fins d'après leur plasticité.

- **Système de classification GTR 92 (Norme NF P 11 300)**

La classification GTR 92 (Guide des Terrassements Routiers, Réalisation des remblais et des couches de forme, LCPC, SETRA, 1992) proposent un classement des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

Cette méthode s'appuie sur les retours d'expériences des chantiers de terrassement et de conception d'ouvrages en terre dans le domaine des routes et autoroutes. Dans sa première version de 1992, le guide GTR avait remplacé l'ancienne « Recommandation pour les terrassements routiers » (RTR) éditée en 1976. Le guide GTR a fait l'objet de mises à jours et de modifications mineures dans sa deuxième version rééditée en 2000. Ce guide est aujourd'hui appliqué par l'ensemble de la profession des travaux publics.

Les sols (première famille) sont désignés par le nom de la portion granulométrique prédominante qualifiée par un adjectif relatif aux portions secondaires.

Le tableau 1.2 présente la classification des sols GTR

Tableau 1. 2 Tableau simplifié de la classification des sols GTR. [8]

Classe	Définition	Caractéristique	Sous-classe
A	Sols fins	$D_{max} \leq 50mm$ et Passant à $80\mu m > 35\%$	A1 à A4 selon VBS ou Ip
B	Sols sableux et graveleux avec fines	$D_{max} \leq 50mm$ et Passant à $80\mu m \leq 35\%$	B1 à B6 selon VBS ou Ip et tamisât
C	Sols comportant des fines et des gros éléments	$D_{max} > 50mm$ et Passant à $80\mu m > 12\%$ ou Passant à $80\mu m \leq 12\% + VBS > 0,1$	30 sous-classes selon VBS, Ip et tamisât à 50mm
D	Sols insensibles à l'eau avec fines	$VBS \leq 0,1$ Et passant à $80\mu m \leq 12\%$	D1 à D3
E	Matériaux rocheux	Voir la norme NF P 11-300	
F	Sols organiques et sous-produits industriels	Voir la norme NF P 11-300	
D_{max} = diamètre pour lequel 95% des grains de sol ont une dimension inférieure			

b) Classification des sols fins

La classification des sols fins utilise les critères de plasticité liés aux limites d'Atterberg. Elle est précisée dans le diagramme de plasticité de Casagrande. Les mots argile et limon sont liés aux valeurs des limites d'Atterberg et non aux classes granulométriques. Il s'agit donc d'une classification basée sur la nature minéralogique des parois de sol et non de leur dimension.

Suivant la position dans le diagramme du point représentatif ayant pour abscisse la limite de liquidité et pour ordonnée l'indice de plasticité, on définit 4 grandes catégories principales représentées dans la figure I.6.

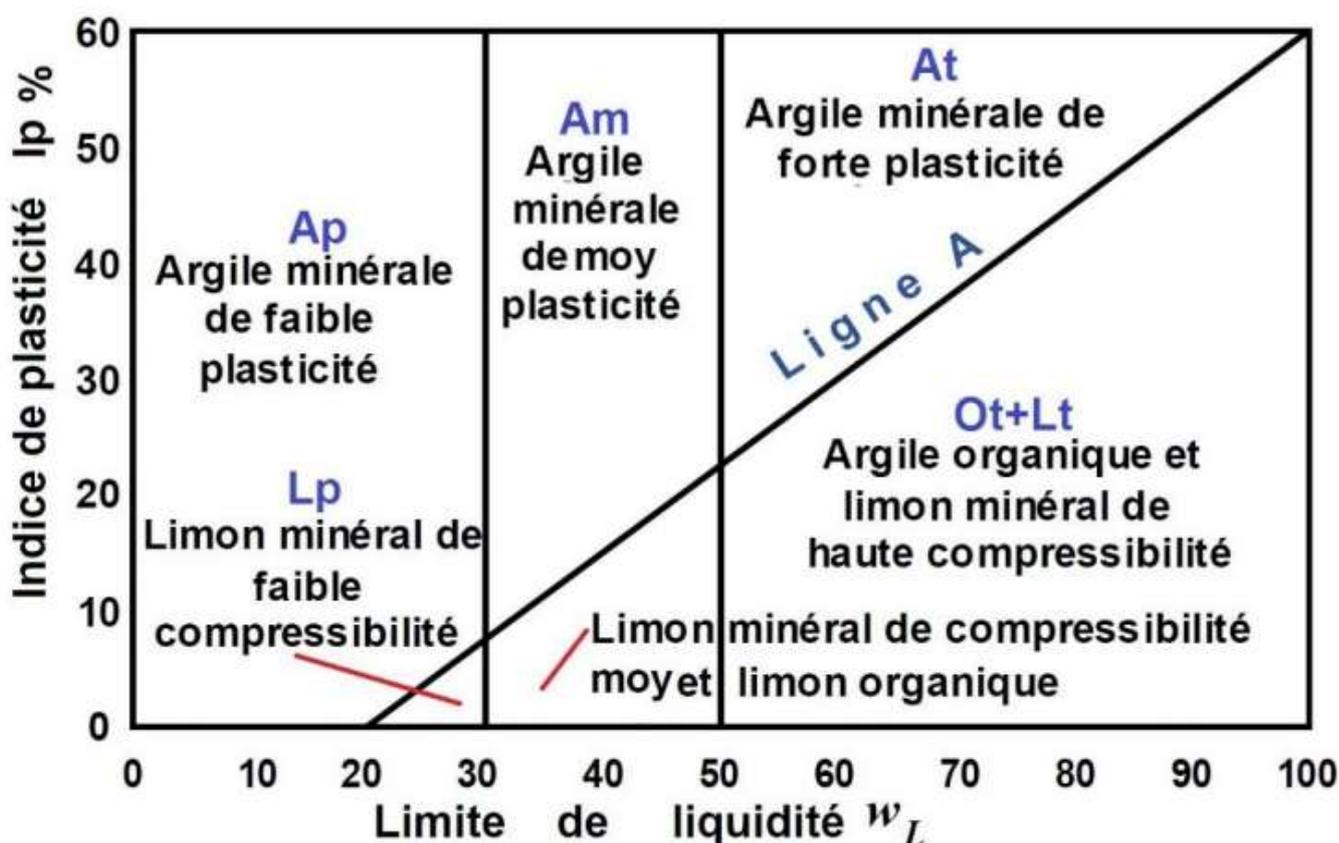


Figure 1.6 Abaque de Casagrande utilisable dans la classification L.C.P.C. des sols fins.

I.1.6.3. Classification des sols par le Public Road Administration [8]

Il s'agit d'une classification des sols fins ayant été mis au point par le " Public Road Administration" mais qui n'est pas applicable aux sables et graviers habituels. Dans un

échantillon de sol donné, on admet qu'il y a en proportion variable du sable, du limon et de l'argile. On utilise alors un diagramme triangulaire et pour appliquer ce diagramme, on détermine les pourcentages des trois catégories de sol par rapport à la fraction inférieure à 2 mm.

La figure 1.7 donne la classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre > à 2 mm).

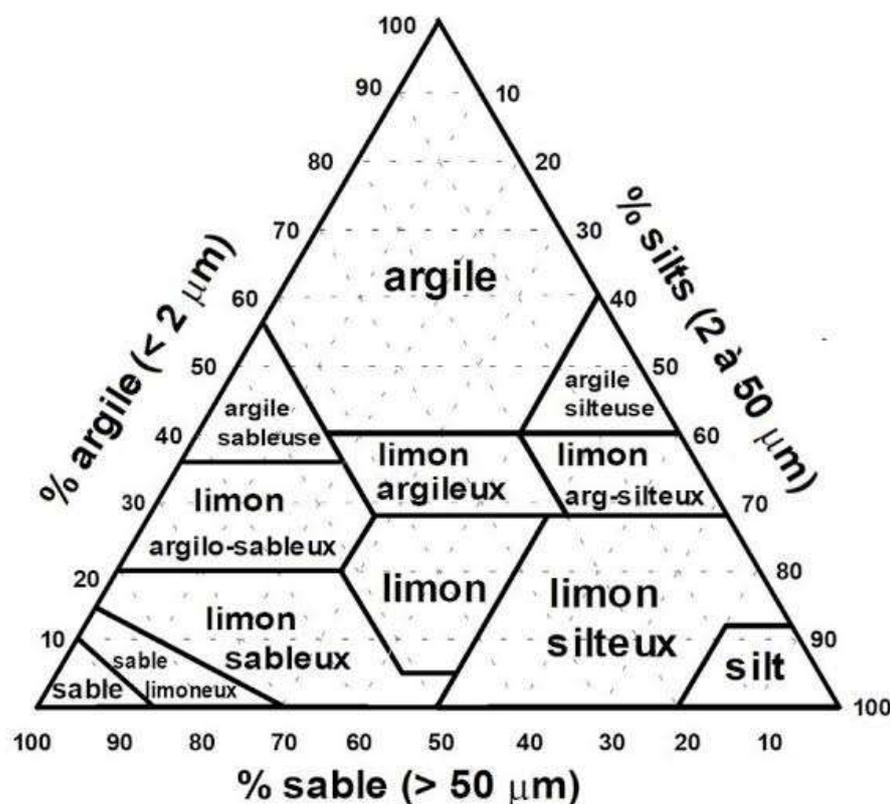


Figure 1.7 Classification triangulaire des sols fins [8]

I.1.7. Essais d'identification des sols [10]

Les essais géotechniques permettant de caractériser un sol au laboratoire sont les suivants :

- L'essai de masse volumique des particules solides dont la détermination se fait à l'aide d'un pycnomètre. On introduit une masse de sol sec dans un pycnomètre contenant de l'eau distillée et après avoir éliminé toutes les bulles d'air, on mesure le volume d'eau déplacé par les grains solides.

- Les essais granulométriques qui permettent d'avoir la répartition en pourcentage des grains solides selon leurs dimensions. Deux types d'essais sont envisageables selon le sol à tester ; notamment le tamisage par voie humide ou sèche (pour les éléments de diamètre $\geq 80\mu\text{m}$) et le tamisage par sédimentométrie (pour les éléments de diamètre $< 80\mu\text{m}$). Les résultats obtenus sont traduits sous forme d'une courbe granulométrique.

Les résultats obtenus à la suite de l'analyse granulométrique permettent de savoir dans quel type de cas utiliser les matériaux analysés. Le tableau 1.3 présente le classement des matériaux suivant leurs diamètres. [11]

Tableau 1. 3 Classement des matériaux selon leur diamètre [11]

Matériau	Bloc rocheux	Cailloux	Graviers	Sables	Limon	Argiles
Diamètre	>200mm	20mm à 200mm	2mm à 20mm	0.02mm à 2mm	2 μm à 0.02mm	<2 μm

A l'instar de la granulométrie, on identifie les autres essais sur les sols fins et sur les sols grenus. [10]

I.1.7.1. Essais sur les sols grenus

Le comportement de ce type de sol dépend des paramètres caractérisant le squelette solide à savoir : les dimensions de grains et l'indice des vides. On identifie l'essai d'équivalent de sable et l'essai de densité relative ou indice de densité.

a) Equivalent de sable : Cet essai est désigné par ES et a pour but principal de déterminer le degré de propreté.

Selon la norme NF P 94-068, après exécution de cet essai, on classe la nature du sable que l'on peut trouver sous forme de pourcentage. Le tableau I.4 présente la valeur de l'équivalent de sable avec nature et qualité de sable. [12]

Tableau 1. 4.4. Valeur de l'équivalent sable avec nature et qualité de sable [12]

ES à vue	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES<65%	ES<60%	Sable argileux : Risque de retrait ou de gonflement de béton
65%<ES<75%	60%<ES<70%	Sable légèrement argileux, de propreté admissible
75%<ES<85%	70%<ES<80%	Sable propre, convenant à béton de haute qualité
ES≥85%	ES≥80%	Sable très propre, absence de plasticité de béton

L'essai d'équivalent de sable permet également de caractériser le type de sol. Le tableau I.5 donne la caractérisation des sols à partir de la valeur de ES. [10]

Tableau 1. 5 Caractérisation des sols à partir de la valeur de ES

ES	Type de sol
≥0	Argile pure
0≥ES≥20	Sol plastique
20≥ES≥40	Sol non plastique
ES≥100	Sable pur et propre

b) Densité relative ou indice de densité : Il permet de caractériser la compacité d'un sol grenu et son aptitude à supporter des charges. Il a pour notation I_D . Le tableau I.6 donne la compacité d'un sol en fonction de l'indice de densité. [9]

Tableau 1. 6 Compacité d'un sol en fonction de la densité relative [9]

I_D	Compacité du sol
0	Très lâche
<0.5	Lâche
0.5	Moyennement dense
>0.5	Très compact
1	Très bien compact

I.1.7.2. Essais sur les sols fins [13]

Le comportement de ce type de sols dépend de :

- La composition minéralogique (types de minéraux argileux) ; Les argiles sont composées d'aluminosilicates hydratés. Les grains solides ont une forme de plaquette et sont formés par un empilement de feuillets.
- La structure (dispersée : contact face-face entre particules, floculée : contact bord-bord entre particules).
- La teneur en eau qui est obtenue par passage à l'étuve à 105°C d'une quantité de sol. Il s'agit du rapport de la masse d'eau évaporée à la masse du sol sec (grains solides).

a) Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg représentent de repères de teneurs en eau raffermissant la classification des sols ayant une certaine cohésion de par leur plasticité ou leur malléabilité. C'est une caractéristique propre aux sols fin : la limite de liquidité et la limite de plasticité. Ces deux limites correspondent à la teneur en eau à laquelle un échantillon de sol passe d'une consistance à une autre.

Les différents états des limites d'Atterberg sont repris selon les indications du tableau I.7. [13]

Tableau 1. 7 Différents états des limites d'Atterberg [13]

Etat	Solide		Plastique	Liquide
	Sans retrait	Avec retrait		
W	W _S		W _P	W _L
Limite de	Retrait		Plasticité	Liquidité

W_S, W_L, W_P sont les limites d'Atterberg déterminées au laboratoire sur la fraction du sol passant au tamis de 0,4mm (méthode de la coupelle de Casagrande). A partir de ces limites, on détermine l'indice de plasticité, l'indice de consistance et l'indice de liquidité.

- **L'indice de plasticité (I_p)**

L'indice de plasticité définit la teneur en eau du sol dans un état plastique. Un I_p grand caractérise un sol très sensible aux conditions atmosphériques car, plus l' I_p est grand, plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccations seront importants. L' I_p permet de classifier les sols suivant l'échelle ci-après :

- $0 < I_p < 5$: Sol non plastique
- $5 < I_p < 15$: Sol peu plastique
- $15 < I_p < 40$: Sol plastique
- $I_p > 40$: Sol très plastique

Le tableau I.8 présente les types de sol en fonction de l' I_p . [13]

Tableau 1. 8 Types de sol en fonction de l'IP [13]

Indice de plasticité	Type de sol
$I_p < 1\%$	Pulvérulent
$1 < I_p < 7\%$	Sable argileux
$7\% < I_p < 17\%$	Argile sableuse
$I_p > 17\%$	Argile

L' I_p est couramment utilisé pour mesurer l'argilosité et le potentiel de gonflement. Il représente la plage de teneurs en eau d'un sol donné correspondant à un comportement plastique de ce sol. Ainsi donc, si l'indice de plasticité du sol est élevé, ce dernier est dit argileux et ses variations de volume peuvent être importantes en fonction de la modification de sa teneur en eau. L'estimation du gonflement libre en fonction de l' I_p est mise en évidence par la classification de Sanglerat (1981) conformément au tableau I.9 :

Tableau 1. 9 Classification de Sanglerat (gonflement libre en fonction de IP) [11]

Potentiel de gonflement	Indice de plasticité (%)
Bas (B)	0-10
Moyen (M)	10-35
Haut (H)	35-55
Très haut (TH)	>55

- **L'indice de consistance (I_C)**

La détermination de l'indice de consistance nécessite la teneur en eau naturelle W du sol et ses limites d'Atterberg. Une fois mesuré, il nous permet de classifier un sol par son adhérence et selon l'état dans lequel il se présente.

Il est calculé par [13] : $I_C = \frac{W_L - W}{I_P}$ **I.1**

Avec : I_C l'indice de consistance, W_L la limite de liquidité, W la teneur en eau et I_P l'indice de plasticité.

- $I_C > 1$: Sol à l'état solide

- $0 < I_C < 1$: Sol à l'état plastique

- $I_C < 0$: Sol à l'état liquide

Le tableau I.10 présente la classification des sols suivant les valeurs de I_C .

Tableau 1. 10 Echelle de classification des sols suivant les valeurs de I_C

I_C (%)	0 à 25	25 à 50	50 à 75	75 à 100
Etat	Plastique			
Consistance	Très molle	Molle	Très plastique	Plastique

- **L'indice de liquidité (I_L)**

-Si $I_L < 0$: Le sol est à l'état solide ou semi-solide

-SI $0 < I_L < 1$: Le sol est à l'état plastique

- Si $I_L \geq 1$: Le sol est à l'état liquide.

Le tableau I.11 présente l'état de consistance du sol en fonction de l'indice de liquidité. [10]

Tableau 1. 11 Etat de consistance de sol en fonction de l'indice de liquidité [9]

Indice de liquidité	Consistance du sol
$I_L < 0$	Très dure
$0 < I_L < 1$	Dure à très plastique
$I_L > 1$	Fluide

b) Teneur en carbonate : % de CaCO₃

L'essai est réalisé au calcimètre Dietrich-Fruhling afin de déterminer la teneur pondérale en carbonates d'un sol qui est le rapport entre la masse de carbonate contenue dans le sol à sa masse sèche totale. La détermination se fait par décomposition du carbonate de calcium CaCO₃ contenu dans le sol par l'acide chlorhydrique. Le tableau I.12 nous donne le type de sol en fonction du pourcentage en CaCO₃.

Tableau 1. 12 Types de sol en fonction du pourcentage en CaCO₃

Teneur en Carbonate en %	Type de sol
0-10	Non marneux
10-30	Faiblement marneux
30-70	Marneux
70-90	Calco-marneux
90-100	Calcaireux-crayeux

c) La teneur en matières organiques « M0 »

Il s'agit du quotient de la masse de matières organiques contenues dans un échantillon de sol par la masse totale des particules solides minérales et organiques. Sa détermination se fait par calcination. Le tableau I.13 nous donne le type de sol en fonction du pourcentage en MO. [13]

Tableau 1. 13 Type de sol en fonction du % en matières organiques

Teneur en MO%	Type de sol
MO<3	Non organique
3<MO<10	Faiblement organique
10<MO<30	Moyennement organique
MO>30	Très organique

I.2. Généralités sur la route [14]

Littéralement, une route est définie comme une voie de communication terrestre, aménagée pour permettre la circulation des véhicules tels que les voitures, les camions, les motos, les vélos, etc. ainsi que la circulation des personnes. Elle est utilisée pour le transport des marchandises ou d'autres activités. Elle est un élément important de l'infrastructure de transport.

Les routes peuvent être classées en différentes catégories en fonction de leur importance, leur capacité et leur utilisation. On peut les classer de la manière suivante :

- a) **Les autoroutes** : Ce sont des routes principales à grande vitesse qui relient les grandes villes et les régions. Elles sont conçues pour un trafic rapide et fluide et sont souvent séparées par une barrière centrale pour empêcher la circulation en sens inverse. Les autoroutes sont également appelées voies rapides.
- b) **Les routes nationales** : Ce sont des routes principales qui traversent le pays et relient les grandes villes et les centres régionaux. Elles sont souvent à deux voies et sont largement utilisées pour le transport de marchandises et de passagers.
- c) **Les routes régionales** : Ce sont des routes qui relient les villes et les villages d'une région donnée. Elles sont souvent à une ou deux voies et sont utilisées pour le transport local.
- d) **Les routes de liaison** : Ce sont des routes secondaires qui relient les centres urbains et les zones rurales. Elles sont souvent étroites et sinueuses et sont utilisées pour les déplacements locaux.
- e) **Les routes de quartier** : Ce sont des routes qui desservent les quartiers résidentiels et les zones commerciales locales. Elles sont souvent à une voie et sont utilisées pour les déplacements locaux.

I.2.1. Réseau routier Congolais

Le réseau routier Congolais comprend au total 153 497 km répartis comme suit : [15]

- 58 509 km de routes d'intérêt général, à charge du Ministère des Infrastructures, Travaux Publics et Reconstruction, placées sous la gestion de l'Office des Routes (OR),

dont environ 3 000 km sont revêtus. Il comprend les ouvrages de franchissement suivants :

- 3 500 ponts de portée de 4 à 750 mètres pour une longueur totale de 68 000 mètres,
 - 175 bacs (à moteur, à traîlle et à pirogue),
 - 7 400 km de voiries sous la gestion de l'Office de Voiries et Drainages (OVD),
- 87 300 km de routes d'intérêt local ou de desserte agricole à charge du Ministère du Développement Rural, sous la gestion de la Direction des Voies de Dessertes Agricoles (DVDA). Ce réseau est reparti en 3 catégories selon leur importance :
- 21 140 Km des routes nationales (RN)
 - 20 124 Km des routes provinciales prioritaires (RPP)
 - 17 245 Km des routes provinciales secondaires (RPS)

En guise d'illustration, le tableau I.14 présente la synthèse sur le réseau routier congolais des routes nationales revêtues et non revêtues.

Tableau 1. 14 Le réseau routier congolais. [16]

Province	Routes	Routes prioritaires	Routes régionales	Total
Bas-Congo	1 380	891	869	3 140
Bandundu	2 267	3 566	3 160	8 993
Equateur	2 970	2 781	3 158	8 909
Province Orientale	3 706	3 484	3 075	10 265
Ex Kivu	2 905	2 607	1 932	7 444
Katanga	4 035	4 054	2 958	11 046
Kasai Occidental	1 998	1 141	859	3 998
Kasai Oriental	1 457	1 627	1 234	4 318
Kinshasa	272	-	-	272
Total	20 989	20 151	17 245	58 385

I.2.2. Importance de la géotechnique routière

La route est l'un des facteurs importants dans le développement économique et social en RDC et sa construction nécessite des études préliminaires indispensables. Ainsi donc, son dimensionnement ainsi que le choix des matériaux devant être utilisés sont nécessaires pour un meilleur service.

La géotechnique routière est une discipline importante dans la construction et l'entretien des routes. Elle permet de comprendre les caractéristiques du sol et de la roche sous-jacents afin de garantir la sécurité et la durabilité des routes, ce qui est essentiel pour une conception et une construction adéquates des routes. Elle permet également de réduire les risques d'effondrement et d'instabilité de la route par la connaissance des propriétés du sol et de la roche, de prolonger la durée de vie des routes ainsi que d'économiser des coûts car, en comprenant les propriétés du sol et de la roche, les ingénieurs peuvent concevoir des routes plus efficaces et moins coûteuses à construire et à entretenir. [17]

Les études géotechniques devront donc lever un maximum d'incertitude sur le sol et le sous-sol pour la conception d'un projet routier. Pour ce faire, il est nécessaire de donner aux études géotechniques toute leur importance.

I.2.3. Notion générale sur les chaussées [18]

Les chaussées sont des voies de circulation destinées aux véhicules terrestres tels que les voitures, les camions et les motos. Elles sont généralement construites en béton ou en asphalte et sont souvent équipées de marquages routiers tels que des lignes blanches et jaunes pour aider les conducteurs à rester sur la bonne voie.

Les chaussées sont sollicitées par différentes contraintes qui leur entraînent une forte dégradation. Afin de la limiter, plusieurs couches peuvent constituer ces chaussées. Son rôle est le report convenable sur le sol support des efforts dus au trafic. Son épaisseur doit être suffisante pour transmettre une contrainte verticale que peut supporter un sol support. Puisque la contrainte verticale décroît avec la profondeur, une chaussée va être constituée du bas vers le haut de couches de caractéristiques mécaniques croissantes.

I.2.3.1. Couches d'une chaussée

Une chaussée comprend 4 couches dont : la couche de forme, la couche de fondation, la couche de base et la couche de roulement.

a) La couche de forme

C'est la couche de sol rapporté ou traitée en place, destinée à constituer une assise satisfaisante (portance, homogénéité) lorsque le sol existant ou le remblai utilisé ne présente pas les qualités suffisantes.

Cette couche de transition entre le sol support et le corps de chaussée a une double fonction :

- Pendant la phase de travaux, elle protège le sol support, établit ne qualité de nivellement et permet la circulation des engins pour l'approvisionnement des matériaux et la construction des couches de chaussées ;
- Vis-à-vis du fonctionnement mécanique de la chaussée, elle permet de rendre plus homogène et éventuellement d'améliorer les caractéristiques dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place ainsi que de les protéger du gel.

b) La couche de fondation : cette couche est posée directement sur le sol support ou sur la couche de forme si elle existe, la plupart des matériaux routiers conviennent pour son élaboration, Elle est destinée à supporter les différentes couches constituant la chaussée et d'absorber les contraintes de la circulation transmises en profondeur, en répartissant les charges sur la couche de forme. Elle se compose d'une grave (mélange de cailloux, graviers et sables) ; pour les chaussées de faible trafic, de tout venant de bonne qualité et à défaut, des matériaux traités avec un liant hydraulique qui se forme et durcit par réaction chimique avec de l'eau ou un liant hydrocarboné contenant du bitume pour obtenir une plus grande résistance.

c) La couche de base : les matériaux constituant cette couche doit résister aux contraintes résultant du trafic. Son épaisseur est généralement de 15 cm. Elle subit plus de contraintes verticales que la couche de fondation et des efforts de cisaillement d'autant plus importants que la couche de surface est mince.

d) La couche de roulement : C'est la couche supérieure de la structure de chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Elle couvre la couche de base et elle doit résister en premier lieu aux efforts horizontaux des pneumatiques

(accélération et freinage) en second lieu elle s'oppose à la pénétration de l'eau aux couches sous-jacentes.

I.2.3.2. Structures des chaussées

On distingue trois types des structures d'une chaussée :

a) Les chaussées souples

C'est une structure de chaussée dans laquelle l'ensemble des couches liées sont traitées aux liants hydrocarbonés. La couche de fondation et/ou la couche de base peuvent être constituées de grave non traitée. Ces structures comportent une couverture bitumineuse relativement mince (inférieure à 15 cm), parfois réduite à un enduit pour les chaussées à très faible trafic, reposant sur une ou plusieurs couches de matériaux granulaires non traités. L'épaisseur globale de la chaussée est généralement comprise entre 30 et 60 cm.

b) Les chaussées semi-rigides

Elles comportent une couche de surface bitumineuse reposant sur une assise en matériaux traités aux liants hydrauliques disposés en une couche (base) ou deux couches (base et fondation). On parle également de chaussées bitumineuses épaisses. L'épaisseur des couches d'assise est plus souvent comprise entre 15 et 40 cm.

c) Les chaussées rigides : une chaussée rigide est constituée d'un revêtement en béton de ciment. En règle générale, une chaussée en béton comporte, à partir du sol support, les couches suivantes : une couche de forme, une couche de fondation et une couche de roulement en béton de ciment.

La figure 1.8 présente la structure d'une chaussée

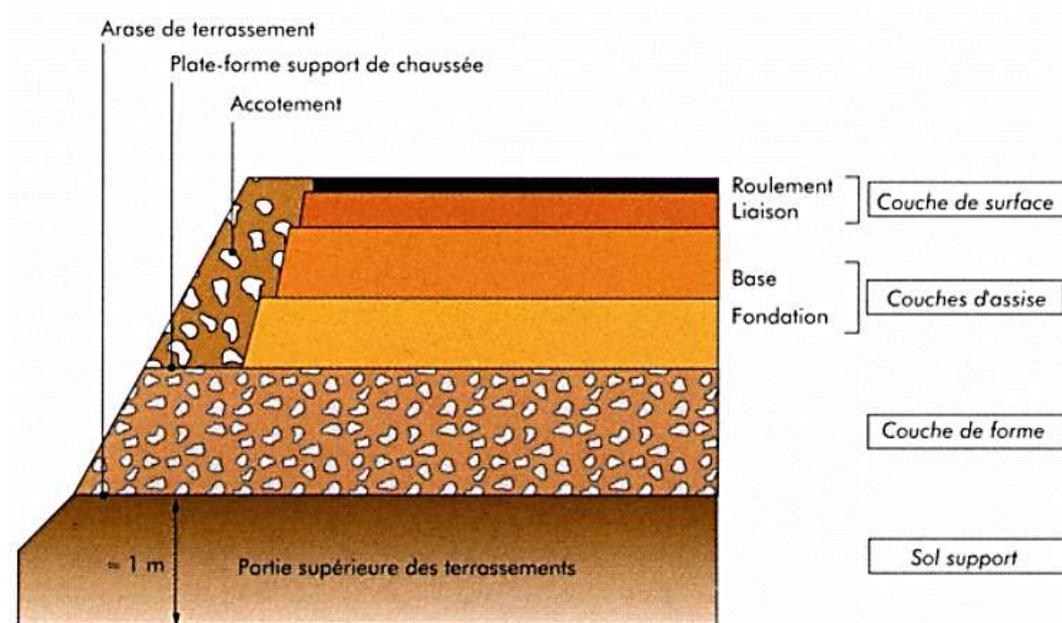


Figure 1.8 Structure d'une chaussée

I.3. Généralités sur le milieu d'étude

Les zones d'étude font partie de la province du Nord-Kivu ayant pour chef-lieu Goma. Ladite province est limitée au Nord par l'Ouganda, à l'Est par le Rwanda, au Sud par la province du Sud-Kivu et à l'Ouest par la province de l'Ituri. Rutshuru est une ville située dans l'Est de la RDC, dans la province du Nord-Kivu à environ 70Km au Nord de la ville de Goma. Elle est située dans une zone de montagnes et de collines, avec une altitude moyenne de 1700mètres et a pour coordonnées géographiques : 1.1000°S, 29.4667°E.

Bunagana est une ville située également dans la province du Nord-Kivu, à l'Est de la RDC à environ 25km à l'Est de Rutshuru près de la frontière avec l'Ouganda. Elle a pour coordonnées géographiques : 1.0838°S, 29.6583°E.



Figure 1.9 Bunagana City



Figure 1.10 RN2 Goma-Rutshuru



Figure 1.11 RN4 Rutshuru-Bunagana

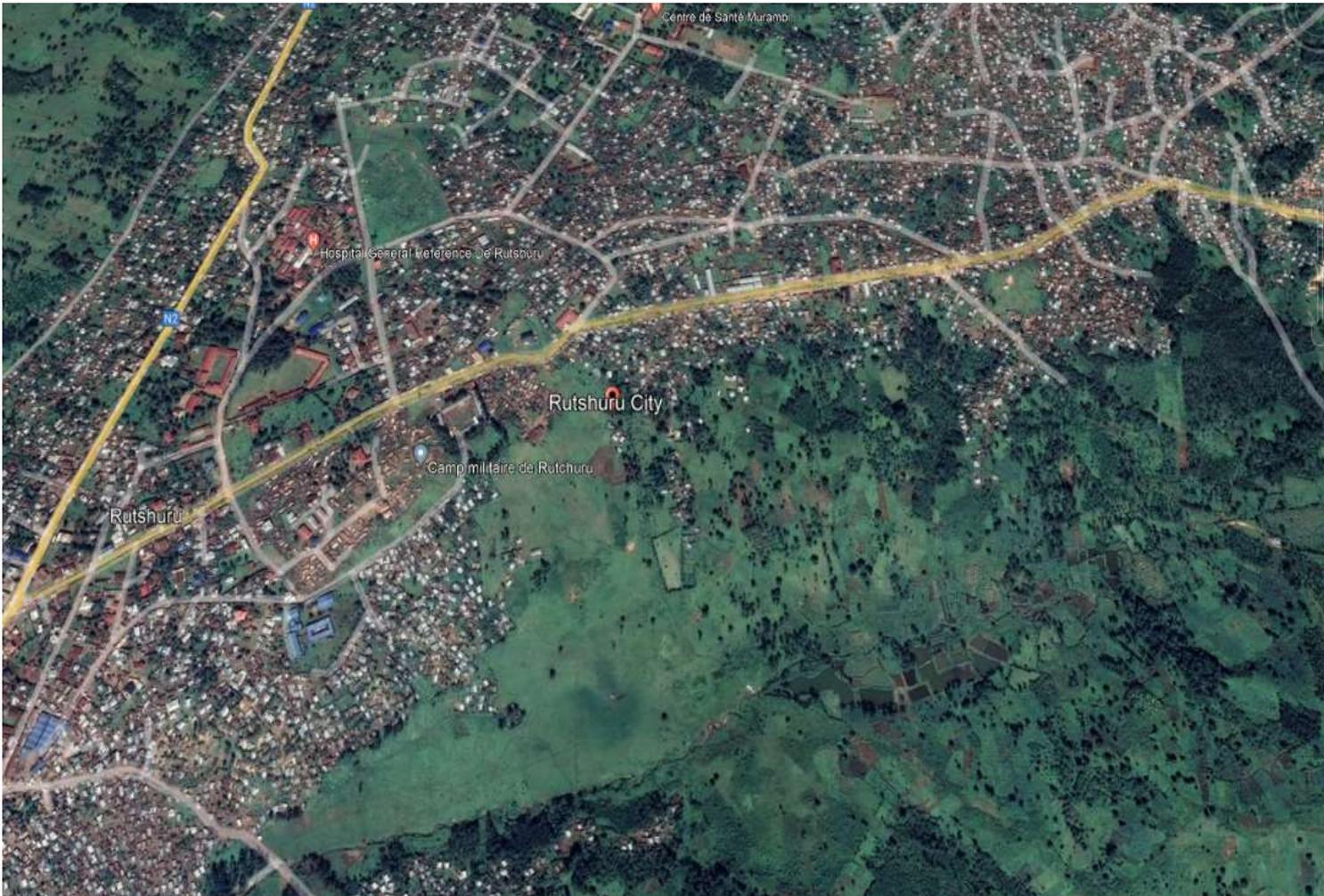


Figure 1.12 Rutshuru City

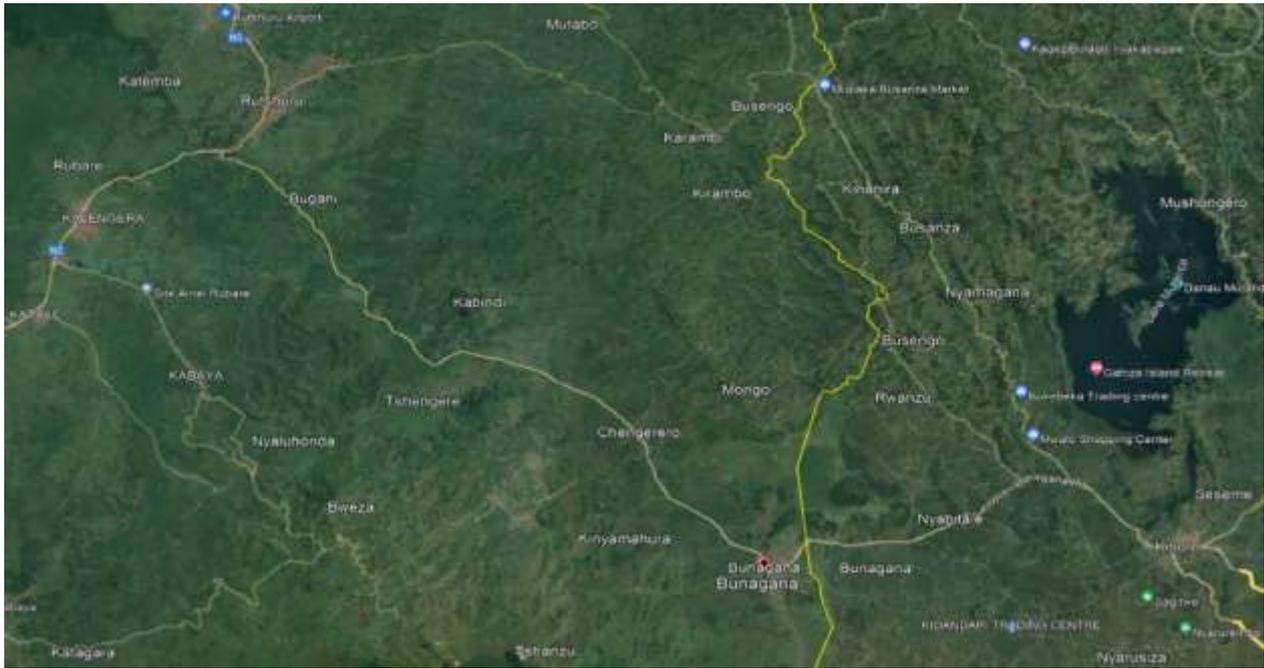


Figure 1.13 Rutshuru-Tshengerero-Bunagana

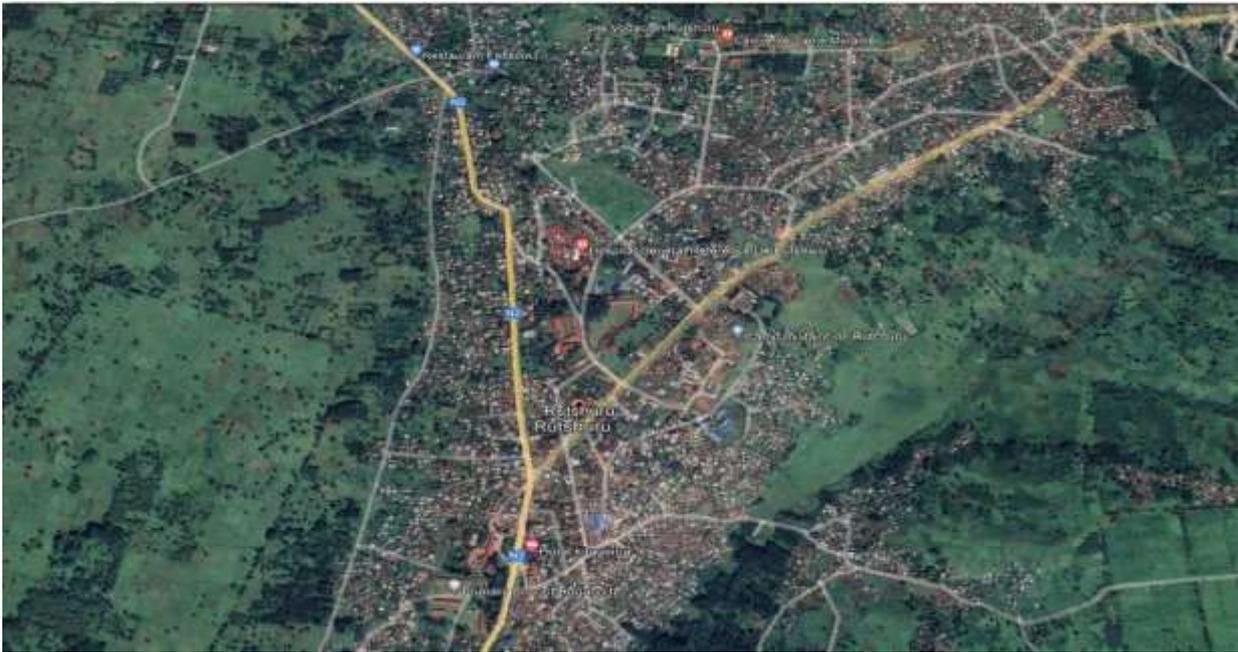


Figure 1.14 Rutshuru Centre

CONCLUSION PARTIELLE

Dans le présent chapitre, nous avons eu à présenter les notions générales sur les sols, certaines corrélations entre les paramètres caractéristiques des sols, un aperçu sur la route et une brève généralité sur le milieu d'étude, autrement dit la région englobant la RN4 Rutshuru-Bunagana. Nous avons de même présenté la classification des missions géotechniques types suivant le cycle de vie du projet routier et par là nous avons noté la mission principale de l'ingénierie géotechnique qui est de comprendre et expliquer les comportements naturels complexes du sol pour projeter l'intégration de la nouvelle infrastructure dans son environnement.

CHAPITRE DEUXIEME : MATERIELS ET METHODES DE RECHERCHE

Introduction

Dans le présent chapitre, il est question de présenter en détail les différents essais qui ont été réalisés au laboratoire de l'ULPGL/Goma ainsi que les matériels et méthodes utilisés.

Les essais sont subdivisés en deux catégories dont : les essais d'identification physique (détermination de la teneur en eau, analyse granulométrique, limites d'Atterberg) et les essais d'identification mécanique.

Identifier un sol revient à connaître sa nature, sa composition et la répartition des grains de différentes tailles qui le compose.

II.1. Choix du site de prélèvement et échantillonnage réalisé

Les sites choisis pour le prélèvement des échantillons sont au nombre de deux : la première zone concerne la région du centre de Rutshuru et la deuxième zone est celle de Jomba. La 1^{ère} zone est une zone à climat chaud tandis que la 2^{ème} est à climat froid. Ainsi donc, l'étude va s'étendre autour des échantillons de sol prélevés sur les deux sites suivant les figures 2.1 et 2.2.

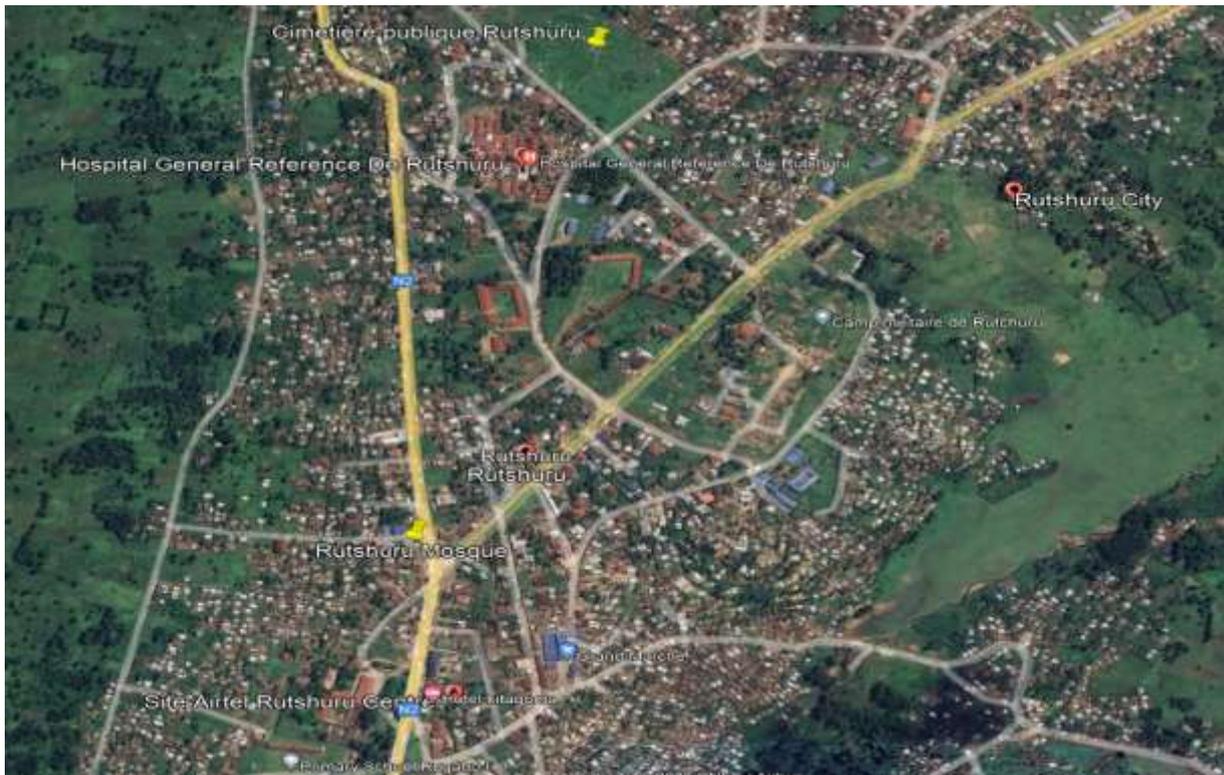


Figure 2. 1 Zone d'étude 1, Rutshuru Centre

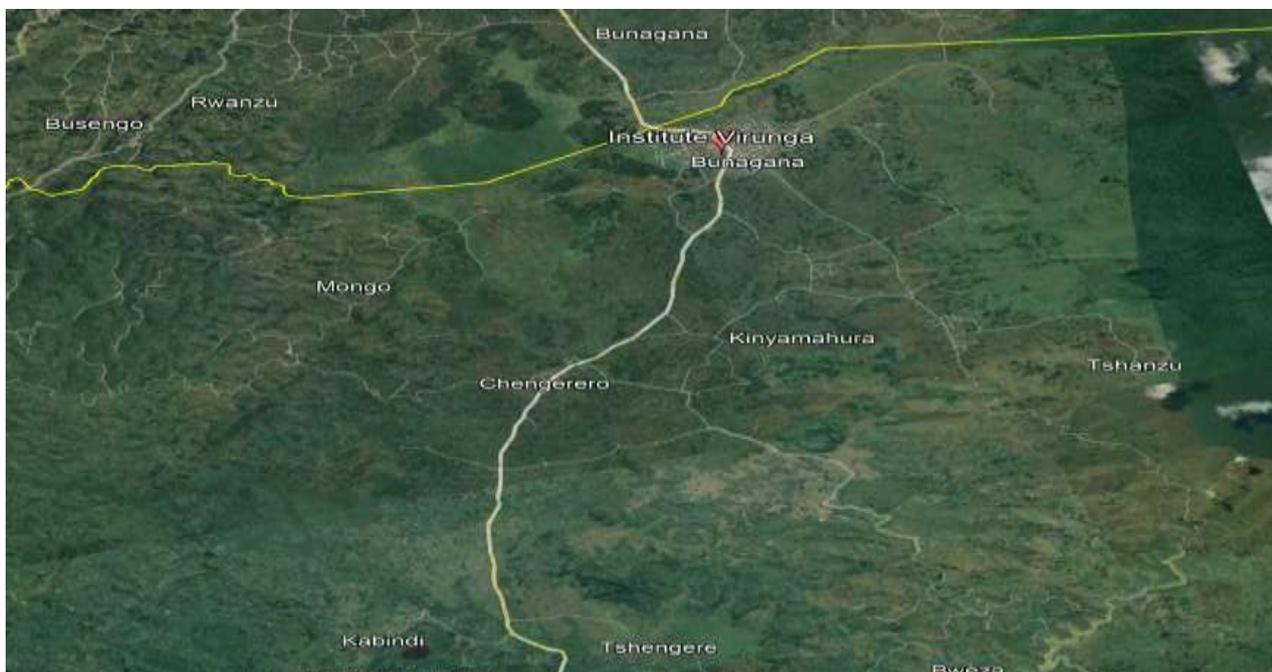


Figure 2. 2 Zone d'étude 2, Jomba

Afin de bien réaliser les essais au laboratoire, deux types d'échantillonnage sont nécessaires : un échantillonnage remanié pour faire les essais d'identification physique et mécanique et un échantillonnage intact pour effectuer les essais de cisaillement rectiligne à l'aide de l'œdomètre de Terzagui [14].

II.2. Essais d'identification, classification et caractérisation

Il s'agit de la teneur en eau naturelle du sol, l'analyse granulométrique, les limites d'atterberg, l'essai proctor, l'essai CBR et l'essai de cisaillement rectiligne.

II.2.1. Teneur en eau naturelle du sol [19]

Elle est déterminée suivant la norme NF P 94-050 sur un échantillon de sol remanié, à partir de la formule II.1.

a) Objectif de l'essai

L'essai consiste à déterminer la teneur en eau d'un échantillon de sol.

b) Matériels et appareillage utilisés

- Une balance ;
- Une étuve ;
- Des tares.

c) Mode opératoire

- Prélever un échantillon de sol représentatif
- Placer ce prélèvement sur un verre de montre de masse T
- Passer immédiatement l'ensemble de masse m, le mettre à l'étuve à 105°C jusqu'à sa dessiccation complète et masse stable au bout de 24h
- Passer l'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve pour obtenir la masse sèche m_d

En déduire la teneur en eau.

$$W = \frac{mh - md}{md} \quad \text{(II.1)}$$

Avec w : la teneur en eau exprimée en pourcentage

T : la masse de la tare

m_h : la masse du sol humide y compris celle de la tare

m_d : la masse du sol sec y compris celle de la tare

La teneur en eau d'un matériau est le rapport du poids d'eau contenu dans ce matériau au poids du même matériau sec. On peut aussi définir la teneur en eau comme le poids d'eau W contenu par unité de poids de matériau sec.

$$\text{On peut ainsi écrire : } W = \left(\frac{W_w}{W_s} \right) \times 100 \quad (\text{II.2})$$

Avec : W : la teneur en eau exprimée en pourcentage

W_w : le poids d'eau contenu dans le matériau

W_s : le poids sec du matériau

II.2.2. Analyse granulométrique [4]

Ce point présente le but de l'essai, le principe, quelques définitions ainsi que la description de l'essai d'analyse granulométrique.

a) But de l'essai

L'analyse granulométrique a pour but de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 63mm, à l'exclusion des fillers.

b) Principe de l'essai

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon en utilisant une série des tamis, emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.

c) Définitions

Pour les besoins du présent travail, les définitions suivantes s'appliquent :

- Prise d'essai : matériau soumis à l'essai.

- Analyse granulométrique par tamisage : ensemble d'opérations aboutissant à la séparation selon leur grosseur des éléments constituant un échantillon, en employant des tamis à maille carrée afin d'obtenir une représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.
- Dimension nominale d'ouverture d'un tamis « d » : dimension caractéristique de la maille carrée de côté d.
- Refus sur un tamis : partie du matériau retenu sur un tamis.
- Tamisât ou passant : partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis.
- Classe granulométrique : ensemble d'éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures d de tamis définissant un intervalle.
- Pourcentage massique de refus : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse de matériau sec retenu par un tamis d'ouverture d, à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.
- Pourcentage massique d'un tamisât : rapport, exprimé en pourcentage, de la masse sèche du passant à travers un tamis d'ouverture d, à la masse totale initiale de matériau sec passant à travers le tamis de maille.
- Courbe granulométrique : représentation du pourcentage massique des différents tamisâts en fonction de la dimension nominale d'ouverture des tamis.

L'analyse granulométrique s'effectue par :

- Tamisage pour les grains de diamètre supérieur à 80micromètres. 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 de tamis sont choisis en fonction de la nature de l'échantillon. Les masses des différents refus ou des différents tamisats sont rapportés à la masse initiale du matériau. Les résultats sont obtenus en pourcentage avec la formule II.3:

$$\% = \frac{\text{poids du refus cumulé}}{\text{poids avant lavage}} \times 100 \quad (\text{II.3})$$

- Par sédimentométrie pour les grains plus fins. L'essai consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau. L'échantillon de sol est placé dans une colonne verticale de sédimentation qui contient un liquide

de densité connue. La colonne est équipée d'un système de mesure optique qui permet de mesurer la hauteur de chaque fraction de particules dans la colonne à intervalles réguliers de temps. La distribution de tailles de particules est ensuite calculée en fonction du temps nécessaire pour que chaque fraction se dépose.

Les résultats de l'analyse granulométrique par sédimentométrie sont présentés sous forme de courbe granulométrique qui montre la distribution des tailles de particules dans l'échantillon.

d) Description de l'essai

L'échantillon doit être préparé suivant les prescriptions de la norme NF P 94-056. L'essai s'effectue par la détermination de la masse sèche de l'échantillon soumis à l'analyse granulométrique ; le lavage de l'échantillon qui est immergé dans l'eau pendant 24 heures. L'échantillon humide avec éventuellement les eaux de trempage, est versé sur un ou plusieurs tamis de décharge et le refus est récupéré et séché jusqu'à masse constante et cela pour chaque tamis utilisé. On procède aussi au tamisage en versant le matériau lavé et séché dans la colonne constituée par l'emboîtement des tamis, les tamis étant classés de haut en bas dans l'ordre de mailles décroissantes. On agite manuellement ou mécaniquement la colonne et enfin on verse le tamisât recueilli dans le fond sur le tamis immédiatement inférieur. Enfin de compte, on pèse le refus maximum admissible sur chaque tamis.

Le matériau séché, de masse M , est versé sur une série de tamis choisis de telle manière que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers haut. En partie inférieur, on dispose un tamis de 0.08mm sur montant un fond étanche afin de récupérer les éléments fins qui passent à travers ce tamis.

On considère que le tamisage est terminé lorsque les refus ne varient pas de plus de 1% entre deux séquences de variations de la tamiseuse.

Le refus du tamis ayant la plus grande maille est pesé. Soit R_1 la masse de ce refus.

Le refus du tamis immédiatement inférieur est pesé. Soit R_2 la masse du refus deuxième refus.

La somme R_1+R_2 représente le refus cumulé sur le deuxième tamis.

Cette opération est poursuivie pour tous les tamis pris dans l'ordre des ouvertures décroissantes.

Ceci permet de connaître la masse des refus cumulés R_n aux différents niveaux de la colonne de tamis. Le tamisât présent sur le fond de la colonne de tamis est également pesé.

II.2.3. Limites d'Atterberg [20]

Les limites d'Atterberg sont des paramètres géotechniques destinés à identifier un sol et à caractériser son état au moyen de son indice de consistance. C'est une caractéristique propre des sols fins. Deux de ces limites présentent un intérêt particulier : la limite de liquidité et la limite de plasticité. Une limite d'Atterberg correspond à la teneur en eau à laquelle un échantillon de sol passe d'une consistance à une autre.

II.2.2.1. Limite de liquidité

La limite de liquidité (W_L) est la valeur de la teneur en eau à laquelle un échantillon de sol transite de l'état plastique à l'état liquide en mesure qu'il imprègne d'eau, ou de l'état liquide à l'état plastique en mesure qu'il sèche. Autrement dit, la limite de liquidité est la teneur en eau à laquelle un sol devient plastique et commence à couler.

a) Matériels et appareillage utilisés

- Un plateau pouvant contenir tout le matériau après lavage
- Un tamis de 0,4mm pour le lavage
- Une pipette d'eau
- Un appareil de Casagrande avec tous ses accessoires
- Un bac pour le malaxage
- Une étuve
- Des tares
- Une balance

b) Mode opératoire

Après échantillonnage, l'échantillon réservé aux limites est lavé à l'eau au tamis de 0,4mm et seules les particules passantes à ce tamis sont recueillies et retenues pour l'essai. Une

quantité d'environ 80g de tamisât est malaxée afin d'obtenir une pâte presque liquide. Avec une spatule, on met la pâte dans une coupole propre et sèche. Cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'emprisonner les bulles d'air.

La limite de liquidité est mesurée et réalisée à l'aide d'un appareil appelé appareil de Casagrande selon le procédé ci-après :

- L'échantillon est mis en place à la spatule de façon bien homogène, l'épaisseur au centre est de 15 à 20mm, le pourtour étant sensiblement horizontal ;
- À l'aide de l'outil à rainurer, on creuse une rainure dans le mortier suivant l'axe de la coupole, l'outil étant sensiblement perpendiculaire à celle-ci ;
- On tourne la manivelle de manière très régulière en raison de 2chocs par seconde et on observe le fond de la rainure en comptant le nombre de chocs nécessaires pour que celle-ci se renferme sur 1cm environ.
- L'opération est reprise 4 à 5fois avec des teneurs en eau décroissantes et de telle sorte que le nombre des chocs à chaque essai soit compris entre 15 et 40. Si le nombre des chocs n est inférieur à 15, on laisse sécher un peu ; s'il est supérieur à 40, on humidifie légèrement et on homogénéise bien le sol avant de reprendre l'essai.

Ainsi donc, la limite de liquidité est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure sur 1cm de longueur en 25chocs.

Pour chaque essai avec $15 \leq \text{nombre de coups} \leq 40$, on détermine la teneur en eau tel que décrit précédemment.

II.2.2.2. Limite de plasticité

La limite de plasticité (W_P) est la teneur en eau à partir de laquelle un échantillon de sol cesse d'être malléable. C'est la teneur en eau à laquelle un échantillon de sol passe de la consistance plastique à la consistance semi-solide à mesure qu'il sèche ou de la consistance semi-solide à la consistance plastique à mesure qu'il s'imprègne d'eau. C'est donc la teneur en eau qui sépare l'état plastique de l'état solide.

Elle est déterminée de la manière suivante : on pétrit une boulette de mortier grosse comme une noisette (environ 12mm de diamètre) et on fait un cylindre en le roulant sur une plaque

de marbre propre, lisse et sèche. On effectue un mouvement alternatif d'environ un aller et retour par seconde et on confectionne à la main un cylindre de 3mm.

Si ce dernier se brise avant d'atteindre ce diamètre, la teneur en eau est trop faible. S'il ne se brise pas, il est soulevé en son milieu à une hauteur de 15 à 20cm. La limite de plasticité est atteinte si la rupture se produit pendant ce soulèvement. Si la rupture ne se produit pas, on laisse la teneur en eau diminuer. Lorsqu'il a été probant, l'essai est réalisé une deuxième fois. Les teneurs en eau obtenues ne devront pas s'écarter de plus de 2% de la valeur moyenne. La limite de plasticité représente le seuil inférieur de l'état plastique. Un petit supplément d'eau au-dessus de la limite de plasticité détruira la cohésion du sol.

II.2.2.3. Indices déductibles des limites d'atterberg

A partir des limites de liquidité et de plasticité, on détermine l'indice de plasticité. C'est la différence numérique de la limite de liquidité et de plasticité. L'indice de plasticité exprime la plage de plasticité d'un sol.

$$I_P = W_L - W_P \quad \text{(II.4)}$$

Avec :

- I_P : Indice de plasticité ;
- W_L : Limite de liquidité ;
- W_P : Limite de plasticité.

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. Cet indice permet de classer les sols suivant l'échelle ci-dessous :

- $0 < I_P < 5$: sol non plastique
- $5 < I_P < 15$: sol peu plastique
- $15 < I_P < 40$: sol plastique
- $I_P > 40$: sol très plastique

- **Indice de liquidité**

L'indice de liquidité est déterminé par la relation II.5 ci-dessous :

$$I_L = \frac{W - W_P}{I_P} \quad (\text{II.5})$$

Où :

- I_L : Indice de liquidité
- W : la teneur en eau naturelle du sol
- W_P : la limite de plasticité
- I_P : l'indice de plasticité.
- Si $I_L < 0$, le sol est à l'état solide ou semi-solide
- $0 < I_L < 1$, le sol est à l'état plastique
- $I_L > 1$, le sol est à l'état liquide.

Plus I_L est élevé, plus l'argile est proche de l'état liquide et plus elle est dangereuse.

- **Indice de consistance**

L'indice de consistance est déterminé par la relation 2.3 ci-après :

$$I_C = \frac{W_L - W}{I_P} \quad (\text{II.6})$$

Le résultat ici trouvé, est analysé et interprété à l'échelle de classification des sols suivant les valeurs d' I_C présentées dans le tableau II.1 :

Tableau 2. 1 Echelle de classification des sols suivant les valeurs de I_C

I_C	0 à 0,25	0,25 à 0,5	0,5 à 0,75	0,75 à 1
Etat	Plastique			
Consistance	Très molle	Molle	Très plastique	Plastique

II.2.4. Les essais mécaniques [21]

Le comportement mécanique du sol est caractérisé par des paramètres qui permettent d'évaluer les déformations qu'il subit sous différentes sollicitations et d'estimer sa capacité à supporter les charges. Ce sont les tassements, la compressibilité ou la consolidation, la résistance au cisaillement du sol, la densité maximale, la portance, etc.

II.2.4.1. Essai Proctor (NF P 94-093, ASTM 1557-91, ISRM D 698-91&98) [22]

L'essai Proctor pour un sol donné, pour un mode de compactage et une énergie de compactage donnés, permet de déterminer l'évolution de la masse volumique finale du sol sec en fonction de la teneur en eau. Il a donc pour but de déterminer la teneur en eau optimale pour un sol de compactage donné et les conditions de compactage fixées, qui conduit au meilleur compactage possible ou encore la capacité portante maximale ; c'est-à-dire de connaître la masse volumique sèche ρ_d maximale et la teneur en eau W_{opt} correspondante appelée « teneur en eau optimum Proctor ».

L'essai Proctor consiste à compacter le matériau de sol dans un moule normalisé, et ce à cinq teneurs en eau différentes. 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%). On détermine ainsi plusieurs points de 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 maximale ».

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.

a) Matériels et appareillage utilisés

- Le moule Proctor constitué d'un tube cylindrique métallique inoxydable pourvu d'un fond et d'une hausse métallique ;
- La dame Proctor ;
- Une étuve ;
- Une règle à araser ;
- Truelles pour malaxer ;
- Des maillets, burins, couteaux, etc. pour le démoulage ;
- Une balance ;
- Une éprouvette graduée ;
- De l'eau ;

- Des bacs.
- b) Mode opératoire
 - Prendre environ 6kg de sol ayant des diamètres inférieurs à 20mm ;
 - Y verser une quantité d'eau de départ 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 normalisé en 5couches et à chaque couche, on compacte à l'aide d'une dame Proctor en 55coups par couche ;
 - Une fois le moule rempli, on arase avec la règle à araser, on comble les vides laissés à la surface ;
 - On prélève un échantillon de sol du moule, puis on retire la base de ce dernier afin de prendre un 2^e échantillon d'à peu près du même poids ;
 - A la balance, on évalue les masses des deux prélèvements puis on les met à l'étuve pendant 24heures pour obtenir la teneur en eau.

Les résultats obtenus sont inscrits dans un tableau. L'essai est répété plusieurs fois de suite(en principe 5 fois si on a une phase descendante de la courbe) sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%,4%,6%.8%,10%,12%,14 %,16%).

II.2.4.2. Essai CBR [23]

L'essai C.B.R (California Bearing Ratio) a pour but de déterminer la portance des matériaux c'est-à-dire l'aptitude des matériaux à supporter les charges dans les conditions les plus défavorables.

a) Définitions

- **Indice CBR après immersion, indice CBR immédiat** : Grandeurs utilisées pour caractériser un sol ou un matériau élaboré, en tant que support ou constituant d'une structure de chaussée.
- **Indice CBR portant immédiat** : Grandeur utilisée pour évaluer l'aptitude d'un sol ou d'un matériau élaboré à supporter la circulation des engins de chantier.

- **CBR immersion(4jours)** : Valeur obtenue par l'essai, proportionnelle à l'effort à appliquer pour obtenir un enfoncement donné dans les conditions de teneur en eau les plus défavorables. Il est aussi appelé simplement indice CBR.

b) Principe de l'essai

Le principe général de l'essai consiste à mesurer les forces appliquées sur un poinçon cylindrique pour les faire pénétrer à vitesse constante dans une éprouvette des matériaux.

Les valeurs particulières de deux forces ayant provoqué deux enfoncements conventionnels sont respectivement rapportées aux valeurs de forces observées sur un matériau de référence pour les mêmes enfoncements.

L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur exprimée en pourcentage des 2 rapports ainsi calculés.

Notons que les indices CBR et IPI (Indice Portant Immédiat) ne constituent pas les caractéristiques intrinsèques d'un sol. En effet, si ces grandeurs dépendent en partie de la nature du sol (granularité, plasticité) elles dépendent davantage de sa teneur en eau, de sa masse volumique sèche et de son degré de saturation qui sont les caractéristiques d'état, celles-ci étant fonction des conditions de mise en œuvre et d'environnement.

Pour ce qui concerne l'indice CBR de dimensionnement d'une chaussée, le concepteur doit choisir les caractéristiques d'état du sol qu'il attend prendre en considération en fonction des particularités du projet. A titre indicatif on peut rappeler que les caractéristiques suivantes sont souvent retenues :

- ✓ La teneur en eau optimale
- ✓ La densité sèche maximale
- ✓ L'état de saturation : celui obtenu après 4 jours d'immersion. Pour ce qui concerne l'indice de portance immédiat
- ✓ La teneur en eau pour laquelle on veut évaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins

- ✓ La masse volumique du sol correspondant à la valeur obtenue lorsqu'on compacte le matériau à la teneur en eau considérée, à l'énergie Proctor normal dans le cas d'un sol et à l'énergie Proctor modifié dans le cas d'un matériau d'assise de chaussée.

c) Appareillage

- **Matériels de confection des éprouvettes**

Il comprend :

- ✓ Le moule CBR
- ✓ Le dame ou machine de compactage Proctor normal et Proctor modifié
- ✓ L'ensemble des accessoires (plaque de base, RIOS, disque d'espacement, règle à araser)
- ✓ Les matériels d'usage courant (balance, étuve, bac, etc.) L'ensemble du matériel est décrit dans la norme NFP94/093

- **Matériels de poinçonnement**

Il comprend une presse d'une capacité efficace d'au moins 50KN et possédant une couse d'au moins 10mm. Cette presse doit être équipée :

- ✓ D'un poinçon cylindrique en acier ;
- ✓ D'un dispositif permettant l'enfoncement du poinçon dans le matériau à une vitesse de 1,27mm/minute ;
- ✓ D'un dispositif de mesure de l'enfoncement du poinçon garantissant la mesure avec une incertitude absolue maximum de 0,1mm ;
- ✓ D'un dispositif de mesure des efforts de poinçonnement

- **Matériels de mise en immersion et de gonflement des matériaux**

On a le bac d'immersion, le comparateur, un disque de gonflement.

d) Exécution de l'essai

➤ **Confection des éprouvettes**

Il convient tout d'abord de choisir les différents ensembles de condition d'état du sol (teneur en eau, masse volumique, état de saturation, etc.) pour lesquels on veut réaliser l'essai. Lorsque la dimension maximale des éléments du sol à étudier est inférieure à

20mm, l'intégralité du sol est soumise à l'essai. Si le sol contient des éléments de dimension supérieure à 20mm, il faut tamiser.

Pour chaque ensemble de conditions d'état considéré, il convient de préparer 5,5kg minimum des matériaux dans le cas où on recherche l'indice CBR d'immersion. On procède ensuite à la préparation du sol et compactage dans le moule.

➤ **Compactage et imbibition**

- Pour la préparation du moule, il faut veiller à ce qu'il soit propre et en bon état. On pèse le tout à 5g près ensuite on place le disque d'espacement ;
- On introduit ensuite le matériau selon le processus de l'essai Proctor modifié en 5 couches successives d'égale épaisseur qui sont chacune compactée avec la même dame Proctor modifié selon les énergies de compactage différentes qui sont en général 10, 25 et 55 coups. Le but est d'obtenir 3 moulages ayant nettement des compacités différentes ;
- Une fois le compactage terminé, la hausse doit dépasser le moule d'environ 1cm. On arase soigneusement puis on enlève le fond qu'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 ensuite après avoir placé un papier filtre sur cette face, on pèse à 5g près ;
- Si le sol doit être essayé sans imbibition, on procède directement 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 bas 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 les bords du moule. On fixe le comparateur au trépied, on règle la hauteur de la tige du plateau de gonflement de sorte que le palpeur 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 4jours dans l'eau ;

- Le délai écoulé, on note le gonflement lu au comparateur, on enlève les surcharges et le plateau de gonflement et on le porte sous la presse de poinçonnement.

➤ **Exécution du poinçonnement**

Les modalités d'exécution du poinçonnement diffèrent selon que l'on détermine l'IPI, l'Indice CBR immédiat ou l'Indice CBR d'immersion.

Si l'objet de l'essai est la détermination de l'IPI, placer l'ensemble embase moule éprouvette sur la presse, en position centrée par rapport au piston de poinçonnement et procéder au poinçonnement de la manière suivante :

- ✓ Mettre en contact la surface supérieure de l'éprouvette avec le piston ;
- ✓ Initialiser les dispositifs de mesure des forces et des enfoncements ;
- ✓ Etablir la courbe effort-déformation correspondant au moins aux enfoncements de 2,25mm, 2mm, 2,5mm, 5mm, 7,5mm et 10mm.
- ✓ Déterminer la teneur en eau de l'éprouvette selon une des méthodes normalisées.

Si l'objet de l'essai est la détermination de l'Indice CBR immédiat :

- ✓ Interposer deux surcharges dans le volume libéré par le disque d'espacement.
- ✓ S'il est prévu que la contrainte apportée par la chaussée sur le sol soit supérieure aux 4,6g de surcharge ainsi constituées, il y'a lieu d'ajouter autant de surcharges que nécessaire. L'ensemble moule plaque de base et surcharges est alors posé sur la presse.
- ✓ Exécuter ensuite le poinçonnement comme indiqué précédemment

Si l'objet de l'essai est la détermination de l'Indice CBR d'immersion :

- ✓ Positionner le disque de gonflement sur l'éprouvette avant de mettre en place les surcharges comme indiqué précédemment ;
- ✓ Mettre en place et initialiser le dispositif de mesure de gonflement ;
- ✓ Immerger l'ensemble de sorte que l'éprouvette soit recouverte par une hauteur d'eau d'au moins 20mm et qu'une lame d'eau d'au moins 10mm de hauteur soit présente sous le moule.

Généralement, le poinçonnement se déroule de la manière ci-après :

- Le moule est placé sur le plateau de la presse et centré de telle sorte 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 fixée de manière à ce 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 manière, le poinçonnement s'effectue avec la vitesse constante normalisée (soit 1,27mm/minute) ;
- 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 lorsqu'on atteint ce dernier enfoncement.
- Pour les calculs, on s'intéresse aux valeurs des pressions trouvées aux enfoncements de 2,5 et 5 mm qu'on divise par 1000 ensuite on lit sur l'abaque les forces correspondantes.
- On considère le CBR pour 25 coups.

e) Calculs et résultats

On calcule les valeurs suivantes

$$\bullet \quad CBR_{2,5} = \frac{\text{Force appliquée } 2,5}{13,6} \times 100$$

$$\bullet \quad CBR_5 = \frac{\text{Force appliquée } 5}{20,3} \times 100$$

L'indice recherché est par convention la plus grande de ces deux valeurs. [24]

Avec : Force appliquée 2,5 : La force (en KN) à 2,5mm d'enfoncement ;

Force appliquée 5 : La force (en KN) à 5mm d'enfoncement ;

13,6 : Forces (en KN) à 2,5mm d'enfoncement pour le matériau de référence ;

20,3 : Forces (en KN) à 5mm d'enfoncement pour le matériau de référence.

Les tableaux 2.2 et 2.3 présentent la classification de portance du sol selon le pourcentage de son CBR ainsi que l'utilisation des sols selon sa classe.

Tableau 2. 2 Pourcentage de CBR et sa classe de portance [11]

Classe de portance	Valeur de CBR (%)
S0 Portance très faible	CBR < 3
S1 Portance faible	3 < CBR < 6
S2 Portance moyenne	6 < CBR < 12
S3 Portance élevée	12 < CBR < 25
S4 Portance très élevée	CBR > 25

Tableau 2. 3 CBR selon l'utilisation des sols

USE OF MATERIALS ACCORDING TO THEIR CBR (DEGN, 1987) [25]

Range of CBR	Use in road construction
S1: 0 < CBR < 5	Not suitable for road construction
S2: 5 < CBR < 10	Sub-base layer
S3: 10 < CBR < 15	Sub-base layer and backfill
S4: 15 < CBR < 30	Fondation layer for a trafic T1
S5: 30 < CBR < 60	Fondation layer for trafic T2/T3 and base layer for trafic T1
S6 : 60 < CBR < 120	Fondation layer for trafic T3/T4 and base layer for trafic T2
S7 : CBR > 120	Base layer trafic T3

II.2.5. Essai de cisaillement rectiligne [14]

L'essai de cisaillement rectiligne a pour but la détermination de deux paramètres importants pour la connaissance géotechnique d'un sol : l'angle de frottement interne et la cohésion, paramètres intervenant pour la détermination de la résistance au cisaillement du sol. Cet essai s'effectue à l'aide de l'appareil appelé la boîte de Casagrande. Cet appareil comporte un dispositif de chargement qui permet d'appliquer une charge verticale N par l'intermédiaire d'un piston. L'essai consiste à fixer horizontalement sur la demi-boîte supérieure de façon à cisailier le sol selon le plan Π . On mesure l'effort horizontal T en fonction de Δl .

L'échantillon est placé entre deux demi-boîtes, une supérieure $C1$ qui peut coulisser horizontalement sur une inférieure $C2$.

Le sol est placé entre deux pierres poreuses qui permettent le drainage de celui-ci. On peut remplacer les pierres poreuses par des plaques pleines et le sol ne peut plus se drainer, théoriquement parlant.

• Description de l'essai consolidé drainé

- Cet essai permet de voir le comportement du sol à long terme. On commence par consolider l'échantillon de sol sous une contrainte isotrope c'est-à-dire qu'ayant appliqué cet état de contrainte, on maintient les orifices de drainage ouverts jusqu'à ce que la pression interstitielle se soit annulée. Puis laissant la contra normale constant dans la boîte de Casagrande, on augmente très lentement la contrainte tangentielle en laissant les orifices de drainage ouverts de façon qu'à tout instant, la pression interstitielle soit nulle ($u=0$). On poursuit l'essai jusqu'à rupture complète de l'échantillon. La courbe intrinsèque obtenue à partir des résultats de plusieurs essais est toujours approximativement une droite dont les caractéristiques sont les suivantes Ψ : appelé angle de frottement interne du sol. C 'est l'angle que fait la droite intrinsèque avec l'axe des contraintes normales
- C' : appelée cohésion drainée. C'est la valeur de l'ordonnée à l'origine de la droite intrinsèque.

$H = \frac{C'}{\tan \Psi}$: la contrainte à la traction du sol.

Tableau 2. 4 Valeurs typiques des propriétés mécaniques des sols sur l'essai de cisaillement [26]

Sols	Ip en %	Angle de frottement interne φ (degré)	Cohésion du sol c (KPa)
Roche concassée		47 ± 7	0
Gravier propre	0	40 ± 5	0
Gravier limoneux	2-6	36 ± 4	~ 0
Gravier argileux	7-12	34 ± 4	~ 0
Sable propre à granulométrie étendue	0	40 ± 4	0
Sable propre à granulométrie uniforme	0	36 ± 6	0
Sable peu à moyennement limoneux	2-6	34 ± 3	~ 0
Sable peu à moyennement argileux	6-12	32 ± 3	~ 0
Sable argileux	9-15	27 ± 3	5 ± 5
Limon	2-6	33 ± 4	~ 0
Limon argileux	4-10	30 ± 4	15 ± 10
Argile limoneuse	12-18	27 ± 4	20 ± 10
Argiles	~ 20	20 ± 4	20 ± 10
	~ 40	15 ± 4	25 ± 10
	~ 60	11 ± 4	2
	~ 100	< 8	2

CONCLUSION PARTIELLE

Le présent chapitre avait pour objectif de présenter les matériels et méthodes utilisés au laboratoire de Génie Civil de l'ULPGL afin de déterminer les caractéristiques géotechniques du sol de Rutshuru et de Jomba. Les essais effectués consistent à l'identification et la caractérisation mécanique des sols de ces deux endroits. Chaque essai est exécuté selon une norme. La teneur en eau naturelle a été déterminée suivant la norme NF 94-049, l'analyse granulométrique a été effectuée par voie humide selon la norme NF P 94-056 afin de connaître la distribution granulométrique des sols ; l'essai des limites d'atterberg nous a servi pour déterminer l'état de consistance des sols, l'essai Proctor modifié nous a permis de déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale selon la norme NF P 94-093 et l'essai CBR selon la norme NFP 94/078 nous a permis de déterminer la portance des matériaux c'est-à-dire l'aptitude des matériaux à supporter les charges dans les conditions les plus défavorables et enfin l'angle de frottement interne et la cohésion du sol à partir de l'indice de plasticité pour l'essai de cisaillement rectiligne.

CHAPITRE TROISIEME : ANALYSE ET INTERPRETATION

DES RESULTATS

Introduction

Le présent chapitre présente et interprète les résultats des essais d'identification et de caractérisation des sols de Rutshuru centre et de Jomba, les caractéristiques mécaniques de ces sols ; notamment les résultats de la teneur en eau naturelle, de l'analyse granulométrique, des limites d'atterberg, de l'essai Proctor et CBR, du cisaillement rectiligne. Après identification, la classification des sols de Rutshuru a été effectuée en vue de conclure si ces matériaux peuvent être utilisés dans la construction routière.

III.1. Teneur en eau naturelle du sol

III.1.1. Sol de Jomba

La teneur en eau naturelle a été déterminée suivant la norme NF 94-049 par la formule II.1. Le tableau 3.1 présente la teneur en eau des échantillons de sol de Jomba.

Tableau 3. 1 Teneur en eau naturelle du sol de Jomba

Echantillon 1		Echantillon 2	
TARE 1	W=35%	TARE 1	W=23%
TARE 2	W=34,78%	TARE 2	W=18,9%
TARE 3	W=30,3%	TARE 3	W=18,45%
Moyenne : 33,36%		Moyenne : 20,27%	

III.1.2. Sol de Rutshuru Centre

Le tableau 3.2 présente la teneur en eau des échantillons de sol de Rutshuru centre

Tableau 3. 2 Teneur en eau naturelle du sol de Rutshuru centre

Echantillon 1		Echantillon 2	
TARE 1	W=4,35%	TARE 1	W=3%
TARE 2	W=7,3%	TARE 2	W=3,5%
TARE 3	W=6,9%	TARE 3	W=3%
Moyenne : 6,18%		Moyenne : 3.17%	

Au vu des résultats présentés dans les tableaux 3.1 et 3.2, nous pouvons remarquer que le sol de Jomba est beaucoup plus humide que celui de Rutshuru centre de par leurs teneurs en eau naturelle. Cela peut s'expliquer par le fait que, comme nous l'avons signalé dans le second chapitre, Jomba est une zone à climat froid.

III.2. Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des sols a été effectuée sur des échantillons de dimension supérieure à 0.08mm de diamètre après lavage et élimination des fines et ce, selon la norme NF P 94-056. Les compositions granulométriques du sol de Jomba et de Rutshuru centre sont présentées sur les figures 3.1, 3.2, 3.3 et 3.4 selon les valeurs trouvées et représentées dans les tableaux en annexes 1 et 2.

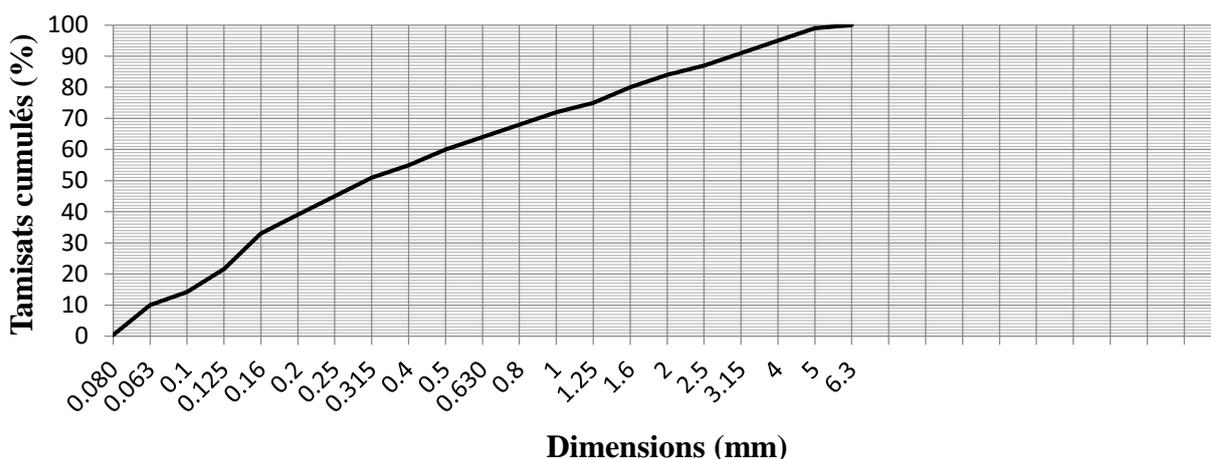


Figure 3. 1 Courbe granulométrique du sol de Jomba, échantillon 1

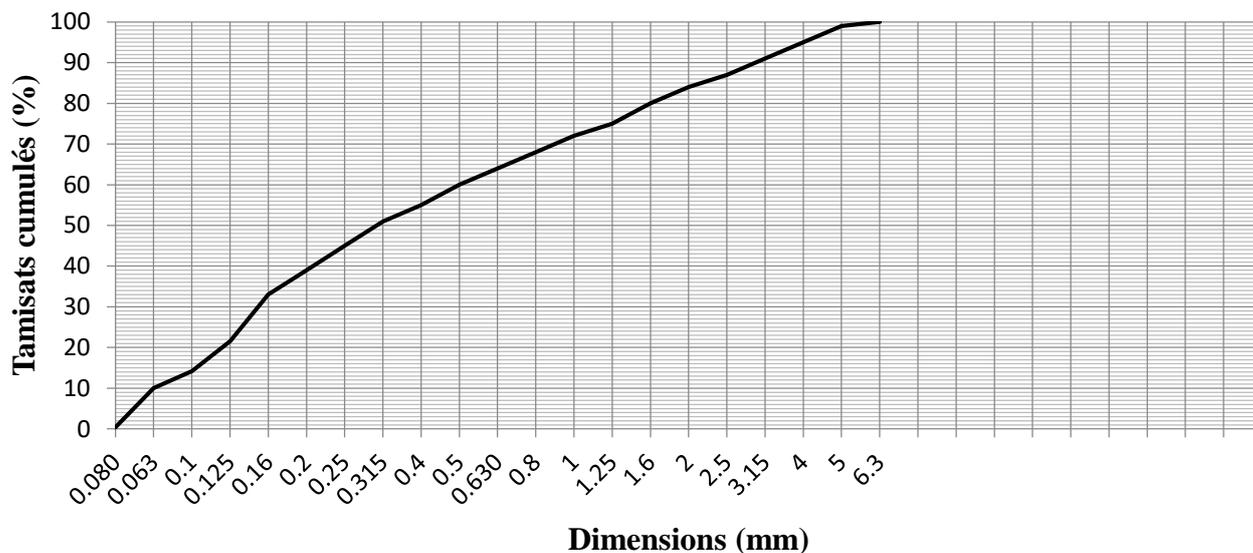


Figure 3. 2 Courbe granulométrique du sol de Jomba, échantillon 2

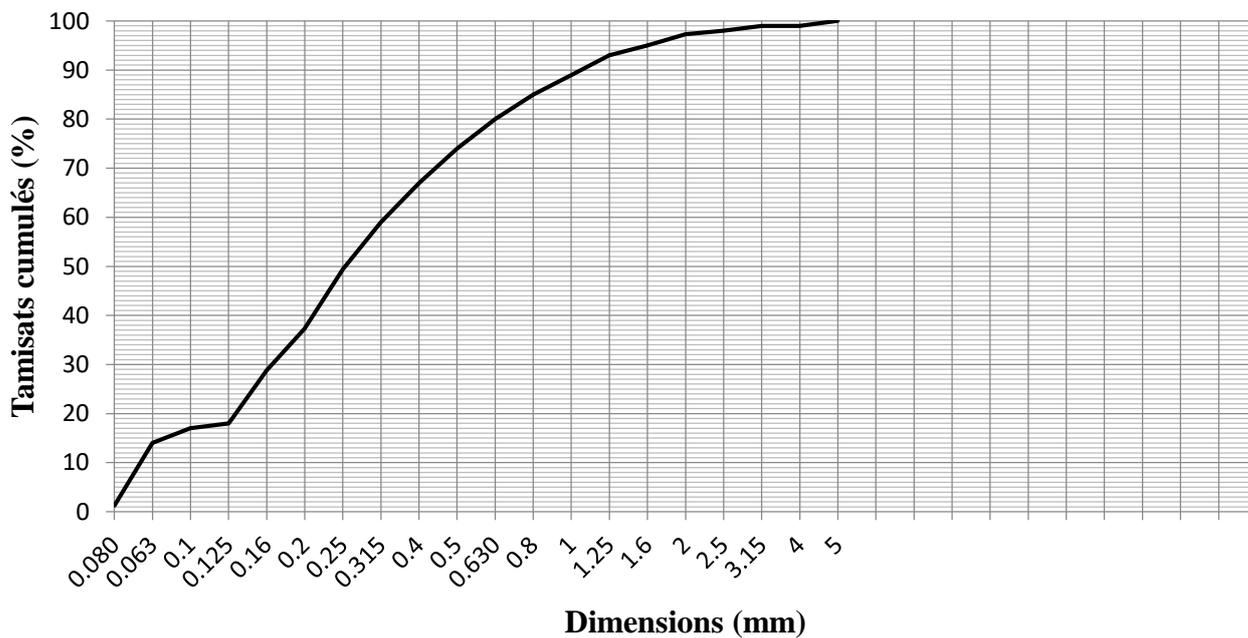


Figure 3. 3 Courbe granulométrique du sol de Rutshuru centre, échantillon 1

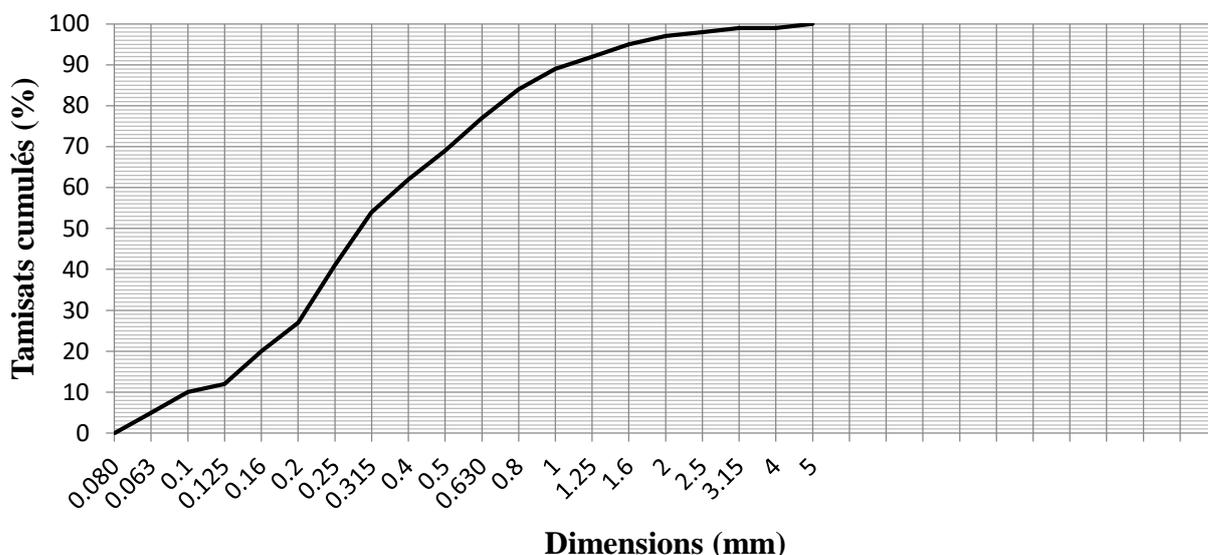


Figure 3. 4 Courbe granulométrique du sol de Rutshuru centre, échantillon 2

De ces résultats, nous constatons que pour les sols des deux sites étudiés, le pourcentage des fines est moindre comparativement aux particules passant dans le tamis de 80µm. Ainsi donc, les sols de Jomba et de Rutshuru centre sont de la classe des grenus selon la figure 1.5 de la classification des sols à granulométrie uniforme.

III.3. Limites d'Atterberg

La détermination des limites d'Atterberg a été effectuée sur des échantillons passants à travers le tamis de 0,4mm selon la norme NF P 94-051.

III.3.1. Limites d'Atterberg du sol de Jomba

Les valeurs trouvées de la teneur en eau(W), limite de liquidité(WL), limite de plasticité(WP), indice de plasticité(IP) et indice de consistance (IC) du sol de Jomba sont présentées dans les tableaux 3.3.a. et 3.3.b. ci-dessous.

Les tableaux en annexe 3 présentent les limites d'Atterberg du sol de Jomba des deux échantillons étudiés.

Tableau 3. 3.a. Valeurs de W, W_L, W_P, I_P, I_C du sol de Jomba, échantillon 1

W(%)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	I _C
33.36%	77.5%	76.2%	1.8%	0.3395

Comme nous l'avons signalé dans le deuxième chapitre, la limite de liquidité est la teneur en eau à laquelle la rainure se referme sur 1cm après 25coups.

La figure 3.5 présente la limite de liquidité du sol de Jomba pour l'échantillon 1.

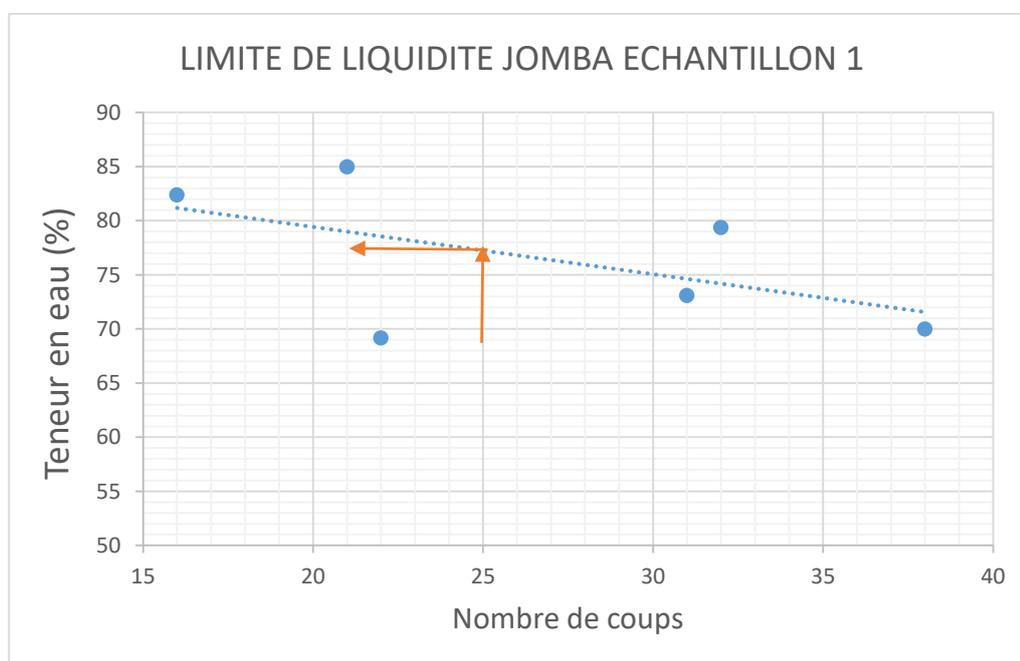


Figure 3. 5 Limite de liquidité du sol de Jomba, échantillon 1.

La limite de liquidité trouvée pour le sol de Jomba échantillon 1 est de **77.5%**. La valeur de sa limite de plasticité est de **76,2%** et elle est représentée dans le tableau en annexe 3. A partir de ces deux limites, nous déterminons les indices déductibles qui sont tels que :

- Indice de plasticité : $I_P = W_L - W_P = (77.5 - 76,2) \% = 1,3\%$
- Indice de consistance : $I_C = \frac{W_L - W}{I_P} = \frac{77.5 - 33,36}{1,3} = 33.95\% = 0,3395$

Partant de valeurs de I_P et W_L et en se basant sur la classification des sols selon le GTR ainsi que sur la figure 1.6, la projection de I_P et W_L nous permet de conclure que le sol de Jomba pour l'échantillon 1 est un sol organique ou limon organique très plastique. Partant de la valeur de son indice de plasticité qui est de 1.3% et en se basant sur le tableau 1.8 de la classification des sols suivant l'indice de plasticité, on classifie ce sol parmi les sables argileux. Enfin, en se basant sur le tableau 1.10 de classification des sols suivant la valeur de l'indice de consistance et ayant une valeur de $I_C = 0.3395$, ce sol est qualifié de sol à consistance molle.

Tableau 3.3.b. Valeurs de W , W_L , W_P , I_P , I_C du sol de Jomba, échantillon 2

$W(\%)$	$W_L(\%)$	$W_P(\%)$	$I_P(\%)$	I_C
20.27%	75.5%	73.2%	2.3%	0.2401

La figure 3.6 présente la limite de liquidité du sol de Jomba pour l'échantillon 2.

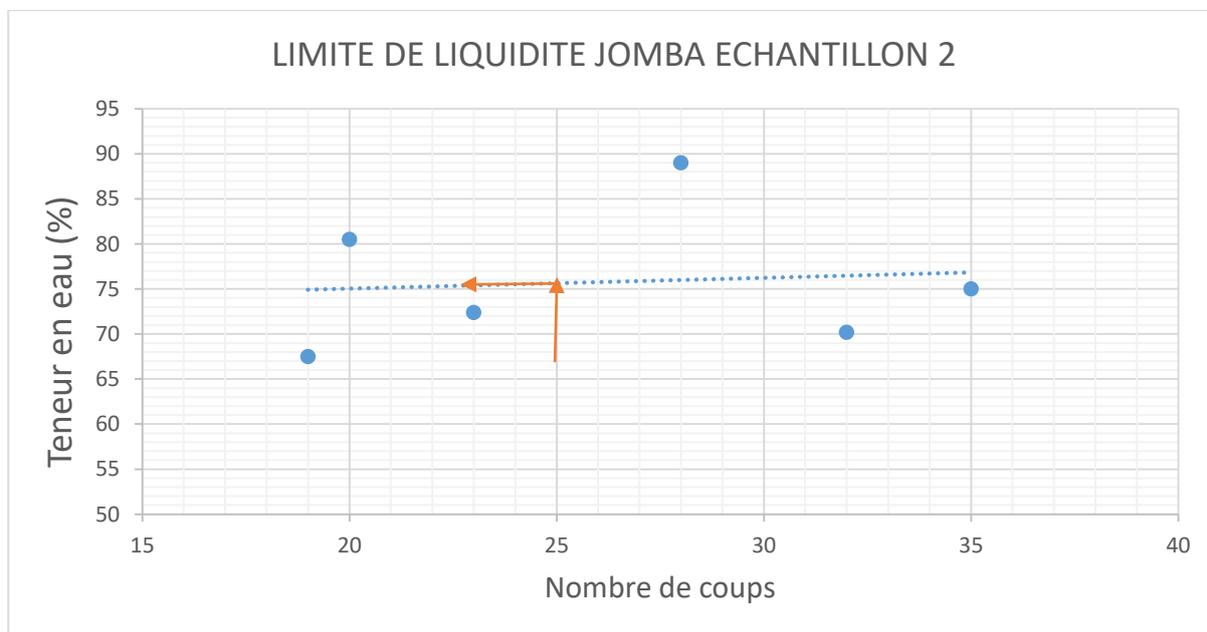


Figure 3. 6 Limite de liquidité du sol de Jomba, échantillon 2.

La limite de liquidité trouvée pour le sol de Jomba échantillon 2 est de **75.5%**. La valeur de sa limite de plasticité est de **73.2%** et elle est représentée dans le tableau en annexe 3. A partir de ces deux limites, nous déterminons les indices déductibles qui sont tels que :

- Indice de plasticité : $I_p = W_L - W_P = (74.5 - 73.2) \% = 2.3\%$
- Indice de consistance : $I_c = \frac{W_L - W}{I_p} = \frac{75.5 - 20.27}{2.3} = 24.01\% = 0.2401$

Partant de valeurs de IP et WL et en se basant sur la classification des sols selon le GTR ainsi que sur la figure 1.6, la projection de IP et WL nous permet de conclure que le sol de Jomba pour l'échantillon 2 est un sol organique ou limon organique très plastique. Partant de la valeur de son indice de plasticité qui est de 2.3% et en se basant sur le tableau 1.8 de la classification des sols suivant l'indice de plasticité, on classifie ce sol parmi les sables argileux. Enfin, en se basant sur le tableau 1.10 de classification des sols suivant la valeur de l'indice de consistance et ayant une valeur de $I_c = 0.2401$, ce sol est qualifié de sol à consistance très molle.

III.3.2. Limites d'Atterberg du sol de Rutshuru centre

Les valeurs trouvées de la teneur en eau(W), limite de liquidité(W_L), limite de plasticité(W_P), indice de plasticité(I_P) et indice de consistance (I_C) du sol de Rutshuru centre sont présentées dans les tableaux 3.4.a. et 3.4. b.

Les tableaux en annexe 4 présentent les limites d'Atterberg du sol de Rutshuru centre.

Tableau 3. 4.a. Valeurs de W, W_L, W_P, I_P, I_C du sol de Rutshuru centre, échantillon 1

W(%)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	I _C
6.18	27.5	25.7	1.8	0.11

La figure 3.7 présente la limite de liquidité du sol de Rutshuru centre pour l'échantillon 1.

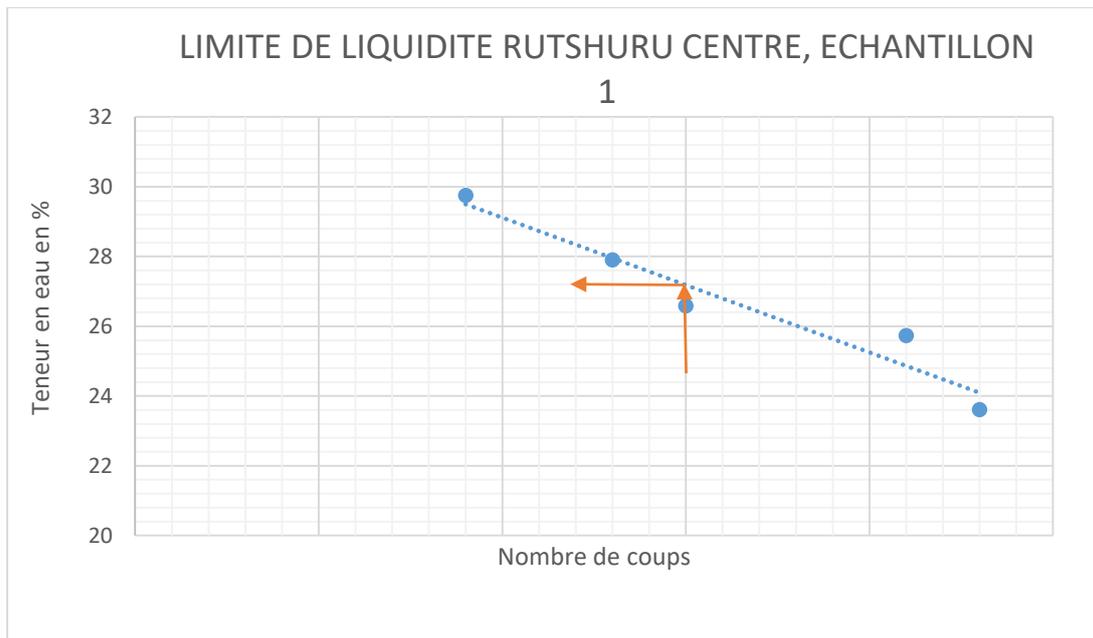


Figure 3. 7 Limite de liquidité du sol de Rutshuru centre, échantillon 1.

La limite de liquidité trouvée pour le sol de Rutshuru centre échantillon 1 est de **27,5%**. La valeur de sa limite de plasticité est de **25,7%** et elle est représentée dans le tableau en annexe 4. A partir de ces deux limites, nous déterminons les indices déductibles qui sont tels que :

- Indice de plasticité : $I_P = W_L - W_P = (27.5 - 25.7) \% = 1.8\%$
- Indice de consistance : $I_C = \frac{W_L - W}{I_P} = \frac{27.5 - 6.18}{1.8} = 11.84\% = 0.11$

Partant de valeurs de I_P et W_L et en se basant sur la classification des sols selon le GTR sur la figure 1.6, la projection de I_P et W_L nous permet de conclure que le sol de Rutshuru centre pour l'échantillon 1 est une argile peu plastique. Partant de la valeur de son indice de plasticité qui est de 1.8% et en se basant sur le tableau 1.8 de la classification des sols suivant l'indice de plasticité, on classifie ce sol parmi les sables argileux. Enfin, en se basant sur le tableau 1.10 de classification des sols suivant la valeur de l'indice de consistance et ayant une valeur de $I_C = 0.11$, ce sol est qualifié de sol à consistance très molle.

Tableau 3.4.b. Valeurs de W, W_L, W_P, I_P, I_C du sol de Rutshuru centre échantillon 2

W(%)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	I _C
3.17%	26%	24.5%	1.5%	0.15

La figure 3.8.ci-dessous présente la limite de liquidité du sol de Rutshuru centre pour l'échantillon 2.

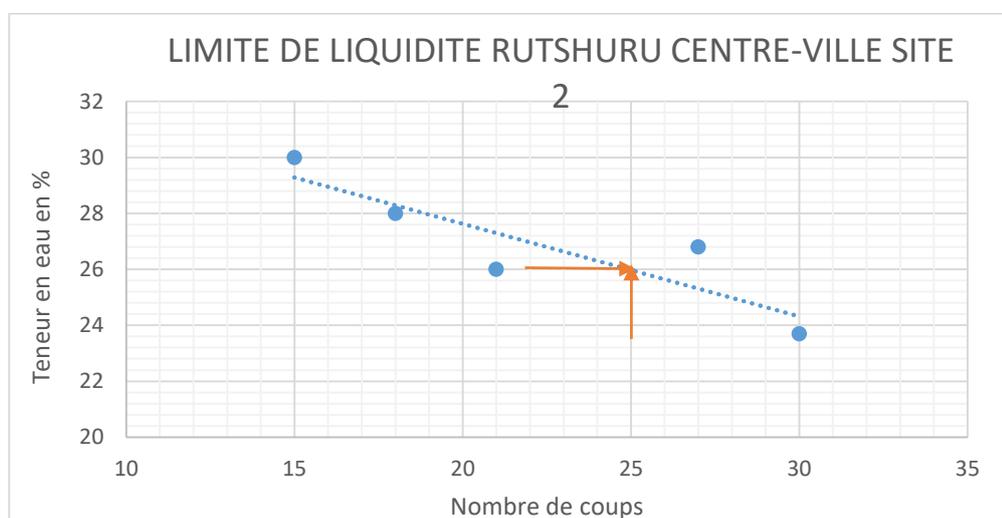


Figure 3. 8 Limite de liquidité du sol de Rutshuru centre, échantillon 2.

La limite de liquidité trouvée pour le sol de Rutshuru centre échantillon 2 est de **26%**. La valeur de sa limite de plasticité est de **24.5%** et elle est représentée dans le tableau en annexe 4. A partir de ces deux limites, nous déterminons les indices déductibles qui sont tels que :

- Indice de plasticité : $I_P = W_L - W_P = (26 - 24.5) \% = 1.5\%$
- Indice de consistance : $I_C = \frac{W_L - W}{I_P} = \frac{26 - 3.17}{1.5} = 15.22\% = 0.15$

Partant de valeurs de I_P et W_L et en se basant sur la classification des sols selon le GTR sur la figure 1.6, la projection de I_P et W_L nous permet de conclure que le sol de

Rutshuru centre pour l'échantillon 1 est une argile peu plastique. Partant de la valeur de son indice de plasticité qui est de 1.5% et en se basant sur le tableau 1.8 de la classification des sols suivant l'indice de plasticité, on classifie ce sol parmi les sables argileux.

Enfin, en se basant sur le tableau 1.10 de classification des sols suivant la valeur de l'indice de consistance et ayant une valeur de $I_c = 0.15$, ce sol est qualifié de sol à consistance très molle.

III.4. Les essais mécaniques

Les résultats des essais mécaniques (Proctor et CBR) ont été déterminés respectivement suivant les normes NF P 94-093 et NF P 94-078.

III.4.1. Essai Proctor Modifié

a) Sol de Rutshuru centre

- Echantillon 1

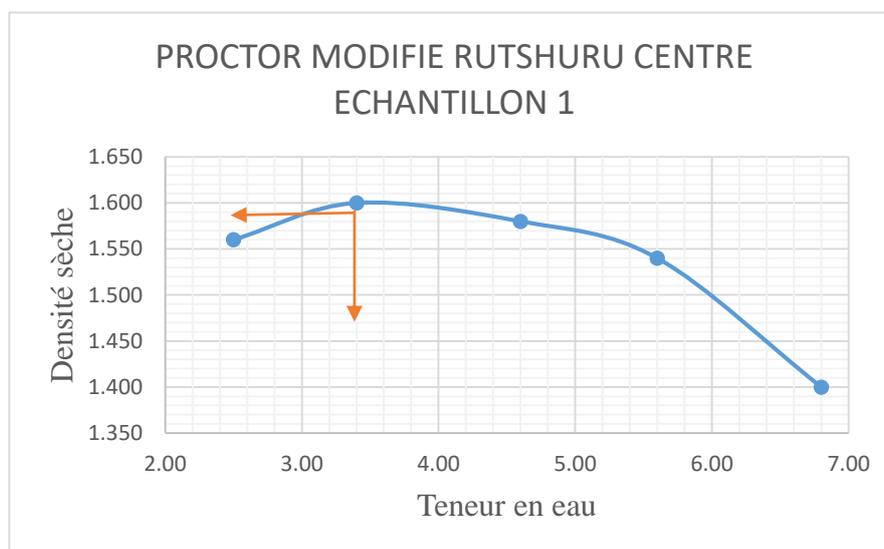


Figure 3. 9 Courbe Proctor modifié du sol de Rutshuru centre, échantillon 1

Le sol de Rutshuru centre pour l'échantillon 1 présente une densité sèche maximale d_{max} de $1.6t/m^3$ qui correspond à une teneur en eau optimale w_{opt} de 3.4%.

- Echantillon 2

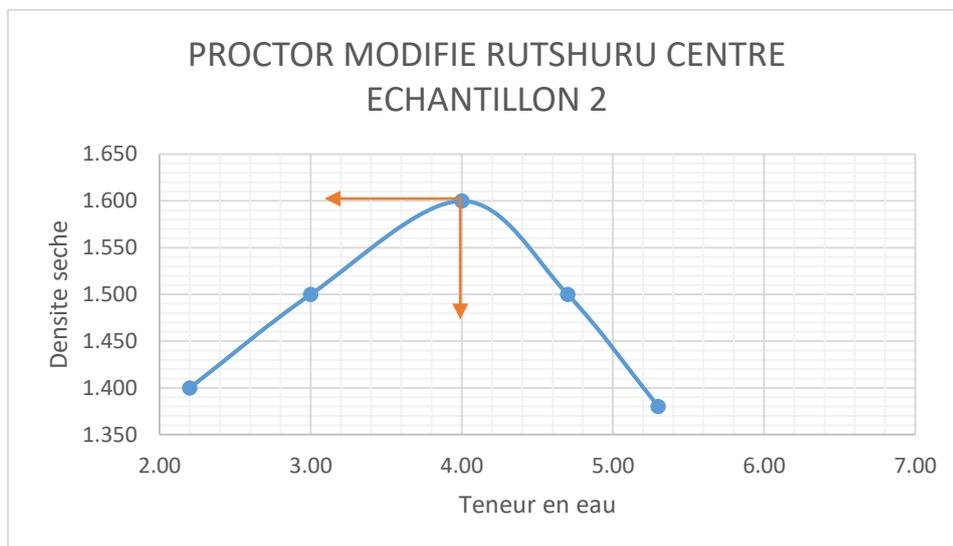


Figure 3. 10 Courbe Proctor modifié du sol de Rutshuru centre, échantillon 2

Le sol de Rutshuru centre pour l'échantillon 2 présente une densité sèche maximale d_{max} de $1.6t/m^3$ qui correspond à une teneur en eau optimale w_{opt} de 4%.

b) Sol de Jomba

- Echantillon 1

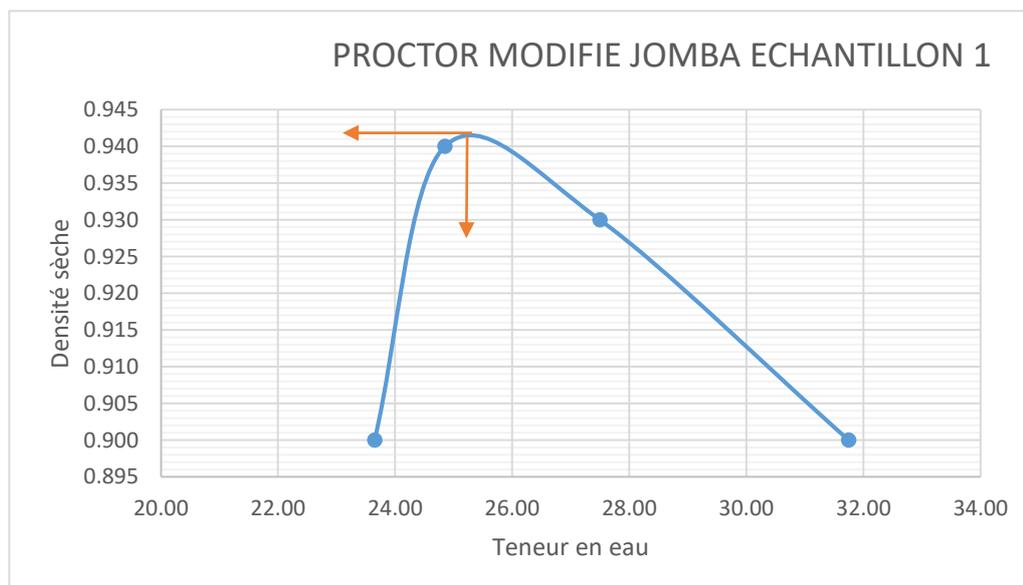


Figure 3. 11 Courbe Proctor modifié du sol de Jomba, échantillon 1

Le sol de Jomba pour l'échantillon 2 présente une densité sèche maximale d_{max} de $0.942t/m^3$ qui correspond à une teneur en eau optimale w_{opt} de 25.2%.

- Echantillon 2

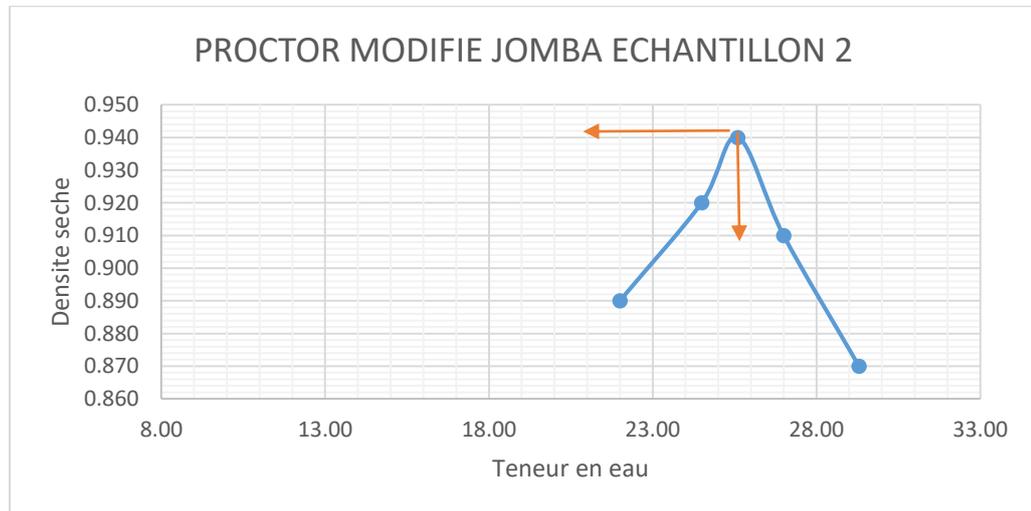


Figure 3. 12 Courbe Proctor modifié du sol de Jomba, échantillon 2

Le sol de Jomba pour l'échantillon 2 présente une densité sèche maximale d_{max} de $0.94t/m^3$ qui correspond à une teneur en eau optimale w_{opt} de 25.7%.

III.4.2. Essai CBR

L'essai CBR après quatre jours d'immersion nous a permis de déterminer les portances des sols étudiés. Les résultats de cet essai sont présentés dans les tableaux 3.5 et 3.6 ainsi que dans les annexes 7, 8 et 9.

Tableau 3. 5 Indice de portance du sol de Rutshuru centre

Nombre de coups	Enfoncement	Forces en KN	Effort de pénétration	CBR après immersion
25	CBR 2.5	0.261	$\frac{0.261}{13.6} \times 100$	1.36%
	CBR 5	0.3915	$\frac{0.3915}{20.3} \times 100$	1.93%

Tableau 3. 6 Indice de portance du sol de Jomba

Nombre de coups	Enfoncement	Forces en KN	Effort de pénétration	CBR après immersion
25	CBR 2.5	0	0	0%
	CBR 5	0	0	0%

Des tableaux 3.5 et 3.6, nous trouvons l'indice CBR pour 25 coups après 4 jours d'immersion et pour 5 mm d'enfoncement égal à 1.96 % pour le sol de Rutshuru centre-ville et nul pour celui de Jomba.

D'après le tableau 2.2, après avoir trouvé un $CBR < 3$, nous pouvons dire que le sol de Rutshuru centre appartient à la classe de portance S0 correspondant à une portance très faible. Pareillement en se référant au tableau 2.3, on constate que le CBR de Rutshuru centre est dans l'intervalle $0 < CBR < 5$ dans S1. Au regard de cet indice CBR, ces matériaux ne peuvent pas être utilisés dans la construction routière.

Pour le sol de Jomba, le CBR est nul, c'est-à-dire qu'il appartient à la classe de portance S0 correspondant à une portance très faible. De même en se référant au tableau 2.3, on constate que le CBR du sol de Jomba est de loin inconvenable pour la construction routière.

III.5. Essai de cisaillement rectiligne

Suite à l'indisponibilité de l'équipement nécessaire pour la réalisation de cet essai, les résultats présentés dans les tableaux 3.7 et 3.8 ont été estimés en fonction des indices de plasticité des échantillons déterminés au laboratoire. Ces résultats nous ont permis de tirer une conclusion sur les paramètres intrinsèques des échantillons de sol étudiés. Les valeurs de la cohésion (c) et de l'angle de frottement interne du sol (φ) sont synthétisées dans le tableau 2.4 et présentés dans les tableaux 3.7 et 3.8.

a) Pour le sol de Rutshuru centre

Tableau 3. 7 Cohésion et angle de frottement interne du sol de Rutshuru centre

Echantillon 1		Echantillon 2	
C (MPa)	φ (degré)	C (MPa)	φ (degré)
0	45	0.008	33

b) Pour le sol de Jomba

Tableau 3. 8 Cohésion et angle de frottement interne du sol de Jomba

Echantillon 1		Echantillon 2	
C (MPa)	φ (degré)	C (MPa)	φ (degré)
0	45	0	45

D'après les valeurs obtenues, nous pouvons dire que les échantillons de sol de Rutshuru centre et Jomba sont non cohérents mais frottant. Non cohérents car C'est nul et frottant car φ est non nul.

CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre présente les résultats sur les essais d'identification et de classification des sols de Rutshuru centre et de Jomba, les résultats sur les caractéristiques mécaniques de ces sols, l'évaluation du CBR et de l'optimum Proctor ainsi que ceux de l'essai de cisaillement rectiligne.

En bref, ces essais nous ont permis de classer les sols de Rutshuru centre et de Jomba à travers ces différents paramètres et nous pouvons constater, à travers leurs indices CBR qu'il s'agit des sols inadaptés pour être utilisés dans la construction routière.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de fin d'études a porté sur la « **contribution à la caractérisation des sols de Rutshuru en vue de l'utilisation comme matériau de remblai dans la construction de la RN4 du tronçon Rutshuru-Bunagana** ». L'objectif poursuivi était de caractériser ces sols afin de déterminer leurs caractéristiques physiques et mécaniques et voir s'ils peuvent être employés dans la construction routière. Pour parvenir aux résultats trouvés, nous avons eu à déterminer les paramètres de caractérisation des sols des deux sites différents notamment la zone de Jomba et celle du centre de Rutshuru pour deux échantillons représentatifs chacun, à travers une série d'essais au laboratoire de génie civil de l'ULPGL GOMA suivant les normes en vigueur.

Les essais mécaniques de ces sols ayant été effectués au travers l'essai Proctor et l'essai CBR nous ont permis de déterminer la teneur en eau optimale, la densité sèche maximale et leurs indices CBR.

Au regard des résultats obtenus, suivant la classification GTR, LCPC, les sols des sites étudiés sont caractérisés comme étant des sols à portance très faible, soit un indice CBR < 5 et donc inconvenables ou inutilisables pour l'ensemble des couches dans la construction des routes. Ils peuvent servir uniquement en remblai de la couche de forme pour une route à faible trafic.

Cependant, pour pallier à cette situation de faible portance, quelques solutions seraient envisageables entre autres la stabilisation qui est un moyen efficace dans l'augmentation de la portance d'un sol. Elle peut se faire soit par ajout du ciment ou de la chaux, selon les expériences. Nous n'avons pas pu aller plus loin mais nous suggérerions à d'autres chercheurs dans le domaine de poursuivre l'étude afin d'apporter d'autres pistes et avancements quant à ce qui est du sol de nos deux zones étudiées.

Pour ce qui est du cas de notre travail qui s'est intéressé à la RN4 du tronçon Rutshuru –Bunagana, vu que c'est une route plus à caractère commercial, il est donc crucial d'utiliser de matériaux convenables afin d'éviter certains risques liés au à la nature du sol et

permettre la construction d'une route qui puisse résister aux conditions environnementales de la région.

Par ailleurs, en ce qui concerne la comparaison de ces deux sites à travers les résultats de leurs différentes analyses, nous pouvons constater que le sol de Jomba présente des caractéristiques moins bonnes que celui de Rutshuru centre notamment en terme de teneur en eau naturelle environnant les 30% par rapport à celle de Rutshuru qui est bien plus basse. Nous pouvons également nous baser sur sa teneur en eau optimale obtenue par essai Proctor et nous remarquons directement que c'est une argile sursaturée et donc forcément il ne devait pas présenter une quelconque bonne portance.

On peut ainsi dire que, pour les futurs chercheurs qui essayerons d'élargir cette recherche, il serait préférable de s'intéresser plus au sol de Rutshuru centre plutôt qu'à celui de Jomba en terme de stabilisation par ciment, chaux ou tout autre moyen pouvant accroître la portance de ce sol afin de remplir les conditions nécessaires pour être en mesure d'être utilisé comme matériau de remblai pour la construction routière, et ce particulièrement pour la construction de la route nationale numéro 4 car comme le sujet l'indique, il s'agit d'une contribution et donc l'apport de tout celui qui voudrait ne ferait qu'aider à l'avancement de l'étude menée.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. Lérau, cours de géotechnique 1, 3ème ingénierie de la construction. Département de sciences et technologies pour l'ingénieur ; Institut National des sciences appliquées de Toulouse 205-2006, Toulouse, 2006.
- [2] I. K. Gibril, Cours de Routes, G3 Génie Civil ULPGL, GOMA, 2021.
- [3] Wikipédia, [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/sol de Rutshuru](https://fr.wikipedia.org/wiki/sol_de_Rutshuru).
- [4] B. Y. e. D. Amine, Caractérisation des sols allégés avec les résidus de bois; mémoire de master, 2017.
- [5] M. KHADIDJA, Contribution à l'évaluation des caractéristiques physico-chimiques et la qualité du sol dans la région Constantine ; mémoire de master, 2022.
- [6] N. M. Christian, Caractérisation du sol argileux d'IKOMA pour la fabrication des briques réfractaires ; Travail de fin de Cycle, 2017.
- [7] N. N. Ernestine, Etude des propriétés physiques et mécaniques des sols fins de la collectivité de BASHALI ; Travail de fin de cycle, 2014.
- [8] D. H. R, Introduction à la Mécanique des sols, licence géologie appliquée, spécialité géotechnique, Algérie, 2020.
- [9] K. M. e. M. B. ALI, Cours et exercices de géotechnique 1 selon Eurocodes7, 2008.
- [10] K. MEFTAH, Cours et exercices de mécanique des sols, 2008.
- [11] A. C. Didier, Renforcement des propriétés mécaniques des sols de nyakavogo par la chaux hydraulique, mémoire de de licence , Génie Civil ULPGL/GOMA, Goma, 2017-2018.
- [12] M. M. E. e. H. M. E. Amine, Qualité des terrassements dans l'exécution d'un projet routier, Mémoire de master, Génie Civil, Université Abou Bakr Belkaid, 2016-2017.

- [13] M. B. NELLY, Etude comparative des caractéristiques du sol par stabilisation au ciment et à la chaux: Application au sol de Buganda à Minova; Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du diplôme d'Inénieur Civil; ULPGL, GOMA, 2020-2021.
- [14] J.-P. MUKONDA, Jean-Paul MUKONDA, Etude des causes et préventions des risques géotechniques dans un projet routier : cas de la route Bukavu-Kamanyola au SUD-KIVU ; mémoire de Licence., 2019.
- [15] R. H. Eugène, Etude de réhabilitation du tronçon routier rond-point Bralima Bukavu-Kasha, Travail de fin de cycle, ULPGL/GOMA., 2016.
- [16] R. H. Eugène, Etude de la réhabilitation du tronçon routier rond-point Bralima Bukavu-Kasha, travail de fin de cycle, ULPGL, GOMA, 2015-2016.
- [17] DGR, Manuel d'entretien routier, 2012.
- [18] K. Yassine, Etude de dédoublement d'un tronçon routier de 6Km sur la RN46 du PK 194+000 au PK 200+000 (Willaya de Biskra), mémoire de Master, 2019.
- [19] Norme NF P 94-056.
- [20] «NFP 94 500,, Mission d'ingénierie géotechnique classification et spécification ; norme française, AFNOR, (France).,» 2006.
- [21] K. M. Elie, 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., 2019.
- [22] K. M. Nelson, Etude de l'applicabilité des corrélations de Peltier et de Popovic sur les sols de BUTUHE et de KOMBA : Application à la construction routière ; Mémoire de licence, Goma, 2022.
- [23] N. française, «NFP 94/078».
- [24] N. F. P. 9.-0. P. AFNOR, France, 2014.
- [25] N. P. 9.-0. AFNOR, Indice CBR après immersion-Indice CBR Immédiat 6 Indice Portant immédiat-Mesure sur échantillon dans le moule CBR, France, Mai 1997.

-
- [26] A. Dhoub, Comportement des fondations sur sols traités par colonnes ballastées sous charge excentrée, Paris, 2003.
- [27] JUnit.org. [En ligne]. Available: <http://www.junit.org>. [Accès le 2 Janvier 2019].
- [28] A. Arnorld, «Conception d'un onduteur pur sinus,» ULPGL, Goma, 2018.
- [29] F. d. s. d. l. B. N e. N. asma, Etude des paramètres influant sur la portance de sol non saturé (Indice CBR), Mémoire de master, Université de Bourmerdes, Algérie, 2016-2017.
- [30] «NFP 94 500, Mission d'ingénierie géotechnique classification et spécification ; norme française, AFNOR, (France).,» chez 2006.
- [31] D. H. R., Introduction à la mécanique des sols, Algérie, UNIVERSITE FERHAT ABBES. SETIF1, 2019-2020.

ANNEXES

ANNEXE 1 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SOL DE JOMBA

• **Echantillon 1**

Masse de l'échantillon avant lavage : 1 018g

Masse de l'échantillon après lavage : 812g

Date de l'essai : 10/08/2023

Profondeur : 50cm

OUVERTURE DES TAMIS(En mm)		REFUS CUMULES		TAMISATS
ASTM	AFNOR	En g	En %	En %
76.2	80			
63.5	63			
50.8	50			
38.1	40			
31.7	31.5			
25.4	25			
19.1	20			
16.9	16			
12.7	12.5			
9.52	10			
7.93	8			
6.35	6.3			100
4.76	5	10	1,2	98,8
4	4	44	5,4	94,6
3.36	3.15	85	10,5	89,5
2.38	2.5	120	14,8	85,2
2	2	152	18,7	81,3
1.68	1.6	186	22,9	77,1
1.19	1.25	221	27,2	72,8
1	1	262	32,3	67,7
0.84	0.8	293	36,1	63,9
059	0.63	336	41,4	58,6
0.5	0.5	372	45,8	54,2
0.4	0.4	412	50,7	49,3
0.315	0.315	455	56	44
0.25	0.25	509	62,7	37,3
0.2	0.2	566	69,7	30,3
0.16	0.16	614	75,6	24,4
0.125	0.125	684	84,2	15,8
0.1	0.1	699	86	14
0.08	0.08	810	99,7	0,3

• **Echantillon 2**

Masse de l'échantillon avant lavage : 1 150g

Masse de l'échantillon après lavage : 944g

Date de l'essai : 10/08/2023

Profondeur ; 50cm

OUVERTURE DES TAMIS(En mm)		REFUS CUMULES		TAMISATS
ASTM	AFNOR	En g	En %	En %
76.2	80			
63.5	63			
50.8	50			
38.1	40			
31.7	31.5			
25.4	25			
19.1	20			
16.9	16			
12.7	12.5			
9.52	10			
7.93	8			
6.35	6.3			100
4.76	5	12	1,3	98,8
4	4	46	4,9	95,1
3.36	3.15	87	9,2	90,8
2.38	2.5	123	13	87
2	2	155	16,4	83,6
1.68	1.6	190	20,1	80
1.19	1.25	235	24,9	75,1
1	1	268	28,4	71,6
0.84	0.8	298	31,6	68,4
059	0.63	342	36,2	63,8
0.5	0.5	376	39,8	60,2
0.4	0.4	422	44,7	55,3
0.315	0.315	465	49,3	50,7
0.25	0.25	521	55,2	44,8
0.2	0.2	580	61,4	38,6
0.16	0.16	630	66,7	33,3
0.125	0.125	740	78,4	21,6
0.1	0.1	810	85,8	14,2
0.08	0.08	941	99,6	0,4

ANNEXE 2 : ANALYSE GRANULOMETRIQUE DU SOL DE RUTSHURU CENTRE

• **Echantillon 1**

Masse de l'échantillon avant lavage : 1 670g

Masse de l'échantillon après lavage : 1 348g

Date de l'essai : 11/08/2023

Profondeur ; 50cm

OUVERTURE DES TAMIS (En mm)		REFUS CUMULES		TAMISATS
ASTM	AFNOR	En g	En %	En %
76.2	80			
63.5	63			
50.8	50			
38.1	40			
31.7	31.5			
25.4	25			
19.1	20			
16.9	16			
12.7	12.5			
9.52	10			
7.93	8			
6.35	6.3			
4.76	5			100
4	4	10,1	0,75	99,3
3.36	3.15	18	1,3	98,7
2.38	2.5	28	2,1	97,9
2	2	36	2,7	97,3
1.68	1.6	68	5	95
1.19	1.25	98	7,3	92,7
1	1	148	11	89
0.84	0.8	198	14,7	85,3
0.59	0.63	270	20	80
0.5	0.5	354	26,3	73,7
0.4	0.4	448	33,2	66,8
0.315	0.315	554	41,1	58,9
0.25	0.25	682	50,6	49,4
0.2	0.2	846	62,7	37,3
0.16	0.16	960	71,2	28,8
0.125	0.125	1106	82	18
0.1	0.1	1126	83,5	16,5
0.08	0.08	1330	98,7	1,3

• **Echantillon 2**

Masse de l'échantillon avant lavage : 1 784g

Masse de l'échantillon après lavage : 1 462g

Date de l'essai : 11/08/2023

Profondeur ; 50cm

OUVERTURE TAMIS (En mm)		REFUS CUMULES		TAMISATS
ASTM	AFNOR	En g	En %	En %
76.2	80			
63.5	63			
50.8	50			
38.1	40			
31.7	31.5			
25.4	25			
19.1	20			
16.9	16			
12.7	12.5			
9.52	10			
7.93	8			
6.35	6.3			
4.76	5			100
4	4	10,5	0,72	99,3
3.36	3.15	20	1,4	98,6
2.38	2.5	32	2,2	97,8
2	2	43	2,9	97,1
1.68	1.6	76	5,2	94,8
1.19	1.25	120	8,2	91,8
1	1	186	12,7	89
0.84	0.8	235	16,1	83,9
0.59	0.63	330	22,6	77,4
0.5	0.5	450	30,8	69,2
0.4	0.4	554	37,9	62,1
0.315	0.315	680	46,5	53,4
0.25	0.25	722	59,4	40,6
0.2	0.2	1074	73,4	26,6
0.16	0.16	1170	80	20
0.125	0.125	1290	88,2	11,8
0.1	0.1	1312	89,7	10,3
0.08	0.08	1456	99,6	0,4

ANNEXE 3 : LIMITES D'ATTEBERG DU SOL DE JOMBA

a) LIMITE DE LIQUIDITE

• *Echantillon 1*

Nombre de coups	16	22	38	32	21	31
N° de la tare	C14	T17	T5	C10	B2	T11
Poids total humide	20.5	21.5	24.3	21.6	19	21
Poids total sec	17.7	19.7	21.5	18.5	16.7	18
Poids de la tare	14.3	17.1	17.5	14.6	14	13.9
Poids net d'eau	2.8	1.8	2.8	3.1	2.3	3
Poids net matériau sec	3.4	2.6	4	3.9	2.7	4.1
Teneur en eau	82.4%	69.2%	70%	79.4%	85%	73.1%

• *Echantillon 2*

Nombre de coups	18	25	36	34	20	28
N° de la tare	T1	C15	W1	B2	1	L3
Poids total humide	21.7	20.5	22.3	20.5	21,5	21.5
Poids total sec	18.5	18.5	19.5	17.8	18.4	19,2
Poids de la tare	14.5	15.6	15.8	14.1	14.3	16
Poids net d'eau	3.2	2	2.8	2.7	3.1	2,3
Poids net matériau sec	4	2.9	3.7	3.7	4.1	3.2
Teneur en eau	80%	69%	75.6%	73%	75.6%	71.8%

b) LIMITE DE PLASTICITE

• *Echantillon 1*

N° de l'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
N° de la tare	C14	W12	C10
Poids total humide	15.8	15.9	16.4
Poids total sec	15.3	15.29	15.55
Poids de la tare	14.5	14.5	14.6
Poids net d'eau	0.5	0.61	0.85
Poids net matériau sec	0.8	0.79	0.95
Teneur en eau (%)	62.5	77.2	89
W_P (%)	76.2%		

• *Echantillon 2*

N° de l'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
N° de la tare	W8	T14	7
Poids total humide	15.3	15.6	17
Poids total sec	14.79	15.09	16.3
Poids de la tare	14.09	14.38	15.37
Poids net d'eau	0.51	0.51	0.7
Poids net matériau sec	0.7	0.71	0.93
Teneur en eau (%)	72.8	71.8	75.2
W_P (%)	73.2%		

ANNEXE 4 : LIMITES D'ATTEBERG DU SOL DE RUTSHURU CENTRE

a) LIMITE DE LIQUIDITE

• *Echantillon 1*

Nombre de coups	19	23	25	31	33
N° de la tare	J1	1'	A1'	T12	A14
Poids total humide	26.04	24.96	22.69	23.43	23.9
Poids total sec	23.6	22.7	20.97	21.5	22.2
Poids de la tare	15.4	14.6	14.5	14	15
Poids net d'eau	2.44	2.26	1.72	1.93	1.7
Poids net matériau sec	8.2	8.1	6.47	7.5	7.2
Teneur en eau	29.76%	27.9%	26.58%	25.73%	23.61%

• *Echantillon 2*

Nombre de coups	15	18	27	21	30
N° de la tare	J1	1'	A1'	T12	A14
Poids total humide	22.3	24	23	21	21.5
Poids total sec	20.9	22.2	21.9	19.7	20.4
Poids de la tare	16.3	15.8	17.8	14.7	15.75
Poids net d'eau	1.4	1.8	1.1	1.3	1.1
Poids net matériau sec	4.6	6.4	4.1	5	4.65
Teneur en eau	30%	28%	26.8%	26%	23.7%

b) LIMITE DE PLASTICITE

• *Echantillon 1*

N° de l'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
N° de la tare	A14	T16	T14
Poids total humide	15.5	15.8	20.5
Poids total sec	15.23	15.48	20.23
Poids de la tare	14.1	14.3	19.2
Poids net d'eau	0.27	0.32	0.27
Poids net matériau sec	1.13	1.18	1.03
Teneur en eau (%)	23.9	27.1	26.21
W_P (%)	25.7%		

• *Echantillon 2*

N° de l'essai	Essai 1	Essai 2	Essai 3
N° de la tare	W8	L1	C14
Poids total humide	15.1	15.8	20.5
Poids total sec	14.77	15.42	20.23
Poids de la tare	13.57	13.72	19.13
Poids net d'eau	0.33	0.38	0.27
Poids net matériau sec	1.2	1.7	1.1
Teneur en eau (%)	27.5	22.3	23.8
W_P (%)	24.5 %		

ANNEXE 5 : ESSAI PROCTOR MODIFIE SOL DE JOMBA

• *Echantillon 1*

Eau ajoutée	2%		4%		6%		8%	
Poids total humide(g)	10956		10730		10968		10964	
Poids du moule(g)	7394		7394		7394		7394	
Poids ech. Humide(g)	3562		3336		3574		3570	
Volume du moule(cm ³)	3002.625		3002.625		3002.625		3002.625	
Densité humide	1.18		1.11		1.19		1.19	
Poids humide+tare(g)	29.03	38.65	40.5	28.85	23.62	25.37	29.05	28.71
Poids sec+tare(g)	26.1	34.7	35.6	26.1	21.7	23	25.7	25.3
Poids de la tare(g)	14	19.2	14.3	14.8	14.1	14.4	14.9	14.8
Poids de l'eau(g)	2.93	3.95	4.9	2.75	1.92	2.37	3.35	3.41
Poids sec matériau(g)	12.1	15.5	21.3	11.3	7	8.6	10.8	10.5
Teneur en eau(%)	24.2	25.5	23	24.3	27.4	27.6	31	32.5
Teneur en eau moyenne(%)	24.85		23.65		27.5		31.75	
Densité sèche	0.94		0.9		0.93		0.9	

• *Echantillon 2*

Eau ajoutée	2%		4%		6%		8%		10%	
Poids total humide(g)	10 186		10 216		10 276		10 126		10 066	
Poids du moule(g)	7394		7394		7394		7394		7394	
Poids ech. Humide(g)	2 792		2 822		2 882		2 732		2 672	
Volume du moule(cm ³)	3002.625		3002.625		3002.625		3002.625		3002.625	
Densité humide	0.93		0.94		0.96		0.91		0.89	
Poids humide+tare(g)	38.5	29.7	29.5	36.7	24.9	25.6	30.4	27.85	31.6	29.2
Poids sec+tare(g)	32.45	26.44	26.63	33.2	23.19	23.47	28	25.25	28.15	25.5
Poids de la tare(g)	10.45	14.14	14.83	19	16.39	15.27	16.9	13.65	15.85	13.4
Poids de l'eau(g)	6.05	3.26	2.87	3.5	1.71	2.13	2.4	2.6	3.45	3.7
Poids sec matériau(g)	22	12.3	11.8	14.2	6.8	8.2	11.1	11.6	12.3	12.1
Teneur en eau(%)	27.5	26.5	24.3	24.7	25.2	26	21.7	22.3	28.1	30.5
Teneur en eau moyenne(%)	27		24.5		25.6		22		29.3	
Densité sèche	0.91		0.92		0.94		0.89		0.87	

ANNEXE 6 : ESSAI PROCTOR MODIFIE SOL DE RUTSHURU CENTRE

• *Echantillon 1*

Eau ajoutée	2%		4%		6%		8%		10%	
Poids total humide(g)	12 410		12 376		12 395		12 345		12 220	
Poids du moule(g)	7 396		7 394		7 394		7 394		7 394	
Poids ech. Humide(g)	4 804		4 992		4 958		4 910		4 828	
Volume du moule(cm ³)	3 002.625		3 002.625		3 002.625		3 002.625		3 002.625	
Densité humide	1.6		1.66		1.65		1.63		1.6	
Poids humide+tare(g)	34	32.5	34.85	29.26	32.46	31.65	34.24	26.01	28.94	28.53
Poids sec+tare(g)	33.54	32.13	34.3	28.7	31.8	30.8	33.1	25.3	28	27.6
Poids de la tare(g)	15.04	16.53	14.6	14.8	15	14.7	13.7	14.4	13.7	14.4
Poids de l'eau(g)	0.46	0.37	0.55	0.56	0.66	0.85	1.14	0.61	0.94	0.93
Poids sec matériau(g)	18.5	15 .6	19.7	13.9	16.8	16.1	19.4	11.6	14.3	13.2
Teneur en eau(%)	2.5	2.4	2.8	4	3.9	5.3	5.9	5.3	6.6	7
Teneur en eau moyenne(%)	2.45		3.4		4.6		5.6		6.8	
Densité sèche	1.56		1.6		1.58		1.54		1.5	

• *Echantillon 2*

Eau ajoutée	2%		4%		6%		8%		10%	
Poids total humide(g)	11 688		12 390		12 033		12 078		11 748	
Poids du moule(g)	7394		7 394		7 394		7 394		7 394	
Poids ech. Humide(g)	4 294		4 996		4 639		4 684		4 354	
Volume du moule(cm ³)	3 002.625		3 002.625		3 002.625		3 002.625		3 002.625	
Densité humide	1.43		1.664		1.545		1.56		1.45	
Poids humide+tare(g)	33.4	31.2	34.85	29.26	32.46	31.65	34.24	26.01	28.94	28.53
Poids sec+tare(g)	33.03	30.85	34.3	28.7	31.8	30.8	33.1	25.3	28	27.6
Poids de la tare(g)	14.53	14.95	14.6	14.8	15	14.7	13.7	14.4	13.7	14.4
Poids de l'eau(g)	0.37	0.35	0.55	0.56	0.66	0.85	1.14	0.61	0.94	0.93
Poids sec matériau(g)	18.5	15.9	19.7	13.9	16.8	16.1	19.4	11.6	14.3	13.2
Teneur en eau(%)	2	2.2	2.8	4	3.9	5.3	5.9	5.3	6.6	7
Teneur en eau moyenne(%)	2.1		4		3		4.32		5.15	
Densité sèche	1.4		1.6		1.5		1.5		1.38	

ANNEXE 7. POINCONNEMENT DU SOL DE RUTSHURU CENTRE

	<i>5 X 10</i>			<i>5 X 25</i>			<i>5 X 55</i>		
	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>F/kg</i>	<i>Kg/cm²</i>	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>p/kg</i>	<i>p/kg</i>	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>p/kg</i>	<i>P Kg/cm</i>
<i>0.2</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>4</i>		
<i>0.4</i>	<i>4</i>			<i>4</i>			<i>6</i>		
<i>0.6</i>	<i>6</i>			<i>6</i>			<i>8</i>		
<i>0.8</i>	<i>7</i>			<i>7</i>			<i>9</i>		
<i>1</i>	<i>8</i>			<i>8</i>			<i>10</i>		
<i>1.5</i>	<i>9</i>			<i>9</i>			<i>11</i>		
<i>2</i>	<i>9</i>			<i>10</i>			<i>12</i>		
<i>2.5</i>	<i>10</i>			<i>12</i>			<i>14</i>		
<i>3</i>	<i>10</i>			<i>14</i>			<i>16</i>		
<i>3.5</i>	<i>10</i>			<i>15</i>			<i>17</i>		
<i>4</i>	<i>11</i>			<i>17</i>			<i>19</i>		
<i>4.5</i>	<i>12</i>			<i>17.5</i>			<i>20</i>		
<i>5</i>	<i>13</i>			<i>18</i>			<i>23</i>		
<i>6</i>	<i>14</i>			<i>21</i>			<i>25</i>		
<i>7</i>	<i>15</i>			<i>24</i>			<i>27</i>		
<i>8</i>	<i>17</i>			<i>25</i>			<i>29</i>		
<i>9</i>	<i>18</i>			<i>27</i>			<i>33</i>		
<i>10</i>	<i>19</i>			<i>29</i>			<i>35</i>		

ANNEXE 8. POINCONNEMENT DU SOL DE JOMBA

	<i>5 X 10</i>			<i>5 X 25</i>			<i>5 X 55</i>		
	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>F/kg</i>	<i>Kg/cm²</i>	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>p/kg</i>	<i>p/kg</i>	<i>Lecture 1/100mm</i>	<i>p/kg</i>	<i>P Kg/cm</i>
<i>0.2</i>	<i>1</i>			<i>1</i>			<i>0</i>		
<i>0.4</i>	<i>1.5</i>			<i>1</i>			<i>0</i>		
<i>0.6</i>	<i>1.5</i>			<i>1</i>			<i>0</i>		
<i>0.8</i>	<i>2</i>			<i>1</i>			<i>0</i>		
<i>1</i>	<i>2</i>			<i>1</i>			<i>1</i>		
<i>1.5</i>	<i>2.5</i>			<i>1</i>			<i>1</i>		
<i>2</i>	<i>3</i>			<i>1.5</i>			<i>1</i>		
<i>2.5</i>	<i>3</i>			<i>1.5</i>			<i>1</i>		
<i>3</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>1.2</i>		
<i>3.5</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>1.5</i>		
<i>4</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>1.5</i>		
<i>4.5</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>1.5</i>		
<i>5</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>1.8</i>		
<i>6</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>1.9</i>		
<i>7</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>1.95</i>		
<i>8</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>2</i>		
<i>9</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>2</i>		
<i>10</i>	<i>3</i>			<i>2</i>			<i>2</i>		

ANNEXE 9. TABLE DE CORRESPONDANCE

Identification : S370-10/AA/0029

Force maximum : 50 KN

Déformation maximum : 2.28mm

Déformation/ Force appliquée

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

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

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

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

0,19	4,13	0,76	16,67	1,33	29,13	1,9	41,74
0,2	4,35	0,77	16,89	1,34	29,35	1,91	41,96
0,21	4,57	0,78	17,11	1,35	29,57	1,92	42,17
0,22	4,78	0,79	17,33	1,36	29,78	1,93	42,39
0,23	5	0,8	17,56	1,37	30	1,94	42,61
0,24	5,22	0,81	17,78	1,38	30,22	1,95	42,83
0,25	5,43	0,82	18	1,39	30,44	1,96	43,04
0,26	5,65	0,83	18,22	1,4	30,87	1,97	43,26
0,27	5,87	0,84	18,44	1,41	30,87	1,98	43,48
0,28	6,09	0,85	18,67	1,42	31,11	1,99	43,7
0,29	6,3	0,86	18,89	1,43	31,33	2	43,91
0,3	6,52	0,87	19,11	1,44	31,56	2,01	44,13
0,31	6,74	0,88	19,33	1,45	31,78	2,02	44,35
0,32	6,96	0,89	19,56	1,46	32	2,03	44,57
0,33	7,17	0,9	19,78	1,47	32,22	2,04	44,78
0,34	7,39	0,91	20	1,48	32,44	2,05	45
0,35	7,61	0,92	20,22	1,49	32,67	2,06	45,22
0,36	7,83	0,93	20,43	1,5	32,89	2,07	45,43
0,37	8,04	0,94	20,65	1,51	33,11	2,08	45,65
0,38	8,26	0,95	20,87	1,52	33,33	2,09	45,87
0,39	8,48	0,96	21,09	1,53	33,56	2,1	46,09
0,4	8,7	0,97	21,3	1,54	33,78	2,11	46,3
0,41	8,91	0,98	21,52	1,55	34	2,12	46,52
0,42	9,13	0,99	21,74	1,56	34,22	2,13	46,74
0,43	9,35	1	21,96	1,57	34,44	2,14	46,96
0,44	9,57	1,01	22,17	1,58	34,67	2,15	47,17

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

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

1,59	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

2,16	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