

**UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS**

**FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**



BP. 368 GOMA

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

**CARACTERISATION DES SOLS DE KITOVU ET  
DE MURUFUNZO A JOMBA EN VUE DE LEURS  
UTILISATION DANS LA FABRICATION DE BLOCS EN  
TERRES COMPRIMEES**

**Par BARAKA HABARARUGIRA Élysée**

Travail présenté en vue de l'obtention d'un diplôme en  
science de l'ingénieur

**Mention : Génie Civil**

**Directeur : Prof. Dr. Ing. CHERIF BIRYONDEKE**

**Encadreur : Ing. KOKO KATUMBI Pascal**

**ANNEE ACADEMIQUE 2023 - 2024**

## **Epigraphe**

*« La vraie sagesse est de reconnaitre sa propre ignorance »*

**Aristote**

## **Dédicaces**

A la famille Papias HABARUGIRA

A la famille SEKAHUNDE

**BARAKA HABARUGIRA Elysée**

## Remerciements

Le présent travail est le résultat de l'effort qu'a tenu l'étudiant et plusieurs personnes qui nous ont guidés pour arriver à sa réalisation. Nous tenons à remercier chacun de tous qui a contribué pour que ce travail soit bien élaboré. C'est ainsi que premièrement nous remercions le bon DIEU qui nous protège tous les jours et qui ne cessera jamais sa protection envers nous.

Au regard de ses activités, nous tenons à remercier le Professeur Cherif BISHWEKA pour son effet d'avoir dirigé ce travail et ainsi que nos sincères remerciements à monsieur Ir pascal KOKO KATUMBI qui a accepté d'encadrer ce travail. Nous remercions aussi toutes les autorités de la faculté des sciences et technologies appliquées pour tous les soucis qu'ils ont toujours pour nous afin que nous puissions bénéficier d'une meilleure formation qu'offre l'université.

Nos remerciements à toute la famille biologique entre autres nos parents Papias HABARUGIRA et Marie N'BAVAKURE qui nous ont toujours accompagnés dans tous nos engagements. Tous nos remerciements à la famille SEKAHUNDE plus particulièrement à Joseph MUNYAMPETA qui ne cesse pas de nous accompagner dans tous nos cursus intellectuels en nous payant les frais académiques et autres malgré toutes ses charges.

Enfin, nous présentons nos remerciements à Grace UZAMUKUNDA et à tous mes frères et sœurs plus particulièrement à Janvier HABARUGIRA et à toutes les personnes qui ont contribué pour l'accomplissement de nos objectifs mais dont leurs noms ne sont pas cités ci haut.

**BARAKA HABARUGIRA Elysée**

## RESUME

*Cette étude a porté sur la caractérisation des sols de KITOVU et de MURUFUNZO à Jomba en vue de leur utilisation dans la fabrication de blocs en terres comprimées. Le travail a consisté à identifier les différents échantillons des sols dans le but de vérifier s'ils peuvent être utilisés dans la fabrication de blocs en terres comprimées et de proposer une meilleure carrière entre les deux. On a déterminé les paramètres d'état et les essais de caractérisation physique et mécanique notamment la teneur en eau naturelle, les masses volumiques apparente et absolue, les masses volumiques sèche, l'indice des vides, la porosité, le degré de saturation, l'essai d'analyse granulométrique par tamisage, l'essai de la limite d'Atterberg, l'essai de la valeur au bleu de méthylène et l'essai Proctor normal ont été réalisés. Pour l'échantillon de sol de KITOVU, la teneur en eau naturelle a été de 2,086% ; la limite d'Atterberg notamment la limite liquidité de 49,5% ; la limite de plasticité de 22,5 % ; l'indice de plasticité de 27,1 ; l'indice de liquidité de -0,7 ; l'indice de consistance de 1,74. La valeur au bleu de méthylène de 0,9 ; et ceux relatifs à l'essai Proctor normal notamment la densité sèche maximale de  $2029 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  et la teneur en eau optimale de 6,5% et pour le sol de MURUFUNZO , la teneur en eau est de 5,1% ; ceux relatifs à l'essai de la limite d'Atterberg notamment la limite de liquidité 12,3% ; la limite de plasticité de 10,7% ; l'indice de plasticité de 1,5 ; l'indice de liquidité de -3,7 ; l'indice de consistance de 4,8 ; la valeur au bleu de méthylène est de 0,75 et pour ceux relatif à l'essai Proctor normal notamment la densité sèche maximale de  $1602 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  et la teneur en eau optimale de 11,6% .les résultats obtenus à l'essai d'analyse granulométrique et de la limite d'Atterberg ont montré que l'échantillon du sol de KITOVU s'inscrivent partiellement dans le fuseau granulométrique et totalement dans le fuseau de plasticité ce qui implique son utilisation dans la fabrication de blocs des terres comprimées malgré les corrections que nécessitent la granulométrie . Par contre le sol de MURUFUNZO dont ses caractéristiques ne s'inscrivent pas dans le fuseau, ne peut donc pas être utilisé dans cette application dont la nécessité de l'amélioration de ses caractéristiques par stabilisation physique est nécessaire afin de garantir son utilisation. Vu ce qui précède, il est observé que le sol de KITOVU convient mieux d'être utilisé dans la fabrication de blocs en terres comprimées que le sol de MURUFUNZO.*

**Mots clés :** *Caractérisation, fabrication, Sol, BTC, stabilisation.*

## ABSTRACT

*This study focused on the characterization of the soils of KITOVU and MURUFUNZO in Jomba with a view to their use in the manufacture of compressed earth blocks. The work consists of identifying the different soil samples in order to verify whether they can be used in the manufacture of compressed earth blocks and to propose a better quarry between the two. Condition parameters and physical and mechanical identification tests were determined, including natural water content, bulk and absolute density, dry density, void index, porosity, saturation, sieve particle size analysis test, Atterberg limit test, methylene blue value test, and normal Proctor test. For the soil sample from KITOVU, the natural water content is 2.086%, the bulk density is 1388.12kg/m<sup>3</sup>, the absolute density is 2481.19kg/m<sup>3</sup> were found, the limit of Atterberg's in particular the liquidity limit of 49.5%, the plasticity limit of 22.5%; the plasticity index of 27.1, the liquidity index of -0.7; the consistency index of 1.74. The methylene blue value of 0.9; and those relating to the normal Proctor test, in particular the maximum dry density of 2029kg/m<sup>3</sup> and the optimum water content of 6.5% and for the soil of MURUFUNZO, the water content is 5.1%, the bulk density of 946.79kg/m<sup>3</sup>, the absolute density of 1975.91 kg/m<sup>3</sup> have been determined, those relating to the Atterberg limit test, in particular the liquidity index of 12.3%, the plasticity limit of 10.7%, the plasticity index of 1.5, the liquidity index of -3.7, the consistency index of 4.8; the methylene blue value is 0.75 and for those relating to the normal Proctor test, in particular the maximum dry density of 1602kg/m<sup>3</sup> and the optimum water content of 11.6% of the results obtained in the particle size analysis and Atterberg limit test showed that the KITOVU soil sample fits into the particle size and plasticity spindle, which implies its use in the manufacture of compressed earth blocks. In spite of the soil of MURUFUNZO, whose characteristics do not fit into the spindle, cannot be used in this application, the need to improve its characteristics by stabilization is necessary in order to guarantee its use. In view of the above, it is observed that the soil of KITOVU is more suitable for use in the manufacture of compressed earth blocks.*

*Keywords: Characterization, manufacturing, soil, BTC, stabilization, cement, lime*

## Table des matières

Epigraphe.....	i
Dédicaces.....	ii
Remerciements .....	iii
RESUME.....	iv
ABSTRACT .....	v
Table des matières .....	vi
Liste de abréviations.....	viii
Liste de tableaux.....	x
Liste des figures.....	xii
Table des annexes.....	xiv
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I. GENERALITES .....	3
I.1.INTRODUCTION.....	3
I.2.GENERALITES SUR LE SOL [3].....	3
I.2.1 Types du sol [4].....	3
I.2.2. Caractéristiques physiques des sols [5].....	4
I.2.3. Les paramètres dimensionnels (poids volumiques).....	4
I.2.4. Les paramètres sans dimensions (paramètres d'état).....	4
I.2.5. Caractéristiques granulométriques des sols.....	5
I.2.6. Identification des sols [6].....	5
I.2.6.1. Classification des sols à granulométrie uniforme .....	6
I.2.6.2. Classification des sols à granulométrie non uniforme .....	6
I.2.7. Essais sur les sols [12].....	14
I.3. GENERALITES SUR LA TERRE.....	19
I.3.1. Composition de la terre.....	20
I.3.2. Rappel sur les argiles.....	21
I.3.3. Avantage de la terre crue.....	23

**CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE**

I.3.4. Inconvénient de la terre crue .....	23
I.3. 5.Techniques de construction en terre crue [22].....	25
I.4. GENERALITES SUR LE BLOCS DES TERRES COMPRIMEES(BTC) .....	27
I.5.CONCLUSION PARTIELLE .....	33
Chapitre II. METHODOLOGIES .....	34
II.1. INTRODUCTION .....	34
II.2. PRESENTATION DU MILIEU D’ETUDE.....	34
II.3. ECHANTILLONAGE .....	34
II.4. ESSAIS D’IDENTIFICATION .....	35
II.4.1 La teneur en eau naturelle du sol [29] .....	36
II.4.2. Analyse granulométrique [3].....	37
II.4.3 Limites d’Atterberg [33] .....	42
II.4.4. Essais de la masse volumique [34] .....	48
II.4.5. Essai de la valeur au bleu de méthylène (VBS) [35] .....	54
II.5. ESSAIS MECANQUES .....	57
II.5.1 essais Proctor normal [36].....	57
II.5. CONCLUSION PARTIELLE .....	60
Chapitre III. PRESENTATION ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS .....	61
III.1. INTRODUCTION .....	61
III.2. CARACTERISTIQUE DU SOL DE KITOVU A L’ETAT NATUREL.....	61
III.2.1. Détermination des paramètres d’état.....	61
III.2.2. Composition granulométrique .....	62
III.2.3 Limites d’Atterberg.....	63
III.2.4. La valeur au bleu de méthylène .....	65
III.2.5. Essai Proctor normal.....	65
III.3. CARACTERIQUES DU SOL DE MURUFUNZO A L’ETAT NATUREL.....	67
III.3.1.les paramètres d’état .....	67
a. Teneur en eau naturelle.....	67
III.3.2.la composition granulométrique.....	68
III.3.3 limites d’Atterberg .....	69
III.3.4. Valeur au bleu de méthylène .....	71
III.3.5 l’essai Proctor normal.....	71
III.4. CONCLUSION PARTIELLE .....	74

CONCLUSION GENERALE .....	75
Bibliography.....	77

## Liste de abréviations

% : pourcentage

$\Sigma \varphi_i$  : sommes des masses volumiques apparentes

$C_C$  : coefficient de conformité

$C_u$  : coefficient d'uniformité

$I_C$  : indice de consistance

$I_L$  : Indice de liquidité

$I_P$  : indice de plasticité

$I_d$  : la densité relative

$S_r$  : le degré de saturation

$V_w$  : volume de l'eau

$W_L$  : limite de liquidité

$W_P$  : limite de plasticité

$m_h$  : masse humide

$m_d$  : masse sèche

$\gamma'$  : poids volumique du sol déjaugé

$\gamma_d$  : poids volumique du sol sec

$\gamma_s$  : poids volumique des particules solides

$\gamma_{sat}$  : poids volumique du sol saturé

$\varphi_{app}$  : masse volumique apparente

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

$\varphi_d$  Masse volumique de l'eau

$\varphi_d$  : masse volumique sèche

BTC : blocs à terre comprime

D : diamètre

e : indice des vides

g : gramme

Kg : kilogramme

M : masse

Max : maximale

Min : minimale

Moye : moyenne

n : la porosité

Rapp : rapport

SST : surface spécifique totale

V : volume

VBS : valeur au bleu de méthylène

W : teneur en eau naturelle

*diff* : différence

$\gamma$  : poids volumique apparent ou humide

$\varphi$ :Masse volumique

GTR : guide de terrassement routiers

ULPGL : université libre des pays des grands lacs

## Liste de tableaux

Tableau I. 1 Classification LC.P.C. des sols grenus. [7].....	7
Tableau I. 2 classification GTR du sol [8] .....	9
Tableau I. 3 Classification des sols fins (extrait de la norme NF P 11-300), GTR [6] .....	10
Tableau I. 4 Classement des matériaux selon leur diamètre [9].....	13
Tableau I. 5 Caractérisation des sols à partir de la valeur de ES [7].....	14
Tableau I. 6 Caractérisation du sol à partir de la valeur de ID [11] .....	14
Tableau I. 7 les états de la limite d'Atterberg .....	15
Tableau I. 8 type de sols en fonction de l'IP .....	16
Tableau I. 9 gonflement libre du sol en fonction de l'IP [9].....	16
Tableau I. 10 classification du sol en fonction de IC .....	17
Tableau I. 11 état de consistance du sol en fonction IL .....	18
<i>Tableau I. 12 type de sol en fonction du pourcentage en CaCO<sub>3</sub> [13].....</i>	<i>18</i>
Tableau I. 13 Type de sol en fonction de MO.....	19
Tableau I. 14 Proportion typique des grains .....	30
Tableau I. 15 Récapitulatif des propriétés valables aussi bien pour des terres à bâtir et que pour les BTC [26] .....	32
Tableau I. 16 Activité argileuse [26].....	32
Tableau II. 1 type de sol en fonction de l'IP .....	46
Tableau II. 2 spécifications des limites d'Atterberg [31].....	47
Tableau II. 3 classifications de sol en fonction de l'IC. ....	48
Figure II. 4 la balance et le pycnomètre .....	51
Tableau III. 1 Teneur en eau naturelle de l'échantillon du sol de KITOVU.....	61
Tableau III. 2 Les masses volumiques, indice des vides, porosité, degré de saturation .....	62
Tableau III. 3 Résultats limite d'Atterberg de l'échantillon du sol de KITOVU.....	64
Tableau III. 4 Résultats de l'essai Proctor de l'échantillon du sol de KITOVU .....	66
Tableau III. 5 Teneur en eau naturelle de l'échantillon du sol MURUFUNZO .....	67

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

Tableau III. 6 les masses volumiques, indices des vides, porosité, degré de saturation de l'échantillon du sol MURUFUNZO.....	67
Tableau III. 7 Résultats de la limite d'Atterberg de l'échantillon du sol de MURUFUNZO..	70
Tableau III. 8 Résultats issus de l'essai Proctor normal de l'échantillon du sol de MURUFUNZO.....	72
Tableau III. 9 Synthèse des résultats de l'échantillon du sol de KITOVU et de l'échantillon du sol de MURUFUNZO. ....	73

## Liste des figures

Figure I. 1 Classification du sol à granulométrie uniforme.....	6
Figure I. 2 Abaque de Cassagrande utilisable dans la classification L.C.P.C. des sols fins [9] .....	12
Figure I. 3 Classification triangulaire des sols fins [10] .....	13
Figure I. 4 Exemples anciens de constructions en terre. De gauche à droite : fondation d'une maison dans la ville de Tell Feres en Syrie, citadelle d'Ulug Dépé au Turkménistan, traces de pisé sur les vestiges des maisons à Volubilis au Maroc, le grand Kyz Kala.....	20
Figure I. 5 Exemples récents de constructions en terre. De gauche à droite : le Fort d'Al Jahili, Al Ain à Abou Dhabi aux Emirats arabes unis créé en 1891 et restauré en 2008 ; le marché de Koudougou au Burkina-Faso construite en blocs de terre comprimée au début.....	20
Figure I. 6 Illustration de quelques moyens de lutte contre la détérioration d'une construction en terre crue. De gauche à droite : vestige de la pyramide en terre crue de La Joya au Mexique (1er siècle) ; vestige d'un mur enduit à Dja'de el Mughara en Syrie .....	24
Figure I. 7 Techniques de construction en terre [19] .....	26
Figure I. 8 Différents formats des BTC et désignation des joints .....	29
Figure I. 9 Fuseau du diagramme des terres recommandé [24] .....	30
Figure I. 10 Fuseau du diagramme plastique des terres [25] .....	31
<i>Figure II. 1 A gauche échantillon MURUFUNZO, à droite échantillon KITOVU</i> .....	35
Figure II. 2 Tamis.....	39
Figure II. 3 Appareils de cassagrande et tous ses accessoires.....	43
Figure II. 4 Illustrations essai limite de liquidité et limite de plasticité.....	45
Figure III. 1 Courbe granulométrique par tamisage de l'échantillon du sol KITOVU .....	62
Figure III. 2 Courbe granulométrique de l'échantillon du sol KITOVU dans le fuseau.....	63
<i>Figure III. 3 droite de progression de la limite d'Atterberg de l'échantillon du sol KITOVU</i>	64
Figure III. 4 L'échantillon dans le diagramme de plasticité du sol de KITOVU.....	65
Figure III. 5 Courbe de l'essai Proctor de l'échantillon du sol de KITOVU .....	66
Figure III. 6 Courbe granulométrique de l'échantillon du sol de MURUFUNZO .....	68

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

Figure III. 7 courbe granulométrique de l'échantillon du sol de MURUFUNZO dans le fuseau.  
..... 69

Figure III. 8 Droite de progression issus de l'essai Limite d'Atterberg de l'échantillon du sol de  
MURUFUNZO..... 70

Figure III. 9 résultat de l'échantillon du sol de MURUFUNZO dans le Fuseau de plasticité 71

Figure III. 10 La courbe Proctor normal de l'échantillon du sol de MURUFUNZO..... 72

### Table des annexes

Annexe 1 teneur en eau sol de KITOVOU .....	81
Annexe 2 Analyse granulométrique par tamisage sol de KITOVOU .....	82
Annexe 3 limites d'Atterberg sol de KITOVOU .....	84
Annexe 4 L'essai Proctor normal sol de KITOVOU .....	85
Annexe 5 L'analyse granulométrique par tamisage sol de MURUFUNZO .....	87
Annexe 6 la limite d'Atterberg sol de KITOVOU .....	88
Annexe 7 L'essai Proctor normal sol de MURUFUNZO .....	89
Annexe 8 Données pour le fuseau granulométrique proposées par CRaTerre .....	90
Annexe 9 Données pour fuseau de plasticité ainsi que les données des résultats.....	91
Annexe 10 Echantillon et pèse .....	92
Annexe 11 Balance de précision .....	93

## INTRODUCTION GENERALE

La construction des bâtiments est un élément très capital pour la vie humaine dont le choix de matériaux est un facteur déterminant les conditions de vie et la durabilité d'un bâtiment. Elle nécessite ainsi la connaissance des propriétés des matériaux choisis pour la réalisation de la structure [1]. Vu l'ensemble des matériaux qui existent sur la planète terre aidant dans le domaine de construction notamment les blocs, briques cuites, les roches, les adobes, les blocs des terres comprimées (BTC), ... ; une insuffisance des logements et les matériaux industriels notamment le ciment, la chaux et les aciers sont chers et produisent une quantité importante de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et les matériaux traditionnels entre autres les sables et les graviers sont épuisables dans le temps. Nombreuses qualités et diverses raisons dont la disponibilité de la terre et sa proximité du site de chantiers, la mise en œuvre qui est relativement facile et ne demandant ni des matériels et équipements lourds moins, encore une technologie avancée offertes par l'argile, il est nécessaire d'évaluer la terre en vue de la production des certains matériaux locaux. Ces matériaux sont disponibles, économiques et sains vis-à-vis de l'environnement [2]. C'est ainsi que notre étude a été orienté dans le domaine géotechnique afin d'utiliser le sol de KITOVU et de MURUFUNZO à Jomba dans la fabrication des blocs des terres comprimées (BTC). De même, la caractérisation est importante car il arrive parfois que les matériaux locaux ne présentent pas des caractéristiques nécessaires pour la fabrication des blocs des terres comprimées. C'est ainsi que des études seront menées afin d'utiliser ces sols dans la vie sociale.

Les blocs des terres comprimées(BTC) sont des éléments de maçonnerie, de dimensions réduites et des caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat [2]. Dans tous les cas, la texture et la structure de la terre, sa teneur en eau, sa granulométrie... sont des éléments essentiels du comportement de la brique par rapport à l'humidité de l'air et à l'action directe de la pluie.

Eu égard ce qui précède, nous nous sommes posé les questions dont :

- Est-ce que à partir de la caractérisation du sol de KITOVU et de MURUFUNZO à Jomba, on peut utiliser ce sol dans la fabrication des blocs des terres comprimées (BTC) ?

## CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN TERRE COMPRIMEE

- La valorisation du sol de KITOVU et de MURUFUNZO à Jomba pourra contribuer à la modernisation de Jomba ?

Conformément aux questions citées, nous avons fixé les hypothèses selon lesquelles :

- ✓ Le sol de KITOVU et de MURUFUNZO à Jomba pourrait être utilisé dans la fabrication de blocs en terres comprimées.
- ✓ La valorisation du sol de KITOVU et de MURUFUNZO à Jomba pourrait contribuer à la modernisation de Jomba.

En effet, ce travail a pour l'objectif général d'analyser à travers les résultats obtenus à travers les essais géotechniques dans le laboratoire ; si le sol de KITOVU et de MURUFUNZO peut être utilisés dans la fabrication des blocs des terres comprimées et si son exploitation contribuerait au développement de Jomba.

Pour atteindre cet objectif global, il sera nécessaire de faire :

- ✚ La localisation géographique des carrières,
- ✚ Les essais d'identification des terres et
- ✚ La caractérisation du sol.

L'ensemble de ces travaux devraient contribuer au développement des matériaux locaux en constituant une référence scientifique et technique pour valoriser la production des BTC.

En plus de l'introduction et la conclusion générale, ce travail comporte trois chapitres ; le premier chapitre traite des généralités notamment l'introduction, les généralités sur les sols, la terre et sur le BTC, le second chapitre traite de la méthodologie notamment les essais d'identifications des matériaux ainsi que les essais mécaniques et enfin le troisième chapitre traite de la présentations et interprétations des résultats.

## **Chapitre I. GENERALITES**

### **I.1.INTRODUCTION**

Le présent chapitre présente le milieu d'étude et traite sur les généralités de la terre, un aperçu sur le bloc à terre comprimée.

### **I.2.GENERALITES SUR LE SOL [3]**

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, Il 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.2.1 Types du sol [4]**

Le sol est subdivisé en plusieurs types dont nous avons :

- 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.
- 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.
- 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.  
Sol limoneux (Avec le limon comme composant principal) : c'est une terre riche 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.

### **I.2.2. Caractéristiques physiques des sols [5]**

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.2.3. Les paramètres dimensionnels (poids volumiques)**

- ✓ Le poids volumique des particules solides (de la matière constituant les grains solides) noté  $\gamma_s$  : pour le sable et l'argile ça varie 26 à 27 kN/m<sup>3</sup>.
- ✓ Le poids volumique du sol (ou poids volumique apparent ou poids volumique humide) noté  $\gamma$  : varie pour le sable de 17 à 20 kN/m<sup>3</sup> et pour l'argile de 16 à 22 kN/m<sup>3</sup>.
- ✓ Le poids volumique du sol sec noté  $\gamma_d$  : varie pour le sable de 14 à 18 kN/m<sup>3</sup> et pour l'argile de 10 à 20 kN/m<sup>3</sup> Si le sol est sec :  $\gamma = \gamma_d$ .
- ✓ Le poids volumique du sol saturé noté  $\gamma_{sat}$  : lorsque tous les vides sont remplis d'eau ; ça varie pour le sable et l'argile de 19 à 22 kN/m<sup>3</sup>.
- ✓ Le poids volumique du sol déjaugé noté  $\gamma'$  : 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 ; pour le sable et l'argile ça varie de 9 à 12 kN/m<sup>3</sup>.

### **I.2.4. Les paramètres sans dimensions (paramètres d'état)**

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

- ✓ La porosité notée  $n$  : 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 et elle varie pour le sable de 0,25 à 0,5 et l'argile de 0,20 à 0,80.

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

- ✓ L'indice des vides noté  $e$ , dont la signification est analogue à celle de la porosité, Elle varie pour le sable de 0,5 à 1 et pour l'argile de 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, elle varie pour le sable de 1 à 15% et pour l'argile de 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.2.5. 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. Plusieurs essais sont mis à la disposition au Laboratoire pour établir la granulométrie des sols (tamisage, sédimentométrie, imagerie, diffraction laser, microscopie).

Parmi tous ses essais, les plus utilisés sont :

- ✓ L'analyse granulométrique par tamisage ;
- ✓ L'analyse granulométrique par sédimentation.

### **I.2.6. Identification des sols [6]**

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.) tandis que les paramètres de nature, 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.2.6.1. Classification des sols à granulométrie uniforme

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

Suivant la taille des grains, on distingue les catégories de sols présentés sur la figure I.1.

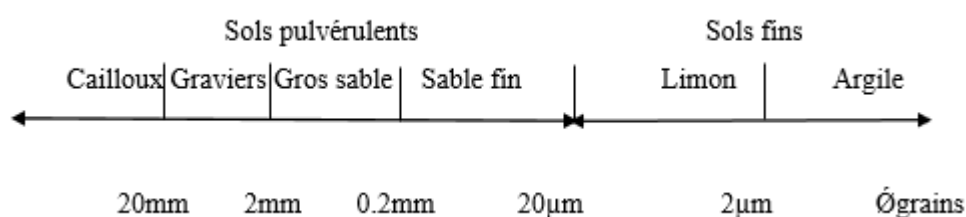


Figure I. 1 Classification du sol à granulométrie uniforme

### I.2.6.2. 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% des éléments en poids :

#### 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.

#### a.1 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.).

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

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

- ✓ Pour les graves : Gb-GL, Gb-GA,  $G_m$  - GL,  $G_m$ -GA ;
- ✓ Pour les sables : Sb-SL, Sb-SA,  $S_m$ -SL,  $S_m$ -SA.

Le tableau I.1 présente la classification LCPC classe les sols grenus d'après leurs granulométries et les sols fins d'après l'abaque de Cassagrande.

*Tableau I. 1 Classification LC.P.C. des sols grenus. [7]*

Le tableau ci-dessous présente la classification LCPC des sols grenus. 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 $C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}.D_{60}}$ 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 Cassagrande	Grave limoneuse	
		GA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A de l'abaque de plasticité de Cassagrande	Grave argileuse	
		Moins de 5% D'élément	Sb	$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10}.D_{60}}$ compris entre 1 et 3	Sable propre bien gradué

**CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE**

SABLES	Plus de 50% d'éléments >0.08mm ont un diamètre <2mm	<0.08mm	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 Cassagrande	Sable limoneux
			SA	Limites d'Atterberg au-dessus de la ligne A de l'abaque de plasticité de Cassagrande	Sable argileux

Il est la base de la majorité des autres systèmes de classification postérieurs, tel que LPC. Il 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.

### **a.2 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 jour 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.

**CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE**

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

Le tableau I.2 présente la classification des sols GTR.

*Tableau I. 2 classification GTR du sol [8]*

<b>Classe</b>	<b>Définition</b>	<b>Caractéristique</b>	<b>Sous-classe</b>
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			

Le tableau I.3 nous prescrit la classification du sol fins selon la GTR.

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Tableau I. 3 Classification des sols fins (extrait de la norme NF P 11-300), GTR [6]*

Paramètre selon la nature		Classement selon l'état hydrique				
Paramètre de nature première niveau de classification	Classe	Paramètre de nature deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètre d'état	Sous classe fonction de l'état	
$D_{max} \leq 50mm$ et tamisat à $80\mu m > 35\%$	A Sols Fins	$I_p \leq 12$	<b>A<sub>1</sub></b> limons peu plastique, loess, silts alluvionnaires, sable fins peu pollués, arènes peu plastique...	$W > 1.25W_{opt}$	A <sub>1</sub> th	
				$1.10 \leq W \leq 1.25W_{opt}$	A <sub>1</sub> h	
				$0.9W_{opt} \leq W < 1.1W_{opt}$	A <sub>1</sub> m	
				$0.7W_{opt} \leq W < 0.9W_{opt}$	A <sub>1</sub> s	
				$W < 0.7W_{opt}$	A <sub>1</sub> ts	
		$12 < I_p \leq 25$	<b>A<sub>2</sub></b> sable fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	$I_c \leq 0.9$ ou $W \geq 1.3 W_{opt}$	A <sub>1</sub> th	
				$0.9 \leq I_c < 1.05$ $1.1W_{opt} \leq W < 1.3 W_{opt}$	A <sub>2</sub> h	
				$1.05 < I_c \leq 1.2$ $0.9W_{opt} \leq W < 1.1W_{opt}$	A <sub>2</sub> m	
				$1.2 < I_c \leq 1.4$ $0.7W_{opt} \leq W < 0.9W_{opt}$	A <sub>2</sub> s	
				$I_c > 1.3$ ou $W < 0.7 W_{opt}$	A <sub>2</sub> ts	
		$25 < I_p \leq 40$	<b>A<sub>3</sub></b> argiles et argiles mameuses, limons très plastiques ...	$I_c \leq 0.8$ ou $W \geq 1.4 W_{opt}$	A <sub>3</sub> th	
				$0.8 \leq I_c < 1$ $1.2W_{opt} \leq W < 1.4 W_{opt}$	A <sub>3</sub> h	
				$1 < I_c \leq 1.15$ $0.9W_{opt} \leq W < 1.2W_{opt}$	A <sub>3</sub> m	
				$1.15 < I_c \leq 1.3$ $0.7W_{opt} \leq W < 0.9W_{opt}$	A <sub>3</sub> s	
				$I_c > 1.3$ ou $W < 0.7 W_{opt}$	A <sub>3</sub> ts	
		$I_p > 40$	<b>A<sub>4</sub></b> argiles et argiles mameuses, très plastiques ...	Valeur seuil des paramètres d'état, à définir à l'appui d'étude spécifique		A <sub>4</sub> th
						A <sub>4</sub> h
						A <sub>4</sub> m
						A <sub>4</sub> s

A1 : matériau acceptable mais ayant un peu trop des fines

A2 : matériau acceptable mais ayant trop des fines

A3 : matériau acceptable mais demandant une attention particulière car relativement actif

A4 : matériau délicat à utiliser car trop actif

B1 : matériau matériaux sableux demandant un rajout des fines pour être acceptable

B2 : matériau matériaux acceptable mais ayant un léger déficit des fines

B3 : matériau sableux demandant un rajout considérable des fines pour être acceptable.

B4 : matériau acceptable mais ayant un déficit des fines

B5 : matériau acceptable mais manquant un peu des fines

B6 : matériau acceptable mais manquant un peu des fines

C1 : matériau trop graveleux, doit être criblé pour changer sa nature

C2 : matériau trop graveleux, doit être criblé pour changer sa nature

D1 : matériau sableux demandant un rajout des fines pour être accepté

D2 : matériau sableux demandant un rajout considérable des fines pour être accepté

D3 : matériau graveleux demandant un criblage pour changer sa nature et un rajout considérable des fines pour être acceptable.

#### **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 Cassagrande.

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.2.

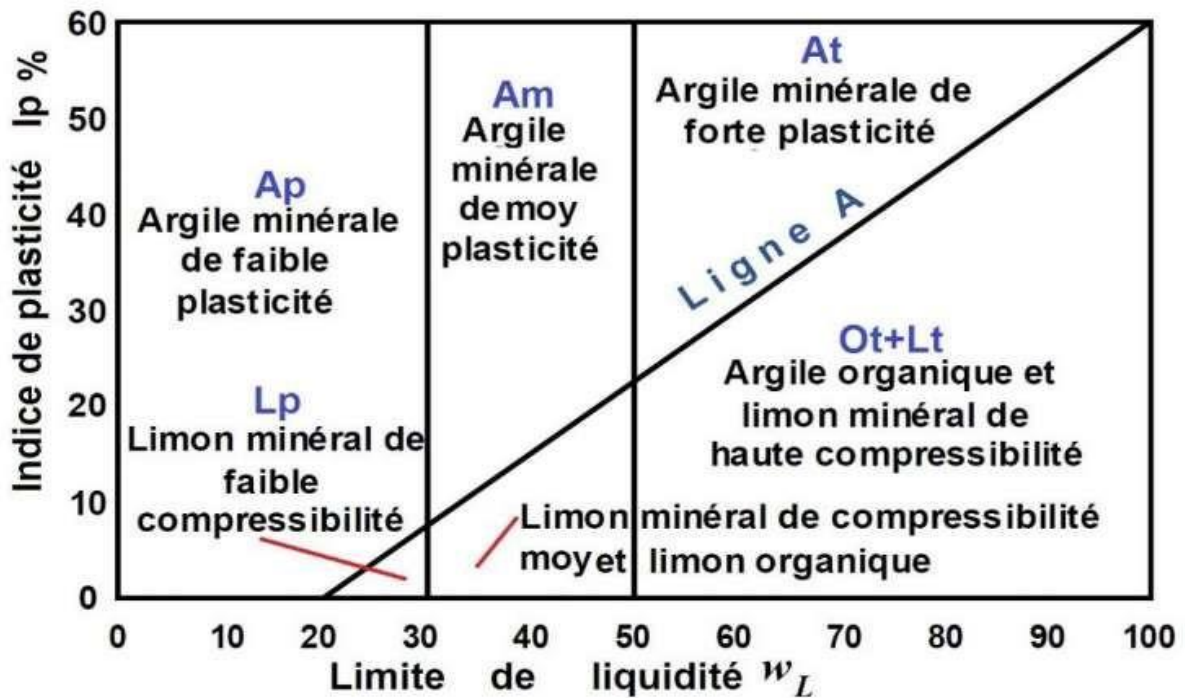
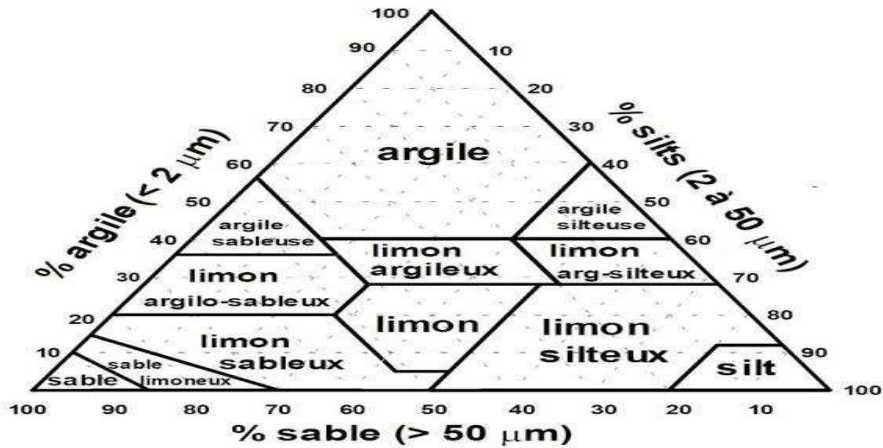


Figure I. 2 Abaque de Cassagrande utilisable dans la classification L.C.P.C. des sols fins [9]

**c) Classification des sols par le Public Road Administration [6]**

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 2mm. La figure I.3 donne la classification triangulaire des sols fins (contenant moins de 30% d'éléments de diamètre > à 2 mm).

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE



*Figure I. 3 Classification triangulaire des sols fins [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 sedimentométrie (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 I.4 présente le classement des matériaux suivant leurs diamètres :

*Tableau I. 4 Classement des matériaux selon leur diamètre [9]*

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

**CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE**

L'essai d'équivalent de sable permet également de caractériser le type de sol ; le tableau I.5 présente la caractérisation des sols à partir de la valeur de ES :

*Tableau I. 5 Caractérisation des sols à partir de la valeur de ES [7]*

<b>ES</b>	<b>Type de sol</b>
$\geq 0$	Argile pure
$0 \geq ES \geq 20$	Sol plastique
$20 \geq ES \geq 40$	Sol non plastique
$ES \geq 100$	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.

*Tableau I. 6 Caractérisation du sol à partir de la valeur de  $I_D$  [11]*

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

### **I.2.7. Essais sur les sols [12]**

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).

### I.2.7.1. 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 particule 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. [12]

*Tableau I. 7 les états de la limite d'Atterberg*

Etat	Solide		Plastique	Liquide
	Sans retrait	Avec retrait		
W	W <sub>S</sub>		W <sub>P</sub>	W <sub>L</sub>
Limite de	Retrait		Plasticité	Liquidité

W<sub>S</sub>, W<sub>L</sub>, W<sub>P</sub> sont les limites d'Atterberg déterminées au laboratoire sur la fraction du sol passant au tamis de 0,4mm (méthode de la coupelle de Cassagrande).

A l'aide de ces limites, on détermine l'indice de plasticité, l'indice de consistance et l'indice de liquidité.

#### ❖ L'indice de plasticité (IP)

L'indice de plasticité définit la teneur en eau du sol dans un état plastique. Un IP grand caractérise un sol très sensible aux conditions atmosphériques car, plus l'IP est grand, plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccations seront importants.

L'IP permet de classer les sols suivant l'échelle ci-après :

- 0 < IP < 5 : Sol non plastique
- 5 < IP < 15 : Sol peu plastique

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

- $15 < IP < 40$  : Sol plastique
- $IP > 40$  : Sol très plastique

Le tableau I.8 présente les types de sol en fonction de l'IP. [12]

*Tableau I. 8 type de sols en fonction de l'IP*

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

L'IP 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'IP est mise en évidence par la classification de Sanglerat (1981) conformément au tableau I.9.

*Tableau I. 9 gonflement libre du sol en fonction de l'IP [9]*

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

❖ **L'indice de consistance (IC)**

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 classer un sol par son adhérence et selon l'état dans lequel il se présente.

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

La relation I.1 présente la valeur de l'indice de consistance.

$$IC = \frac{WL - W}{IP} \quad I-1$$

Avec IC : l'indice de consistance, WL: la limite de liquidité, W : la teneur en eau et

IP : l'indice de plasticité.

Si :

- $IC > 1$  : Sol à l'état solide
- $0 < IC < 1$  : Sol à l'état plastique
- $IC < 0$  : Sol à l'état liquide

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

*Tableau I. 10 classification du sol en fonction de IC*

I <sub>c</sub> (%)	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 (IL)**

Si :

- $IL < 0$ : Le sol est à l'état solide ou semi -solide
- $0 < IL < 1$  : le sol est à l'état plastique
- $IL \geq 1$  : 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. [7]

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Tableau I. 11 état de consistance du sol en fonction IL*

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

**I.2.7.2. Teneur en carbonate : % de CaCO<sub>3</sub>**

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 CaCO<sub>3</sub> contenu dans le sol par l'acide chlorhydrique.

Le tableau I.12 nous donne le type de sol en fonction du pourcentage en CaCO<sub>3</sub>.

*Tableau I. 12 type de sol en fonction du pourcentage en CaCO<sub>3</sub> [13]*

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

**I.2.7.3. 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 [12] .

*Tableau I. 13 Type de sol en fonction de MO*

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

### **I.3. GENERALITES SUR LA TERRE**

La « terre » est utilisée comme matériau de construction depuis onze millénaires sur tous les continents [14] . Ce terme désigne un matériau sédimentaire naturel présent dans les sols et les sédiments qui résulte de l'altération physique (fragmentation sans modification de la nature des minéraux), chimique et biologique d'une roche mère sous l'action du climat, de l'érosion ou des organismes vivants [15] . Il s'agit d'un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'Humanité. La terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux.

Au cours des temps, la terre est apparue comme le matériau de construction privilégié par l'Homme, car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau que l'on a sous les pieds.

A l'antiquité et moyen âge plusieurs constructions en terre ont été réalisées telles que la cité antique de Volubilis au Maroc, ou le grand Kyz Kala à Merv au Turkménistan

La figure I.4 présente l'exemples des différentes anciennes constructions.

## CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN TERRE COMPRIMEE



*Figure I. 4 Exemples anciens de constructions en terre. De gauche à droite : fondation d'une maison dans la ville de Tell Feres en Syrie, citadelle d'Ulug Dêpe au Turkménistan, traces de pisé sur les vestiges des maisons à Volubilis au Maroc, le grand Kyz Kala*

Dans le bâtiment, la terre peut être utilisée comme isolant associé à la paille ou pour la rénovation, réparateur des bâtiments construits en terre, couche de finition intérieure, mur porteur, enduit intérieur.

La figure I.5 présente les différentes constructions en terre existantes.



*Figure I. 5 Exemples récents de constructions en terre. De gauche à droite : le Fort d'Al Jahili, Al Ain à Abou Dhabi aux Emirats arabes unis créé en 1891 et restauré en 2008 ; le marché de Koudougou au Burkina-Faso construite en blocs de terre comprimée au début*

### **I.3.1. Composition de la terre**

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2  $\mu\text{m}$ -0.08 mm), et les argiles (< 2  $\mu\text{m}$ ). Comme nous l'avons constaté, la terre est composée de matériaux inertes (graviers, sables) et de matériaux actifs (silts, argiles).

Les premiers jouent un rôle de squelette et les seconds celui de liant, tel un ciment.

La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent.

Les proportions des éléments constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non.

Les premiers sont instables et les autres stables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction.

L'importance relative des éléments constitutifs influence les propriétés physiques (plasticité, pouvoir absorbant) et conditionne les applications techniques de chaque type de terre [16].

- Les graviers ( $2 \text{ mm} \leq D < 64 \text{ mm}$ ) et les sables ( $0,063 \text{ mm} \leq D < 2 \text{ mm}$ ) constituent les éléments grossiers de la terre à bâtir. Ils constituent le squelette et augmentent la perméabilité à l'eau de la terre. En outre, la fraction sableuse limite le gonflement et le retrait de la terre [17].
- Les limons ont une granulométrie comprise entre 0,063 et 0,002 mm  
Ils possèdent une grande friction interne, une faible cohésion en présence d'eau et une grande perméabilité [18].
- Les argiles sont définies soit par leur granulométrie (i.e., particules de taille inférieure à 2 micromètres), soit par leur minéralogie (i.e., famille des phyllosilicates) [19].  
Les minéraux argileux sont des silicates ayant une structure cristalline en couches (i.e., phyllo signifie feuille en grec)

Vu l'importance des argiles comme liant dans la fabrication des BTC, il est utile de rappeler certaines propriétés physico-chimiques des argiles.

### **I.3.2. Rappel sur les argiles**

Les argiles sont des minéraux issus de la décomposition des roches. Il s'agit de matériaux hétérogènes à différentes échelles.

A l'échelle macroscopique, elles sont souvent associées à d'autres minéraux (quartz, feldspath...) et à l'échelle microscopique, elles présentent une structure en feuillet.

### I.8.2.1. Définition

Il n'y a pas de définition universelle du terme « argile ».

En effet, il en existe autant que de disciplines.

Elles se fondent sur les propriétés physiques étudiées, comme par exemple la plasticité, sur l'emploi qui en est fait ou encore sur la structure cristallographique.

L'argile à l'état naturel est rarement composée d'un seul minéral, elle correspond souvent à un mélange de phyllosilicates ; le minéral majoritaire lui donne alors son nom.

Il y a, de plus, de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, aragonite...), la silice (quartz, cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, gibbsite, diaspre...) ou encore des minéraux ferrifères (lépidocrocite, maghémite...). Le terme argile désigne donc un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz etc.) ainsi que des impuretés (oxyde de fer, titane etc.). Par ailleurs, ce mélange est caractérisé par une certaine plasticité et des grains ayant une taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$  [20].

Les Kaolinites, smectites, illites et chlorites constituent l'essentiel des argiles que l'on trouve dans les terres. Ce sont elles qui assurent à la terre sa cohésion.

- Les kaolinites sont des argiles combinant un feuillet T et un feuillet O (minéraux 1/1). L'équilibre des anions et des cations est strictement respecté et le feuillet est donc électriquement neutre.
- Les smectites se composent de 2 couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Elles ont un feuillet qui porte une charge nette négative, compensée par des cations supplémentaires situés à la surface des feuillets et entourés de molécules d'eau.
- Les illites ont une structure 2/1 comme les smectites mais celle-ci diffère par un déficit de charges positives élevé compensé par la présence de cations  $\text{K}^+$  dans l'interfoliaire.
- Les chlorites ont une structure de base formée de deux feuillets alternés (minéral 2/1/1).

Le premier est négatif, le second positif compense la charge négative du premier, ce qui conduit à un assemblage neutre [21].

La nature et les caractéristiques des argiles sont liées à leur mode de formation.

### **I.3.3. Avantage de la terre crue**

La terre crue présente des nombreux avantages, elle peut être utilisée en construction neuve, en rénovation et pour la réhabilitation tant de manière traditionnelle que contemporaine. Parmi ses rôles, nous pouvons citer :

- ✓ La terre est issue d'une ressource locale ; ce qui réduit les problèmes liés au transport. Elle nécessite peu d'énergie d'extraction, de transformation et de production. Son utilisation « crue » ne contribue pas à la déforestation comme c'est le cas dans certaines régions du monde où l'on utilise le bois pour la terre cuite
- ✓ Sa transformation est peu coûteuse et fait souvent appel à une main d'œuvre locale. La fabrication se prête à l'auto-construction. La terre ne nécessite que des outils simples et largement accessibles pour son extraction, sa transformation et sa mise en œuvre
- ✓ La terre joue un rôle d'amortissement acoustique et régule la température et l'humidité ambiante. La terre crue purifie l'air ambiant en filtrant certains polluants et en absorbant les odeurs

### **I.3.4. Inconvénient de la terre crue**

Malgré tous ses avantages que présente la terre crue, elle présente aussi ses inconvénients :

- ✓ Dans les régions à climat tempéré comme en Belgique, la pluie et le gel diminuent ses propriétés mécaniques et limitent sa durabilité.
- ✓ Dans les régions à climat équatorial comme en République Démocratique du Congo (RDC), les variations importantes d'humidité rendent les matériaux en terre crue instables car il s'érode à chaque saison.

Sans liant stabilisateur, le matériau dégage de la poussière. La terre se dégrade au contact de l'eau et de l'humidité, ce qui rend son emploi délicat

La pyramide est une construction en damier qui alterne des blocs de terre plus sableux et des blocs plus argileux. Les blocs sableux permettent un écoulement plus rapide de l'eau, les blocs argileux donnent la stabilité à la structure.

## CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN TERRE COMPRIMEE

Une évolution de ce système consiste à insérer dans le mur en terre des bandes horizontales d'un matériau plus résistant à l'érosion (terre cuite, mélange terre chaux ou terre ciment). Ces bandes ralentissent la vitesse d'écoulement de l'eau. Cette technique est surtout utilisée dans les constructions en pisé.

Le revêtement à base d'enduit d'origine végétale ou animale est une tradition millénaire pour lutter contre l'érosion des structures en terre.

La technique la plus employée pour préserver un mur de terre de l'érosion liée à l'eau consiste à protéger sa base et son sommet, cela consiste à protéger le mur d'un toit débordant qui évite au mur d'être trempé par la pluie, et d'un soubassement en pierre, brique cuite, béton de ciment, qui empêche toute remontée capillaire.

La figure I.6 présente les illustrations des quelques moyens de lutte contre la détérioration d'une construction en terre crue.



*Figure I. 6 Illustration de quelques moyens de lutte contre la détérioration d'une construction en terre crue. De gauche à droite : vestige de la pyramide en terre crue de La Joya au Mexique (1er siècle) ; vestige d'un mur enduit à Dja'de el Mughara en Syrie*

### **I.3. 5. Techniques de construction en terre crue [22]**

Il existe différentes techniques de construction en terre crue selon les contextes géographiques, les modes de vie, les coutumes locales, le climat ainsi que les matériaux disponibles. Houben et Guillaud (1989) ont répertorié 12 techniques principales de construction en terre crue comme le montre la figure ci -dessous. Les cinq techniques de construction les plus répandues dans la terre comprimée.

- Adobe : la terre à l'état de pâte plastique souvent amendée de paille ou autre fibres, moulée sous forme de briques séchées au soleil
- Pisé : la terre est compactée en masse dans des coffrages, couche par couche et banchée par banchée, avec une dame.
- Terre-paille : la terre est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène que l'on mélange à la paille afin de former un film sur chaque brin.

Le matériau ainsi obtenu conserve l'aspect de la paille et est banché pour ériger un mur monolithique qui nécessite une structure porteuse.

- Torchis : la terre argileuse, amendée de paille ou autres fibres, recouvertes en une ou plusieurs couches des claies qui hourdent une structure en colombages.
- Terre façonnée : la terre, souvent amendée de paille ou autres fibres, est façonnée sous forme de murs de la même façon que pour la technique de poterie, sans outil.
- Terre extrudée : la terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à être cuits.
- Bauge : la terre, généralement amendée de paille ou autres fibres, est mise sous forme de boules grossières, qui sont empilées les unes sur les autres et entassées légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à ériger des murs monolithiques façonnés ; dans d'autres cas, la bauge est incorporée dans une structure en bois.



#### **I.4. GENERALITES SUR LE BLOCS DES TERRES COMPRIMEES(BTC)**

Si on reprend la définition des blocs à terre comprimée (BTC) énoncée par boubekeur et Houben (1998) dans le guide des normes des blocs de terre comprimées, les BTC « sont des éléments de maçonnerie des dimensions réduites et des caractéristiques régulières et contrôlés obtenus par compression statique ou dynamique de terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat».

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente. Elle a été développée dans les années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie. Cette technique est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe.

Au lieu qu'ils soient moulés à la main dans un cache en bois, les blocs sont obtenus par compression de la terre, légèrement humide dans une presse métallique.

Comparé au bloc moulé à la main, le BTC est très régulier en formes et en dimensions, plus dense et présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau [23].

L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance des blocs de terre moulée est pourtant ancienne ; c'est à l'aide de pilons en bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée. Ce procédé est encore utilisé par le monde.

Les premières machines à comprimer la terre auraient été imaginées au XVIIIe siècle mais ce n'est qu'au début du XXe siècle que l'on imagina les premières presses mécaniques qui utilisaient de lourds couvercles rabattus avec force dans le moule ; Des presses de ce type ont même été motorisées.

L'industrie de la brique cuite a ensuite utilisé des presses à compression statique où la terre était comprimée entre deux plateaux.

Le développement significatif de l'emploi des presses et de l'utilisation constructive et architecturale du bloc de terre comprimée n'a été finalement engagé qu'à partir de 1952 suite à l'invention de la fameuse petite presse "CINVA- RAM", imaginée par l'ingénieur Raul Ramirez, au centre CINVA de Bogota, en Colombie ; Elle fut utilisée dans le monde entier.

Les années 70 et 80 ont amené l'apparition d'une nouvelle génération de presses manuelles, mécaniques et motorisées et le développement aujourd'hui considérable d'un véritable marché de la production et de l'utilisation du bloc de terre comprimée [24] .

La brique de terre comprimée (BTC) est un bloc de terre parallélépipédique de dimension standard de 29,5 x 14 x 9 cm avec un poids 6 à 8 kg, réalisé à base de terre tamisée (0,5 à 0,8 mm au tamis).

Il est possible d'ajouter à la terre, différents produits stabilisants pour en améliorer les performances mécaniques (compression, cohésion) ou pour réduire la sensibilité à l'eau (gonflement et retrait) et aussi réduire sa perméabilité.

La terre est très légèrement humidifiée mais fortement comprimée à l'aide d'une presse pouvant aller de 7 à 60 bars [25].

Une fois pressées, les briques sont stockées et séchées en phase humide, sous bâche, durant une à trois semaines ; Passé ce délai, elles pourront être mises en œuvre.

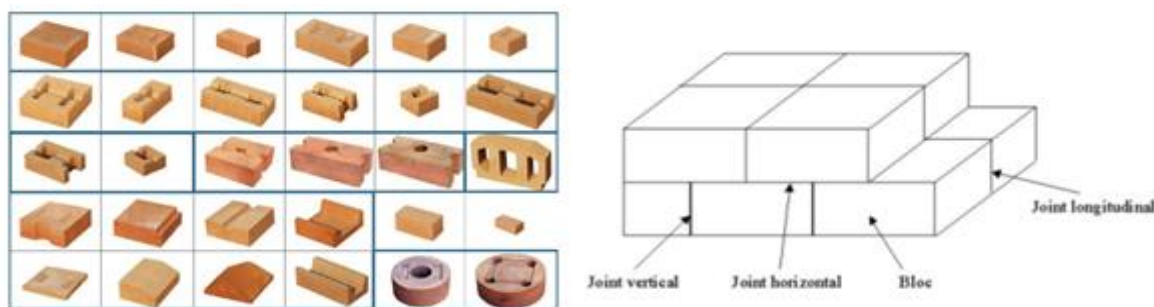
La production des BTC nécessite une organisation industrielle, semi industrielle ou artisanale souvent en 6 étapes, ce qui fait du BTC un matériau largement accessible.

- ✚ Extraction de la terre.
- ✚ Préparation de la terre : séchage, broyage, tamisage.
- ✚ Mélange avec l'eau et éventuellement stabilisation.
- ✚ Pressage et démoulage.
- ✚ Séchage, précédé d'une cure lorsque le BTC contient un stabilisant hydraulique.
- ✚ Stockage.

Une maçonnerie en BTC est constituée de blocs liés par un joint de mortier.

Le mortier est généralement un mélange de sable et de liant hydraulique (ciment ou chaux). Il permet en plus de lier les blocs, de transmettre les efforts entre les éléments et de les distribuer sur tous les éléments et de contribuer à l'esthétique du bâtiment. [26]

Les différents formats des BTC et la désignation des joints sont illustrés sur la figure I.8.



*Figure I. 8 Différents formats des BTC et désignation des joints*

#### **I.4.1. Recommandation pour l'utilisation des sols**

Pour qu'un sol puisse être utilisé dans la construction, il doit respecter un certain nombre de critères.

##### **I.4.1.1. la granulométrie [22]**

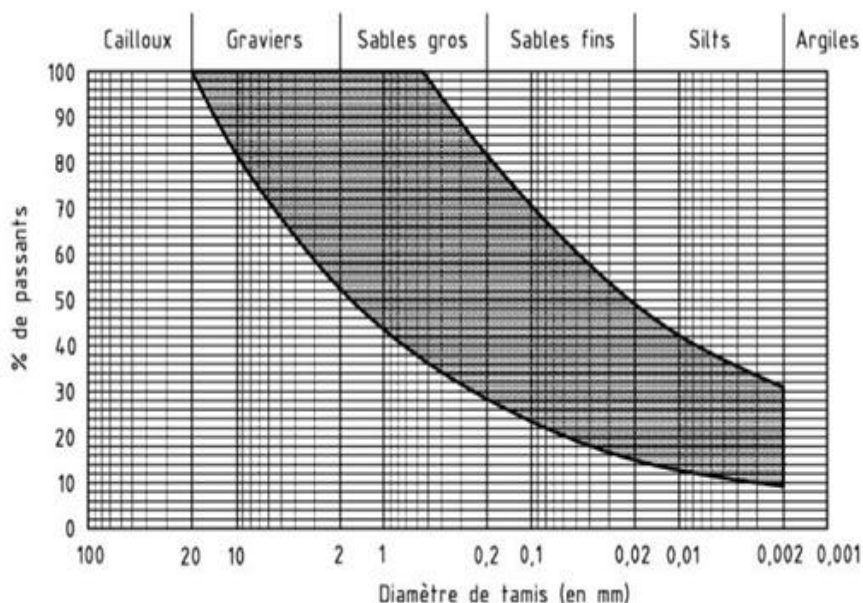
Les bonnes performances des terres stabilisées ou non stabilisées dépendent largement des performances de la granulométrie.

Pour qu'une terre donne des briques ayant de bonnes caractéristiques mécaniques, elle doit contenir une quantité d'argile et de limon non négligeable.

Mais l'argile est responsable des fissures dues au retrait, et au mauvais comportement à l'eau des briques en terre. Une bonne terre doit contenir environ 70% à 80% de sable et 20% d'argile et limon.

Au-delà de 30%, l'argile a des effets négatifs sur la stabilité des briques en terre (non stabilisée) et sur leur durabilité. En cas de stabilisation par la chaux la teneur maximale en argile est de l'ordre de 45%.

La figure I.9 illustre le fuseau du diagramme recommandé par CRaTerre.



*Figure I. 9 Fuseau du diagramme des terres recommandé [24]*

Selon le type de technique utilisée, on choisira des terres avec des proportions variables d'argile, de sable et de graviers. Mais une même terre peut être utilisée pour plusieurs techniques selon son état hydrique, c'est-à-dire sa teneur en eau.

Le tableau I.14 illustre les proportions variables d'argile, des sables et des graviers qu'on devra trouver dans la terre pour le BTC.

*Tableau I. 14 Proportion typique des grains*

	<b>Graviers</b>	<b>Sables</b>	<b>Silts</b>	<b>Argiles</b>
Proportion	0 à 40 %	25 à 80 %	10 à 25%	8 à 30 %

#### I.4.1.2. Limite d'Atterberg

La plasticité traduit l'aptitude d'une terre à se déformer sans qu'une réaction élastique significative ne se produise. Les limites d'Atterberg définissent les limites entre différents états de cohérence d'une terre. Celle-ci sont évaluées en quantité d'eau sur la fraction fine du sol (moins de 0,4 mm) :

- Limite liquide (WL) : de l'état liquide à l'état plastique, la terre commence à manifester une résistance au cisaillement,

- Limite plastique (WP) : passage de l'état plastique à un état solide, la terre devient friable.

L'indice de plasticité  $IP=WL-WP$  détermine le domaine de comportement plastique de la terre.

La combinaison de WL et WP définit la sensibilité du sol aux variations d'humidité. Les propriétés plastiques d'un sol peuvent être représentées sur un diagramme de plasticité.

La figure I.10 présente le diagramme de plasticité des terres montrant la limite ou doit se situer le résultat de la limite d'Atterberg (indice de plasticité et limite de liquidité).

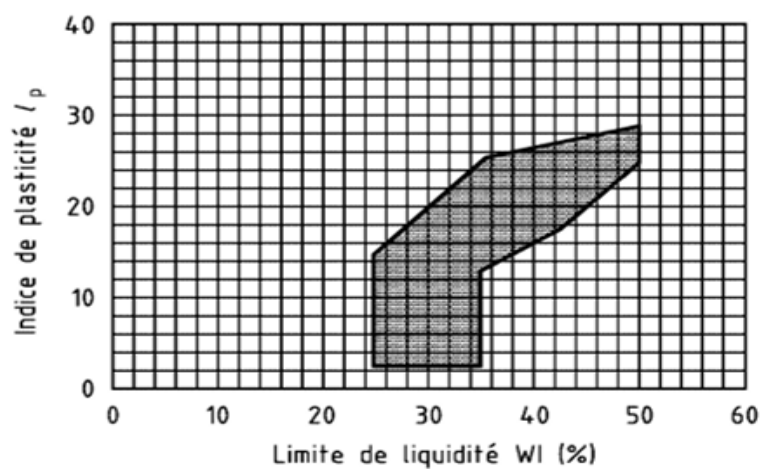


Figure I. 10 Fuseau du diagramme plastique des terres [25]

Ci-dessous, les limites correspondant aux éléments du fuseau de plasticité :

- IP : idéalement proche de 9, compris entre 7 et 25
- WL : idéalement proche de 27, compris entre 25 et 45
- WP : idéalement proche de 17, compris entre 10 et 25

Les travaux de Moevus et al [27], offrent une synthèse de l'état de connaissance des principales propriétés de la terre utilisée en construction pour les BTC. Ces travaux regroupent aussi bien des exigences liées à la terre et celle de la brique.

Le tableau I.15 compile aussi bien des données granulaires de la terre que des données de consistances. Pour la BTC, elles sont recensées des paramètres aussi bien physique, que mécanique et thermique.

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Tableau I. 15 Récapitulatif des propriétés valables aussi bien pour des terres à bâtir et que pour les BTC [26]*

Paramètres	Unités	Valeur
<b>Critères valables sur la terre à construire</b>		
Teneur en argile	%	5 – 30
Indice de plasticité (IP)	%	5 – 30
Teneur en eau initiale (TEI)	%	5 – 15
Teneur en eau ambiante (w)	%	0 – 5
<b>Critères sur la brique de terre comprimé crue</b>		
Retrait de séchage	%	1 – 3
Masse volumique sèche ( $\rho$ )	Kg.m <sup>-3</sup>	1600 – 2200
Module d'Young (E)	GPa	1.0 – 6.0
Résistance en compression (Rc)	MPa	0.4 – 3.0
Résistance en traction (Rt)	MPa	0.1 – 0.5
Capacité thermique massique (Cm)	kJ.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	600 – 1000
Capacité thermique volumique (Cv)	kJ.m <sup>-3</sup> .K <sup>-1</sup>	960 – 2200
Conductivité thermique ( $\lambda$ )	W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	0.5 – 1.7

#### 1.4.1.3. Teneur en argile

La proportion argileuse doit contenir dans les marges spécifiées dans le tableau I.16.

*Tableau I. 16 Activité argileuse [26]*

Caractéristiques recommandées	Caractéristiques acceptables
$200 \leq IP \leq 400$	$170 \leq IP \leq 500$
$8 \leq IP \leq 15$	$7 \leq IP \leq 20$

### **I.5.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, une généralité sur le BTC. Nous avons de même présenté la généralité de certains essais géotechniques qui entre en étude du sol au laboratoire afin de confectionner de BTC et par là nous avons noté la mission principale de l'ingénieur géotechnique qui est de comprendre et expliquer les comportements naturels complexes du sol pour arriver à la réalisation du projet.

## **Chapitre II. METHODOLOGIES**

### **II.1. INTRODUCTION**

Dans le présent chapitre, il est question de présenter les différents essais qui ont été réalisés au laboratoire ainsi que les matériels associés pour chaque type d'essais et les méthodes employés pour la réalisation du travail. La présentation des milieux d'étude sera aussi faite dans cette partie du travail.

Les essais sont subdivisés en deux catégories d'où les essais d'identification physique (l'analyse granulométrique, la détermination de la teneur en eau, la limite d'Atterberg ; la masse volumique apparente et absolue, la valeur au bleu de méthylène du sol VBS, ...) et les essais d'identification mécanique (l'essai Proctor, l'essais CBR, ...).

Identifier le sol revient à connaître sa nature, sa composition et la répartition des grains des différentes dimensions qui les composent.

### **II.2. PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE**

Ce travail porte sur la contribution à la caractérisation des sols de kabindi en vue d'être utilisés comme matériau de confection de blocs à terre comprimé. Etude menée respectivement dans deux sites de Jomba précisément à kabindi dans la zone notre MURUFUNZO et une zone connue sous le nom de GITOVU.

Ces zones d'études se situent en République démocratique du Congo dans la province du nord – Kivu, territoire de Rutshuru.

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 1700 mètres et a pour coordonnées géographiques : 1.1000°S, 29.4667°E.

### **II.3. ECHANTILLONAGE**

Deux sites de prélèvement de l'échantillon ont été choisis à Jomba pour cette étude dont à KITOVU et MURUFUNZO.

L'étude va s'étendre sur ces échantillons de sol prélevés sur les sites choisis.

La figure II.1 présente à gauche l'échantillon de MURUFUNZO et à droite l'échantillon de KITOVU.



*Figure II. 1 A gauche échantillon MURUFUNZO, à droite échantillon KITOVU*

#### **II.4. ESSAIS D'IDENTIFICATION**

Les essais d'identification physique et les essais d'identification mécaniques sont les deux types d'essais réalisés sur les matériaux pour déterminer leurs propriétés et leur comportement.

Parmi les essais d'identification, nous pouvons citer : l'analyse granulométrique (par tamisage et par sédimentométrie), la teneur en eau, la limite d'Atterberg, la densité et la porosité, ...

En revanche de ce qui est des essais mécaniques, nous pouvons citer : essais de portance et de compactage (indice de portance CBR, l'essai à la compression, l'essai à la traction, l'essai à la flexion, l'essai à l'érosion, l'essai au fluage ; l'essai Proctor (normal et modifier) ....

- Les essais d'identification : sont des essais qui servent à caractériser la nature des matériaux c'est-à-dire analyser sa composition physique et minéralogique.

Ils permettent de s'assurer que la terre utilisée pour fabriquer le BTC est bien adaptée à la construction. [28]

- Les essais mécaniques : sont des essais permettant à vérifier la résistance et la durabilité de BTC après la fabrication.

Ils mesurent comment les blocs réagissent sous des forces externes et s'ils sont suffisamment solides pour être utilisés dans la construction.

#### **II.4.1 La teneur en eau naturelle du sol [29]**

Elle est déterminée suivant la norme NF P 94-050 sur l'échantillon du sol remanié à partir de la formule qui nous sera donnée.

Elle est en abrègé par W.

##### **a. Objectif de l'essai**

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

##### **b. matériels et appareillages utilisés**

- Une balance
- Une étuve
- Des tares

##### **c. Mode opératoire**

- Prélever un échantillon du sol représentatif
- Placer ce prélèvement sur un verre de montre de masse
- Passer immédiatement l'ensemble de masse m, le mettre l'étuve a 105°C jusqu'à sa dessiccation complète la masse stable au bout de 24 heure.
- L'échantillon sec immédiatement à la sortie de l'étuve pour obtenir la masse sèche  $m_d$ .
- En déduire la teneur en eau :

Avec :

W : la teneur en eau en pourcentage

$m_h$  : 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.

La formule II.1 présente le résultat de la teneur en eau en pourcentage.

$$W = \frac{w_w}{w_s} * 100 \quad \text{II-1}$$

Une teneur en eau doit être comprise entre 8 à 15% pour la production de BTC des bonnes qualités, durables et résistants.

#### **II.4.2. Analyse granulométrique [3]**

##### **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. Définition**

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 tamisât 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 tamisât sont rapportés à la masse initiale du matériau. Les résultats sont obtenus en pourcentage avec la formule II.2 et la formule II.3.

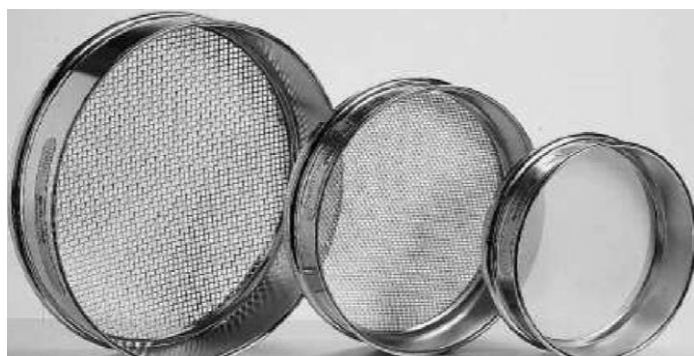
$$\% \text{ refus cumulé} = \frac{\text{poid du refus cumule}}{\text{poid avant lavage}} * 100$$

II-2

$$\% \text{ tamisat} = 100\% - \% \text{ refus cumules}$$

II-3

La figure II.2 présente les différents tamis utilisés lors de l'essai d'analyse granulométrique par tamisage.



*Figure II. 2 Tamis*

- ❖ Par sedimentométrie 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**

##### **❖ Analyse granulométrique par voie sec(tamissage) [30]**

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 la masse constante et cela pour chaque tamis utilisé.

On procède aussi au tamissage 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, 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 tamissage 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.

**❖ Analyse granulométrique par voie humide(sédimentométrie) [31]**

La sédimentométrie consiste à laisser une suspension de sol se déposer au fond d'une éprouvette pleine d'eau.

Plus les grains sont fins, plus la vitesse de décantation est lente conformément à la loi de Navier Stokes sur la vitesse de chute de bulles sphériques dans l'eau.

La mesure de la densité de suspension à des intervalles de temps variables permet de calculer la proportion des grains de chaque diamètre.

**a. Matériel et appareil utilise**

- Un chronomètre
- Un agitateur électrique
- Des éprouvettes de deux litres
- Un densimètre de type torpille (densité 1000 à 1030)
- Un agitateur manuel
- De l'eau distillée
- De la solution d'hexa métaphosphate de sodium
- Une balance
- Un thermomètre au 1/10 de c.

Procédure :

- Prélever 40 gr dans les passants au tamis de  $80\mu m$  de chaque échantillon

- Ajouter 60ml de sodium de flocculante (hexa métaphosphate de sodium) et 440cm<sup>3</sup> d'eau distillée
- Laisser au repos environ 14heures
- On les agite pendant 5 minutes avec l'agitateur électrique avant de les mettre dans chaque tube et compléter avec l'eau distillée jusqu'au trait de 2000ml.
- Les mesures sont faites à l'aide d'un densimètre après agitation à la palette.

En résumé de cet essai, il consiste à déterminer la granularité de la terre [32]

Ces analyses permettent d'évaluer la terre pour l'élaboration des BTC, s'il peut être utiliser avec ou sans agent de stabilisation. Le fuseau CRATERre est utilisé comme critère de vérification (Figure I.9). Les paramètres d'estimation sont le coefficient d'uniformité  $C_u$  (II.4) et le coefficient de conformité  $C_c$  (II.5).

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad \text{II-4}$$

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad \text{II-5}$$

Avec,  $D_i$  : diamètre des tamis correspondant à  $i\%$  de pourcentage de tamisât cumuler (10%, 30 % et 60%)

### II.4.3 Limites d'Atterberg [33]

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 limites présentent un intérêt particulier dont 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.

### ❖ Limite de liquidité

La limite de liquidité (WL) 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. Matériel et Appareillage utilise

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

La figure II.3 présente l'appareil de cassagrande ainsi que tous ses accessoires.



*Figure II. 3 Appareils de cassagrande et tous ses accessoires*

### **b. Mode opératoire**

L'échantillon réservé aux limites est lavé à l'eau au tamis de 0.4 mm et seules les particules passantes à ce tamis sont réaccueillies et retenus pour l'essais. Une quantité d'environ 80 g de tamisât est malaxées afin d'obtenir une pate presque liquide.

Avec une spatule, on place la pâte dans une coupole propre et sèche qui sera 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 dit appareil de cassagrande selon le procédé suivant :

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

Afin, la limite de liquidité est la teneur en eau correspondant à la fermeture de la rainure sur 1cm de longueur à 25 coups.

#### **❖ La limite de plasticité**

La limite de plasticité ( $W_p$ ) est la teneur en eau à partir de laquelle un échantillon cesse d'être malléable.

C'est la teneur en eau à laquelle un échantillon du sol passe de la consistance plastique à la consistance semi – solide en mesure qu'il sèche ou de la consistance semi – solide à la consistance plastique en mesure qu'il imprègne de l'eau ; c'est la teneur en eau qui sépare l'état plastique à l'état solide.

Pour sa détermination ; on malaxe une boulette de mortier grosse comme une noisette d'environ 12 cm de diamètre et on fait un cylindre en roulant sur une plaque de marbre propre, lisse et sèche.

On effectue un mouvement alterné de va et viens par seconde jusqu'à obtenir un cylindre à la main de 3mm.

Si ce dernier est brisé 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 ces soulèvements ;

Si la rupture ne se produit pas pendant ce soulèvement, on laisse la teneur en eau diminuer.

Lorsqu'il a été probant, l'essai est réalisé une deuxième fois et les teneurs en eau obtenues ne doivent s'écarter de plus de 2% de la valeur moyenne.

La limite de plasticité présente le seuil inférieur de l'état plastique.

Un petit supplément d'eau au-dessus de la limite plastique détruira la cohésion du sol.

La figure II.4 illustre à gauche le mode opératoire de la recherche de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de cassagrande et à droite le mode opératoire de la recherche de la limite de plasticité en réalisant un fil.



*Figure II. 4 Illustrations essai limite de liquidité et limite de plasticité*

#### ❖ Indices déductibles de limites d'Atterberg

A partir de la limite de liquidité et de la limite de plasticité, on peut trouver l'indice de plasticité et l'indice de liquidité.

##### a. L'indice de plasticité

Elle est la différence entre la limite de liquidité et la limite de plasticité.

Il exprime la plage de plasticité du sol.

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

La formule II.6 donne l'indice de plasticité du sol.

$$IP = WL - WP$$

II-6

Avec :

IP : l'indice de plasticité

WL : la limite de liquidité

WP : la limite de plasticité

Plus l'indice de plasticité est élevé, la zone dans laquelle le sol est l'état plastique est grande et plus ce sol contient de l'argile.

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

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

Le tableau II.1 présente le type de sol en fonction de l'IP :

*Tableau II. 1 type de sol en fonction de l'IP*

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

L'IP est couramment utilisé pour mesurer l'argilosité et le potentiel de gonflement.

Si le résultat est compris entre 5 et 10 ; la plasticité est faible. S'il se situe entre 10 et 20, la plasticité est moyenne et s'il est supérieur à 20, la plasticité est forte.

Les spécifications présentées au tableau II.2 sont à considérer pour les limites d'Atterberg.

*Tableau II. 2 spécifications des limites d'Atterberg [31]*

	Zone limite	Zone préférentielles
$I_p$	De 7 à 29	De 7 à 18
$W_l$	De 25 à 50	De 30 à 35
$W_p$	De 10 à 25	De 12 à 22

### **b. Indices de liquidité**

L'indice de liquidité est déterminé par la relation II.7.

$$I_l = \frac{W - W_p}{I_p} \quad \text{II-7}$$

Avec :

$I_l$  : 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 :

- $IL < 0$ , le sol est à l'état solide ou semi-solide
- $0 < IL < 1$ , le sol est à l'état plastique
- $IL > 1$ , le sol est à l'état liquide.

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

### **c. Indice de consistance**

Il est donné par la relation II.8.

$$I_c = \frac{W_l - W}{I_p} \quad \text{II-8}$$

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN TERRE COMPRIMEE
--

Avec :

$I_c$  : l'indice de consistance

$I_p$  : l'indice de plasticité

W : la teneur en eau naturelle du sol

$W_l$  : la limite de liquidité

L'interprétation des résultats est telle que si :

- $IC < 0$  : Sol à l'état liquide
- $0 < IC < 1$  : Sol à l'état plastique
- $IC > 1$  : Sol à l'état solide

Le résultat trouvé est interprété et analysé à l'échelle de la classification des sols suivant les valeurs de l'indice de consistance présentées dans le tableau II.3 :

*Tableau II. 3 classifications de sol en fonction de l'IC.*

IC	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

En résumer, la connaissance des états de consistance d'une terre à brique permet de définir la meilleure utilisation. Avec l'indice de plasticité et la limite de liquidité, il est possible de choisir si la terre est plus adaptée au BTC (Figure I.10).

#### **II.4.4. Essais de la masse volumique [34]**

Dans cette partie nous allons déterminer la quantité de matière qu'on retrouve dans un volume donné.

La masse volumique c'est la masse d'un corps par unité de volume apparent en état naturel, après passage à l'étuve à  $105 \pm 5$  °c, notée ou  $V_{app}$  et exprimée en ( $g/cm^3$  ;  $Kg/m^3$  ;  $T/m^3$ ).

Elle est abrégée par  $\rho$  et est donnée par la relation II-9.

$$\varphi = \frac{M}{V}$$

Avec M : la masse de l'échantillon et V : le volume du récipient standard

❖ **La masse volumique apparente**

**a) définition**

- La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules.
- La masse volumique apparente d'un matériau pourra avoir une valeur différente suivant qu'elle sera déterminée à partir d'un matériau compacté ou non compacté
- La masse volumique apparente sèche Pd est la masse de granulats secs (Ms) occupant un volume apparent (volume des solides : Vs + volume des vides Vv)

**b) matériel utilise**

- ✓ Un récipient cubique ou cylindrique de volume connu
- ✓ Une main écope pour le remplissage
- ✓ Une balance

**c) mode opératoire**

- Déterminer le volume du récipient V
- Noter la masse du récipient propre et vide  $M_0$
- Placer le récipient dans le bac en plastique
- Verser les granulats secs, par couches successives et sans tassement : utiliser les mains comme entonnoir naturel
- Araser à l'aide de la règle métallique par un mouvement horizontal de va et vient
- Noter la masse du récipient remplie  $M_1$ .
- Vider les granulats dans un autre bac en plastique
- Renouveler l'opération au moins deux fois avec un autre échantillon du même type

Le résultat sera donc donné par la formule II.10.

$$\varphi_{app} = \frac{M_1 - M_0}{V}$$

Il faut reprendre l'essais au moins deux fois et le résultat sera la moyenne des résultats des essais.

La formule II.11 représente la moyenne des résultats de la masse volumique apparente.

$$\varphi_{app} = \frac{\sum \varphi_i}{n} \quad \text{II-11}$$

Avec :

$\sum \varphi_i$  : la somme des masses volumiques apparentes

n: nombres des masses volumique apparente déterminée et

$\varphi_{app}$ : La masse volumique apparente

#### ❖ Masse volumique absolue (masse volumique des grains solides)

##### a. Définition

La masse volumique absolue en abrègè  $\varphi_{abs}$ : c'est la masse par unite de volume de la matière qui constitue le granulats sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains.

Elle est utilisée pour déterminer la densité des particules solides d'un sol sans tenir compte des vides.

##### b. but de l'essais

- ✓ Des caractéristiques intrinsèques des matériaux telles que la résistance à la compression et le module d'élasticité sont des fonctions de la masse spécifiques.
- ✓ Par ailleurs, la connaissance simultanée de la masse spécifique  $M_s$  et de la masse volumique apparente seche  $\varphi_s$  permet de calculer la compacite C et les pourcentages des vides V dans un échantillon :

##### c. Matériels et appareillage utilises

- ✓ La balance
- ✓ Le pycnomètre gradue jusqu'à 250 ml

La figure II.4 présente les appareils nécessaires pour cet essai.



Figure II. 4 la balance et le pycnomètre

#### d.la méthodologie l'essai

Nous avons, pour la détermination de la masse volumique absolue utilise la méthode de trois pesées. Elle est la méthode la plus précise si une fois on prend un certain nombre de précautions lors de sa détermination.

Pour ce faire, on procède comme suit :

- Déterminer avec précision la masse  $m_1$  du ballon rempli d'eau (jusqu'au repère de remplissage)
- Déterminer avec précision la masse  $m_2$  d'un échantillon de matériau sec,
- Introduire la totalité de la masse sèche dans le ballon, remplir d'eau (jusqu'au repère de remplissage), vérifier s'il n'y a pas de bulle d'air, peser alors  $m_3$  .

La formule II.12 présente les résultats de la masse volumique absolue.

$$\varphi_{abs} = \frac{m_2}{(m_1 + m_2) - m_3} * \varphi_w \quad \text{II-12}$$

Avec :

$m_1$  : la masse du ballon rempli d'eau

$m_2$ : La masse de l'échantillon de matériau sec et

$m_3$ : L'ensemble des masses (masse du ballon rempli d'eau et celle de l'échantillon du matériau sec)

$\rho_w$ : La masse volumique de l'eau en  $\frac{kg}{m^3}$  ( $\frac{g}{cm^3}$ )

De l'interprétation des résultats, on a si :

- $\varphi_{abs} = 2,6$  à  $2,8 \frac{g}{cm^3}$ , on aura le sol argileux et limoneux
- $\varphi_{abs} = 2,65 \frac{g}{cm^3}$ , on aura le sol sableux et graveleux
- Pour les sols contenant des minéraux lourds,  $\varphi_{abs}$  peut dépasser  $3 \frac{g}{cm^3}$ .

Cet essai est nécessaire pour calculer la porosité (pourcentages des vides dans le sol) et la densité relative de ce sol

#### ❖ Masse volumique sèche

L'essai consiste à déterminer la masse volumique des particules solides du sol sec. Elle se note  $\varphi_d$  et elle exprime la masse d'une unité de volume de sol sec.

La formule II.13 est utilisée pour calculer la Masse volumique sèche.

$$\varphi_d = \frac{m_d}{v} = \frac{\varphi_{app}}{1+W} \quad \text{II-13}$$

Avec :

- $\varphi_d$  : masse volumique sèche.
- $m_d$  : masse sèche.
- $V$  : volume.
- $W$  : la teneur en eau naturelle.
- $\varphi_{app}$  : masse volumique apparente

De ce qui concerne l'interprétation de ses résultats ; on arrivera à conclure de ce qui suit, si :

- $\varphi_d < 1600 \frac{kg}{m^3}$  le BTC sera trop léger et peu compacte
- $1600 < \varphi_d < 2000 \frac{kg}{m^3}$  On aura le BTC bien compacte et performant.
- $\varphi_d > 2000 \frac{kg}{m^3}$  : on aura le BTC trop dense et difficile a manipuler.

Pour produire le BTC de bonne qualité, la masse volumique sèche doit être comprise entre 1600 et  $2000 \frac{kg}{m^3}$

#### ❖ Détermination de l'indice des vides et la porosité

L'indice des vides « e » a été trouvé grâce à la relation de la masse volumique absolue avec la masse volumique sèche des grains solides d'un sol à partir de la formule II.12 et II.13. La porosité « n » quant à elle, est la valeur pondérale indiquant la proportion des vides par rapport aux grains solides d'un sol. Elle est trouvée à partir de la relation II.14.

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{\varphi_{abs} - \varphi_d}{\rho_d} \quad \text{II-14}$$

Avec :

e : l'indice des vides.

$V_v$  : me volume des vides.

$V_s$  : le volume des grains solides.

$\varphi_{abs}$  : la masse volumique absolue.

$\varphi_d$  : la masse volumique sèche.

La formule II.15 est utilisée pour calculer la porosité n.

$$n = \frac{e}{1+e} \quad \text{II-15}$$

La porosité influence la compressibilité, la perméabilité et la capacité du sol à supporter des charges.

**❖ Détermination du degré de saturation  $S_r$**

Le degré de saturation d'un sol est le niveau de remplissage des vides par l'eau. Il s'évalue par la relation V.

Il est donné par l'expression II.16.

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{W * \varphi_{abs}}{e * \varphi_w} * 100 \quad \text{II-16}$$

Avec :

W : la teneur en eau naturelle

$\varphi_{abs}$  : la masse volumique absolue

e : l'indice des vides

$\varphi_w$  : la masse volumique de l'eau

$V_w$  : volume de l'eau

$V_v$  : volume des vides

L'interprétation des résultats de  $S_r$  pour le BTC est tel que si :

- $S_r < 40\%$  : Le sol très sec (difficulté de bien compacter ce sol, on doit donc ajouter de l'eau avant le moulage pour améliorer la plasticité et la compaction de BTC)
- $S_r = 40\%$  : ici on a un niveau optimal pour le BTC (bonne compaction sous presse De blocs des terres comprimées).
- $S_r > 80\%$  : sol trop humide ou saturé

Cette plage est à éviter car l'excès d'eau rend le compactage impossible.

**II.4.5. Essai de la valeur au bleu de méthylène (VBS) [35]**

L'essai au bleu de méthylène est l'une des essais permettant de calculer l'argilosité du sol.

**a. But de l'essai**

Le but de cette étude est de mesurer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour saturer un sol. Cette dernière est directement liée à la surface spécifique qui est elle-même reliée à l'activité du sol.

### **b. Principe de la manipulation**

Il consiste à doser une prise d'essai mise en suspension avec du bleu de méthylène.

A saturation, une goutte de la suspension déposée sur du papier filtre provoque la formation d'une tâche avec une auréole.

### **c. Mode opératoire**

- ✓ Prendre 100 grammes de sol sec passé au tamis 5mm
- ✓ Mettre la prise d'essai à tremper dans un bécher avec 100 cm d'eau.
- ✓ A l'aide de l'agitateur (700 tr/min), disperser la suspension pendant 5 min.
- ✓ A l'aide du dispositif de dosage, introduire 5 cm<sup>3</sup> de bleu et agiter (400 tr/min) pendant 1 min.
- ✓ A l'aide d'une baguette, déposer une goutte de la suspension sur du papier filtre (l'essai de la tâche).

Si le test est négatif (tâche sans auréole), ajouter 5 cm<sup>3</sup> de bleu et refaire l'essai de la tâche (Opération 5) après une minute.

- ✓ Cette opération sera répétée autant de fois qu'il sera nécessaire jusqu'à ce que le test de la tâche soit positif (tâche avec auréole).
- ✓ Si le test est positif (tâche avec auréole), procéder à 5 essais successifs (un test par minute) sans ajouter de bleu. Si les 5 essais sont positifs, l'essai est terminé
- ✓ Si au cours de ces tests de la tâche, l'une des tâches deviendra sans auréole, ajouter uniquement 2,5 cm<sup>3</sup> et reprendre les tests de la tâche jusqu'à ce que les 5 essais soient positifs.

L'agitation n'est jamais interrompue pendant tout le déroulement de l'essai.

La figure II.5 présente les images des appareils ainsi que ses accessoires nécessaires pour faire l'essai de la valeur au bleu de méthylène (VBS).



*Figure II. 5 agitateur mécanique et accessoire pour l'essai VBS*

#### d. Calcul de VBS

La valeur du bleu du sol est sans unité.

Elle est donnée par la formule II.17.

$$VBS = \frac{V}{m} \quad \text{II-17}$$

Avec :

V : le volume du bleu en  $cm^3$  et m : la prise d'essai

La surface spécifique totale de la prise d'essai est donnée par la formule II.18.

$$SST \left( \frac{m^2}{g} \right) = 20,93 * VBS \quad \text{II-18}$$

La surface spécifique est le rapport de la surface totale des grains à leurs volumes parfois à leurs poids ( $m^2/m^3$  ou  $m^2/Kg$ ). Elle est de l'ordre de 10 à 20  $m^2/g$  pour la kaolinite et de l'ordre de 500  $m^2/g$  pour la montmorillonite.

Le tableau II.4 présente la classification du sol suivant la valeur du VBS :

*Tableau II. 4 Classification du sol suivant la valeur du VBS [47]*

<b>Valeur du bleu du sol</b>	<b>Nature du sol</b>
< 0,2	Sols sableux
0,2 – 2,5	Sols limoneux
2,5 – 6	Sols limoneux-argileux
6 – 8	Sols argileux
> 8	Sols très argileux

En résumé, le Bleu de Méthylène est absorbé préférentiellement par les argiles smectites et les matières organiques. Les autres principales argiles (illite et kaolinite) n'y sont pas très sensibles. En fonction de la VBS, il est possible de projeter le type d'argile contenue dans la terre car les surfaces spécifiques d'absorption sont plus importantes avec les argiles smectites, moyennes avec les illites et faibles avec les kaolinites.

## **II.5. ESSAIS MECANIQUES**

Parmi les essais disponibles, nous pouvons énumérer l'essai Proctor qui a été utilisée pour déterminer la teneur en eau optimal afin de trouver la densité sèche maximale.

### **II.5.1 essais Proctor normal [36]**

Le compactage sur les échantillons dans le moule Proctor normal sera effectué pendant cet essai. Le compactage est le procédé le plus économique toujours utilisé dans la construction des remblais pour améliorer la densité sèche du sol. C'est une réduction pratiquement instantanée du volume du sol dû à la réduction des vides de l'air.

L'étude du compactage s'effectue à l'aide d'un damage normalise connu sous le nom de l'essai Proctor.

#### **a. But de l'essai Proctor**

L'essai sèche Proctor a pour but de déterminer, pour un compactage d'intensité donnée, la teneur en eau à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la densité maximum (masse volumique la plus grande qu'il est possible à atteindre avec l'énergie de compactage mise en œuvre). La teneur en eau ainsi déterminée est appelée teneur en eau optimum Proctor. Cette teneur en eau est celle qui permet d'assurer l'enrobage de chaque grain du sol fin qu'ils puissent s'arranger de la façon la plus compacte possible.

### **b. Principe de l'essai**

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et selon le processus bien déterminé.

Un échantillon du sol a été étudié et à déterminer le teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage.

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 représentative des densités sèches en fonction de la teneur en eau.

On trace alors la courbe la courbe en interpolant entre les points expérimentaux.

Elle représente un maximum dont l'abscisse est la teneur en eau optimum Proctor et l'ordonnée la densité sèche maximum Proctor.

L'essai Proctor s'effectue en trois couches avec la dame Proctor normal.

L'énergie de compactage est de :

- ❖ 55 coups de dame par couche dans le moule C.B.R
- ❖ 25coups par couche dans le moule Proctor normal.

Dans ce présent travail, on aura à utiliser le moule Proctor normal.

### **c. appareillages utilises**

Dans ce point, on aura à présenter tous les appareils a utilisés lors de l'essai.

Il comprend :

- ✓ Le moule Proctor constitue par un tube cylindrique métallique inoxydable de 10,15cm de diamètre intérieur et 11,7 cm de hauteur, pourvu d'un fond et d'une hausse métallique amovibles.
- ✓ La dame Proctor normal qui est constitué par un mouton de 2,49kg (cylindrique de 5.1cm de diamètre) dont la hauteur de chute est de 30,4cm

- ✓ Du sable
- ✓ Une étuve
- ✓ Une règle a arasé d'environ 250mm
- ✓ Truelles pour le malaxage
- ✓ Des mailles, burins, couteau, et ce pour le démoulage ou mieux un appareil à démoulé.
- ✓ Une balance sensible au gramme d'une portée maximale au moins égale à 20kg
- ✓ Une éprouvette graduée
- ✓ De l'eau
- ✓ Un bac

#### **d. mode opératoire**

- On prend 2.5 kg de sable préalablement préparé qu'on vers dans un bac.
- On ajoute une certaine quantité d'eau (2%) proportionnelle au poids de sable utilise
- A l'aide de truelle, on malaxe bien le sable
- On remplit le moule Proctor normalise en trois couches puis après avoir verse chaque couche, on compacte à l'aide de la dame Proctor normal en 25 coups en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition équitable des coups sur la surface a compacter.
- On procède de la même manière après la mise en place de la deuxième et la troisième couches.
- Une fois le moule rempli, on arase le sable avec une règle à araser, on comble le vide laisser à la surface.
- On prélève en suite un échantillon d'environ 100gr à la surface du moule, puis on retire la base de ce dernier afin de prendre un deuxième échantillon d'à peu près de même poids.
- A la balance, on évalue les masses des deux prélèvements puis on le fait passer à l'étuve au moins pendant 24 heures ; au terme desquelles on va repeser les échantillons.

L'essais est répète plusieurs fois de suite sur des échantillons portes à des teneurs en eau croissantes (2%,4%,6%,8%,10%,12%,14%,16%).

### E. Interprétation des résultats

De cet essai, nous arrivons à conclure de ce qui concerne les résultats de la densité sèche optimale obtenus après l'essai comme suit :

Lors que la masse volumique sèche est entre :

- 1650 et  $1760 \frac{kg}{m^3}$ , on dira que le résultat est assez médiocre
- 1760 et  $2100 \frac{kg}{m^3}$ , on dira que le résultat est très satisfaisant (le matériau est assez argileux)
- 2100 et  $2200 \frac{kg}{m^3}$ , on dira que le résultat est excellent (le matériau est riche en gros éléments)
- 2200 et  $2400 \frac{kg}{m^3}$ , le résultat est exceptionnel.

### II.5. 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 de l'échantillon du sol de GITOVU et RUFUNZO.

## **Chapitre III. PRESENTATION ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS**

### **III.1. INTRODUCTION**

Le présent chapitre présente les résultats obtenus aux différents essais sur les échantillons du sol de Jomba plus précisément à KITOVU et à MURUFUNZO à l'état naturel dans le laboratoire de l'ULPGL/GOMA ainsi que leur interprétation. Pour cette étude les essais d'identification dont la détermination de la teneur en eau naturelle, la détermination des masses volumiques (la masse volumique apparente et la masse volumique absolue), l'essai de l'analyse granulométrique par tamisage, l'essai de la limite d'Atterberg, l'essai de la valeur au bleu de méthylène et l'essai Proctor normal ont été nécessaires.

### **III.2. CARACTERISTIQUE DU SOL DE KITOVU A L'ETAT NATUREL**

#### **III.2.1. Détermination des paramètres d'état**

##### **a. La teneur en eau**

Le tableau III.1 présente la teneur en eau naturelle du sol de KITOVU.

*Tableau III. 1 Teneur en eau naturelle de l'échantillon du sol de KITOVU.*

Paramètres	Unités	Valeurs 1	Valeurs2	Valeurs3	Valeurs Moyenne
Teneur en eau naturelle	%	2,78	1,72	1,76	2,086

Le tableau III.1 indique que la teneur en eau naturelle moyenne est de 2,086%.

##### **b. Les masses volumiques, indice de vide, la porosité, degré de saturation**

Le tableau III.2 présente les masses volumiques, l'indice des vides, porosité et le degré de saturation.

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Tableau III. 2 Les masses volumiques, indice des vides, porosité, degré de saturation*

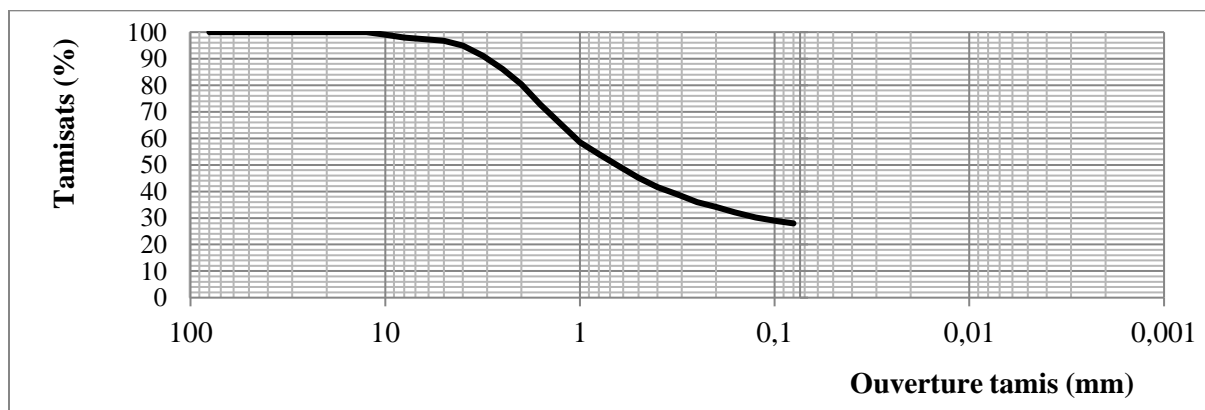
Paramètres	Unités	Valeurs 1	Valeurs2	Valeurs3	Valeurs Moyenne
Masse volumique apparente	$\frac{kg}{m^3}$	1383,18	1387,42	1393,77	1388,12
Masse volumique absolue	$\frac{g}{cm^3}$	2,48119	-	-	2,48119
Masse volumique sèche	$\frac{kg}{m^3}$	-	-	-	1359,75
Indice des vides (e)	-	-	-	-	0,82
Porosité (n)	-	-	-	-	0,45
Degré de saturation (Sr)	-	-	-	-	0,063

### III.2.2. Composition granulométrique

La répartition granulométrique des grains est représentée par une courbe granulométrique des grains obtenue par tamisage.

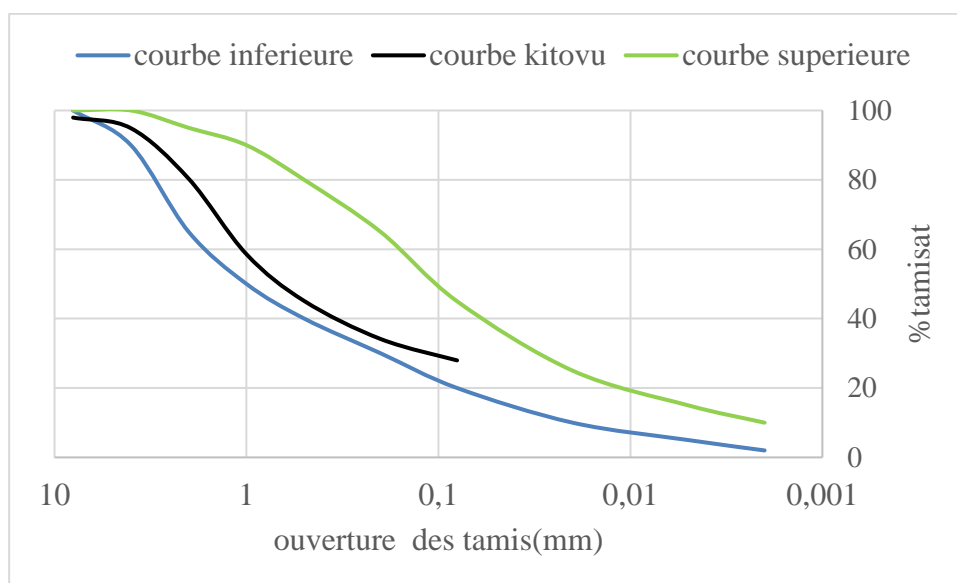
Les données qui ont permises à tracer cette courbe sont présentées dans le tableau se trouvant dans les annexes

La figure III.1 présente la courbe granulométrique du sol de KITOVU obtenue par tamisage.



*Figure III. 1 Courbe granulométrique par tamisage de l'échantillon du sol KITOVU*

La figure III.2 présente la courbe granulométrique dans le fuseau granulométrique.



*Figure III. 2 Courbe granulométrique de l'échantillon du sol KITOVU dans le fuseau*

La courbe en noir est celle obtenue grâce au tamisage de l'échantillon de sol de KITOVU dans le laboratoire de génie civil à l'ULGL/GOMA et les deux autres représentent le fuseau granulométrique proposée par CRATerre. Au regard de ce résultat, l'échantillon du sol de KITOVU convient pour la fabrication des blocs des terres comprimées car sa courbe granulométrique s'inscrit partiellement dans le fuseau. Cette courbe nécessite des corrections au regard de la petite partie qui ne s'inscrit pas dans le fuseau afin de produire de blocs de bonnes performances. Bien que cette courbe soit contenue partiellement dans le fuseau recommandé pour la construction des matériaux en terre (adobe, terre battue, BTC), elle présente une discontinuité dépendant de la granulométrie du sable ; raison pour laquelle il est impossible d'évaluer  $C_u$  et  $C_c$  à cause de la valeur non définie  $D_{10}$ .

### III.2.3 Limites d'Atterberg.

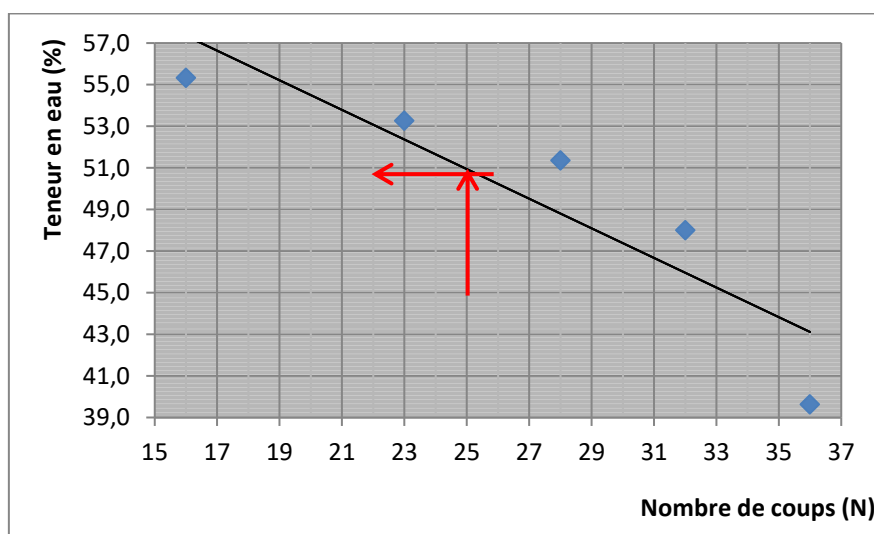
Les résultats de la limite d'Atterberg sont donnés dans le tableau III.3.

**CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE**

*Tableau III. 3 Résultats limite d'Atterberg de l'échantillon du sol de KITOVU*

Nombre de coups		16	23	28	32	36
Teneur en eau (%)		55,3	53,3	51,4	48,0	39,6
Limite de liquidité "WL" (%)		49,5				
Limite de plasticité "WP" (%)		22,5				
Indice de plasticité "IP" (%)		27,1				
Classification		Sol très plastique				
		Sol argileux				

La fig. III.3 présente la droite de progression de la limite de liquidité de l'échantillon du sol de KITOVU.



*Figure III. 3 droite de progression de la limite d'Atterberg de l'échantillon du sol KITOVU*

L'échantillon dans le diagramme de plasticité est présente sur la figure III.4.

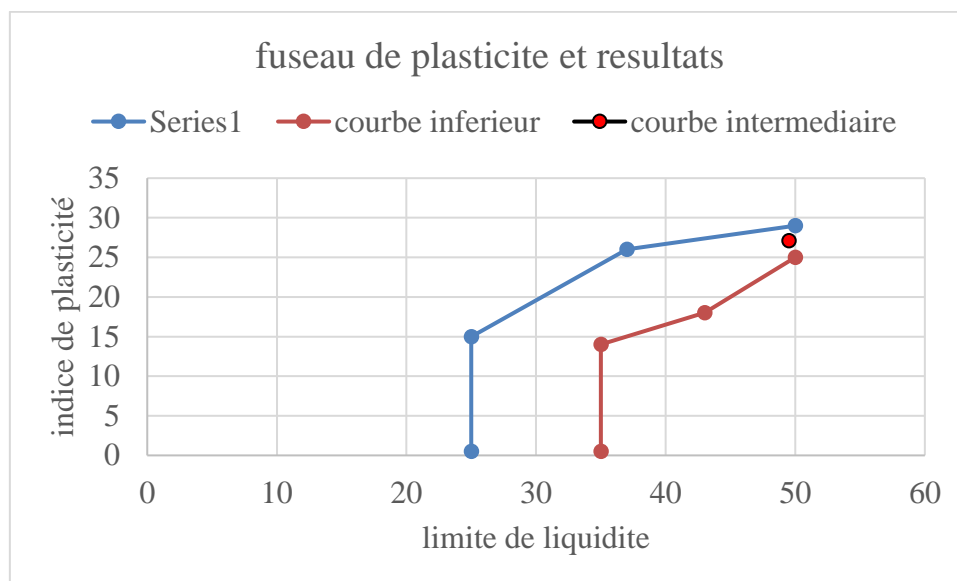


Figure III. 4 L'échantillon dans le diagramme de plasticité du sol de KITOVU

En complétant le résultat de l'analyse granulométrique par tamisage, nous constatons que le sol de KITOVU convient pour la fabrication des blocs des terres comprimées car l'échantillon s'inscrit dans le fuseau de plasticité.

#### III.2.4. La valeur au bleu de méthylène

La valeur au bleu de méthylène est de 0,9 et sa surface spécifique totale de la prise d'essai est de 18,83. ce sol contient des limons (sol limoneux) car sa valeur au bleu de méthylène de 0,9 est entre 0,2 et 2,5 selon ce que nous prescrit le tableau II.4 et il contient l'argile du type kaolinite car la surface spécifique totale de 18,83 est entre 10 et 20  $\frac{m^2}{g}$ .

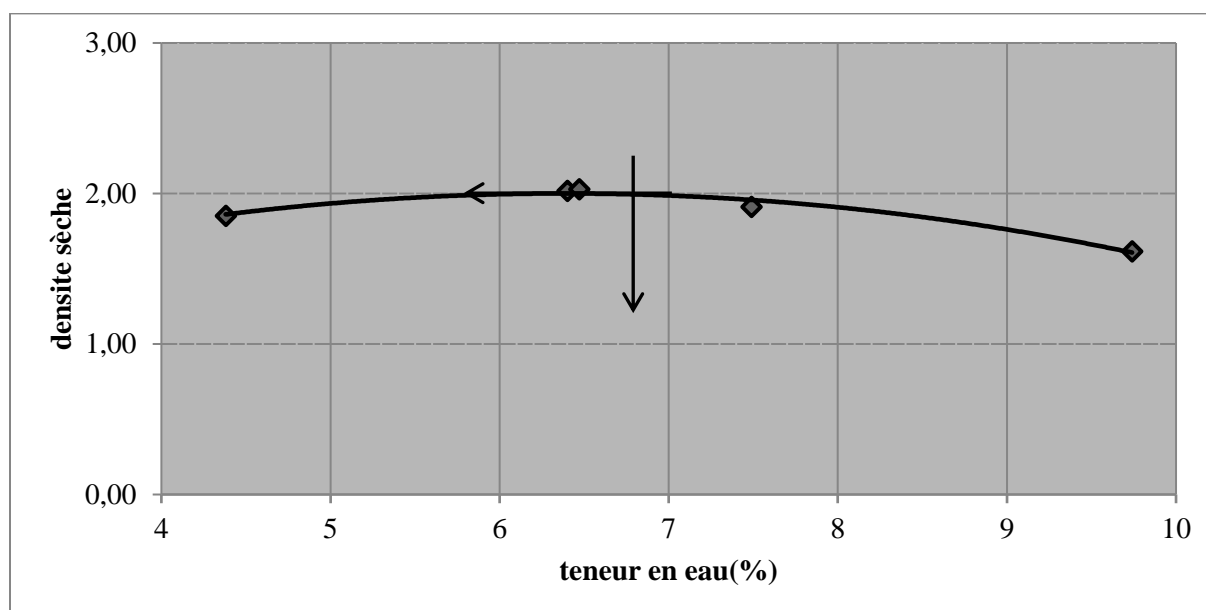
#### III.2.5. Essai Proctor normal

Les résultats de l'essai Proctor normal sont représentés dans le tableau III.4 et sur la figure III.5.

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Tableau III. 4 Résultats de l'essai Proctor de l'échantillon du sol de KITOVU*

W (%)	4,4	6,4	6,5	7,5	9,7
$\varphi_d$ (T/m <sup>3</sup> )	1,85	2,02	2,03	1,91	1,62
$\varphi_{d \max}$ (T/m <sup>3</sup> )	2,03				
W opt. (%)	6,5				



*Figure III. 5 Courbe de l'essai Proctor de l'échantillon du sol de KITOVU*

Les résultats nous indiquent que la densité sèche maximale est de 2,03 T/m<sup>3</sup> et correspond à la teneur en eau optimale de 6,5%. C'est de cette teneur en eau que l'échantillon de sol de KITOVU peut transiter de la phase solide à la plastique car il sera bien humidifié.

Il est donc nécessaire d'utiliser cette quantité d'eau afin d'obtenir un meilleur compactage de sol à une densité sèche optimale de  $2,03 \frac{T}{m^3}$  et pour une réduction précise des volumes des vides qu'il contient. La classification GTR présentée dans le tableau I.3 nous indique que le sol de KITOVU est un argile et argile mameuses, limons très plastiques et un matériau acceptable pour la fabrication de blocs des terres comprimées mais demandant une attention particulière car il est relativement actif.

### III.3. CARACTERIQUES DU SOL DE MURUFUNZO A L'ETAT NATUREL

#### III.3.1. les paramètres d'état

##### a. Teneur en eau naturelle

Le tableau III.5 présente la teneur en eau naturelle de l'échantillon du sol de MURUFUNZO.

*Tableau III. 5 Teneur en eau naturelle de l'échantillon du sol MURUFUNZO*

Paramètres	Unités	Valeurs 1	Valeurs 2	Valeurs 3	Valeurs moyenne
Teneur en eau naturelle	%	5,1	4,5	5,9	5,1

Le tableau III.5 indique la teneur en eau naturelle moyenne de 5,1%.

##### b. Les masses volumiques, l'indice des vides, la porosité et le degré de saturation

Le tableau III.6 présente les masses volumiques, l'indice des vides, la porosité et le degré de saturation.

*Tableau III. 6 les masses volumiques, indices des vides, porosité, degré de saturation de l'échantillon du sol MURUFUNZO*

Paramètres	Unités	Valeurs 1	Valeurs 2	Valeurs 3	Valeurs moyenne
Masse volumique apparente	$\frac{kg}{m^3}$	1007,49	982,095	-	994,79
Masse volumique absolue	$\frac{kg}{m^3}$	1975,91	-	-	1975,91
Masse volumique sèche	$\frac{kg}{m^3}$	-	-	-	946,51
Indice des vides (e)	-	-	-	-	1,08
% Porosité (n)	-	-	-	-	51,9

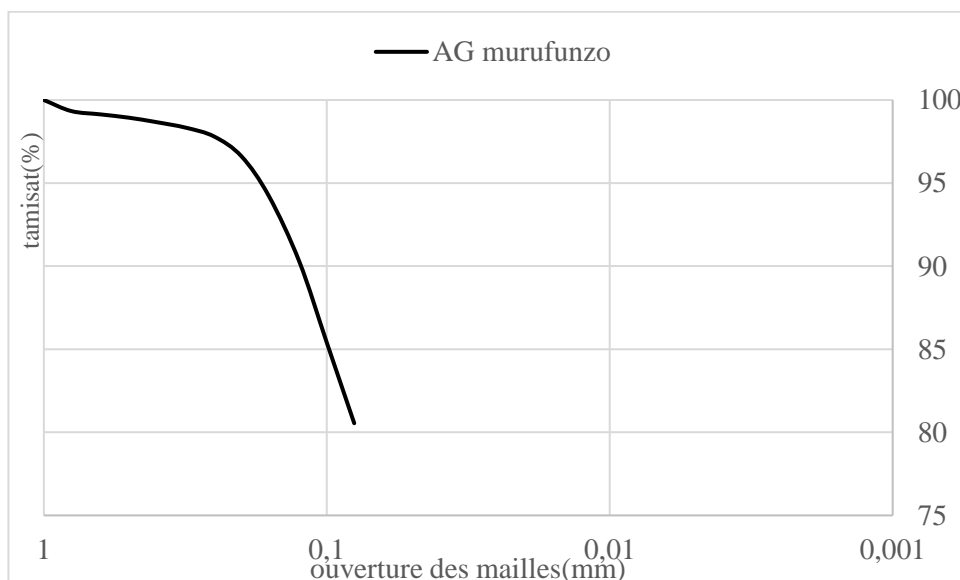
**CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE**

Degré de saturation (Sr)	-	-	-	-	0,19
--------------------------	---	---	---	---	------

Le tableau III.6 indique la masse volumique apparente de  $994,79 \frac{kg}{m^3}$  ; la masse volumique absolue de  $1975,91 \frac{kg}{m^3}$ , la masse volumique sèche de  $946,51 \frac{kg}{m^3}$  ; l'indice de vide de 1,08 ; la porosité de 51,9% enfin le degré de saturation de 0,19.

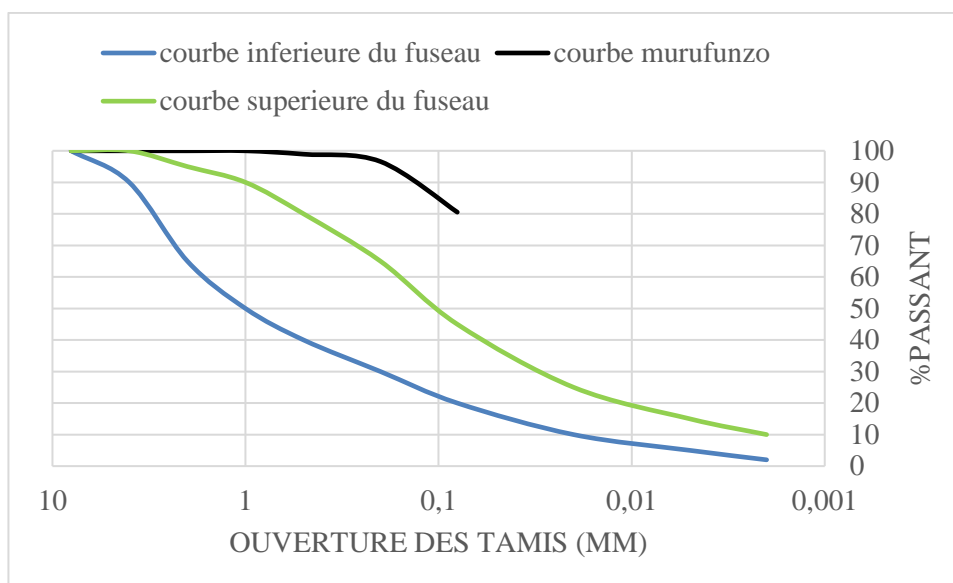
### III.3.2. la composition granulométrique

Les résultats de l'analyse granulométrique sont représentés par la courbe granulométrique présentée sur la figure III.6.



*Figure III. 6 Courbe granulométrique de l'échantillon du sol de MURUFUNZO*

L'échantillon dans le fuseau granulométrique est présenté sur la figure III.7.



*Figure III. 7 courbe granulométrique de l'échantillon du sol de MURUFUNZO dans le fuseau.*

La courbe en noir représente la courbe obtenue par l'analyse granulométrique par tamisage du sol de MURUFUNZO. La carrière de MURUFUNZO ne peut pas être utilisée pour la fabrication de blocs des terres comprimées car la courbe granulométrique de l'échantillon ne s'inscrit pas dans le fuseau granulométrique proposée par CRA Terre.

Il nécessite des corrections pour qu'il soit utilisé dans cette application en équilibrant la répartition des grains qui les constituent ou soit en le stabilisant.

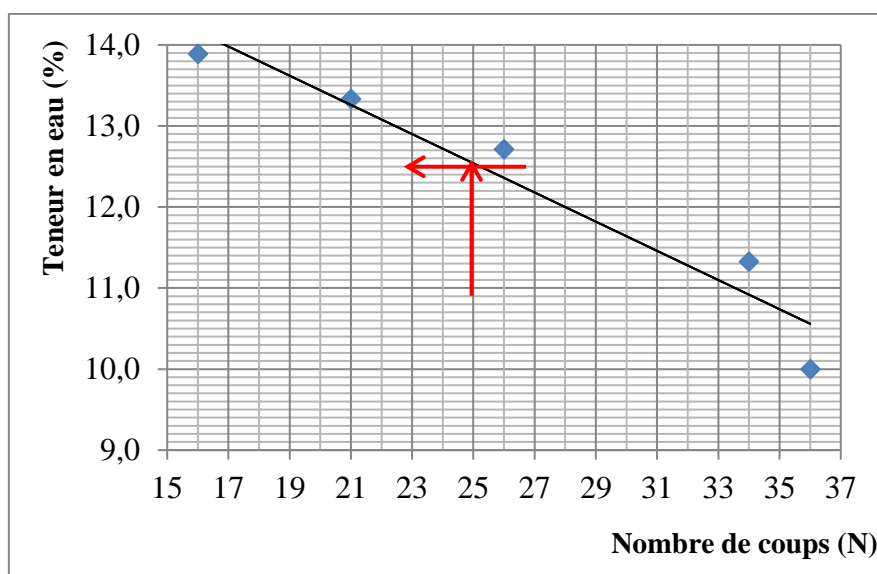
### III.3.3 limites d'Atterberg

Les résultats de la limite d'Atterberg de l'échantillon du sol de MURUFUNZO sont visualisés dans le tableau III.7 et sur la figure III.8.

**CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE**

*Tableau III. 7 Résultats de la limite d'Atterberg de l'échantillon du sol de MURUFUNZO*

Nombre de coups		16	21	26	34	36
Teneur en eau (%)		13,9	13,3	12,7	11,3	10,0
Limite de liquidité "WL" (%)		12,3				
Limite de plasticité "WP" (%)		10,7				
Indice de plasticité "IP" (%)		1,5				
Classification		Sol peu plastique				
		Sol fin				



*Figure III. 8 Droite de progression issus de l'essai Limite d'Atterberg de l'échantillon du sol de MURUFUNZO*

Le sol de MURUFUNZO ne présente pas des caractéristiques recommandées ainsi que les caractéristiques acceptées pour la fabrication des blocs des terres comprimées car son  $IP = 1,5\%$  ne se trouve pas dans les intervalles conformément au tableau I.16.

L'échantillon du sol de MURUFUNZO dans le fuseau de plasticité est représenté sur la figure III.9.

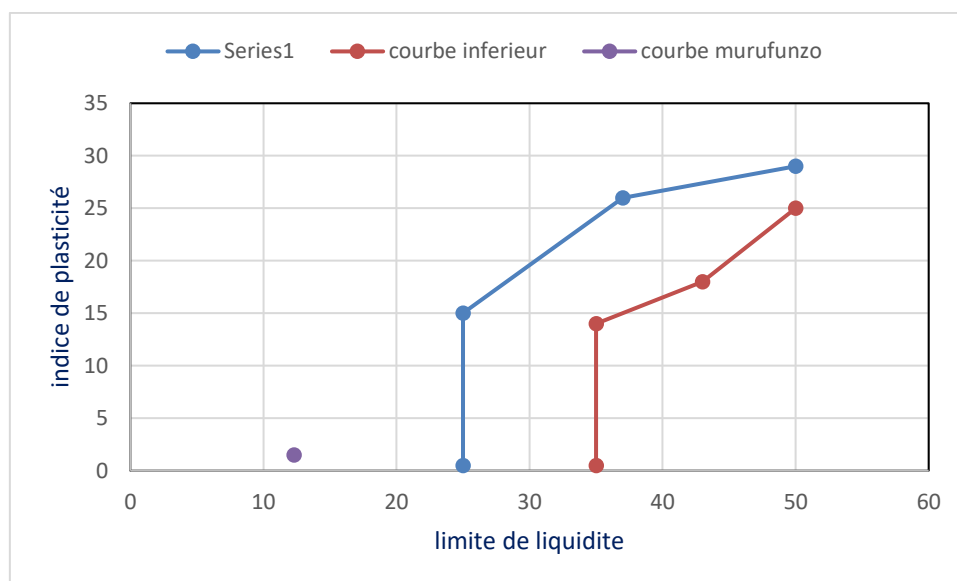


Figure III. 9 résultat de l'échantillon du sol de MURUFUNZO dans le Fuseau de plasticité

En complétant les résultats de l'analyse granulométriques, le sol de MURUFUNZO ne convient pas pour la fabrication de blocs des terres comprimées car l'échantillon ne s'inscrit dans le fuseau de plasticité proposé par CRATerre. Il nécessite des corrections afin d'améliorer sa plasticité qui est tellement faible.

### III.3.4. Valeur au bleu de méthylène

Le sol de MURUFUNZO est limoneux car sa valeur au bleu de méthylène de 0,75 est entre 0,2 à 2,5 conformément au tableau II.4 et contient l'argile du type kaolinite car sa surface spécifique est de  $15,69 \frac{m^2}{g}$  est entre 10 à  $20 \frac{m^2}{g}$ .

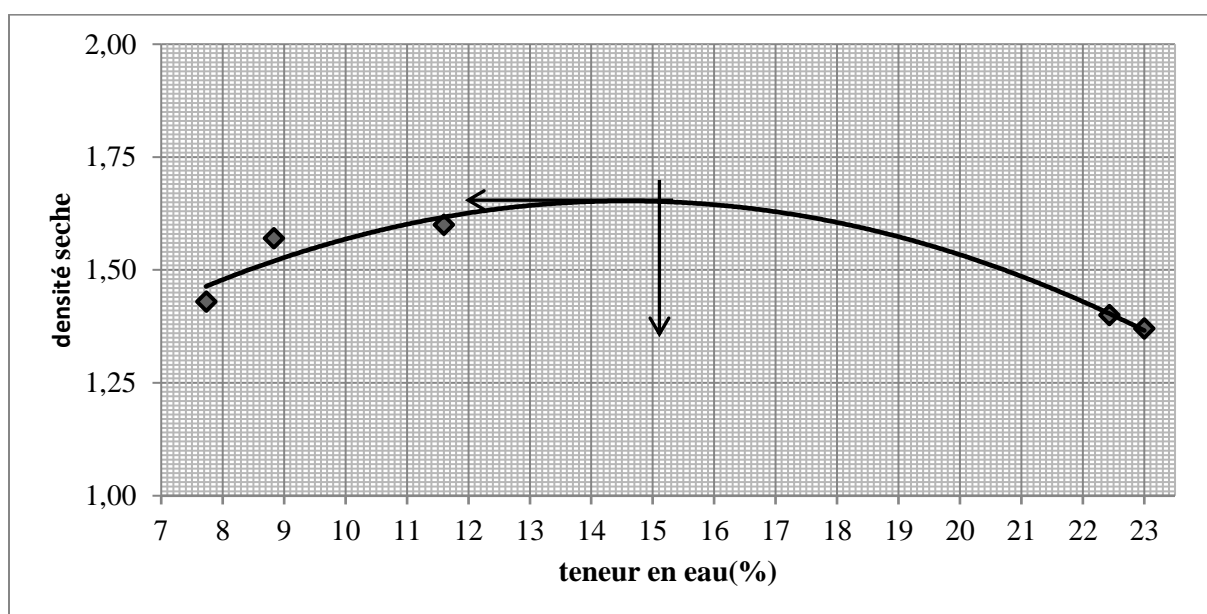
### III.3.5 l'essai Proctor normal

Les résultats de l'essai Proctor sont donnés dans le tableau III.8 et sur la figure III.10.

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Tableau III. 8 Résultats issus de l'essai Proctor normal de l'échantillon du sol de  
MURUFUNZO*

W (%)	7,7	8,8	11,6	22,4	23,0
$\varphi_d$ (T/m <sup>3</sup> )	1,43	1,57	1,60	1,40	1,37
$\varphi_{d \text{ max}}$ (T/m <sup>3</sup> )	1,6				
W opt. (%)	11,6				



*Figure III. 10 La courbe Proctor normale de l'échantillon du sol de MURUFUNZO*

La teneur en eau optimale et la densité sèche sont successivement de 11,6% et  $1,6 \frac{T}{m^3}$ .

Le résultat de compactage sera assez médiocre car la densité sèche maximale de  $1602 \frac{kg}{m^3}$  est comprise entre  $1650$  et  $1760 \frac{kg}{m^3}$ . Conformément au tableau I.3, c'est un sol fin à limon peu plastique, lœss, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arène peu plastique.

Le tableau III.9 présente la synthèse des résultats

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Tableau III. 9 Synthèse des résultats de l'échantillon du sol de KITOVU et de l'échantillon du sol de MURUFUNZO.*

		Unités	Sol KITOVU		Sol MURUFUNZO
Essais	Teneur en eau	%	W	2,086	5,1
	Limite d'Atterberg	%	$W_L$	49,5	12,3
		%	$W_P$	22,5	10,7
		%	$I_P$	27,1	1,5
		%	$I_L$	-0,7	-3,7
		%	$I_C$	1,74	4,8
	Essai Proctor	$\frac{kg}{m^3}$	$\varphi_{d\ opt}$	2029	1602
		%	$W_{opt}$	6,5	11,6
	Valeur au bleu de méthylène		VBS	0,9	0,75
	Masse volumique absolue	$\frac{kg}{m^3}$	$\varphi_{abs}$	2481,19	1975,91
	Masse volumique apparente	$\frac{kg}{m^3}$	$\varphi_{app}$	1388,12	946,79
	Masse volumique sèche	$\frac{kg}{m^3}$	$\varphi_d$	1359,75	946,51
Indice des vides	-	E	0,82	1,08	
Porosité	-	N	0,45	51,9	
Degré de saturation		$S_r$	0,063	0,19	

### **III.4. CONCLUSION PARTIELLE**

Les résultats obtenus à travers les essais dans le laboratoire sur les différents échantillons ainsi que les différentes interprétations qui y sont relatives ont été présenté dans ce chapitre.

On a trouvé certaines décisions pour nos différentes carrières conformément à la convenance pour la fabrication des blocs des terres comprimées. Le sol de KITOVU convient pour cette application car le résultat de la granularité (courbe granulométrique obtenue par tamisage) et ceux de la limite d'Atterberg (indice de plasticité et la limite de liquidité) s'inscrivent dans le fuseau granulométrique et de plasticité mais malgré cela nécessitant des corrections en ajoutant du sable ou des graviers pour sa granulométrie ; contrairement au sol de MURUFUNZO qui ne convient pas pour cette application car son échantillon ne s'inscrit pas dans les différents fuseaux (fuseau granulométrique et fuseau de plasticité).

## CONCLUSION GENERALE

Ce travail de fin de cycle a porté sur la caractérisation du sol de KITOVU et de MURUFUNZO à Jomba en vue de la fabrication de blocs des terres comprimées. Pour arriver aux résultats, la détermination des paramètres d'état notamment la teneur en eau naturelle, les masses volumiques apparente et absolue, les masses volumiques sèche, l'indice des vides, la porosité et le degré de saturation ainsi que les essais d'identification physique notamment les essais de l'analyse granulométrique par tamisage, les essais de la limite d'Atterberg, les essais de la valeur au bleu de méthylène et afin un essai d'identification mécanique notamment l'essai Proctor normal ont été nécessaires. Pour l'échantillon du sol de KITOVU, on a trouvé la teneur en eau naturelle de 2,086%, la masse volumique apparente de  $1388,12 \frac{kg}{m^3}$ , la masse volumique absolue de  $2481,19 \frac{kg}{m^3}$ . De même pour les essais d'identification physique notamment l'essai de la limite d'Atterberg, on a trouvé la limite de liquidité de 49,5%, la limite de plasticité de 22,5 %, l'indice de plasticité de 27,1, l'indice de liquidité de -0,7 ; l'indice de consistance de 1,74. la valeur au bleu de méthylène de 0,9 a été déterminée. Pour l'essai Proctor normal, la densité sèche maximale de  $2029 \frac{kg}{m^3}$  correspondant à la teneur en eau optimale de 6,5% a été déterminée. Pour l'échantillon du sol de MURUFUNZO, on a eu la teneur en eau naturelle de 5,1%, la masse volumique apparente de  $946,79 \frac{kg}{m^3}$ , la masse volumique absolue de  $1975,91 \frac{kg}{m^3}$ . Pour les essais d'identification physique notamment la limite d'Atterberg, on a trouvé la limite de liquidité de 12,3% ; la limite de plasticité de 10,7% ; l'indice de plasticité de 1,5 ; l'indice de liquidité de -3,7 ; l'indice de consistance de 4,8. La valeur au bleu de méthylène de 0,75 a été déterminée. Pour l'essai d'identification mécanique notamment l'essai Proctor normal, on a trouvé la densité sèche maximale de  $1602 \frac{kg}{m^3}$  correspondant à la teneur en eau optimale de 11,6%.

Au regard de ces résultats, la classification suivant le guide de terrassement nous prescrit que le sol de KITOVU est un argile et argile mameuses, limons très plastiques de la sous classe  $A_3$  (matériau acceptable pour l'utilisation dans la fabrication de blocs des terres comprimées mais demandant une attention particulière car il est relativement actif) et il est acceptable dans la fabrication de blocs des terres comprimées car ses caractéristiques granulométriques s'inscrivent partiellement dans le fuseau granulométrique et totalement dans le fuseau de

## CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN TERRE COMPRIMEE

plasticité proposé par CRATERre ; il de mande donc des petites corrections en ajoutant des sables et des graviers pour la granularité afin de produire de blocs de bonne performances .

Contrairement du sol de MURUFUNZO qui, malgré sa classification suivant le guide de terrassement routier comme un sol fin à limon peu plastique, lœss, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués et arène peu plastique (sous classe  $A_1$ ) ne convient pas d'être utilisé dans la fabrication de blocs des terres comprimées car l'échantillon ne s'inscrit pas dans le fuseau granulométrique et de plasticité.

Nous suggérerons donc aux futurs chercheurs qui traiterons sur le même sujet, d'améliorer les paramètres du sol de MURUFUNZO en le stabilisant ou en incorporation des gros granulats afin qu'il soit utilisé dans cette application et augmenter les nombres des échantillons pour chaque site et d'améliorer les caractéristiques granulométriques du sol de KITOVU en ajoutant des sables et des graviers afin de produire de blocs de bonnes performances.

Ce travail est illimité car nous nous sommes basé sur l'identification physiques (sans l'analyse granulométrique par sédimentométrie ) et un essai mécanique (essai Proctor normal) ; c'est ainsi que nous encourageons aux futurs chercheurs d'expérimenter les autres types d'essais et faire la confection afin de mener les autres essais mécaniques qui n'ont pas été réalisés entre autres l'essai à la compression , à la flexion et autres essais qui peuvent être réalisés en vue de produire les blocs des terres comprimées des bonnes qualités et plus performants et de faire l'essai de l'analyse granulométrique par sédimentométrie afin de compléter la courbe obtenue par tamisage.

## Bibliography

- [1] In Mango-Itulamy, L.A., «Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs à terre comprimée,» 2019.
- [2] PAULUS, jehanne, CONSTRUCTION EN TERRE CRUE :DISPOSITIONS QUALITATIVES,CONSTRUCTIVES ET ARCHITECTURALES, université de liège-faculté des sciences appliquées, 2014-2015, p. 48.
- [3] B.Y.e.D Amine, «Caracterisation des sols allégés avec les résidus de bois,» 2017.
- [4] M.KHADIDJA, contribution à l'évaluation des caracteristiques physico-chimiques et la qualité du sol dans la région constantine;, memoire de master, 2022.
- [5] N.N.Ernestine, Etude des propriétés physiques et mécaniques des sols fins de la collectivitéde BASHALI, travail de fin de cycle, 2014.
- [6] D.H.E, Introduction à la mecanique des sols, algerie: licence géologie appliquée, specialité géotechnique, 2020.
- [7] K.MEFTAHA, cours et exercices de mécanique des sols, 2008.
- [8] N. N. P. 1.-3. &GTR, «classification des sols».
- [9] G.W.NSEKABUHORO, «Ccontribution à la caracterisation du sol de rutshuru en vue de l'utilisation comme materiaux de remblais routier dans la construction de la RN4 du tronçon rutshuru-bunagana,» 2022-2023.
- [10] K. .. e. M. B. ALI, COURS & EXERCICES DE GEOTECHNIQUE 1 Selon, 2008.
- [11] K.M.e.M.B.ALI,, cours et exercices de geotechnique 1 selon Eurocodes 7, 2008.
- [12] M.B.NELLY, Etude comparative des caracteristiques du sol par stabilisation au ciment et à la chaux:application du sol de buganda à minova, ULPGL/GOMA: mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du diplome d'ingenieur rcivil, 2020-2021.
- [13] MEFTAHA, K., cours et exercices corriges de mecanique des sols, 2008, p. 13.
- [14] Anger , R., Approche granulaire et colloïdale du materiau terre pour la construction (these de doctorat), lyon ,INSA,lyon, 2011.
- [15] pesson,P., La vie dans les sols, paris: gauthier villars, 1971.

- [16] Rigassi V., blocs de terre comprimée,volume I.Manuel de production, Grenoble: CRATERRE EAG, 1995.
- [17] H. G. Houben, traité de construction en terre, marseille;parenthèse : 2ème éd.1995; 3ème éd.2006, 1989.
- [18] R. V., Blocs de terre comprimée,volume I .Manuel de production, Grenoble: CRATERRE EAG, 1995.
- [19] Weaver,C.E., clays muds, and Shales, Amsterdam: elsevier, 1989.
- [20] Michot A., caractéristique thermophysiques des matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400 degré celcius., France: thèse de doctorat université de limoges, 2008.
- [21] Moore,D.M,&Reynolds,R.C., Diffraction and the identification and Analysis of clay minerals, Oxford: oxford university press, 1989.
- [22] C.BISHWEKA, caractérisation de sols lateritiques de BWEREMANA en vue de fabrication de blocs des terres comprimés en republique democratique du congo, yaounde,camerounais ;thèse de doctorat de lecole techniaue de : yaounde I, 2022.
- [23] GATE, Blocs de terre comprimée.element de base., allemagne: CRATerre, 1991.
- [24] Rigassi V., Blocs de terre comprimée .Volume I.Manuel de production .p 104, allemagne: CRATerre-EAG,Friedrich & sohn,Braunschweig, 1995.
- [25] H.Houben,S. Matuck, F. Vitoux, p. 155.
- [26] P'kla, A. et Rigassi, V., caractérisation en compréssion simple des blocs de terre comprimee (btc) : Application aux maçonnerie 'btc -mortier de terre et blocs de terre comprimee, lyon, Grenoble: institut national des sciences appliquées de lyon, CRATERREEAG, 2002,1995.
- [27] M.Moeuvus,R.Angel et L.Fontaine , hygro- thermomechanical properties of earthen materials for construction, Terra: XIth international conference of the study and conservation of earthen Architecturale heritage, 2012.
- [28] CRATerre, Blocs de terre comprimee:guide de bonnes pratiques, Editions CRATerre, 2009.
- [29] N. 9.-0. AFNOR, «sols : reconnaissance et essais- Analyse granulométrique - Méthode par tamisage a sec apres lavage,» mars 1996.

- [30] N. P. 9.-0. AFNOR, sols : reconnaissance et essais- Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage, france, mars 1996.
- [31] N. P. 9.-0. AFNOR, Essais de compactage d'un materiau(essai proctor normal et essai proctor modifie).
- [32] reconnaissance etessais geotechnique:essais au laboratoire sur le sol ;parti 4:determination de la distribubion granulometrique des particules, ISO/TC ,ISO 17892-4, p. 182.
- [33] N. P. 9. 500, «Mission d'ingenierie géotechnique classification et specification ;norme française ,AFNOR,» France, 2006.
- [34] «Norme : NF P 18-554 et NF P 18-555 et N A 255».
- [35] Pr. baheddi Med., les tp geotechniques appliquees.
- [36] N. P. 9.-0. AFNOR, Essai PROCTOR, france, Octobre 2014.
- [37] D.H sleiman, Analyse granulometrique par sedimentometrie, tripoli: universite libanaise ,departement de genie civil,faculte de genie, 12 janvier 2015.
- [38] Moriset,s, 11000 ans d'architecture de terre, unpublished document, 2018.
- [39] TerraLyon, actes du XIIe congrès mondial sur les architectures terre,, france: Lyon , 2016.
- [40] Dannels, A, Monumental earthen Architecture at La joya,veracruz,Mexico,crystal River, Foundation for advancement of mesoamercan studies: le 4 avril 2019 from <http://www.famsi.org/reports/07021>, 2008.
- [41] Angel&Fontaine,L, batir en terre,du grain de sable à l'architecture, paris,: berlin, 2009.
- [42] MARIOTTE, La terre , matériau de construction, 1982.
- [43] D.miracourt, stabilisation de la terre crue pour application en brique de terre comprimé au burkinafaso, liege, 2016-2017.
- [44] [https://www.researchgate.net/figure/Abaque-de-Casagrande-utilisable-dans-la-classification-LPC-des-sols-fins\\_fig10\\_341714091](https://www.researchgate.net/figure/Abaque-de-Casagrande-utilisable-dans-la-classification-LPC-des-sols-fins_fig10_341714091).
- [45] «AFNOR XP P 13-901:blocs de terre comprimée pour murs et cloisons,» 10 2001.
- [46] «AFNOR XP P 13-901:blocs de terre comprimée pour murs et cloisons,» 10 2001.
- [47] J. M. &. YOUSSEFIAN, Essai au bleu de méthylène et classification géotechnique des sols.

# Annexes

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 1 teneur en eau sol de KITOVU*

Poids tare	Poids h	Poids sec	Diff (ph, Ps)	Rap (diff (ph, Ps) et Ps)	W%	Somme W	Moye W%
14,59	22,92	22,3	0,62	0,027802691	2,78027		
14,94	22,46	22,08	0,38	0,017210145	1,72101	6,265989433	2,0886631
14,66	22,49	22,1	0,39	0,017647059	1,76471		

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 2 Analyse granulométrique par tamisage sol de KITOVU*

Tamis(mm)	Refus partiel(g)	Refus cumule (g)	Refus cumulé(%)	%tamisât
12,5	0	0	0	100
10	10,8	10,8	0,432	99,568
8	40	50,8	2,032	97,968
6,3	14	64,8	2,592	97,408
5	17	81,8	3,272	96,728
4	46	127,8	5,112	94,888
3,15	96	223,8	8,952	91,048
2,5	123	346,8	13,872	86,128
2	145	491,8	19,672	80,328
1,6	190	681,8	27,272	72,728
1,25	185	866,8	34,672	65,328
1	169	1035,8	41,432	58,568
0,8	113	1148,8	45,952	54,048
0,63	113	1261,8	50,472	49,528
0,5	111	1,3728	54,912	45,088
0,4	85	1457,8	58,312	41,688
0,315	70	1527,8	61,112	38,888

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

0,25	70	1597,8	63,912	36,088
0,2	49	1646,8	65,872	34,128
0,16	51	1697,8	67,912	32,088
0,125	48	1745,8	69,832	30,168
0,1	31	1776,8	71,072	28,928
0,08	24	1800,8	72,032	27,968

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 3 limites d'Atterberg sol de KITOVU*

Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	16	23	28	32	36	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B	C	
Poids total humide (g)	22,3	20,55	18,76	24,66	25,6	14,6	17,23	14,86	
Poids total sec (g)	19	18,1	16,5	22,5	23,5	14,4	17,2	14,84	
Poids de la tare (g)	13	13,5	12,1	18	18,1	14	17	14	
Poids net d'eau (g)	3,32	2,45	2,26	2,16	2,14	0,2	0,03	0,02	
Poids net du matériau sec (g)	6	4,6	4,4	4,5	5,4	0,4	0,2	0,84	
Teneur en eau (%)	55,33	53,26	51,36	48,00	39,63	50,00	15,00	2,38	
			26	49,5		WP =	22,5		
				IP = 27,1					

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 4 L'essai Proctor normal sol de KITOVU*

			ESSAIS PROCTOR SOL 2 KITOVU				
Eau ajoutée	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%
Poids total(kg)	5,966	6,12	6,15	6,354	6,364	6,264	6
Poids du moule en (kg)	4,324	4,324	4,324	4,324	4,324	4,324	4,324
Diamètre du moule en cm	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
Hauteur du moule en cm	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8
Volume moule en cm	944,91863	944,91863	944,91863	944,91863	944,91863	944,91863	944,91863
Masse humide échantillon	1,642	1,796	1,826	2,03	2,04	1,94	1,676

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

Masse volumique échant(g)	1,73772	1,9007	1,93244	2,1483	2,15892	2,05309	1,7737
Densité sèche	1,67047	1,8215	1,85134	2,018	2,02906	1,91163	1,61627
Teneur en eau %	4,025	4,34	4,38	6,45	6,47	7,49	9,74

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 5 L'analyse granulométrique par tamisage sol de MURUFUNZO*

Tamis(mm)	Refus partielle (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	% tamisât
1,25	0		0	100
1	0	0	0	100
0,8	20	20	0,666666667	99,3333
0,63	6	26	0,866666667	99,1333
0,5	6	32	1,066666667	98,9333
0,4	8	40	1,333333333	98,6667
0,315	10	50	1,666666667	98,3333
0,25	16	66	2,2	97,8
0,2	36	102	3,4	96,6
0,16	72	174	5,8	94,2
0,125	118	292	9,733333333	90,2667
0,1	146	438	14,6	85,4
0,08	145,6	583,6	19,45333333	80,5467

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 6 la limite d'Atterberg sol de KITOVU*

Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	16	21	26	34	36	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B	C	
Poids total humide (g)	23	24,2	23,65	22,77	21,3	16	14,9	14,7	
Poids total sec (g)	22	23	22,9	22	21	15,8	14,7	14,5	
Poids de la tare (g)	14,8	14	17	15,2	18	12,5	13	14,3	
Poids net d'eau (g)	1	1,2	0,75	0,77	0,3	0,2	0,2	14,3	
Poids net du matériau sec (g)	7,2	9	5,9	6,8	3	3,3	1,7	14,3	
Teneur en eau (%)	13,89	13,33	12,71	11,32	10,00	6,06	11,76	14,3	
			26	<b>12,3</b>		<b>WP =</b>	<b>10,7</b>		
				<b>IP = 1,5</b>					

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 7 L'essai Proctor normal sol de MURUFUNZO*

Eau ajoutée	2%	4%	6%	8%	10%	12%
Poids total(kg)	5,668	5,784	5,944	6,014	5,946	5,9
Poids du moule en (kg)	4,324	4,324	4,324	4,324	4,324	4,324
Diamètre du moule en cm	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1	10,1
Hauteur du moule en cm	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8	11,8
Volume moule en cm	944,9186	944,9186	944,9186	944,9186	944,9186	944,9186
Masse humide échantillon	1,344	1,46	1,62	1,69	1,622	1,576
Masse volumique échant(g)	1,422	1,545	1,714	1,789	1,717	1,668
Densité sèche ( $\frac{g}{cm^3}$ )	1,324	1,434	1,575	1,602	1,402	1,375
Teneur en eau %	7,417582	7,738095	8,834586	11,66667	22,43108	23,10606

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 8 Données pour le fuseau granulométrique proposées par CRaTerre*

Diamètre(mm)	%passant	
	min	max
8	100	100
4	90	100
2	65	95
1	50	90
0,5	40	80
0,2	30	65
0,08	20	45
0,02	10	25
0,005	5	15
0,002	2	10

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 9 Données pour fuseau de plasticité ainsi que les données des résultats*

$W_L$ Inf	$W_L$ Sup	$I_P$ Sup	$I_P$ Inf	$W_L$ Int	$I_P$ Int
35	25	0,5	0,5	13,52	13,39
35	25	15	14	42,52	40,39
43	37	26	18		
50	50	29	25		

CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 10 Echantillon et pèse*



CARACTERISATION DU SOL DE JOMBA EN VUE DE LA FABRICATION DES BLOCS EN  
TERRE COMPRIMEE

*Annexe 11 Balance de précision*

