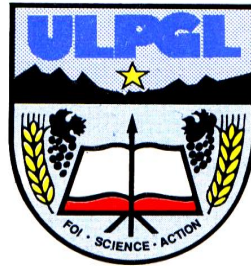


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS



BP 368/GOMA

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

**ETUDE COMPARATIVE ENTRE LA STABILISATION DES
BRIQUES EN TERRES COMPRIMEES (BTC) PAR LE
CIMENT ET PAR LA CHAUX ETEINTE**

*Mémoire présenté et défendu en vue de l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur civil,*

Option : structures et ouvrages d'art

Présenté par : MUGANGU SALAMA Salem

Dirigé par : Prof.Dr.Ir NKIEDIEL ALAIN Akwir

Encadré par : Ir KATUMBI KOKO Pascal

ANNEE ACADEMIQUE 2021- 2022



EPIGRAPHE

« Vouloir construire l'avenir sans affronter les erreurs du passé, autant vouloir construire un mur sans briques et sans mortier ».

Alain LEBLAY



DEDICACES

A Nos chers parents MUGANGU Félicien et KIZUNGU Immaculé

MUGANGU Salama Salem

REMERCIEMENTS

Nous ne pouvons pas affirmer que ce travail est un fruit uniquement de nos propres efforts. Il a bénéficié des apports des plusieurs personnes animées par la bonne volonté. Ainsi il est de notre devoir de remercier tous ceux qui de près ou de loin nous ont soutenus d'une manière ou d'une autre.

De prime abord, nous adressons nos sincères remerciements à l'Eternel Dieu Tout Puissant pour le souffle de vie et la santé qu'il n'a cessé de nous garantir tout au long de nos recherches pour ce travail, que l'honneur Lui soit rendu.

Nos sincères remerciements s'adressent ensuite à toutes les autorités académiques ainsi qu'à tout le corps enseignant de l'Université Libre des Pays des Grands-Lacs pour leur encadrement et formation.

Nous remercions infiniment le Professeur Docteur Ingénieur NKIEDIEL ALAIN Akwir et ingénieur Civil Pascal KOKO KATUMBI qui ont respectivement accepté de diriger et encadrer le présent travail et cela en dépit de leurs diverses occupations.

Nos remerciements s'adressent à nos chers parents MUGANGU FELICIEN et Immaculé KIZUNGU MALIZA, à nos frères et sœurs Benjamin MUGANGU ;Josué MUGANGU, Rachel MUGANGU, Ruth MUGANGU, Neville MUGANGU.

Nous remercions infiniment le Docteur ingénieur Cherif BISHWEKA de par son expertise et ses multiples orientations nous avons pu produire un bon travail.

Nous remercions également l'Ingénieur ASIFIWE BAHATI David qui au-delà de ses responsabilités multiples, nous a donné des orientations de qualité pour parfaire ce travail. Enfin, nous remercions tous nos amis et camarades, BAGULA Deo, MUHAMBU FAIDA Jonathan KAMBALE MAGHAVIRO jacques. Ne prétendant pas avoir touché à toutes les couches qui ont contribué à l'aboutissement du présent travail, que tous ceux qui de loin ou de près ont contribué à son l'aboutissement trouvent dans cette phrase l'expression de notre profonde gratitude.

MUGANGU Salama Salem

RESUME

Plus d'un tiers des habitants du globe vit aujourd'hui dans des habitats en terre, car cela présente de nombreux avantages environnementaux, sociaux et culturels. La présente recherche a porté sur l'étude comparative entre la stabilisation des briques en terres comprimées (BTC) par le ciment et la chaux éteinte ; Pour y arriver les différents essais d'identification, de caractérisation physique, la confection des briques et les essais de compression ont été faits au laboratoire de l'ULPGL. L'objectif est de montrer que l'ajout de stabilisant peut apporter une amélioration notable dans la résistance de briques en terre. La classification nous a montré que le matériau était acceptable mais présentant un peu trop ses fines ou trop des fines nécessitant un ajout de la fraction 0/5 du sable concassé au sol K1 et 0/8 aux sols K2 et K3. Et l'influence de la teneur en stabilisant ont été étudiées avec plusieurs dosages à la chaux et au ciment dont un essai à 4%, à 6% et un dernier à 8% pour une période d'essai de compression fixée à 14 jours. Les mesures de la résistance à la compression ont été faites par la méthode d'écrasement des briques. A l'issue de cette étude, après écrasements à 14 jours de tout le types de briques, les briques non stabilisées ont donnés la contrainte maximale de 2.71 Mpa, les briques stabilisés au ciment à 4%,6% et 8% pour les sols K1' K2' K3' ont donnés respectivement des résistances à la compression de 4.31 MPa, 4.83 MPa, 4.48 Mpa, quant aux briques stabilisés à la chaux des sols K1' K2' K3', les valeurs des résistances à la compression sont respectivement de 1.52 MPa; 1.13 MPa ;1.51 MPa. Les résultats obtenus à l'essai d'absorption ont montré que le ciment et la chaux sont des bons stabilisant car ils réduisent l'absorption par capillarité des BTC en fonction du taux de stabilisation. Nous pouvons donc dire que la résistance à la compression des BTS par le ciment est supérieure à celle des BTS à la chaux et augmente en fonction du dosage, vu ce qui précède, il est observé que les BTS au ciment donnent des bonnes valeurs en terme des résistances en compression que les BTS à la chaux pour les sols de NYANGEZI.

Mots clés : *ciment, chaux éteinte, BTC, stabilisation*

ABSTRACT

More than a third of the world's inhabitants now live in earthen habitats, as this has many environmental, social and cultural benefits. This research focused on the comparative study between the stabilization of compressed earth bricks (BTC) by cement and slaked lime; To achieve this, the various identification and physical characterization tests, the making of the bricks and the compression tests were carried out in the ULPGL laboratory. The objective is to demonstrate that the addition of stabilizer can bring a significant improvement in the resistance of earth bricks. The classification showed us that the material was acceptable but presenting a little too many fine requiring an addition of the fraction 0/5 of the crushed sand to the soil K1 and 0/8 to the soil K2 and K3 and influence of the stabilizer content were studied with several lime and cement dosages including a test at 4%, 6% and a final one at 8% for a compression test period set at 14 days. The compressive strength measurements were made by the brick crushing method. At the end of this study, after crushing at 14 days of all types of bricks, the unstabilized bricks gave a maximum stress of 2.71 Mpa, the bricks stabilized with cement at 4%, 6% and 8% for the K1' K2' K3' soils respectively gave compressive strengths of 4.31 MPa, 4.83 MPa, 4.48 Mpa, as for the lime-stabilized bricks of K1' K2' K3' soils, the compressive strength values were respectively 1.52 MPa; 1.13MPa;1.51MPa. The results obtained in the absorption test showed that cement and lime are good stabilizers because they reduce the absorption by capillarity of BTC according to the stabilization rate. We can therefore say that the compressive strength of the BTS by cement is higher than that of the BTS with lime and increases according to the dosage, considering the above; it is observed that the BTS with cement give good values in terms of compressive strengths than lime BTS for NYANGEZI floors.

Keywords: *cement, slaked lime, BTC, stabilization*

SOMMAIRE

EPIGRAPHE	i
DEDICACES	ii
REMERCIEMENTS	iii
RESUME	iv
ABSTRACT	v
SOMMAIRE.....	vi
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES ANNEXES	xi
SIGLES ET ABREVIATIONS	xii
INTRODUCTION GENERALE	xiii
Chapitre I REVUE DE LA LITTERATURE	1
I.1 AU NIVEAU GEOLOGIQUE.....	1
I.2 AU NIVEAU MICROSCOPIQUE	2
I.3 IDENTIFICATION DES SOLS.....	3
I.3.1 Les grains	3
I.3.2 Les argiles	4
I.4 CLASSIFICATION DES SOLS	5
I.4.1 nomenclature GTR (norme NF P 11-300).....	5
I.5 CONSTRUCTION EN TERRE	8
I.5.1 Le bloc de terre comprimée.....	11
I.6 STABILISATION DE LA TERRE.....	20
I.4.1 Définition	20
I.4.2 Objectif.....	21
I.4.3 Procédés	22



I.4.4 Stabilisation par le ciment	23
I.4.5 Stabilisation par la chaux	24
I.7 CONCLUSION PARTIELLE.....	26
Chapitre II METHODES ET MATERIELS.....	27
II.1 PRESENTATION DU MILIEU D’ETUDE.....	27
II.2 ESSAI SUR LE SOL	28
II.2.1 Les essais in situ.....	28
II.2.2 Les essais de laboratoire	31
II.3 CONCLUSION PARTIELLE	51
Chapitre III PRESENTATION ET DISCUSION DES RESULTATS	53
III.1 ESSAI D’IDENTIFICATION	53
III.1.1 Essai in situ.....	53
III.1.2 Essai de laboratoire.....	53
III.2 CORRECTION DU MATERIAU	65
III.2.1 Adéquation de la terre et classification des matériaux pour la production des BTC.	70
III.4 COMPRESSION SECHE.....	75
III.5 ABSORPTION CAPILLAIRE.....	80
III.6 CONCLUSION PARTIELLE	81
CONCLUSION GENERALE	82
Références	84
ANNEXES.....	87

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I-1 Cycle géologique [6].....</i>	<i>2</i>
<i>Figure I-2 Les 3 phases d'un sol et leur représentation schématique [7]</i>	<i>2</i>
<i>Figure I-3 classification des matériaux suivant leur nature, GTR [31].....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I-4 Roue des techniques de construction en terre [18].....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I-5 cycle de production des blocs de terre comprimé [1].....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I-6 différents produits de blocs de terre comprimé [20]</i>	<i>13</i>
<i>Figure I-7 fuseau granulaire des terres utilisables pour les BTC [10].....</i>	<i>16</i>
<i>Figure I-8 diagramme de plasticité du sol [1]</i>	<i>17</i>
<i>Figure I-9 résistance en compression minimale admissible pour BTC suivant les normes [23] [4] [22].....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II-1 cartographie du milieu d'étude [29].</i>	<i>27</i>
<i>Figure II-2 cartographie de l'échantillonnage</i>	<i>28</i>
<i>Figure II-3: essai in situ</i>	<i>30</i>
<i>Figure II-4 aspect visuel du sol de la carrière de KALUA (Nyangezi).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure II-5 matériels utilisés au laboratoire</i>	<i>32</i>
<i>Figure II-6 série des tamis pour l'analyse granulométrique</i>	<i>34</i>
<i>Figure II-7 les matériel de la sédimentométrie</i>	<i>36</i>
<i>Figure II-8 Matériels de l'essai de consistance des sols</i>	<i>40</i>
<i>Figure II-9 essai au bleu de méthylène</i>	<i>42</i>
<i>Figure II-10 moule à BTC</i>	<i>45</i>
<i>Figure II-11 presse hydraulique.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure II-12 cure de séchage [17]</i>	<i>49</i>
<i>Figure II-13 dispositif d'immersion [26].....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III-1 composition granulométrique sol K1</i>	<i>54</i>
<i>Figure III-2 composition granulométrique sol K1</i>	<i>55</i>
<i>Figure III-3 composition granulométrique sol K1</i>	<i>55</i>
<i>Figure III-4 composition granulométrique sol K2</i>	<i>56</i>
<i>Figure III-5 composition granulométrique du sol K2</i>	<i>56</i>
<i>Figure III-6 composition granulométrique du sol K2</i>	<i>57</i>
<i>Figure III-7 composition granulométrique du sol K3</i>	<i>57</i>
<i>Figure III-8 composition granulométrique du sol K3</i>	<i>58</i>
<i>Figure III-9 composition granulométrique du sol K3</i>	<i>58</i>

<i>Figure III-10 limite de liquidité du sol K1</i>	59
<i>Figure III-11 limite de liquidité du sol K2</i>	60
<i>Figure III-12 limite de liquidité du sol</i>	60
<i>Figure III-13 fuseau granulométrique des sols</i>	61
<i>Figure III-14 fuseau de plasticité des sols</i>	63
<i>Figure III-15 composition granulométrique du sol K1'</i>	66
<i>Figure III-16 composition granulométrique du sol K1'</i>	66
<i>Figure III-17 composition granulométrique du sol K1'</i>	67
<i>Figure III-18 composition granulométrique du sol K2'</i>	67
<i>Figure III-19 composition granulométrique du sol K2'</i>	68
<i>Figure III-20 composition granulométrique du sol K2'</i>	68
<i>Figure III-21 composition granulométrique du sol K3'</i>	69
<i>Figure III-22 composition granulométrique du sol K3'</i>	69
<i>Figure III-23 composition granulométrique du sol K3'</i>	70
<i>Figure III-24 fuseau limite de granulométrie</i>	71
<i>Figure III-25 limite de liquidité du sol K1'</i>	71
<i>Figure III-26 limite de liquidité du sol K2'</i>	72
<i>Figure III-27 limite de liquidité du sol K3'</i>	72
<i>Figure III-28 fuseau limite de plasticité</i>	73
<i>Figure III-29 les contraintes de compression des BTC témoin</i>	76
<i>Figure III-30 les contraintes de compression des BTC stabilisé à base du ciment et de la chaux</i>	77
<i>Figure III-31 masse volumique des BTC témoin</i>	79
<i>Figure III-32 masse volumique des BTC témoin et celles stabilisé au ciment et à la chaux.</i>	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1. Classifications des grains [9] et [10]	4
Tableau I-2 Classification des sols fins (extrait de la norme NF P 11-300), GTR [31].....	7
Tableau I-3 Brève description de quelques techniques traditionnelles de construction en terre crue [19]	9
Tableau I-4: types des presses pour la production des BTC [10]	14
Tableau I-5: performances technique des bloc de terre comprimée [1]	15
Tableau I-6: dimensions des BTC [10].....	15
Tableau I-7 proportion des différents éléments [23].....	16
Tableau I-8: utilisation des blocs de terre comprimé [16].....	18
Tableau I-9 mécanisme de stabilisation. [26]	23
Tableau II-1 coordonnées des points d'échantillonnage	28
Tableau II-2 Tableau des hauteurs effectives permettant de calculer rapidement le diamètre équivalent [27], [26] [25].....	38
Tableau II-3 spécification des limites d'atterberg [22]	40
Tableau II-4 formulation et dosage sol K1', ciment (chaux), sable concassé.....	47
Tableau II-5 formulation et dosage sol K2', ciment (chaux), sable concassé.....	47
Tableau II-6 formulation et dosage sol K3', ciment (chaux), sable concassé.....	47
Tableau II-7 nombre des blocs confectionné.....	48
Tableau III-1 les teneur en eau des sols	53
Tableau III-2 les masses volumique des sols	54
Tableau III-3 caractéristique de consistance des sols.....	59
Tableau III-4 les valeurs au bleu des sols.....	60
Tableau III-5 caractéristique des liants utilisés	61
Tableau III-6 caractérisation des sols	64
Tableau III-7 caractéristique physiques des sols.....	65
Tableau III-8 caractérisation des sols	74
Tableau III-9 période de cure et nombre des blocs écrasés sèches.....	75
Tableau III-10 Comparaison des propriétés mécaniques en compression.....	76
Tableau III-11 différence en terme de pourcentage entre les BTC témoin et BTS à base du ciment	77
Tableau III-12 différence en terme de pourcentage entre BTS à base du ciment et celles à base de la chaux.....	77
Tableau III-13 les masses volumique des BTC.....	78
Tableau III-14 tableau des propriétés physique des BTC.....	80

LISTE DES ANNEXES

<i>annexe 1 analyse granulométrique du sol K1</i>	<i>A</i>
<i>annexe 2 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K1</i>	<i>B</i>
<i>annexe 3 limite d'atterberg du sol K1</i>	<i>C</i>
<i>annexe 4 analyse granulométrique du sol K2</i>	<i>D</i>
<i>annexe 5 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K2</i>	<i>E</i>
<i>annexes 6 limite d'atterberg du sol K2.....</i>	<i>F</i>
<i>annexe 7 analyse granulométrique du sol K3</i>	<i>G</i>
<i>annexe 8 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K3</i>	<i>H</i>
<i>annexe 9 limite d'atterberg du sol K3</i>	<i>I</i>
<i>annexe 10 analyse granulométrique du sol K1'</i>	<i>J</i>
<i>annexe 11 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K1'</i>	<i>K</i>
<i>annexe 12 limite d'atterberg du sol K1'</i>	<i>L</i>
<i>annexe 13 analyse granulométrique du sol K2'</i>	<i>M</i>
<i>annexe 14 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K2'</i>	<i>N</i>
<i>annexes 15 limite d'atterberg du sol K2'</i>	<i>O</i>
<i>annexes 16 analyse granulométrique du sol K3'</i>	<i>P</i>
<i>annexes 17 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K3'</i>	<i>Q</i>
<i>annexes 18 limite d'atterberg du sol K3'</i>	<i>R</i>
<i>annexes 19 illustration de la prise de mesure sous le ménisque</i>	<i>S</i>
<i>annexes 20 abaque de la détermination du facteur F</i>	<i>S</i>
<i>annexes 21 Nomogramme d'après CASAGRANDE de calcul des diamètres équivalent.....</i>	<i>T</i>
<i>annexes 26 résultat des essais en compression.....</i>	<i>V</i>
<i>annexe 27 courbe d'évolution de la charge en fonction du temps</i>	<i>V</i>
<i>annexe 28 les BTC confectionnées</i>	<i>W</i>

SIGLES ET ABBREVIATIONS

AG : analyse granulométrique

BTC : Bloc ou Brique de terre comprimée

BTS : Blocs de terre stabilisée

CRATERre : Centre international de la construction en terre

EAG : Ecole d'Architecture de Grenoble (France)

TEO : Teneur en eau optimale

MPa : Mēga pascal

ρ_t : masse volumique apparente de la terre sèche

ρ_s : masse volumique apparente du sable

C : taux de stabilisation en ciment ou en chaux

V_t : volume terre

V_s : volume sable

P_C : poids du ciment

H_r : hauteur effective

P : pourcentage des grains

T : tamisât au tamis module AFNOR21

R : lecture au densimètre

C : taux de stabilisation du ciment et ou de la chaux

D : Diamètre équivalent

R_C : lecture corrigé

NF P : la normalisation française

GTR : guide de terrassement routier

K_i : échantillon du « sol » i de kalua (i= 1,2,3)

K_i' : échantillon du « sol i » de kalua stabilisé physiquement (i= 1,2,3)

K_i'-N : échantillon du « sol i » de kalua stabilisé chimiquement avec un taux de stabilisation N (i= 1,2,3) ; (N= 0,4,6,8)

INTRODUCTION GENERALE

La terre crue est utilisée pour la construction des bâtiments depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète. Plus d'un tiers de la population du globe vit aujourd'hui dans des habitats en terre [1].

Après avoir été abandonnée avec l'avancement des matériaux de construction industriels, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés suite aux techniques de production variées, les BTC offrent des avantages économique, social et environnemental. On dénombre des très nombreux modes de construction qui traduisent l'identité des lieux et des cultures ; adobes, pisé, torchis, façonnage, bauge, blocs, comprimés, des blocs taille... Les techniques de production en terre varient du procédé le plus rudimentaire, manuel, artisanal à celui le plus sophistiqué, mécanisé, industrialisé [2].

En effet, Au-delà des avantages ci haut cités que présentent les BTC contrairement aux matériaux tel que le béton, l'acier, le bois... qui coutent chers, favorisent l'émission des gaz CO₂ et la déforestation ; les BTC présentent une mauvaise adaptation à l'humidité et à l'eau qui sont les premiers ennemis de la construction.

De nombreuses méthodes de fabrication de briques en terre ont été mises en œuvre en Afrique, en relation avec le niveau de développement de l'habitat en milieu urbain et rural. Parmi celles-ci, les procédés de compactage et de stabilisation chimique de la terre par adjonction d'un stabilisant notamment les liants hydrauliques : ciment, la chaux et les liants bitumineux et les fibres végétales Etc... confèrent à la brique des propriétés physiques et mécaniques déterminantes pour son comportement vis-à-vis des sollicitations qui lui sont imposées.

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. Bien que le problème de la résistance de la brique de terre ait toujours intéressé les ingénieurs en bâtiment, il reste encore difficile à résoudre dans un cadre général.

Eu égard ce qui précède, nous nous sommes posé les questions de savoir premièrement, si les stabilisants sont susceptibles d'augmenter la résistance à la compression des BTC, deuxièmement si les stabilisants peuvent parvenir à diminuer l'absorption par capillarité.

Conformément aux questions présentées ci-haut, nous avons émis les hypothèses selon lesquelles les stabilisants amélioreraient la résistance à la compression et l'absorption par capillarité.

En effet, ce travail de recherche se propose de faire une étude comparative de blocs de terre comprimée stabilisée d'une part par le ciment et d'autre part par la chaux éteinte. Ce travail de recherche se propose de comparer l'effet de stabilisation de ciment à celui de la chaux sur la modification de la résistance des blocs de terre comprimée. La comparaison porte essentiellement sur les résistances mécaniques des briques en fonction des durées de cure (7 ou 14, 28 et ou 45jours). [3]

Spécifiquement le présent travail se propose de faire d'abord une caractérisation du sol de NYANGEZI en vue de la production des BTC. Ensuite, il s'agira d'effectuer la formulation ainsi que la production des BTC stabilisées physiquement et chimiquement. Enfin, une caractérisation mécanique et physique par rapport aux exigences de la norme et faire une comparaison entre les BTC stabilisées à base du ciment et celles stabilisées à base de la chaux.

Les études menées par MAHAMAT S. montrent que la résistance à la compression des BTS stabilisées à base du ciment et à la chaux augmente en fonction de la durée de la cure et du taux de stabilité. Selon ses études, la résistance à la compression était de 9,15MPa, équivalent à une teneur en stabilisant du ciment de 12% et pour une durée de cure de 45 jours.

NGOWI et All ont montré que la résistance à la compression augmente en fonction du taux de stabilisant, mais aussi la résistance du ciment est deux fois plus grande que la résistance de la chaux. Suite à leurs expériences sur le sol de Tsabong pour 15% du ciment et la chaux, la résistance à la compression était respectivement de 10,64MPa et 3,74MPa.

Cependant, une bonne maîtrise des techniques d'identification des terres orientera les choix en matière de stabilisation. L'utilisation du ciment ou de la chaux dans la stabilisation de la terre en général est un domaine assez connu grâce aux importants travaux de laboratoire et réalisations sur le terrain. Ces travaux ont permis de connaître les mécanismes de réactions entre la terre et ces liants, leurs effets sur les propriétés de la terre. D'après ces études, il a été défini que la chaux convient plus à une terre avec un taux d'argile non négligeable et le ciment est plutôt meilleur avec une terre sableuse.

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

Hormis l'introduction et la conclusion, ce travail est subdivisé en trois chapitres, Le premier, traite de la revue de la littérature notamment les généralités sur les sols, les constructions en terres et la stabilisation des terres ; le deuxième, traite de la méthodologie utilisée pour l'échantillonnage, les essais d'identification relatives aux matériaux BTC ; et enfin le troisième présente les résultats et leurs interprétations.

Chapitre I REVUE DE LA LITTERATURE

INTRODUCTION

Ce chapitre premier du travail va développer de notions sur les sols comme leur origine et formation, les constituants du sol, l'identification et classifications des sols tout en mettant un accent sur les sols argileux. Par suite, seront abordés de points tels que la caractérisation mécanique des sols, les constructions en terres ainsi que la stabilisation de la terre.

Le sol tel que connu possède un processus de formation qui lui est spécifique. Ainsi, cette section présente l'origine et la formation de sols en définissant les termes génériques. Elle précise aussi les constituants d'un sol.

Le sol est une formation naturelle de surface, à structure meuble et d'épaisseur variable, résultant de la transformation de la roche-mère sous-jacente sous l'influence de divers processus, physicochimiques et biologiques, au contact de l'atmosphère et des êtres vivants [4]

I.1 AU NIVEAU GEOLOGIQUE

Les sols sont constitués par des mélanges, en proportion variable, de quatre sortes d'éléments : les graviers, les sable, les silts et les argiles. Le comportement de chacun de ces éléments lui est spécifique et, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité, certains changent de volume, et d'autres non. Les deux premiers éléments sont stables et les deux autres instables. La terre est définie comme la couche d'épaisseur variable de matière meuble disponible sur la surface terrestre. Cette fine couche est issue de la dégradation des roches mères par des procédés d'altération sur des périodes géologiques. A l'épreuve des années d'érosion causée par le vent, la pluie, le soleil, Les roches solides se fragmentent progressivement pour former des grains de plus en plus petits, les sédiments. Les matières organiques présentes dans le sol contribuent également à sa dégradation. A travers l'eau, la faune et la flore propres au sol, la terre subit une constante migration verticale des éléments solubles. L'ensemble de ces facteurs engendrent des transformations importantes des sols, phénomène que l'on appelle pédogénèse.

Les sédiments vont s'agglomérer par la suite pour former des roches sédimentaires après plusieurs milliers d'années. Cette seconde métamorphose de la matière s'appelle la diagénèse. Le matériau s'inscrit ainsi dans un cycle géologique naturel ; nous pouvons le voir tel que représenté à la *figure I.1* [5].

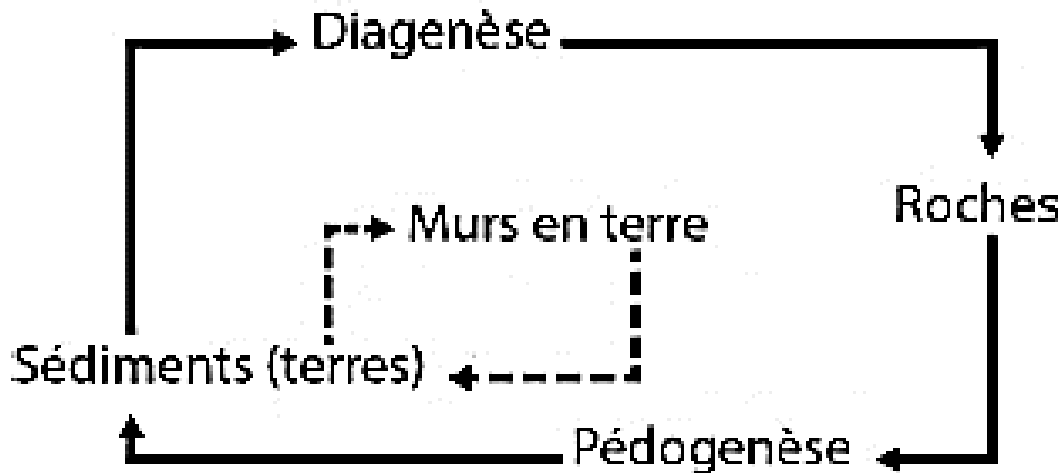


Figure I-1 : Cycle géologique [6]

I.2 AU NIVEAU MICROSCOPIQUE

La partie microscopique de la terre est constituée par nature de différentes phases. La première est la phase liquide, contenant majoritairement de l'eau et quelques corps en solution. La seconde est la phase gazeuse, qui contient essentiellement de l'air. Enfin, la phase solide comprend des matières minérales et organiques insolubles dans l'eau. Sur la *figure I.2*, nous retrouvons les trois phases d'un sol et leur représentation schématique.

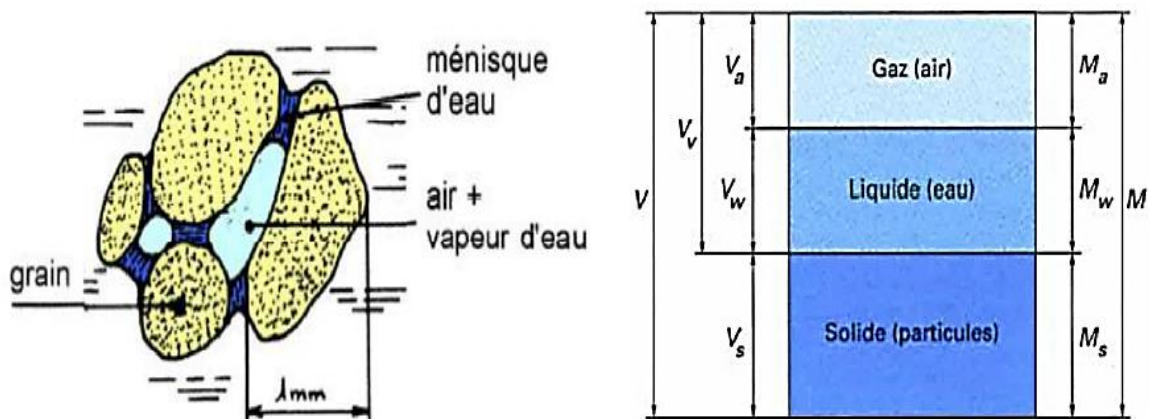


Figure I-2 : Les 3 phases d'un sol et leur représentation schématique [7]

V_s : volume des grains solides ; V_a : volume d'air ; V_w : volume d'eau ; V_v : volume des vides ;
 M_a : masse d'air ; M_w : masse d'eau ; M_s : masse des grains solides.

L'air ne joue pas un rôle prépondérant, et on cherche à réduire son incorporation dans les terres. L'eau par contre est un facteur important et se présente sous plusieurs formes. L'eau libre est mobile par gravitation ou capillarité en fonction des paramètres thermo hydriques. L'eau interstitielle est contenue dans les pores fins où la capillarité la retient, et peut être éliminée par

séchage en étuve.

Les matières minérales sont issues de l'altération de la roche mère et forment la partie mécanique du sol. Elles sont des fragments de la roche initiale et des minéraux silicatés ou calcaires. Ce sont celles-ci qui forment le matériau principal de construction et que l'on nommera terre crue pour la suite. Les éléments minéraux sont généralement majoritaires dans le sol. Selon leur état, on peut les classer en deux sous-catégories [8]:

- ✚ Minéraux non dégradés : semblables à la roche mère, ils sont constitués des graviers, sables et silts,
- ✚ Minéraux dégradés : ils ont été fortement altérés et forment par leur taille réduite ($2\mu\text{m}$), une pâte collante en présence d'eau. On les dénomme colloïdes de par la propriété collante qu'ils confèrent à la terre. Ils sont principalement constitués d'argiles.

I.3 IDENTIFICATION DES SOLS

Identifier un sol c'est déterminer un ensemble de propriétés physiques, mécaniques ou chimiques qui permettent de le caractériser. Ces propriétés sont déterminées par des essais simples et rapides appelés essais d'identification, qui conduisent à une description précise et chiffrée du sol. Une description plus détaillée est nécessaire car des sols, même semblables à l'œil nu, peuvent avoir des comportements mécaniques très différents. D'où l'importance d'effectuer des essais d'identification des sols [9]

I.3.1 Les grains

Les sols sont constitués de différentes proportions de quatre types de matériaux sous forme de grains. On retrouve dans un ordre granulométrique décroissant les graviers, les sables, les limons et les argiles. Ces quatre types de grains se comportent de façon différente vis-à-vis de paramètres extérieurs comme l'hygrométrie. Les graviers et les sables sont stables, tandis que les limons et argiles subissent des variations liées à leur environnement. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire la capacité à résister à une humidité et à un dessèchement sans changement de propriétés, revêt une importance fondamentale pour un matériau de construction. Ces matériaux sont issus de la désagrégation de la roche-mère. Le *tableau I.1* donne la classification des grains des sols.

Tableau I-1. Classifications des grains [9] et [10]

		Taille	
		1	2
Cailloux		2mm<D<20mm	2mm à 20mm
Gravier		0,2mm<D<2 mm	20 mm à 2 mm
Sable	Gros Sable	60µm<D<200µm	2mm à 0,2mm
	Sable fin		0,2mm à 0,02mm
Silts		2µm<D<60µm	0,02mm à 0,002mm
Argiles		D<2µm	Inférieur à 0,002mm

I.3.2 Les argiles

On donne généralement deux définitions au terme argile, l'une granulométrique, la seconde minéralogique. [11].

- D'un point de vue granulométrique, on considère généralement que le terme argile englobe toutes les particules inférieures à 2 micromètres. En réalité, cette classification granulométrique regroupe majoritairement des argiles et des oxydes métalliques, mais également des particules de quartz et de calcaire ainsi que de la silice plus ou moins hydratée. On peut aussi trouver des colloïdes dans les particules plus grandes que 2 micromètres. C'est pourquoi cette définition granulométrique, bien qu'étant un bon indicateur de la teneur en argile d'un sol, est à prendre avec précaution car elle cache la grande variabilité de comportement des différentes natures minéralogiques qui induisent d'immenses différences dans la réaction du matériau vis-à-vis de l'eau [12].
- D'un point de vue minéralogique les argiles sont généralement composés des phyllo silicates hydratés formés par l'association de feuillets, ceux-ci sont basés sur un ensemble de tétraèdres de silice SiO₄.

Ces tétraèdres partagent trois sommets entre eux suivant un plan dit hexagonal. Le sommet restant est partagé avec un octaèdre AlO₆, Il existe différentes combinaisons de tétraèdre et octaèdre suivant le type d'argile [13]

On retiendra cette dernière définition car ce sont bien les feuillets d'argiles qui sont à l'origine de la cohésion du matériau terre [14]. La distance interfoliaires sépare deux feuillets successifs. Les feuillets d'argile composés de plusieurs couches d'oxyde tétraédrique et octaédriques montrent qu'il y a 4 types d'argiles selon leur comportement vis-à-vis de l'eau, on a les kaolinites, les chlorites, les smectites, les illites qui regorgent les latérites. Les argiles étant le liant pour les matériaux terre au même titre que le ciment pour le béton il possède une plasticité élevée car il se déforme rapidement sous des contraintes plus ou moins élevées. [15]

I.4 CLASSIFICATION DES SOLS

La classification des sols se fait selon divers paramètres tout en se basant sur la géométrie de ceux-ci. Elle consiste à regrouper les sols qui ont une nature, un état et un comportement similaires par rapport à une application géotechnique particulière (routes, fondations, etc...). [17]

I.4.1 nomenclature GTR (norme NF P 11-300)

Dans cette classification on distingue 4 familles à savoir : les sols de classe A, B, C et D ; les matériaux rocheux de classe R ainsi que les sols organiques et sous-produits industriels de classe F. Les 4 classes ou familles de sols sont caractérisées comme suit

- Classe A : sols fins,
- Classe B : sols sableux et graveleux avec fines,
- Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments.
- Classe D : sols insensibles à l'eau.

Cette classification représente un réel intérêt pratique. La figure I-3 reprend le graphique de la classification GTR.

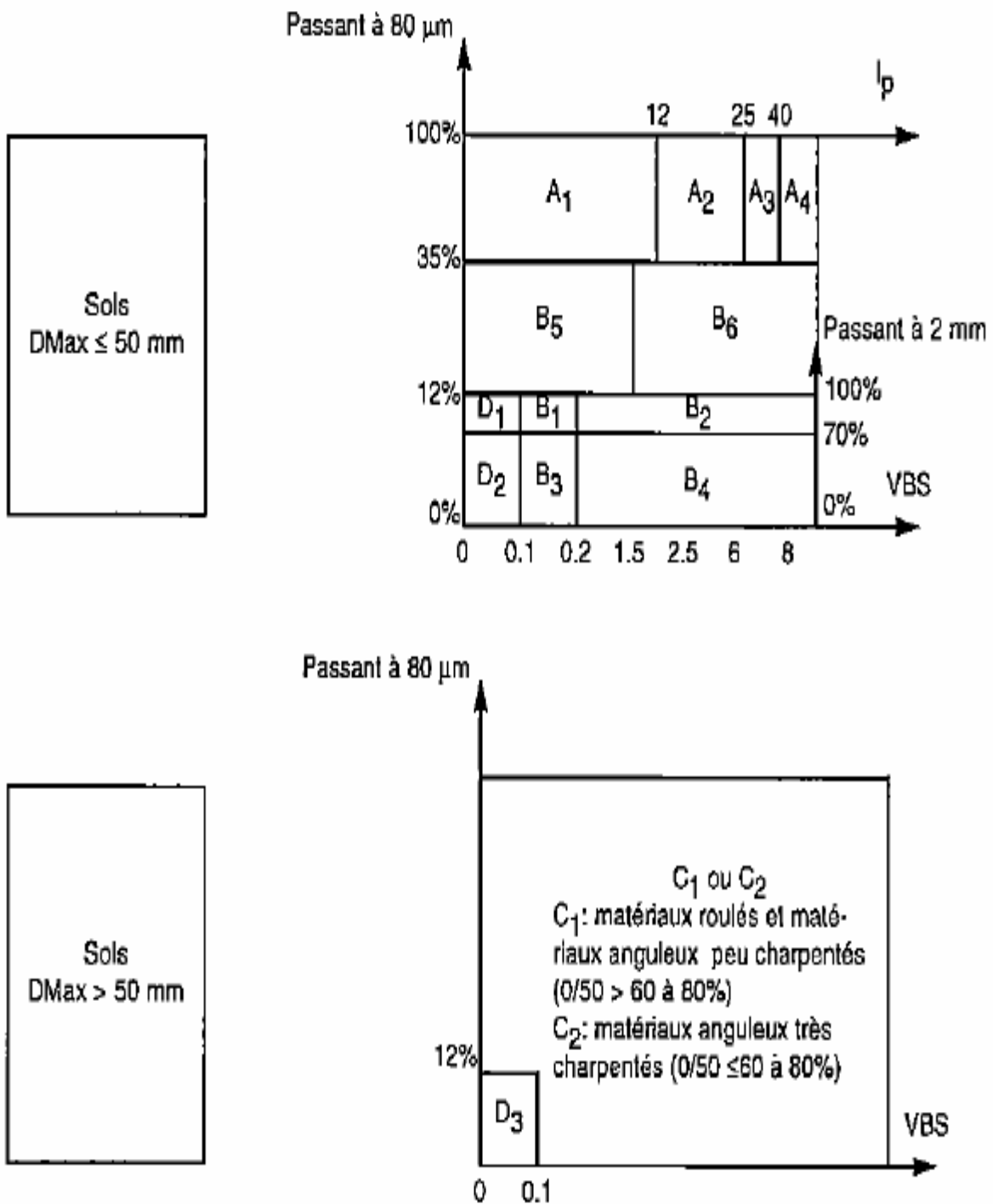


Figure I-3 classification des matériaux suivant leur nature, GTR [31]

Le tableau I.2 présente les classes des sols fin selon la classification GTR.

Tableau I-2 Classification des sols fins (extrait de la norme NF P 11-300), GTR [31]

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} ≤ 50mm et tamisat à 80µm > 35 %	A Sols Fins	I _p ≤ 12	A ₁ limons peu plastique, loess, silts alluvionnaires, sable fins peu pollués, arènes peu plastique...	W > 1.25W _{opt}	A ₁ th
				1.10 ≤ W ≤ 1.25W _{opt}	A ₁ h
				0.9W _{opt} ≤ W < 1.1W _{opt}	A ₁ m
				0.7W _{opt} ≤ W < 0.9W _{opt}	A ₁ s
				W < 0.7W _{opt}	A ₁ ts
		12 < I _p ≤ 25	A ₂ sable fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	I _c ≤ 0.9 ou W ≥ 1.3 W _{opt}	A ₁ th
				0.9 ≤ I _c < 1.05 1.1W _{opt} ≤ W < 1.3 W _{opt}	A ₂ h
				1.05 < I _c ≤ 1.2 0.9W _{opt} ≤ W < 1.1W _{opt}	A ₂ m
				1.2 < I _c ≤ 1.4 0.7W _{opt} ≤ W < 0.9W _{opt}	A ₂ s
				I _c > 1.3 ou W < 0.7 W _{opt}	A ₂ ts
		25 < I _p ≤ 40	A ₃ argiles et argiles mameuses, limons très plastiques ...	I _c ≤ 0.8 ou W ≥ 1.4 W _{opt}	A ₃ th
				0.8 ≤ I _c < 1 1.2W _{opt} ≤ W < 1.4 W _{opt}	A ₃ h
				1 < I _c ≤ 1.15 0.9W _{opt} ≤ W < 1.2W _{opt}	A ₃ m
				1.15 < I _c ≤ 1.3 0.7W _{opt} ≤ W < 0.9W _{opt}	A ₃ s
				I _c > 1.3 ou W < 0.7 W _{opt}	A ₃ ts
		I _p > 40	A ₄ argiles et argiles mameuses, très plastiques ...	Valeur seuil des paramètres d'état, à définir à l'appui d'étude spécifique	A ₄ th
					A ₄ h
					A ₄ m
					A ₄ 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.

I.5 CONSTRUCTION EN TERRE

A travers le patrimoine mondial des traditions de la construction en terre crue, on dénombre des très nombreuses techniques de construction. En effet, il existe différents modes de mise en œuvre de la terre crue. Chacune de ces techniques est née de contextes géographiques différents, de modes de vie particuliers, de coutumes différentes, de climats variés ou encore selon les matériaux disponibles. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC) mais il en existe de nombreuses autres. Chaque technique a ses spécificités et utilise une terre bien précise. En effet, chacune d'elle demande une courbe granulométrique différente ainsi que des états hydriques et hygrométriques différents. **H. Guillaud et H. Houben (1995)** ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des techniques de construction en terre représentée sur la *figure I.4*, mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité.

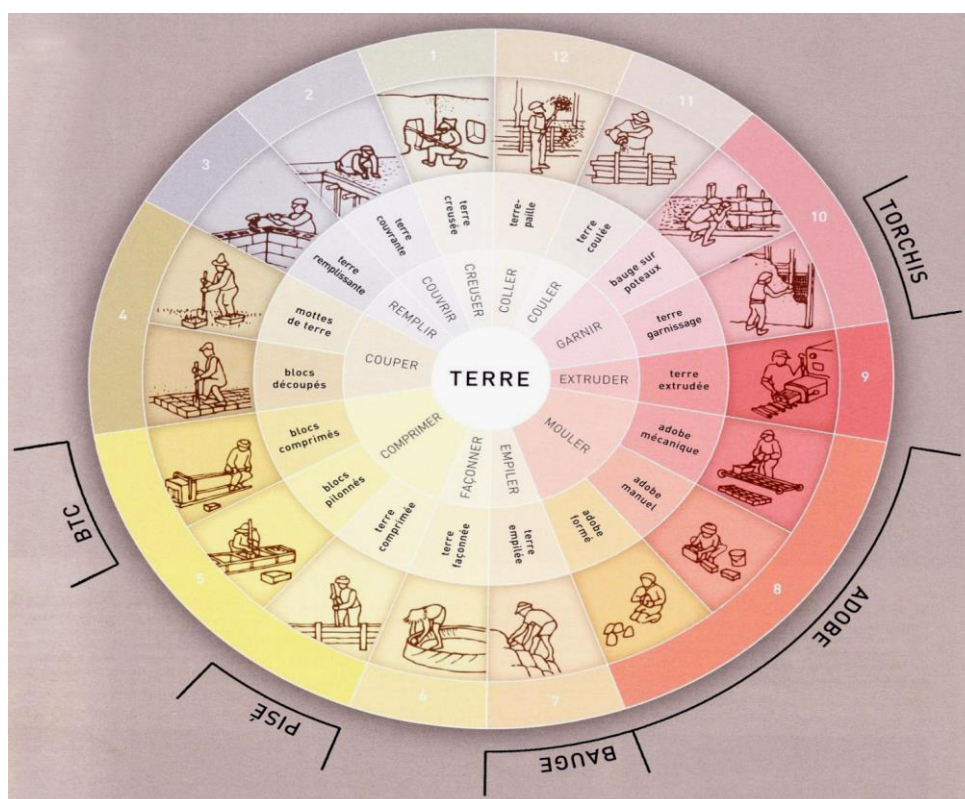







Figure I-4 : Roue des techniques de construction en terre [18]

Le tableau I.3 suivant, présente une brève description de quelques techniques traditionnelles de construction en terre crue.

Tableau I-3 Brève description de quelques techniques traditionnelles de construction en terre crue [19]

TECHNIQUE	DESCRIPTION BREVE	ILLUSTRATION
<p>Torchis</p>	<p>La terre crue dans un état très plastique, mélangée à des Fibres végétales, est appliquée en remplissage sur un Clayonnage en bois souple entre une structure en pans de bois.</p>	 <p>(Crédit photo : Constructions d'Antan)</p>



<p>Bauge</p>	<p>Mur massif en terre mise en œuvre à l'état plastique Souvent mélangée avec des fibres et empilée sans l'aide de coffrage.</p>	 <p>(Crédit photo : Atelier ALP)</p>
<p>Pisé</p>	<p>Mur en terre mise en œuvre à l'état humide, compactée à l'aide d'un piseoir par couches entre des banches</p>	 <p>(Crédit photo : PICHLER Ingénieure GmbH)</p>
<p>Adobe</p>	<p>Terre « visqueuse » (grande teneur en eau) souvent mélangée avec des fibres végétales et mise en œuvre dans un moule à briques (Cadre en bois). La brique est ensuite laissée à sécher au soleil</p>	 <p>(Crédit photo : Enrique Sevillano)</p>
<p>Briques de Terre Comprimées</p>	<p>Technique plus récente, les briques en terre mises en œuvre à l'état humide par compaction mécanique, souvent à l'aide d'une presse manuelle ou pneumatique. Souvent les BTC sont stabilisées à l'aide de liants hydrauliques (chaux ou ciment).</p>	 <p>(Crédit photo : Cycle Terre)</p>

I.5.1 Le bloc de terre comprimée

Le bloc de terre comprimée est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. L'idée de compacter la terre pour améliorer la qualité et la résistance de bloc de terre moulée est pourtant ancienne et à l'aide de piliers de bois que l'on réalisait les premiers blocs de terre comprimée. Elle a été développée aux années 50 dans le cadre d'un programme de recherche sur l'habitat rural en Colombie.

Les blocs de terre comprimée, sont fabriqués à partir de terre humide et compactée dans une presse.

Le bloc de terre comprimée peut être stabilisé. Dans ce cas on parle alors de « bloc de terre, comprimée stabilisée ». Stabiliser la terre, c'est modifier les propriétés d'un système terre eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec des applications particulières. [3]

I.5.1.1 Avantages

Les blocs de terre comprimés présentent plusieurs avantages parmi lesquels nous citons :

- **Économiques** : une diminution des matériaux importés (ciment, acier et bois) ; Une production manuelle à haute intensité de main d'œuvre qui favorise l'économie locale.
- **Écologiques** : réduction d'émission de CO₂, dont 5% de l'émission mondiale provient de la production de ciment ; réduction importante d'énergie consommée pour le transport du matériau de construction.
- **Disponibilité** : la terre est disponible en quantités quasiment illimitées dans la plupart des régions. Production possible de l'échelle artisanale à l'échelle industrielle, possibilité de produire directement sur le chantier,
- **Confort**: atténuation de l'amplitude et de la rapidité des variations climatiques à l'intérieur des bâtiments, grâce à une grande inertie thermique.
- **Qualité architecturale** : produits aux dimensions standardisées, modulaires, réguliers et précis, permet la réalisation des architectures aux murs apparents.

I.5.1.2 Cycle de production des blocs de terre comprimée

La figure I.5 donne le cycle de production des blocs de terre comprimée.

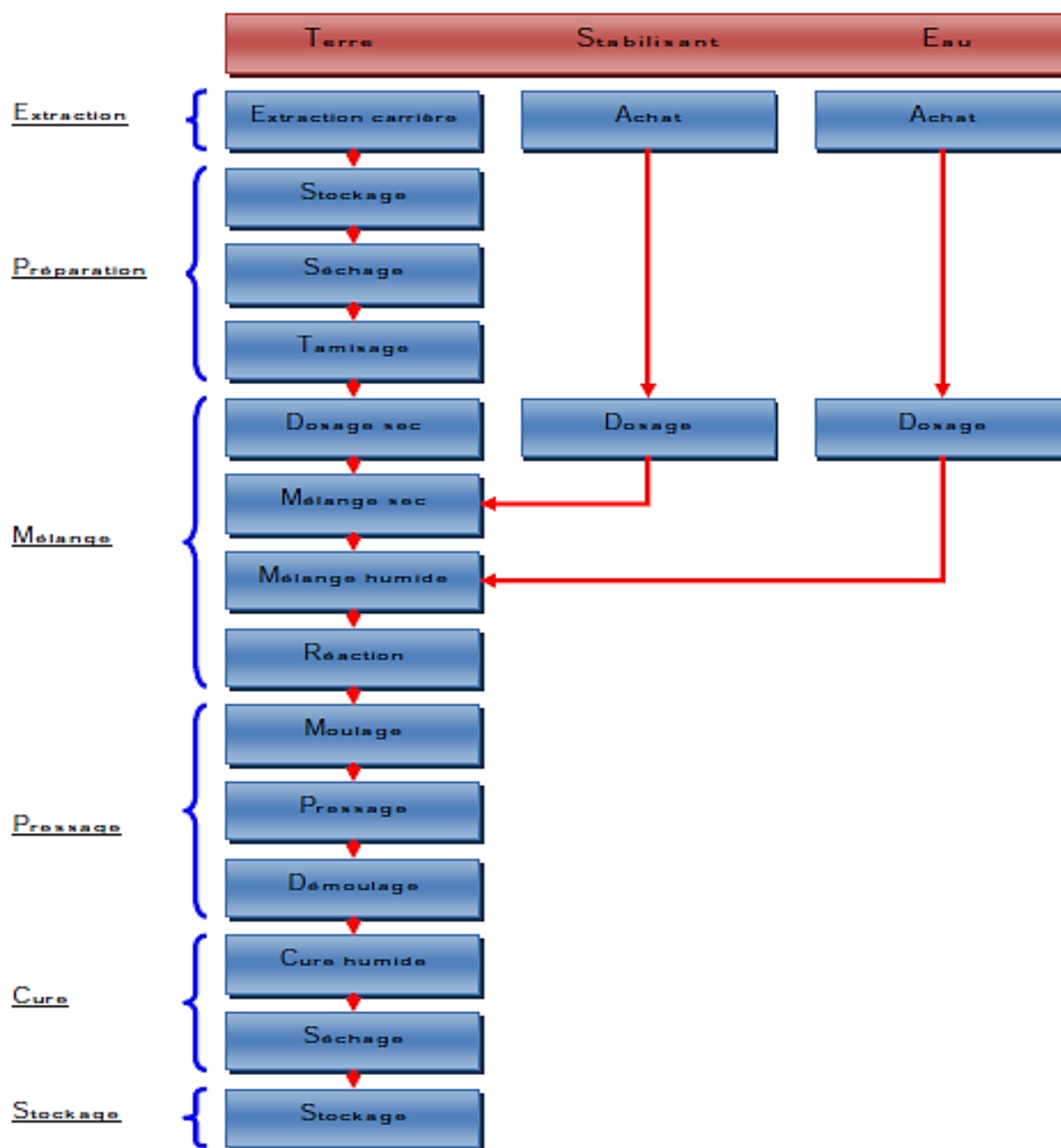


Figure I-5 cycle de production des blocs de terre comprimé [1].

I.5.1.3 Diversité des blocs de terre comprimée

Sur la figure I.6 nous retrouvons les différents produits de BTC.



Figure I-6: différents produits de blocs de terre comprimé [20]

1.5.1.4 Typologie des presses pour la production des BTC

Le BTC s'obtient par compression de la terre dans une presse, on distingue :

- ***Les presses manuelles*** : elles sont actionnées manuellement et n'effectuent que les actions de compression et de démoulage. Cette catégorie admet des presses mécanique et hydraulique.
- ***Les presses motorisées*** : elles sont actionnées par un moteur et n'effectuent que les seules actions de compression et de démoulage. Cette catégorie admet des presses mécanique et hydraulique comportant également une unité de production (préparation et évacuation des produit motorisé).

Les différents types de presse sont répertoriés dans *le tableau I.4* ci-dessous.

Tableau I-4: types des presses pour la production des BTC [10]

SYSTÈMES			CATÉGORIES DE PRESSES	CARACTÉRISTIQUES	
SOURCE D'ÉNERGIE	TRANSMISSION D'ÉNERGIE	ACTION DE COMPRESSION		PRESSIION DE COMPRESSION	RENDEMENT THÉORIQUE/h
manuelle	mécanique	statique	presses manuelles	très basse	300 à 800
	mécanique et hydraulique	statique		hyper	300 à 400
	mécanique	statique		basse	400 à 1 000
motorisée	mécanique	statique	presses motorisées	basse à moyenne	800 à 3 000
	hydraulique	statique		basse à moyenne	800 à 2 000
	mécanique	statique	unités de production foraines	basse à moyenne	800 à 3 000
	hydraulique	statique		basse à moyenne	800 à 3 000
	mécanique	statique		basse	2 000 à 15 000
	hydraulique et mécanique	statique ou dynamique		basse à hyper	1 500 à 7 500
	hydraulique	statique		unités de production fixes	basse à méga.
hydraulique et mécanique	dynamique		10 000 à 50 000		

Les pressions théoriquement appliquées au mélange et qui exprime le rapport entre la force utile et la surface sur laquelle elle est appliquée : la classification de la pression de compression est la suivante :

- ✚ Très basse pression : 1 à 2 MPa
- ✚ Basse pression : 2 à 4 MPa
- ✚ Haute pression : 4 à 6 MPa
- ✚ Hyperpression : 6 à 10 MPa
- ✚ Mégapression : 10 à 20 MPa et plus. [1]

1.5.1.5 Performances technique des BTC

Les performances techniques des BTC sont extrêmement variées. Toutes fois, une analyse de ces performances permet de dégager quatre grand types de blocs.

- Type 1 : BTC non stabilisé ;
- Type 2 : BTC stabilisé, produit dans des conditions correctes ;
- Type 3 : BTC stabilisé, produit avec soin, avec des équipements performants et faisant l'objet d'une démarche de qualité ;
- Type 4 : BTC stabilisé, produit dans des conditions industrielles exceptionnelles [1].

Le *tableau I.5* dresse une liste de performances techniques relatives à ces différents types de BTC.

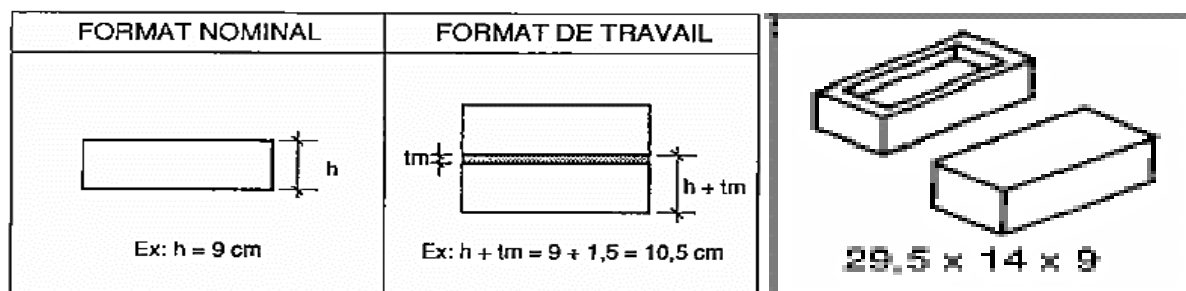
Tableau I-5: performances technique des bloc de terre comprimée [1]

PERFORMANCES TECHNIQUES DES BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE						
CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES	SYMBOLE	UNITÉ	TYPE DE BLOC DE TERRE COMPRIMÉE			
			TYPE 1	TYPE 2	TYPE 3	TYPE 4
RÉSISTANCE À LA COMPRESSION SEC À 28 JOURS (+ 40% APRES 1 AN, + 50% APRES 2 ANS)	R_c sec 28	MPa	> 2	2 4	> 4	> 12
RÉSISTANCE À LA COMPRESSION HUMIDE À 28 JOURS	R_c hum. 28	MPa	0,1 0,5	> 1	> 2	> 6
RÉSISTANCE À LA TRACTION SEC À 28 JOURS	R_t sec 28	MPa	0,5 1	0,2 0,4	1 2	> 2
RÉSISTANCE À LA FLEXION SEC À 28 JOURS	R_f sec 28	MPa	0,5 1			
RÉSISTANCE AU CISALEMENT SEC À 28 JOURS	R_c sec 28	MPa	> 0,5			
COEFFICIENT DE POISSON	μ				0,15 0,25	
MODULE DE YOUNG	E	MPa			700 7000	
MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	ρ	kg/m ³	1700 2200	1700 2200	1700 2200	> 2200
UNIFORMITÉ DES DIMENSIONS			BON	BON	EXCELLENT	EXCELLENT

I.5.1.6 Description, variété et composition

Pour réaliser une maçonnerie correcte, il est intéressant d’avoir des blocs dont la longueur varie. Ainsi, on utilise couramment les blocs (L=21,75cm) et le bloc (L=14cm). Le format le plus courant (les plus fréquent) des BTC pour une maçonnerie porteuse est généralement parallélépipédique ou prismatique de longueur (L=29,5cm), de largeur (l=14cm) et de hauteur (h=9cm). Dans le *tableau I.6*, nous présentons les dimensions des blocs de terre comprimé.

Tableau I-6: dimensions des BTC [10]



Les sols sont constitués par des mélanges, en proportions variables, de quatre sortes d’élément : les graviers, les sables, les silts et les argiles [1].

Les matériaux inertes du sol (graviers à limons) agissent comme le squelette et les colloïdes (argiles) agissent comme un liant, assimilable à un ciment léger. La structure d'une terre est donc comparable à celle du béton avec un liant différent. [21]

Voici à la *figure I.8*, une courbe approximative qui représente les sols recommandés pour la fabrication des blocs de terre comprimée.

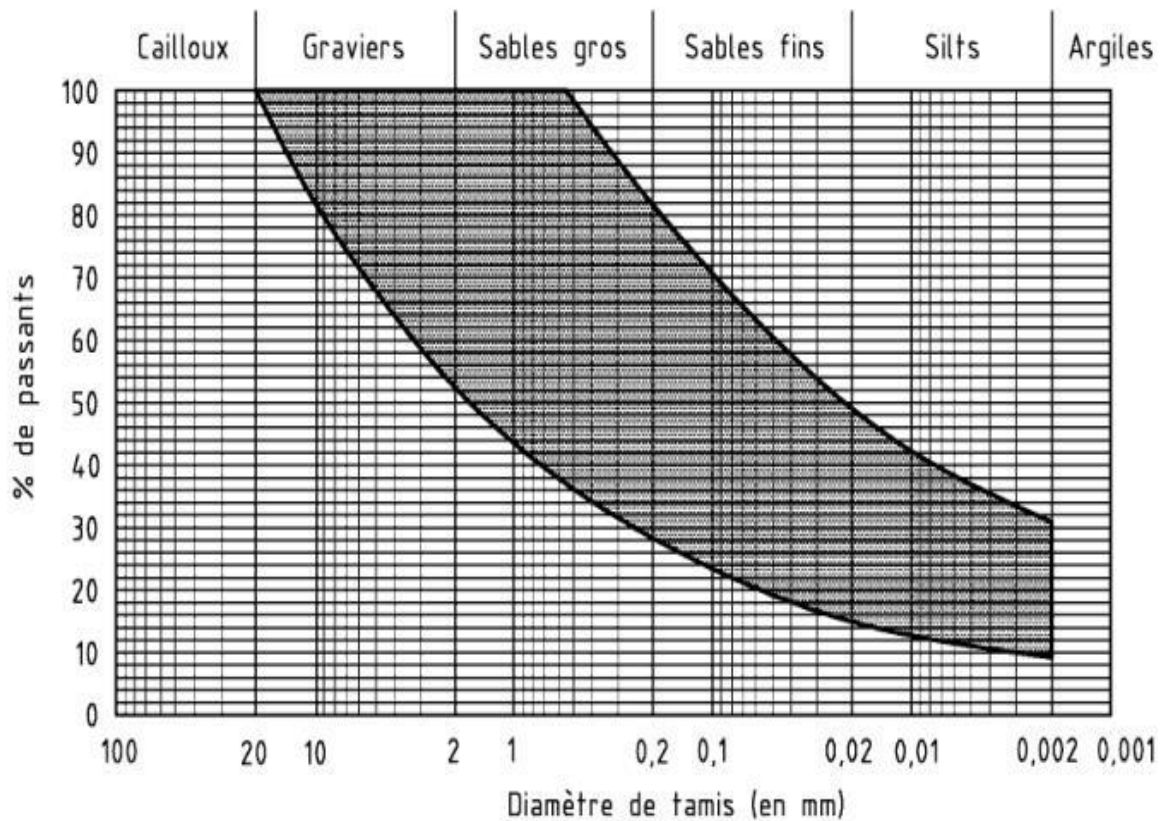


Figure I-7: fuseau granulair des terres utilisables pour les BTC [10]

Selon le type de technique utilisée, on choisira des terres avec des proportions variables d'argile, de silts, de sable et de graviers. Le *tableau I.7* présente les proportions des différents des éléments constitutifs des sols utilisables pour les BTC.

Tableau I-7 proportion des différents éléments [23]

	Graviers	Sables	Silts	Argiles
Proportion	0 à 40%	25 à 80%	10 à 25%	8 à 30%

La *figure I.9* représente le fuseau de plasticité du sol en fonction de la limite de liquidité et l'indice de plasticité.

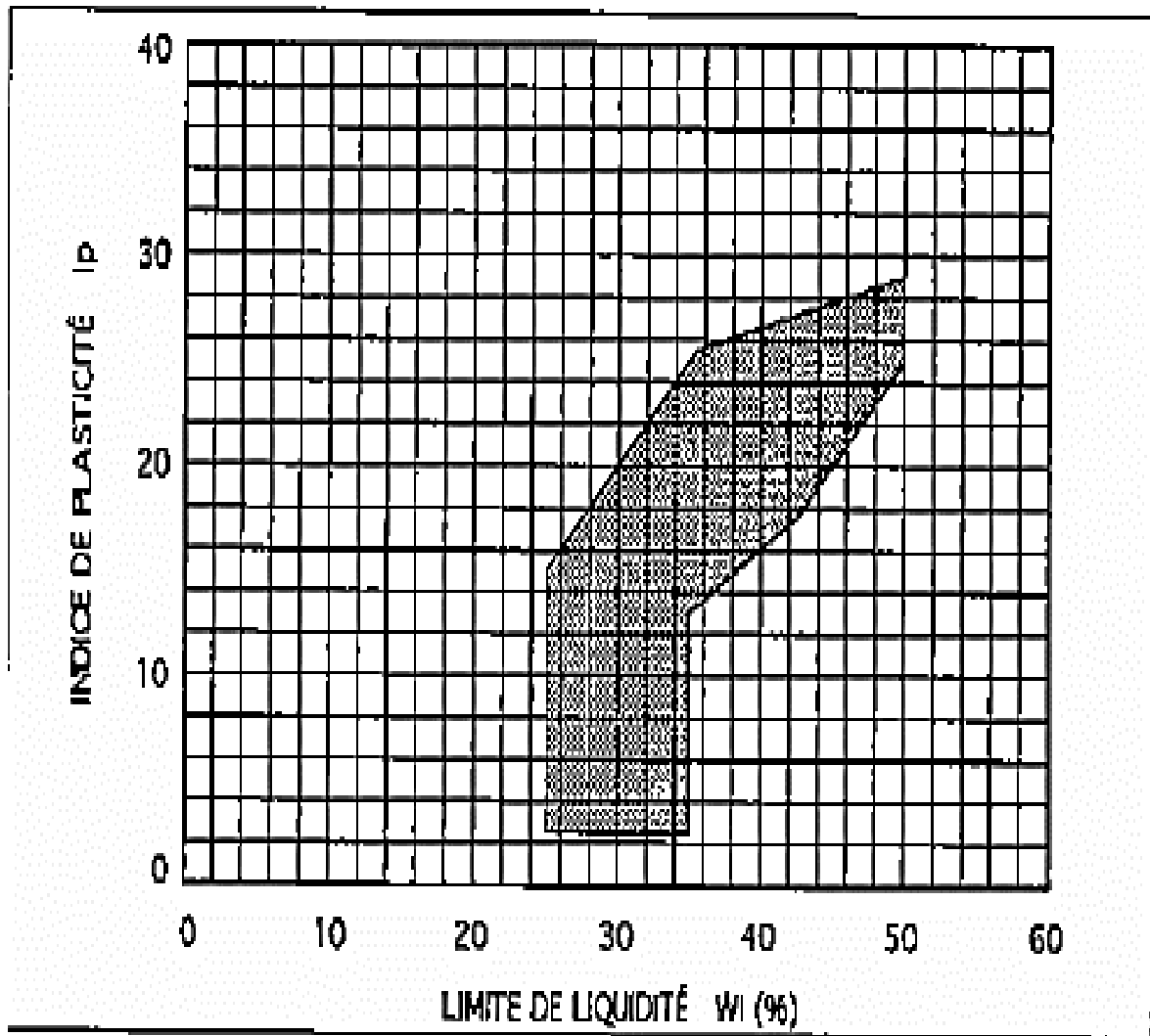


Figure I-8: diagramme de plasticité du sol [1]






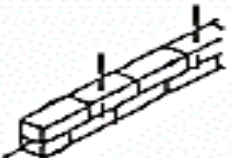





Ci-dessous, les limites correspondant aux éléments du fuseau de plasticité :

- **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

I.5.1.7 Utilisation des BTC

Le tableau I.8 donne quelques utilisations relatives aux BTC.

Tableau I-8: utilisation des blocs de terre comprimé [16]

6 PRINCIPALES CATEGORIES D'USAGE		
USAGE		TYPE DE BLOCS
maçonnerie porteuse		
maçonnerie de remplissage		
applications particulières	<ul style="list-style-type: none"> • ventilation • câblages • corniches • décoration • arcs et voûtes 	
maçonnerie renforcée		
systèmes constructifs particuliers : imbrication		
systèmes constructifs particuliers : empilement à sec autobloquant		

1.5.1.8 Propriétés des BTC

Les propriétés des BTC dépendent de nombreux paramètres tels que la terre utilisée, la méthode de compactage, l'utilisation d'un stabilisant, ... De ce fait, elles sont difficilement quantifiables car elles varient d'une production à l'autre. Ci-dessous, des valeurs moyennes récurrentes sont citées mais elles ne sont pas exhaustives. [4] [22].

✓ Résistance à la compression

Pour déterminer la qualité des briques de terre comprimée, la résistance en compression est la valeur qui est généralement étudiée. Par contre, celle-ci est étroitement liée au type de terre utilisé et à la teneur en stabilisant ajoutée, aux dimensions du bloc ainsi qu'à la procédure de compaction employée. Selon la norme utilisée et le pays de référence, les propriétés mécaniques exigées pour les BTC diffèrent légèrement. Ainsi, si on compare les normes suivantes : IS 1725 (Inde), NBR (Brésil), ARS (Afrique), NT (Tunisie), NZS (Nouvelle-Zélande), KS 02-1070 (Kenya), XP P13-901 (France), NTC 5324 (Colombie), UNE 41410 (Espagne), SLS 1382 (Sri Lanka), ASTM E2392M-10 (Amérique), NMAC 147.4 (Nouveau-Mexique), la résistance en compression minimale admissible pour les BTC (qu'elles soient stabilisées ou non) prend les valeurs suivantes (pour un état sec et un état humide)

Malgré les différences entre les normes, on peut dire que la tendance est à une exigence de résistance minimale en compression de 2MPa afin que les blocs soient utilisables pour la construction. En général, la résistance à la compression d'un BTC sera de 4MPa. La *figure I.10* représente les limites de la résistance en compression admissible pour les blocs de terre suivant les normes.

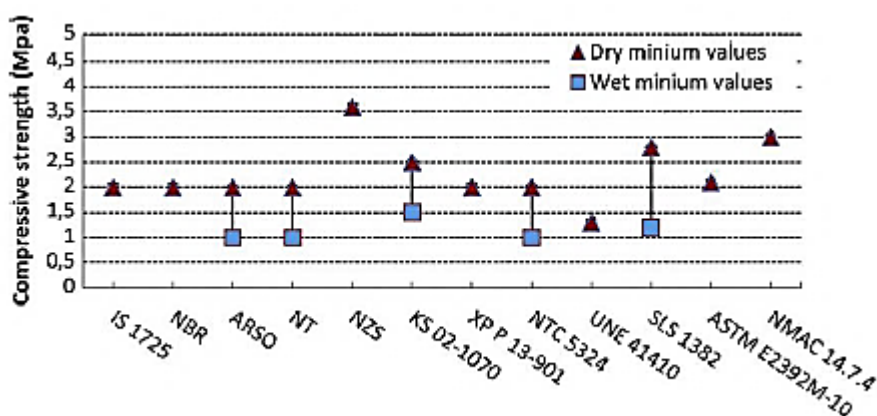


Figure I-9: résistance en compression minimale admissible pour BTC suivant les normes [23] [4] [22]

✓ **Densité**

D'une part La masse volumique des BTC est généralement comprise entre 1500 et 2000 kg/m³. Elle est liée au type de compactage et à la force de compaction appliquée lors de la production ainsi qu'aux caractéristiques des matériaux utilisés et à leur teneur en humidité lors de la presse. La masse volumique des briques en terre cuite est fort semblable à celle des BTC avec une moyenne de 1800 kg/m³. [24], [4], [22]

D'autre part selon **Hugo Houben 1998**, la densité apparente des BTC doit se situer dans la plage de 1700 à 2200Kg/m³.

✓ **Absorption**

L'absorption d'eau est fonction de l'âge des briques et de la teneur en argile et en ciment (elle augmente avec l'augmentation de la teneur en argile et la diminution de la teneur en ciment). Elle influence fortement la résistance et à la durabilité des BTC. Le taux d'absorption d'eau ne doit pas être trop élevé pour éviter tout gonflement de la fraction argileuse ou toute perte de cohésion du BTC. Pour cela, du sable peut être ajouté au mélange.

L'absorption est de l'ordre des 10%, pour des blocs stabilisés à la chaux, elle est d'environ 12% et pour les blocs stabilisés aux fibres, elle est aux alentours des 13%. Cette propriété d'absorption et de désorption est très importante pour ce qui est du confort intérieur de la construction car elle permet une régulation hygrothermique qui conserve un taux d'humidité relativement stable à l'intérieur.

I.6 STABILISATION DE LA TERRE

La stabilisation des sols au ciment et à la chaux a connu un progrès important durant les trente dernières années. Ce progrès a été marqué par la connaissance des mécanismes des réactions entre terre – ciment et terre – chaux, par l'importance et la qualité des travaux au Laboratoire et surtout par les expérimentations et les réalisations sur le terrain. Cette technique permet donc l'utilisation en couche de forme des chaussées. Dans le domaine de la construction en terre, le stabilisant le plus utilisé est le ciment. Mais ce dernier s'adapte mal aux argiles.

I.4.1 Définition

Stabiliser une terre, c'est lui donner des propriétés irréversible face aux contraintes physique afin de créer un matériau permettant la fabrication des BTC. Des nombreux paramètres interviennent, dépendant autant de la conception des bâtiments que de la qualité du matériau, que de l'économie du projet ou de la durabilité. Pour que la stabilisation soit un succès, les procédés employé doit être compatible avec ces dives impératifs. [1]

I.4.2 Objectif

En stabilisant, nous intervenons sur la texture et structure de la terre. Cinq opérations possibles sont :

- ✚ La réduction de volume de vide entre les particules ;
- ✚ La fermeture des vides qui ne peuvent être supprimés ;
- ✚ L'augmentation des liens entre les particules ;
- ✚ Améliorer les caractéristiques mécaniques de la terre (résistance à la compression, cohésion) en réduisant les vides entre les particules, en améliorant ou en créant des liaisons entre les particules.
- ✚ Réduire la sensibilité à l'eau (gonflement, retrait) et la perméabilité en bouchant les vides entre les particules.

Quand stabiliser ?

Il existe une tendance actuelle à la stabilisation systématique mais la stabilisation n'est pas une obligation, on peut très bien s'en passer, car la stabilisation peut être à l'origine d'un surcout de 30 à 50 % du prix de revient du matériau.

- ❖ Ne pas stabiliser lorsque le matériau n'est pas exposé à l'eau mur protégé, mur enduit, architecture bien conçue en fonction de la logique du matériaux terre.

Sur le plan pratique, diverses contraintes peuvent apparaître, on a :

- L'écrasement issu du poids propre du mur et d'une charge concentrée verticale
- Les charges excentriques verticales résultant d'un effort de traction
- Le tassement résultant de l'effet cumulé d'une contrainte de charge et d'un tassement dans un mur trop mince et élancé
- Les charges horizontales dues à la pression uniforme du vent

Ces dispositions constructives sont à considérer :

- Varier l'épaisseur des murs
 - Améliorer la stabilité des murs minces par des contreforts
 - Améliorer la stabilité des murs minces par les chainages
 - Réaliser les maçonneries armées horizontalement et verticalement (système parasismique).
 - Si le sol est perméable ou humide il faudra drainer les eaux avant qu'elle ne pénètrent dans le sol.
- ❖ Stabiliser lorsque le matériau est exposé, architecture mal conçue négligeant les règles de

l'art de bâtir en terre ou au contraintes d'implantation sur terrain humide ; mur exposés aux pluies battantes.







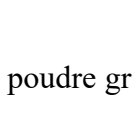
I.4.3 Procédés

Trois procédés permettent de stabiliser la terre :

- **Stabilisation mécanique** : le compactage de la terre modifie sa densité, sa résistance mécanique ainsi que sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité.
- **Stabilisation physique** : les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en Intervenant sur sa texture, c'est-à-dire en mélangeant judicieusement des fractions de grains de taille différentes.
- **Stabilisation chimique** : d'autres matériaux au des produits chimiques peuvent être ajoutés à la terre. Les liants (ciment et chaux éteinte) créent entre les grosses particules du sol des liaisons mécaniquement résistantes même si le matériau se trouve ensuite en Présence d'eau. [16]

Le *tableau I.8* présente quelques mécanismes de stabilisation des terres remaniées

Tableau I-9 mécanisme de stabilisation. [26]

MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES						
STABILISANT	NATURE		PROCÉDÉ	MOYENS	PRINCIPE	SYMBOLE
SANS APPORT DE STABILISANT			MÉCANIQUE	DENSIFIER	CRÉER UN MILIEU DENSE QUI BLOQUE LES PORES ET LES CANAUX CAPILLAIRES	
AVEC APPORT DE STABILISANT	STABILISANTS INERTES	MINÉRAUX	PHYSIQUE	ARMER	CRÉER UNE ARMATURE OMNI-DIRECTIONNELLE QUI RÉDUIT LE MOUVEMENT	
		FIBRES				
	STABILISANTS PHYSICO-CHIMIQUE	LIANTS	CHIMIQUE	ENCHAÎNER	CRÉER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE À TOUT MOUVEMENT	
				LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE	
		HYDRO-PHOBANTS		IMPERMÉABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMÉABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX	
			HYDRO-FUGER	ÉLIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET L'ADSORPTION D'EAU		

I.4.4 Stabilisation par le ciment

Le ciment est un liant hydraulique qui se présente généralement sous forme d'une poudre grise. Il sert à fabriquer du béton et du mortier : additionné d'eau, le ciment durcit pour former une masse solide, résistante et notamment sous l'eau (puisque'il s'agit d'un liant hydraulique).

I.4.4.1 Processus de fabrication du ciment

Les matières premières essentielles sont la roche calcaire et l'argile. Elles sont broyées et éventuellement additionnées de produits secondaires. Le mélange obtenu s'appelle le cru et est composé d'environ 80 % de calcaire et d'environ 20 % d'argile. Dans le procédé dit à voie sèche, le plus courant aujourd'hui, le cru est préchauffé (et donc séché) dans un précalcinateur. Il est ensuite introduit dans un four cylindrique et tournant, aujourd'hui toujours horizontal (légèrement incliné). Leur longueur varie de 30 à 110 mètres.

Un brûleur chauffe l'intérieur du four entre 1 400 et 1 500 °C. Le composant principal des ciments industriels actuels est le clinker, appelé aussi "scorie".

Le clinker résulte de la cuisson à 1 450° C de 80 % d'un mélange de calcaire et de 20 % d'argile, appelés " crus ". Cette formule classique est celle du ciment dit Portland. D'autres types de

ciments sont obtenus par adjonction de différents constituants secondaires.

L'argile, composée principalement de silicates d'alumine, se fragmente sous l'effet de la chaleur en ses constituants : silice et alumine. Ceux-ci se combinent ensuite à la chaux provenant du calcaire pour donner des silicates et des aluminates de chaux.

Au cours de la cuisson, de profondes modifications chimiques des constituants du cru se produisent. En premier lieu apparaît une émission de Ferro-aluminate tétra calcique, de consistance pâteuse ou liquide. Lorsque le fer est épuisé par cette réaction, il se forme de l'aluminate tricalcique fondu. Ces deux corps fondus constituent le liquide des fours à ciment. Celui-ci dissout la silice et la chaux qui se combinent alors et cristallisent sous forme de silicates de chaux.

Ce phénomène progressif constitue la "clinkérisation". Le clinker obtenu est ensuite moulu dans des broyeurs à boulets : grands cylindres métalliques horizontaux, rotatifs, et à moitié remplis de boulets d'acier. Le clinker est broyé, après ajout de gypse (de 3 à 5 %), pour donner le Ciment.

Le ciment est sans doute l'un des meilleur stabilisant pour le BTC. L'ajout de ciment avant compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa résistance à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosse. Le ciment va agir principalement sur les sable et graviers comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. De ce fait, il est inutile, voir néfaste, d'utiliser des terres trop argileuses (>30%). Pour sa mise en œuvre, il ne nécessite pas trop d'eau, ce qui correspond à l'état humide de compression des BTC.

1.4.4.2 Efficacité du Dosage :

En générale, il faut au moins 5 à 6% de ciment pour des résultats satisfaisant. La résistance en compression reste très dépendante du dosage. Pour des faibles dosages (2 à 3%), certaines terres se comportent moins bien que si elles ne sont pas stabilisées. 8% de ciment constituent souvent une limite supérieure économique acceptable.

Les meilleurs résultats sont obtenus avec des terres sableuses. La présence d'oxyde de fer permet une bonne stabilisation à cause des réactions pouzzolanique la nature de l'eau joue également un grand rôle sur la résistance.

1.4.5 Stabilisation par la chaux

Le calcaire est une pierre d'origine naturelle comportant des niveaux élevés de carbonates de calcium et/ou de magnésium. Le terme « chaux » désigne les produits dérivés du calcaire, notamment la chaux vive, la chaux éteinte et la chaux hydraulique.

L'utilisation des produits à base de chaux et de calcaire remonte à la préhistoire. Utilisés depuis plus de 12000 ans, il s'agit des plus anciens matériaux utilisés par l'humanité dans toutes sortes d'applications : en art et en architecture, dans les matériaux de construction, la préparation des aliments, les soins de toilette personnels, les produits chimiques industriels et bien plus.

Les trois grandes familles de chaux (chaux aérienne, chaux naturelles et chaux Hydrauliques) se différencient par la composition de leur matière première, le calcaire, et leur manière de faire prise.

1.4.5.1 Les chaux aériennes

Fabriquées à base de calcaire pur, ces chaux font prise et durcissent au contact du gaz carbonique contenu dans l'air. Cette prise très longue limite le retrait et développe une faible résistance à long terme.

- ***La chaux vive (CaO) :***

C'est le premier produit de la cuisson de la pierre à chaux (calcaire). C'est un matériau très avides d'eau. La chaux vive en contact avec de l'eau produit des explosions et sa température peut dépasser 150° (réaction très exothermique).

- ***La chaux éteinte(Ca(OH)2) :***

Elle est obtenue par hydratation de la chaux vive. Cette opération qui permet le passage de la chaux vive à la chaux éteinte s'appelle ***Extinction***. Elle s'accompagne d'une augmentation de volume du produit (foisonnement).

1.4.5.2 Les chaux naturelles

Fabriquées à base de calcaire siliceux, elles débutent leur prise au contact de l'eau et finissent de durcir au contact de l'air. Plus réactive, leur résistance augmente dans le temps.

1.4.5.3 Les chaux hydrauliques

Sont des chaux recomposées avec différents liants. Elles suivent le même processus de prise, dans des proportions différentes liées au pourcentage des matériaux qui les composent.

1.4.5.4 Caractéristiques de la chaux

La chaux est un liant naturel et écologique. Elle offre des avantages tel que :

- ✚ Un pouvoir assainissant et désinfectant
- ✚ Une esthétique que l'on peut obtenir avec un autre liant ;
- ✚ Une participation à la respiration de l'ouvrage ;
- ✚ Une élasticité ;

- ✚ Une tenue dans le temps encore inégalité ;
- ✚ Une absorption des CO₂ lors de la carbonisation.

1.1.1.1 Cycle de la chaux

Les produits dérivés du calcaire (CaCO₃) possèdent la capacité unique d'être transformés et de reprendre leur forme originale. Le cycle de la chaux consiste à cuire le calcaire pour former la chaux vive (CaO). La chaux éteinte (Ca(OH)₂) peut alors être produite en ajoutant de l'eau à la chaux vive. Le dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère peut alors réagir avec la chaux éteinte pour la reconvertir en calcaire.

La stabilisation de la terre par la chaux aérienne (vive ou éteinte) est couramment utilisée avec les terres argileuses. La chaux va surtout créer des liens avec les argiles et pratiquement aucun avec les sables. Elle ne sera envisagée que si la stabilisation au ciment est impossible.

1.1.1.2 Efficacité du dosage

L'ajout de 2 à 3% de chaux provoque immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et un brisage des mottes. Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en générale des dosages de 6 à 12%. Les meilleurs résultats sont obtenus avec les terres argileuses (30 à 40%, voire 70%).

I.7 CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre il était question de présenter le lieu choisi pour l'étude, faire une étude bibliographique sur le matériau terre et les BTC. La revue de la littérature nous a permis de comprendre la structure des matériaux, les techniques de construction en terre ; quand, comment et pourquoi stabiliser une terre pour son utilisation dans la production des BTC.

Chapitre II METHODES ET MATERIELS

INTRODUCTION

Cette partie décrit l'ensemble des méthodes et techniques utilisées dans le cadre de cette étude ainsi que le matériel et les moyens mis en œuvre. Elle est structurée de façon chronologique. Ainsi, après les prélèvements des échantillons en carrière, on a tour à tour procédé à l'identification, à la caractérisation physique, ainsi qu'à la stabilisation chimique, ensuite à la préparation des différents traitements, à leur application sur les échantillons en fin à la caractérisation mécanique des échantillons traités y compris des échantillons témoins.

II.1 PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE

NYANGEZI (NYA-NGEZI ou NYA-GHEZI) est une contrée située en RDC dans la province du SUD-KIVU dans le groupement de NDUBA en territoire de WALUNGU dans la collectivité chefferie de NGUWESHE, Cette contrée fut créé vers les années 1950, elle est située à 24km de Bukavu et à 1680 m d'altitude. NYANGEZI est limité :

- ✚ Au nord par le groupement de MUMOSHO ;
- ✚ Au nord-Ouest par le groupement de KAMISIMBI ;
- ✚ Au sud-est par la rivière LUZINZI ET MUGABA
- ✚ À l'Est par la rivière RUZIZI

À l'Ouest par les chaînes de montagne de de MUKUNAMWA ET BISUNZU 2° 39' 4'' latitude sud, 28° 51' 59'' Est. La figure II.2 présente la cartographie du milieu d'étude.

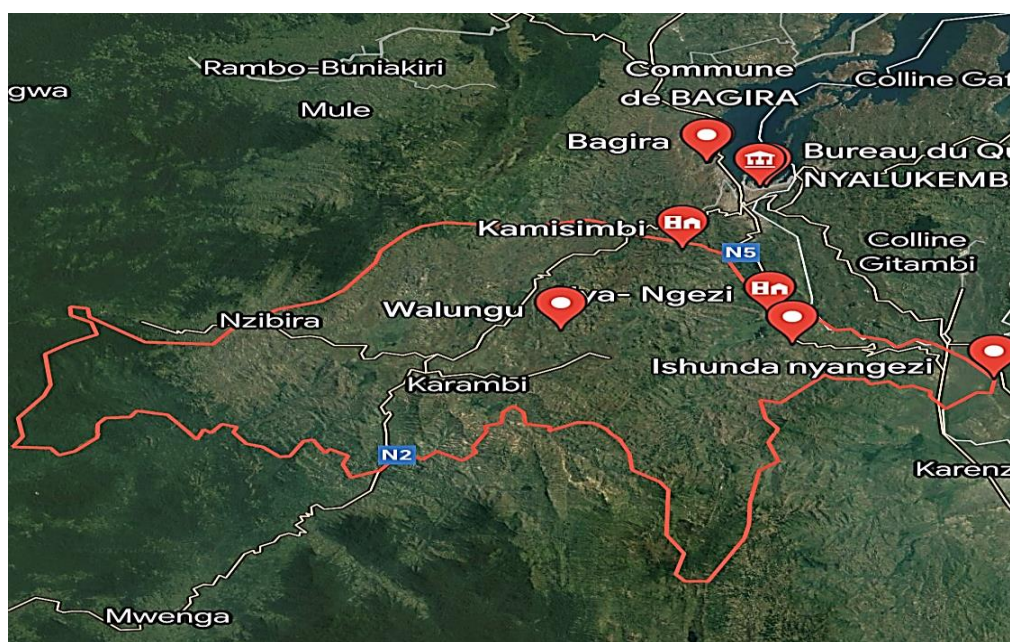


Figure II-1 cartographie du milieu d'étude [29].

Notre sol provient d'une contrée appelée KALUA dans la localité de NYANGEZI ; dans une carrière exploitée par les habitants qui produisent des briques adobes et cuites souvent acheminées dans la ville Bukavu. Les échantillons ont été prélevés par maillage de 2m et à 1m de profondeur. La figure II.2 présente la cartographie de l'échantillonnage.

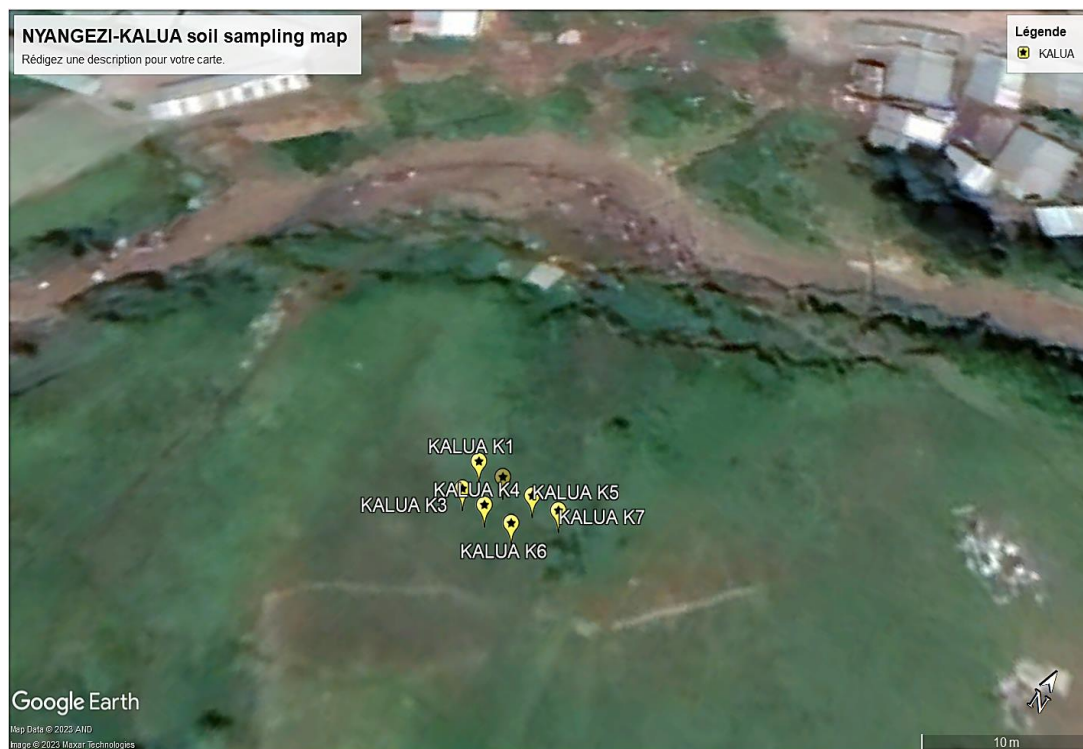


Figure II-2 cartographie de l'échantillonnage

Le tableau II.1 présente les coordonnées des points d'échantillonnage.

Tableau II-1 coordonnées des points d'échantillonnage

points	latitude	longitude	altitude
KALUA K1	2°39'44.16"	28°52'11.13"	1546 m
KALUA K2	2°39'44.16"	28°52'11.19"	1547 m
KALUA K3	2°39'44.23"	28°52'11.14"	1548 m
KALUA K4	2°39'44.23"	28°52'11.19"	1549 m
KALUA K5	2°39'44.16"	28°52'11.26"	1550 m
KALUA K6	2°39'44.23"	28°52'11.26"	1551 m
KALUA K7	2°39'44.15"	28°52'11.32"	1552 m

II.2 ESSAI SUR LE SOL

Les essais d'identification des matériaux qualitatifs ou quantitatifs peuvent se faire soit au terrain (in situ), qui demandent un savoir-faire de l'opérateur ; mais aussi au laboratoire de matériaux.

II.2.1 Les essais in situ

Nous avons pratiqué sur le terrain quelques essais simples suivant la norme CRATERRE/EAG

permettant d'apprécier certaines caractéristiques de la terre et la possibilité de son utilisation.

II.2.1.1 Examen de toucher/odeur/lavage

On prend une petite quantité de terre dans la paume de la main et on la frotte à sec afin d'observer sa texture ; ensuite on mouille un peu cette terre, si elle commence à dégager une odeur, c'est qu'elle contient des matières organiques ; ensuite on frotte délicatement la terre mouillée toujours pour observer sa texture ; enfin on lave délicatement la paume de la main afin d'observer si la terre colle ou non.

Si la terre ne colle pas et se lave facilement, le sol est **graveleux et sableux** ; si la terre colle et se lave difficilement, le sol est **siliteux** ; si la terre colle beaucoup et se lave très difficilement (reste de coloration), le sol est **argileux**. [16]

II.2.1.2 Essai du cigare

Ce test permet d'observer la cohésion d'une terre et les quantités d'argile. Retirer les graviers de la terre ; humidifier et bien malaxer de façon à obtenir une pâte homogène et la laisser reposer pendant 30min ; rouler la pâte entre les mains de façon à obtenir un cigare de 3cm de diamètre ; poser le cigare en travers de la paume de la main et le pousser lentement avec l'autre main ; mesurer la longueur à laquelle le cigare s'est cassé.

Si la moyenne des longueurs est moins de 5cm, la terre est trop sableuse ; plus de 15cm la terre est très argileuse ; entre 5 et 15 cm, il s'agit d'une bonne terre.

II.2.1.2 Essai de la pastille

Procéder comme pour l'essai du cigare, retirer les graviers et bien malaxer afin d'obtenir une pâte homogène. Mouler des pastilles d'environ 3cm de diamètre et 1cm d'épaisseur ; casser les pastilles afin d'observer leur résistance.

Si la pastille est fissurée ou nettement distante des parois du moule après séchage, la terre est trop argileuse ; difficile à casser et rupture avec un claquement, la terre très argileuse ; difficile à casser mais sans trop d'effort et en arrivant à la réduire en poudre entre pouce et index, la terre est argileuse-sableuse ; très facile à casser et se réduit facilement en poudre, la terre est sableuse.

II.2.1.3 Essai de sédimentation ou de la bouteille

Dans un flacon cylindrique transparent d'au moins ½ litre, on met environ ¼ de terre et ¾ d'eau ; on agite bien le flacon en le bouchant avec la main ; on laisse reposer pendant 30min puis on observe la sédimentation.

Les gros éléments (gravier) sont au fond ensuite le sable puis les silts enfin les argiles, on observe les épaisseurs de chaque couche [16].

La *figure II.3* représente l'ensemble de la procédure à réaliser in situ.

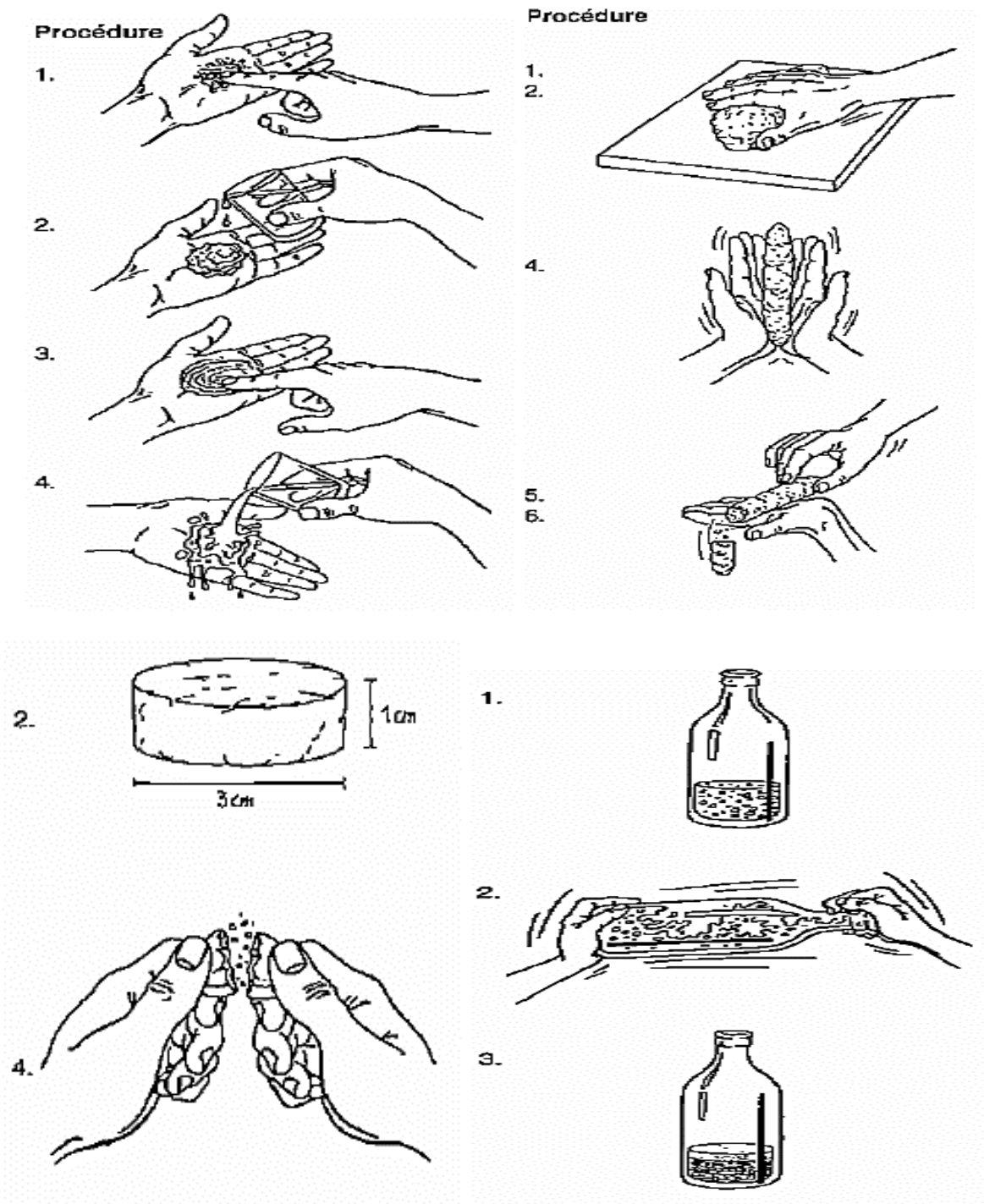


Figure II-3: essai in situ

Aux termes des essais in situ ci hauts explicités La reconnaissance du sol nous a conduits à une conclusion qu'il s'agit d'un sol argileux. Un aperçu du sol de la carrière de KALUA est représenté à la *figure II.4*

Une fois ces 4 tests réalisés, on peut facilement dire si la terre conviendra ou non à l'édification d'un bâtiment. Mais dans certains cas, des essais supplémentaires en laboratoire sont exigés pour confirmer la classification du sol basée sur les essais situ du sol et l'aptitude de ce sol à être utiliser pour la confection des BTC.



Figure II-4 aspect visuel du sol de la carrière de KALUA (Nyangezi)

II.2.2 Les essais de laboratoire

II.2.2.1 Teneur en eau

La teneur en eau est définie comme étant la quantité d'eau liquide contenue dans un matériau déterminé par la norme NF P 94-050 ; L'essai permet d'identifier la teneur en eau d'un échantillon. La teneur en eau noté W exprimé en % est le quotient de la masse de l'eau (Mw) contenue dans l'échantillon par sa masse sèche (Md).

✚ Les matériels utilisés :

- Une étuve
- Une balance à précision
- Des tares



a) Etuve



b) balance à précision

Figure II-5 matériels utilisés au laboratoire

Mode opératoire :

- Laver la tare puis la peser pour déterminer m_0 ;
- Prélever l'échantillon, l'introduire dans la tare et peser le tout pour déterminer m_1 ;
- Mettre à l'étuve et après dessiccation complète peser pour déterminer m_2 .

Expression des résultats :

La teneur en eau est donnée par la relation (II.1).

$$W(\%) = \frac{(mw - md) * 100}{md} \quad (II.1)$$

Avec, W : la teneur en eau exprimée en pourcentage ;

mw : la masse du sol humide ;

md : la masse du sol sec.

II.2.2.2 Les masses volumiques

A) La Masse volumiques apparente

La densité apparente ρ_a en g/cm³ est définie comme le quotient de la masse sèche (Md) au volume apparent (Va) occupé par les matières solides et les vides contenu dans les grains.

Les matériels utilisés :

- Une moule normalisée de volume connu V ;
- Une balance de précision ;
- Un outil à araser.

Mode opératoire :

- Prélever une certaine quantité d'échantillon de sol (passant au tamis de 2mm) ;
- Déterminer, par pesée sur la balance, la masse m_0 du moule puis tarer ensuite ;

- Bien remplir le moule de l'échantillon de sol et araser sa surface supérieure ;
- Peser l'ensemble pour déterminer la masse m

✚ Expression des résultats :

La masse volumique est déterminé par la norme NF P 94-053 et donnée par la *formule (II.2)*:

$$\rho_a = \frac{M}{V} \quad (\text{II.2})$$

Où M : masse du matériau ;

V : volume apparent du moule ;

ρ : la masse volumique apparente

B) La Masse volumiques absolue

La densité absolue ou densité des grains solide ρ_a en g/cm^3 est définie comme le quotient de la masse sèche (M_d) au volume absolue (V_{abs}) occupé seulement par les matières solides contenu dans l'échantillon.

✚ Les matériels utilisés :

- Un éprouvette gradué ayant un volume minimal de 500 cm^3
- Tamis de 2mm
- Une balance de précision

✚ Mode opératoire :

- Prélever 250g d'échantillon tamisé au tamis de 2mm
- Verser l'échantillon dans une éprouvette contenant un volume d'eau initial $V_1=275$ cm^3
- On observe une augmentation de volume, on note ensuite le volume final V_2 contenant l'échantillon et l'eau distillé.

✚ Expression des résultats :

La masse volumique absolue est déterminé par la norme NF P 94-054 et donnée par la *formule (II.3)* :

$$\rho_{abs} = \frac{M_d}{V_{abs}} \quad (\text{II.3})$$

$$V_{abs} = V_2 - V_1 \quad (\text{II.4})$$

Avec V_1 : volume initial (volume de l'eau) ; V_2 : volume final (volume de l'eau + le volume de matériaux) ; M_d : masse du matériau sec ; V_{abs} : volume absolue.

II.2.2.3 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique consiste à déterminer les différentes proportions d'éléments constituant le sol (graviers, sables, limons et argiles). Deux essais ont été utilisés pour déterminer la granulométrie des sols : Analyse Granulométrique par tamisage et la sédimentométrie.

a) Le tamisage

La terre sera simplement passée dans plusieurs tamis aux mailles de tailles différentes, superposés par ordre d'ouverture décroissant pour un sol ayant des gros grains supérieurs à 0,1mm recueilli et pesé après lavage et séchage du sol. Lorsque le sol contient une proportion importante de fines qui s'agglomèrent pour former des grains on effectue le tamisage par voie humide, les fractions boueuses de lavage inférieures à 0,1mm seront alors récupérées, décantées puis siphonnées et séchées pour l'analyse granulométrique par sédimentation.

➤ **Les matériels utilisés :**

Tamis AFNOR, balance, étuve



Figure II-6 série des tamis pour l'analyse granulométrique

➤ **Mode opératoire :**

- Peser les matériaux humides avant lavage
- Laver les matériaux au tamis module 20 d'ouverture 0,08mm.
- Sécher les matériaux à l'étuve à 105°C
- Passer les matériaux secs ; le poids peut être pris au hasard.
- Tamiser sur les différents tamis AFNOR et peser chaque fois les refus partiels et en déduire les refus cumulés (**Rc**) en g.

➤ **Expression des résultats :**

- Calcul des refus cumulés Rc en %

Le refus cumulé est donné par la *formule* (II.5):

$$Rc = \frac{Rc(g)}{\text{poids avant lavage}} * 100 \quad (II.5)$$

Ou, Rc(g) : refus cumulé en g ; Rc : Refus cumulés

- Calcul de tamisât (T) en %

Le tamisât est donné par la *formule* (II.6) :

$$T(\%) = 100 - Rc \quad (II.6)$$

T : tamisât ; Rc : refus cumulé

A l'issue de l'essai granulométrique on obtient une courbe qui reprend en abscisse les ouvertures des tamis et en ordonnée les tamisât.

b) La sédimentométrie

Il correspond en quelque sorte au *test de la bouteille* expliqué ci-avant. Il sert à mesurer les teneurs en particules fines en utilisant la propriété de différence de vitesses de chute des particules en suspension dans l'eau, exprimée par la loi de Stokes. Pour réaliser cet essai, il faut conserver les grains traversant le tamis de 0,1mm d'ouverture qui ont été recueillis au test précédent et puis on suit le même processus que celui du test de la bouteille, mais dans une éprouvette graduée dans ce cas-ci. On peut alors calculer les proportions des grains de tailles différentes.

La sédimentométrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 0,1 mm (module AFNOR21). Les grains de diamètre différent sédimentent dans un milieu liquide au repos à vitesse différentes. La relation entre diamètre des grains et vitesse de sédimentation est donnée par la loi de Stokes. Comme cette relation a été établie pour des grains sphériques, on n'obtiendra en l'appliquant aux éléments d'un sol que des diamètres équivalent [25].

➤ **Appareils utilisé :**

Densimètre gradué de 0,995 à 1030 g/cm³, éprouvette avec des graduations tous les 0,0005 g/cm, des éprouvettes de 2l, agitateur mécanique, un défoulant hexametaphosphate de sodium, agitateur manuel, thermomètre gradué, bécher, balance eau distillée, tamis AFNOR module 21, étuve.



Figure II-7 les matériel de la sédimentométrie

➤ **Mode opératoire :**

Préparation de l'échantillon

- Prendre 80 g de matériau au cg près de la fraction inférieure à 0,1 mm qui a été recueilli par tamisage humide, laissé décanter, siphonné au maximum et séché afin d'éliminer de l'eau.
- Verser ces 80 g dans un bécher et compléter avec 500 cm³ d'eau distillée et 60 cm³ environ de défoulant à 5% d'hexametaphosphate de sodium.
- Laisser reposer 12h à 15h minimum, Procéder à l'agitation à l'agitateur mécanique à très grande vitesse pendant 3minutes (séparation des particules fines).
- Verser, dans une éprouvette graduée de 2000 cm³, compléter de l'eau jusqu'au trait de jauge et préparer une éprouvette témoin contenant de l'eau distillé et le défloculant pour les lectures corrigées.

Exécution de l'essai

- Agiter manuellement la suspension pour avoir une concentration uniforme sur toute la hauteur.
- Retirer l'agitateur de la solution et enclencher au même moment le chronomètre puis plonger lentement le densimètre.
- Faire la lecture au sommet du ménisque noté « **R** » (ex : 1,8183 se note 18,5 pour les lectures supérieures à 1000) de la densité et de la température à la fois dans l'éprouvette contenant l'échantillon et l'éprouvette témoin à 30secondes, 1, 2, 5, 10,

20, 40,80, 240 minutes et éventuellement 1440 soit 24heures compté à partir du début de l'essai. Les 3 premières lectures se font sans retire le densimètre de la suspension. Plonger le densimètre 15 à 20 secondes avant la lecture.

➤ **Correction des lectures et calculs**

Avant de faire le calcul pour les essais de sédimentométrie, il faut déterminer la « correction composée ou corrigé R_1 » à apporter aux lectures R pour tenir compte de : Les variations de température en cours de l'essai (C_t), Du ménisque (C_m), Du défloculant (C_d)

La lecture intervenant dans le calcul des pourcentages des grains inférieur à D sera donnée par la *formule* (II.7) :

$$R_1 = R + C \quad (\text{II.7})$$

R_1 : correction composée ou corrigé, R : lecture R lues au densimètre, C : lecture équivalente à la lecture R lue au densimètre.

La lecture équivalente pour la lecture R lue au densimètre est donnée par la *formule* (II.8).

$$C = \pm C_t + C_m - C_d \quad (\text{II.8})$$

C : lecture équivalente à la lecture R lue au densimètre ; C_t : Les corrections dues aux variations de température en cours de l'essai ; C_m : Les corrections dues à la formation du ménisque ; C_d : Les corrections dues au défloculant.

Une méthode simple pour obtenir directement à partir des lectures R , les lectures corrigées R_1 sans devoir passer par l'étalonnage.

Préparer une deuxième éprouvette témoin identique à celle de l'échantillon de 2l contenant de l'eau distillé et la même quantité de défloculant et s'assurer que cette éprouvette est à la même température que celle contenant l'échantillon.

Au lieu d'effectuer une seule lecture (R), on effectue donc pour chaque temps une deuxième lecture (C) pour permettre de calculer R_1 . [26].

En prenant l'hypothèse que nous avons le même densimètre on peut utiliser le *tableau II.2* pour obtenir les hauteurs totales :

Tableau II-2 Tableau des hauteurs effectives permettant de calculer rapidement le diamètre équivalent [27], [26] [25]

Lecture $R' = R + C_m$	(Pour les trois premières lectures)	Profondeur effective H_r
0	22,2	21,6
1	21,8	21,2
2	21,4	20,8
3	21,0	20,4
4	20,7	20,0
5	20,3	19,7
6	19,9	19,3
7	19,5	18,9
8	19,2	18,5
9	18,8	18,1
10	18,4	17,8
11	18,0	17,4
12	17,6	17,0
13	17,3	16,6
14	16,9	16,2
15	16,5	15,9
16	16,1	15,5
17	15,7	15,1
18	15,4	14,7
19	15,0	14,3
20	14,6	14,0
21	14,2	13,6
22	13,8	13,2
23	13,5	12,8
24	13,1	12,4
25	12,7	12,1
26	12,3	11,7
27	11,9	11,3
28	11,6	10,9
29	11,2	10,5
30	10,8	10,2

On calcule ensuite le diamètre équivalent (D) des particules par la *formule (II.9)* :

$$D = F * \sqrt{\frac{H_r}{t}} \tag{II.9}$$

Avec H_r : la profondeur effective ou hauteur totale en cm,

T : la température en °C

F : facteur F

D : Diamètre équivalent des particules

On calcule également le facteur F par la *formule (II.10)* :

$$F = \sqrt{\frac{30\eta}{g(\rho_s - 1)}} \tag{II.10}$$

Avec ρ_s : masse absolue du sol en g/cm³,

g : accélération de la pesanteur en m/s²,

η : viscosité du liquide en poises.

F : facteur F

La valeur de F peut être lue sur l'abaque qui est fonction de la température et du poids spécifique du sol voire annexe

Déterminer enfin le pourcentage des grains qui es donné par la *formule (II.11)* :

$$P = \frac{V}{m} * \frac{\rho_s}{\rho_s - 1} * \frac{R_1}{10} \quad (\text{II.11})$$

Avec, **V** : volume de la suspension en (litres),

M : masse de l'échantillon en (g),

ρ_s : poids spécifique en (g/cm³).

R1 : correction composée ou corrigé

P : pourcentage des grains

❖ CORRECTION DU SOL

La granulométrie optimale permet de comparer la courbe granulométrique de la terre analysée à la courbe optimale, encadrée de ses courbes limites inférieures et supérieures. Cette courbe idéale est la courbe qui permet de tirer le meilleur parti des qualités des éléments du sol.

Elle est tracée à partir du regroupement des spécifications granulométriques de la terre. La courbe granulométrique doit être contenue dans le fuseau limite et être la plus proche possible de la courbe idéale. Elle doit également être quasiment parallèle aux courbes limites et à la courbe idéale. Si la courbe répond à ses trois critères, il n'y aura pas de problèmes pour construire avec cette terre. Si par contre elle n'y répond pas, on peut tout de même construire à l'aide cette terre mais il faudra auparavant résoudre d'importants problèmes.

D'où on doit ajouter expérimentalement des éléments grossiers selon que le sol est fin ou des éléments fins selon que le sol est grossier pour que la courbe granulométrique soit inscrite dans le fuseau.

II.2.2.4 Les Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg définissent les limites entre les différents états de consistance pour la partie du sol passant à travers un tamis de 0,4mm. On retrouve les états suivants : état de dispersion, état liquide, état plastique, état solide avec retrait et finalement, état solide sans retrait. Entre l'état liquide et l'état plastique, on retrouve [4] :

La limite de liquidité W_L : La limite de liquidité déterminé par la norme NF P 94-051 correspond

à la teneur en eau lorsque 25 coups ont dû être appliqués pour refermer la rainure sur 1cm. Entre l'état plastique et l'état solide, on retrouve :

La limite de plasticité W_p : déterminé par la norme NF P 94-051 Elle correspond à la teneur en eau que contient un petit boudin de terre de 3mm de diamètre lorsqu'il se rompt en morceau. Avec la limite de liquidité et la limite de plasticité, on peut calculer l'indice de plasticité I_p du sol, équivalent à $I_p = W_L - W_p$. 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 si le résultat est supérieur à 20, la plasticité est forte. Les spécifications présentées au *tableau II.3* suivant sont à considérer pour les limites d'atterberg :

Tableau II-3 spécification des limites d'atterberg [22]

	Zone limites	Zones préférentielles
IP	De 7 à 29	De 7 à 18
WL	De 25 à 50	De 30 à 35
WP	De 10 à 25	De 12 à 22

➤ **Appareil utilisé :**

Tamis d'ouverture 0,4mm AFNOR module 27, étuve, balance, appareil de casagrande, plaque de marbre (en verre).



Figure II-8 Matériels de l'essai de consistance des sols

➤ **Mode opératoire :**

Limite de liquidité

- Prendre une quantité de matériau au cg près de la fraction inférieure à 0,4 mm qui a été

recueilli par tamisage humide, laissé décanter pendant 24h, siphonné au maximum et séché afin d'éliminer de l'eau.

- Broyer les matériaux et le tamiser au tamis encore au tamis de 0,4mm.
- Ajouter un peu d'eau pour faire la pâte à l'aide d'une spatule sur un plateau.
- Placer la pâte sur l'appareil de casagrande, diviser la en 2 lèvres par un outil à rainurer.

Compter le nombre des coups admis jusqu'à la fermeture des lèvres à 1cm en suite prélever un échantillon à l'endroit de fermeture des deux lèvres.

- Répéter l'opération 5 fois en majorant chaque fois le nombre des coups

Limite de plasticité

- Prélever une quantité sur l'échantillon qui correspond à la teneur en eau au dernier intervalle de coups.
- Faire des rouleaux jusqu'à ce qu'ils se coupent à 3mm près.

➤ Calculs et résultats :

La limite de plasticité et limite de liquidité se calculent en faisant la moyenne des teneurs en eau

On calcule ensuite la valeur de l'indice de plasticité par la *formule (II.12)* :

$$IP = W_l - W_p \quad (II.12)$$

Où W_l : limite de liquidité

W_p : limite de plasticité

Ip : indice de plasticité

II.2.2.5 Essai au bleu de méthylène

L'essai au bleu mesure la capacité des fines d'un sol à absorber du bleu de méthylène à la surface externe et interne des particules étudiées. A partir de la mesure de la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche mono moléculaire la surface externe et interne des éléments constituant de l'échantillon et de la masse de cet échantillon, on détermine une valeur de bleu propre à la fraction étudiée à laquelle on peut associer la surface spécifique de cette fraction[26].

Selon la valeur au bleu du sol(VBS) on distingue :

- Sol limoneux de plasticité moyenne : $2,5 \leq VBS < 6$
- Sol argileux : $6 \leq VBS < 8$
- Sol sablo argileux peu plastique : $1,5 \leq VBS < 2,5$
- Sol très argileux : $VBS > 8$

- **Matériel utilisé :** eau distillée, bécher, spatule, spatule, solution de bleu de méthylène à 10g/l, agitateur à ailettes, balance, chronomètre, tige de verre, papier filtre.



Figure II-9 essai au bleu de méthylène

➤ **Mode opératoire**

- Prendre la fraction 0/5 de l'échantillon de sol par tamisage
- Prélever 30-60 g pour un sol argileux et 60-120 g pour un sol peu argileux.
- Mélanger dans le bécher le matériau avec 500cm³ d'eau distillé et agiter la solution pendant 5min.
- Injecter 5ml de bleu de méthylène et au bout d'une minute, effectuer le test sur papier filtre. Le test est positif lorsqu'on aperçoit une auréole bleu claire autour de la tache centrale sinon le test est négatif.
- Prélever 5 gouttes supplémentaire et observer si l'auréole bleu claire subsiste, sinon injecter 2ml de bleu jusqu'à ce que le test soit positif au bout de 5 gouttes. [28].

➤ **Calculs**

La valeur au bleu du sol(VBS) est la quantité de bleu absorbée par 100g des fines.

On calcule alors La valeur au bleu du sol par la *formule (II.13)* :

$$VBS = \frac{M_B}{M_{ech}} * 100 \quad (II.13)$$

Avec : M_B : masse de bleu injecté dans l'échantillon ;

M_{ech} : la masse sèche de l'échantillon ;

VBS : La valeur au bleu du sol ;

II.2.2.6 Dosage des BTC

Afin d'obtenir des blocs de terre comprimée de qualité et au coût raisonnable, le dosage des différents composants est primordial. Celui-ci peut se faire selon le poids ou selon le volume des

matériaux. Bien qu'elle soit moins précise, la deuxième solution est généralement préférée sur chantier car plus simple. Pour un dosage selon le poids, une balance précise est nécessaire afin de peser la masse sèche des matériaux. Les dosages obtenus seront précis et facilement modifiables. Pour un dosage selon le volume, des doseurs aux contenances connues sont nécessaires. Usuellement, des pelles, seaux ou brouettes sont utilisés. Une fois remplis, la surface doit être arasée de façon à obtenir des volumes précis. Avant de passer à la production, différents essais de dosage. Une quantité des blocs doivent être réalisés pour chaque dosage. Ceux-ci seront alors observés afin de choisir le dosage le plus satisfaisant. Le meilleur dosage sera celui qui répondra au mieux aux critères suivants : lisse, pas de fissures, très peu friable et difficile à casser. [4].

Si stabilisant il y a, le dosage se calcule à partir de la masse volumique de la terre et des masses ou volumes secs des matériaux. Selon **Rigassi et Cratère-EAG (1995)**, la méthode de calcul pour un mélange de terre et ciment peut se faire de deux façons. La première s'applique lorsqu'on cherche le poids de ciment pour un volume de terre et un taux de stabilisation connus On calcule alors Le poids en ciment donné par la *formule (II.14)*:

$$P_C = \frac{\rho_T * V_T * C}{100} \quad (II.144)$$

Avec ρ_t : masse volumique apparente de la terre sèche en g/cm³
C : taux de stabilisation en ciment ou en chaux
V_t : volume terre
P_C : poids du ciment

La deuxième s'applique lorsqu'on cherche le volume de terre lorsqu'on connaît le poids et le pourcentage de ciment le volume de la terre est alors donné par la *relation (II.15)*:

$$V_T = \frac{P_C * 100}{\rho_T * C} \quad (II.15)$$

Avec ρ_t : masse volumique apparente de la terre sèche
C : taux de stabilisation en ciment ou en chaux
V_t : volume terre en
P_C : poids du ciment en Kg

La méthode de calcul pour un mélange de terre, sable et ciment (chaux) peut se faire des deux façons suivantes :

Soit on connaît a priori les volumes de terre et de sable ainsi que le pourcentage de ciment. C'est

donc le poids de ciment (chaux) qui est cherché, On calcule alors Le poids en ciment qui est donné par la *formule* (II.16):

$$P_C = \frac{[(\rho_T * V_T) + (\rho_S * V_S)] * C}{100} \quad (\text{II.16})$$

Avec ρ_t : masse volumique apparente de la terre sèche
 ρ_s : masse volumique apparente du sable
C : taux de stabilisation en ciment ou en chaux
 V_t : volume terre
 V_s : volume sable
 P_C : poids du ciment

Soit on a déterminé à l'avance le poids de ciment ainsi que les pourcentages de ciment, terre et sable. C'est donc les volumes de terre et de sables qui sont cherchés ; ils sont alors donnés par les *formules* (II.17) et (II.18) :

$$V_T = \frac{P_C * T}{\rho_T * C} \quad (\text{II.17})$$

$$V_S = \frac{P_C * S}{\rho_S * C} \quad (\text{II.18})$$

Avec ρ_t : masse volumique apparente de la terre sèche
 ρ_s : masse volumique apparente du sable
C : taux de stabilisation en ciment ou en chaux
 V_t : volume terre
 V_s : volume sable
 P_C : poids du ciment
T : pourcentage de la terre
S : pourcentage du ciment

Lorsqu'un volume de terre est soumis à l'action de compression, le matériau est comprimé et l'indice des vides décroît. Plus la densité d'une terre peut être augmentée, plus sa porosité sera bloquée et moins l'eau pourra y pénétrer. Cette propriété résulte de l'imbrication plus étroite des particules qui réduit les risques de perturbation de la structure sous l'action de l'eau.

Cette teneur en eau doit être suffisante pour permettre une bonne lubrification des grains, elle ne

doit pas non plus être trop importante car les vides seraient remplis d'eau et, de ce fait, incompressible

D'une part La quantité d'eau ajoutée correspond à sa teneur en eau optimale (TEO).

Elle est calculée selon le poids humide et le poids sec du mélange de la façon suivante selon la formule (II.19) :

$$TEO = \frac{\text{poids humide} - \text{poids sec}}{\text{poids sec}} * 100 \quad (\text{II.19})$$

D'autre part, selon toujours **Rigassi et Cratère-EAG (1995)** ; il est difficile de fixer à priori le volume d'eau précis pour obtenir la teneur en eau optimum de compactage, car celle-ci dépend de l'humidité naturelle des constituants (terre, sable...) Qui est très variable. L'opérateur déterminera le dosage par des test simples (test de la boule par exemple) et par son expérience.

Les éprouvettes cubiques de dimension 20*14*9 ont été utilisées pour la détermination des différents essais fixés par notre programme expérimental, ont été confectionnées dans un moule spécialement usiné à cet effet. La figure II.10 ci-dessous illustre le moule à BTC qui a été utilisé pour la confection.



Figure II-10 moule à BTC

Le compactage des éprouvettes est du type statique à simple effet : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble (moule + mélange + piston), le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de la lecture de la pression [30]

Voulue. Dans cette étude on a appliqué une contrainte de compactages : 1 MPa. Qui est une très faible pression suivant la classification selon **Hugo Houben 1998**. La figure II.11 illustre la presse hydraulique qui a été utilisé pour la confection et l'écrasement des éprouvettes.



Figure II-11 presse hydraulique

Les stabilisations chimiques et correction du sol des matériaux ont été faites à des proportions de stabilisation différentes (4%,6% et 8%) par l'ajout du ciment et de la chaux ainsi que 30 et 50% par l'ajout du sable concassé.

Les échantillons des sols corrigés K1', K2' et K3' ont des masses absolues respectivement de 2,41 ; 2,44 ; 2,42 g/cm³ et 2,66 g/cm³ pour le sable concassé.

La moyenne des blocs a été au nombre de 4 par taux de stabilisation ainsi que pour le sol stabilisé seulement physiquement. Le volume total du matériau a été de 30 litres dont 21 litres représentant 70% de la terre de nyangezi et 9 litres représentant 30% du sable concassé.

Sachant que :

- ρ_t : masse volumique apparente de la terre sèche en g/cm³
- ρ_s : masse volumique apparente du sable en g/cm³
- C : taux de stabilisation en ciment ou en chaux
- V_t : volume terre en litre
- V_s : volume sable en litre
- P_C : poids du ciment en Kg

Les différents poids de stabilisant sont représentés dans les tableaux III.4 :

Tableau II-4 formulation et dosage sol K1', ciment (chaux), sable concassé

Vt	21 litres = 0.021m ³ = 21000 cm ³		
ρt	2,41 g/cm ³		
Vs	9 litres = 0.009m ³ = 9000 cm ³		
ρs	2,66 g/cm ³		
C	4%	6%	8%
Pc	2,982 Kg	4,473 Kg	5,964 Kg

Mélange constitué de 30 litres de matériau dont 15 litres représentant 50% de la terre de nyangezi et 15 litres représentant 50 % du sable concassé. Les différents poids de stabilisant sont représentés dans les tableaux III.5 :

Tableau II-5 formulation et dosage sol K2', ciment (chaux), sable concassé

Vt	15 litres = 0.015m ³ = 15000 cm ³		
ρt	2,44 g/cm ³		
Vs	15 litres = 0.015m ³ = 15000 cm ³		
ρs	2,66 g/cm ³		
C	4%	6%	8%
Pc	3,06 Kg	4,59 Kg	6,12 Kg

Mélange constitué de 30 litres de matériau dont 15 litres représentant 50% de la terre de nyangezi et 15 litres représentant 50 % du sable concassé. Les différents poids de stabilisant sont représentés dans les tableaux II.6 :

Tableau II-6 formulation et dosage sol K3', ciment (chaux), sable concassé.

Vt	15 litres = 0.015m ³ = 15000 cm ³		
ρt	2,42 g/cm ³		
Vs	15 litres = 0.015m ³ = 15000 cm ³		
ρs	2,66 g/cm ³		
C	4%	6%	8%
Pc	3,048 Kg	4,572 Kg	6,096 Kg

Les quantité d'eau étaient respectivement 1.5 litres pour les BTC témoin, de 2litres pour les BTS au ciment et de 3litres pour les BTS à la chaux éteinte.

Le tableau II.4 ; II.5 ; II.6 présentent les différents poids de stabilisant connaissant a priori les volumes de terre et de sable ainsi que le pourcentage de stabilisant. C'est donc le poids de ciment (chaux) qui est cherché, On calcule alors Le poids en ciment qui est donné à la *formule (II.16)*:
Le tableau II.7 présente le nombre total des BTC confectionnées

Tableau II-7 nombre des blocs confectionné

	Epreuve témoin			Epreuve K1'			Epreuve K2'			Epreuve K2'		
	K1	K2	K3									
Durée de cure (j)	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Taux de stabilisation	0%	0%	0%	4%	6%	8%	4%	6%	8%	4%	6%	8%
Nombre des briques	4	4	4	8	8	8	8	8	8	8	8	8
TOTAL	84											

Comme présenté au tableau II.7 le nombre total des blocs a été de 84 dont 4 bloc pour chaque échantillon stabilisé physiquement et 8 pour chaque échantillon stabilisé chimiquement dont 4 pour le ciment et 4 pour la chaux.

II.2.2.7 La Cure et séchage

➤ Cure humide et sèche

Les BTC, une fois pressées, sont stockées en cure humide (sous bâche) ou en cure sèche sous un ombrage pendant 7, 14, 21, 28 et même 45 jours.

Deux facteurs déterminent les conditions de cure :

- Le ciment doit être maintenu en ambiance humide pendant au moins 7 jours pour atteindre à résistance maximale;
- L'argile a du retrait en séchant.

Il faut éviter un dessèchement de surface trop rapide qui provoquera des fissures de retrait. Les blocs doivent être à l'abri du soleil et du vent et maintenues dans une humidité relative (Hr) proche de 100% en le couvrants des feuilles plastiques étanche. Après 28 jours, la résistance des ciments ne croitra plus de façon notable. Une température élevée doit accroitre la résistance ; elle peut être élevée grâce à des feuilles plastiques noires. Par contre, le séchage à l'abri du vent et du soleil est indispensable environ 7 jours. Pour notre cas, c'est la cure sèche qui a été effectué dans un délai de 14 jours [30]. La figure II.11 illustre les différentes conditions de cure et séchage :

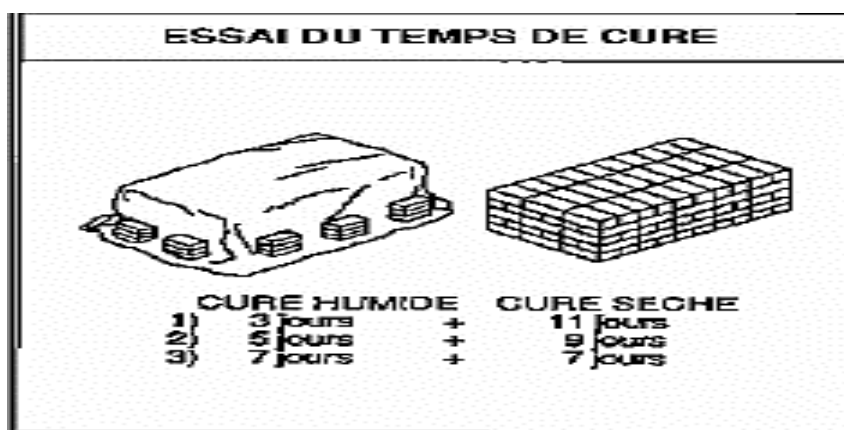


Figure II-12 cure de séchage [17]

➤ Séchage

C'est un élément important dans la chaîne de fabrication des BTC. Après la cure, il faut permettre au ciment ou à la chaux de faire sa prise et l'évaporation de l'eau ainsi que le retrait de la fraction argileuse. Mais cette évaporation doit être progressive car le liant a besoin d'eau pendant la durée de sa prise. Recouvrir les briques d'un film plastique durant plusieurs jours, ce qui permet de considérablement d'améliorer les effets du traitement.

Le séchage doit se faire à l'abri des intempéries mais aussi de tout facteur météorologique « fort » pouvant perturber le cycle du séchage tel que :

- La pluie : pénétration d'eau, désagrégation de la brique alors que le ciment n'a pas fini sa prise; Le gel : désagrégation de la brique;
- Le vent, les fortes chaleurs : causent un séchage trop rapide, ce qui va entraîner une dessiccation du produit, donc altérer la prise du ciment. Il y aura aussi un risque de fissuration due au retrait trop important.

II.2.2.8 Essai de compression sèche

L'essai d'écrasement permet de mesurer la résistance à la compression des briques. Les briques sont écrasées à plat, dans la même position qu'elles occupent dans la maçonnerie. L'essai de compression se réalise sur 3 à 5 échantillons afin de faire la moyenne des résultats. Ils sont ensuite placés dans une machine spécifique et sont soumis à une charge pouvant aller de 500 à 1500 kg. L'essai a été réalisé suivant la norme NF EN 14617-15.

➤ Appareil utilisés :

Presse hydraulique représenté sur la figure II.10

➤ Mode opératoire :

- Préparation des blocs ;

- Sécher les éprouvettes à l'étuve ;
- Soumettre les éprouvettes à un effort uni dimensionnelle afin d'évaluer leur contraintes limites en compression sèche ;

➤ **Expression des résultats :**

On calcule ainsi la valeur de la contrainte en compression par la *formule (II.20)* :

$$R_c = \frac{F}{S} \quad (II.16)$$

Avec ; F : force maximale de compression

S : section de la brique

Rc : contrainte en compression

II.2.2.9 Essai d'absorption d'eau

L'essai d'absorption permet d'apprécier le comportement des blocs dans un environnement humide. Il nous donne une idée sur le taux d'absorption de l'eau durant une période donnée.

L'essai se réalise également sur 3 à 5 échantillons passés à l'étuve au préalable afin d'obtenir un poids sec constant. On pose ceux-ci sur une surface poreuse saturée d'eau en permanence, dans une atmosphère humide pendant 10 min. le principe est tel que, le matériau soit partiellement immergé sur une hauteur de 5mm. [4].

➤ **Appareil utilisés :**

Bac d'immersion ; tamis

La figure II.13 illustre le dispositif d'immersion pour l'essai d'absorption par capillarité :

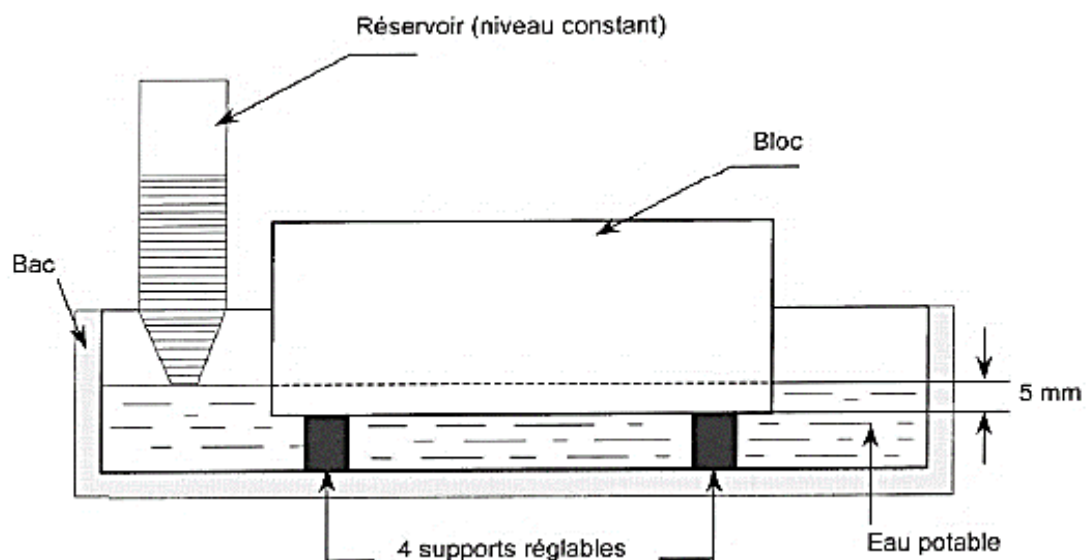


Figure II-13 dispositif d'immersion [26]

➤ **Expression des résultats :**

Les échantillons sont alors retirés, essuyé et pesé pour avoir la masse humide. Le coefficient d'absorption est donné par la relation de la *formule* (II.21) et est exprimé en g/cm²min :

$$C_b = \frac{(M_h - M_d)}{A * \sqrt{t}} * 100 \quad (II.17)$$

Avec : M_h : masse humide de l'éprouvette ; M_d : masse sèche de l'éprouvette ; A : surface immergée ; t : temps d'immersion ; C_b : coefficient d'absorption capillaire. Le taux d'absorption (w) d'eau est calculé par la *formule* (II.22) [29] :

II.3 CONCLUSION PARTIELLE

Dans cette partie il a été question de présenter les différentes méthodes utilisé pour l'échantillonnage, les essais d'identification relatives aux matériaux BTC ; qui peuvent se faire in situ c'est-à-dire sur terrain et qui dépend de l'expertise et la maîtrise de l'opérateur mais également au laboratoire pour la confirmation des essais faits sur terrain, et les différentes formulations des BTC et enfin la cure sèche des produits respectivement de 14jou

Chapitre III PRESENTATION ET DISCUSION DES RESULTATS

INTRODUCTION

Les briques doivent présenter un certain nombre de qualités, répondant à des performances minimales, pour pouvoir être utilisées comme matériau de construction. Pour valider les procédures d'essais sur les briques, des nombreux essais de comparaison ont été réalisés avec différents matériaux pour lesquels les identifications et les paramètres de mise en œuvre ont été très précisément enregistrés en fin de vérifier la reproductibilité des résultats.

Après chaque période de conservation, les briques sont soumises à l'effort de compression directe jusqu'à la rupture. Le but recherché est justement d'augmenter au maximum la résistance et de supprimer l'influence de la teneur en eau des briques... [3]

III.1 ESSAI D'IDENTIFICATION

L'identification correcte de la terre est essentielle pour décider de son utilisation ou de sa stabilisation. La reconnaissance de la terre s'effectue par différent test réalisés qui sont entre autre.

III.1.1 Essai in situ

Des essais réalisés sur terrain, la reconnaissance du sol nous a conduit à une conclusion qu'il s'agit d'un sol argileux.

III.1.2 Essai de laboratoire

A) Teneur en eau

Le tableau III.1 reprend les caractéristiques pour le sol de KALUA NYANGEZI

Tableau III-1 les teneur en eau des sols

	Teneur en eau %
KALUA(K1)	29
KALUA(K2)	30
KALUA(K3)	28

D'après le tableau III.1 nous remarquons que la valeur de la teneur en eau naturelle de l'échantillons de sol K2 de KALUA-NYANGEZI est plus grand que les autres.

B) Les masses volumiques

Le tableau III.2 reprend les caractéristiques pour le sol de KALUA NYANGEZI

Tableau III-2 les masses volumique des sols

	Masse absolue (g/cm ³)	Masse apparente (g/cm ³)
KALUA(K1)	2,34	1,65
KALUA(K2)	2,35	1,68
KALUA(K3)	2,33	1,64

D'après le tableau III.2 nous remarquons que la valeur de la masse volumique apparente ainsi que celles des grains solides des échantillons de sol K2 de KALUA-NYANGEZI sont supérieurs que celles des autres sols.

C) Analyse granulométrique

Deux essais ont été utilisés pour déterminer la granulométrie des sols : Analyse Granulométrique (NF P 18-560) et sédimentométrie (NF P 94-057). Les courbes Granulométriques sont présentées sur les figures.

La figure III.1 illustre la composition granulométrique par tamisage de l'échantillons K1 :

A-G PAR TAMISSAGE SOL K1

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

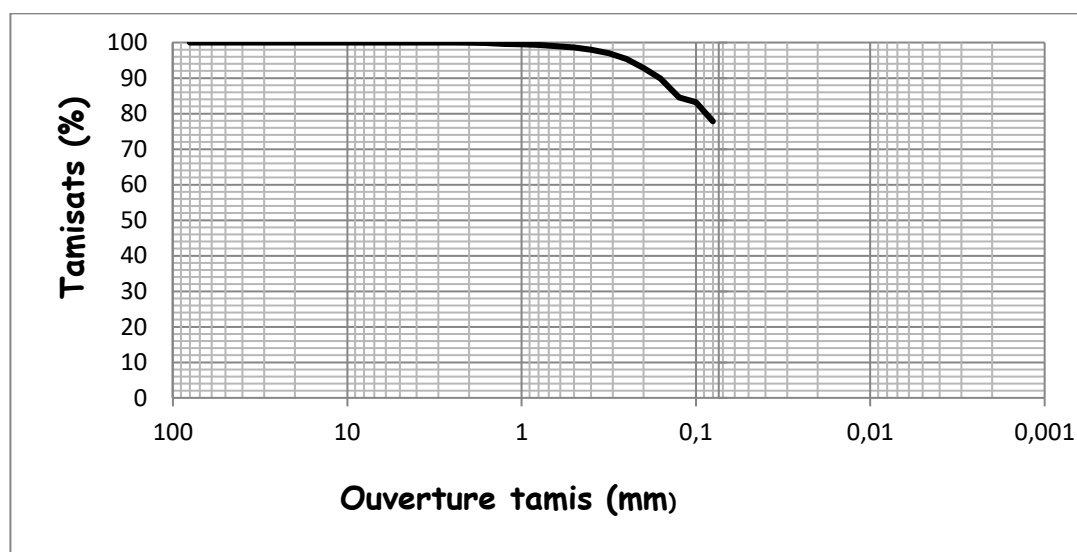


Figure III-1 composition granulométrique sol K1

La figure III.2 illustre la composition granulométrique par sédimentométrie de l'échantillons K1 :

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K1

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

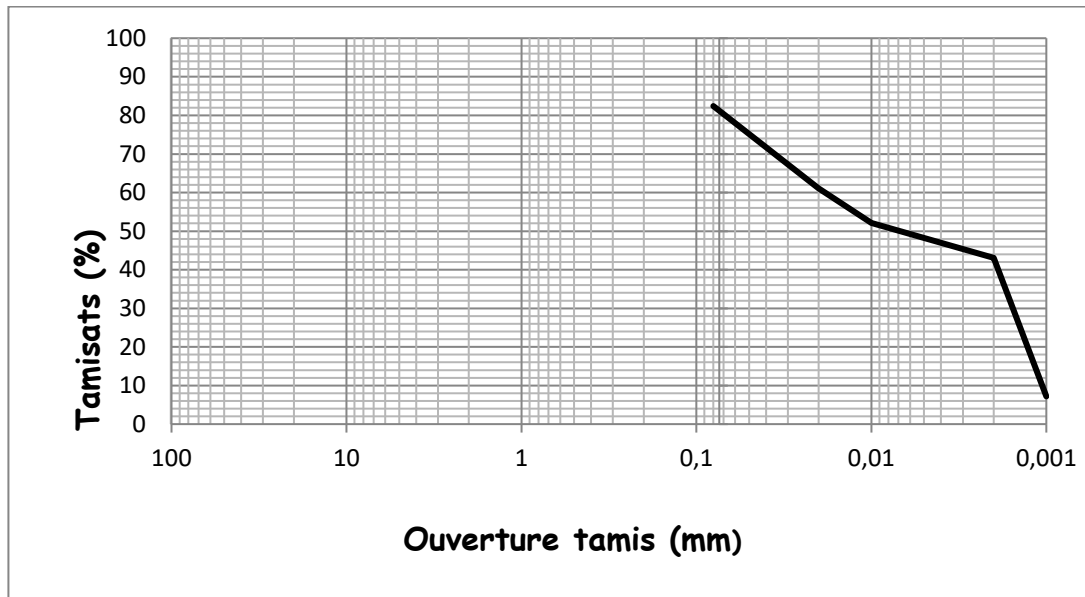


Figure III-2 composition granulométrique sol K1

La figure III.3 illustre la composition granulométrique par tamisage-sédimentométrie de l'échantillons K1 :

A-G PAR TAMISAGE-SEDIMENTOMETRIE SOL K1

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

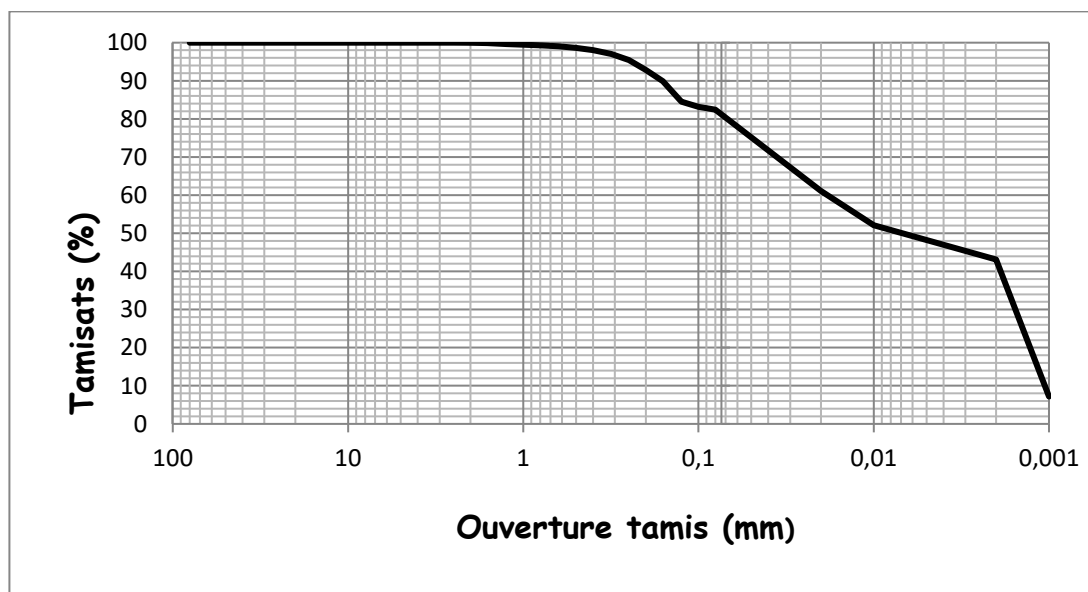


Figure III-3 composition granulométrique sol K1

Les courbes granulométriques obtenue et illustrées aux figures III.1 et III.2 ci haut montrent que

le pourcentage des fines est de 77.84% c'est-à-dire les particules passant au tamis de 0,080mm mais également la courbe tend vers le 100% des tamisât aux particules de dimensions 1mm. Il en découle que l'échantillons K1 de sol de KALUA-NYANGEZI appartient à la classe des sols fins. La figure III.4 illustre la composition granulométrique par tamisage de l'échantillons K2 :

A-G PAR TAMISSAGE SOL K2

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

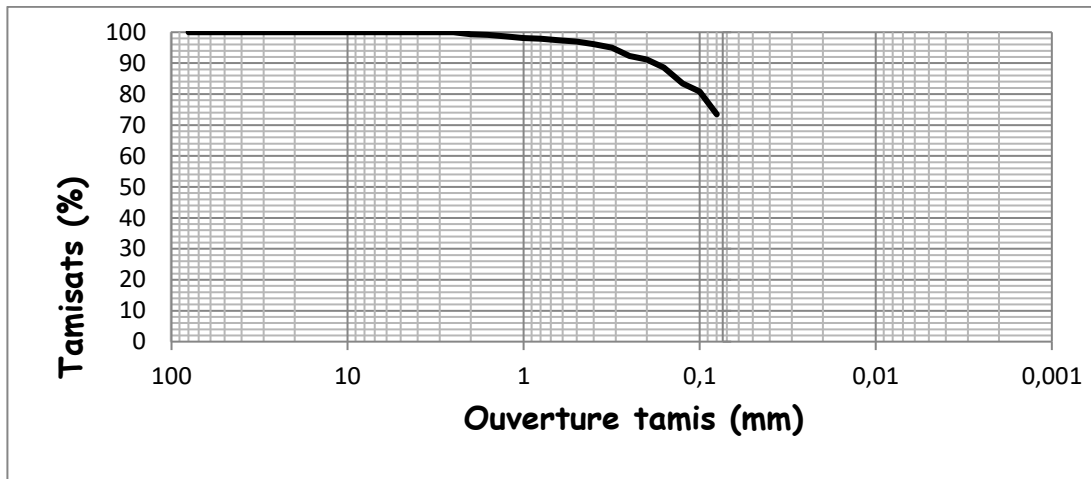


Figure III-4 composition granulométrique sol K2

La figure III.5 illustre la composition granulométrique par sédimentométrie de l'échantillons K2 :

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K2

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

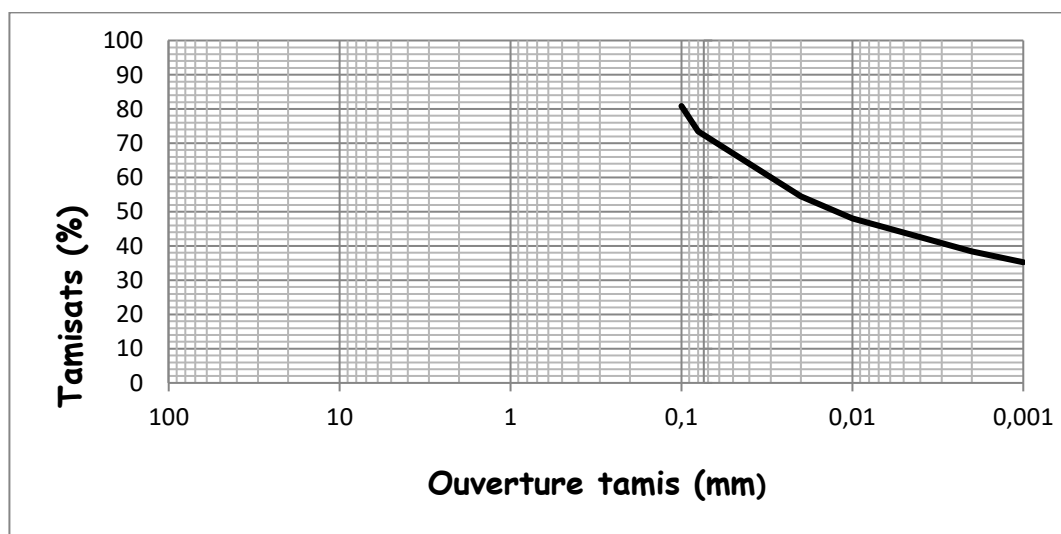


Figure III-5 composition granulométrique du sol K2

La figure III.6 illustre la composition granulométrique par tamisage-sédimentométrie de

l'échantillons K2 :

A-G PAR TAMISAGE-SEDIMENTOMETRIE SOL K2

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

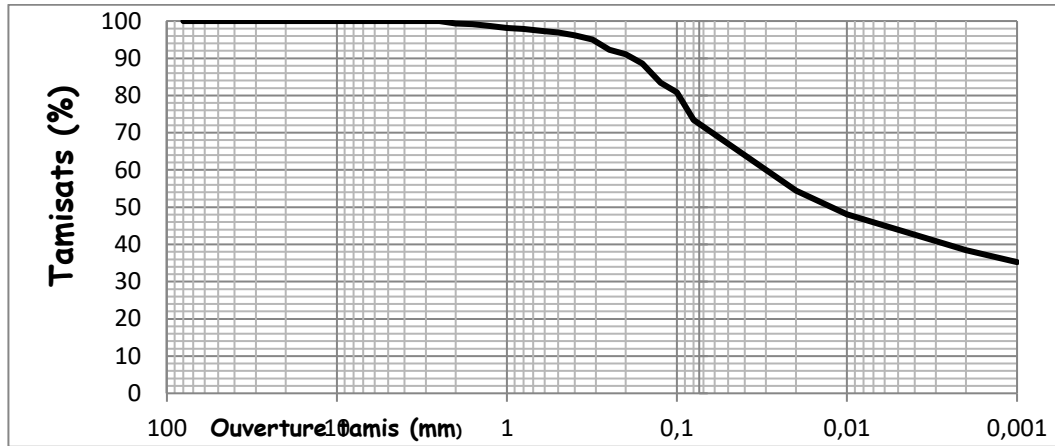


Figure III-6 composition granulométrique du sol K2

Les courbes granulométriques obtenue et illustrées aux figures III.4 et III.5 ci haut montrent que le pourcentage des fines est de 73.468 % c'est-à-dire les particules passant au tamis de 0,080mm mais également la courbe tend vers le 100% des tamisât aux particules de dimensions 1mm. Il en découle que l'échantillons K2 de sol de KALUA-NYANGEZI appartient également à la classe des sols fins.

La figure III.7 illustre la composition granulométrique par tamisage de l'échantillons K3 :

A-G PAR TAMISSAGE SOL K3

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

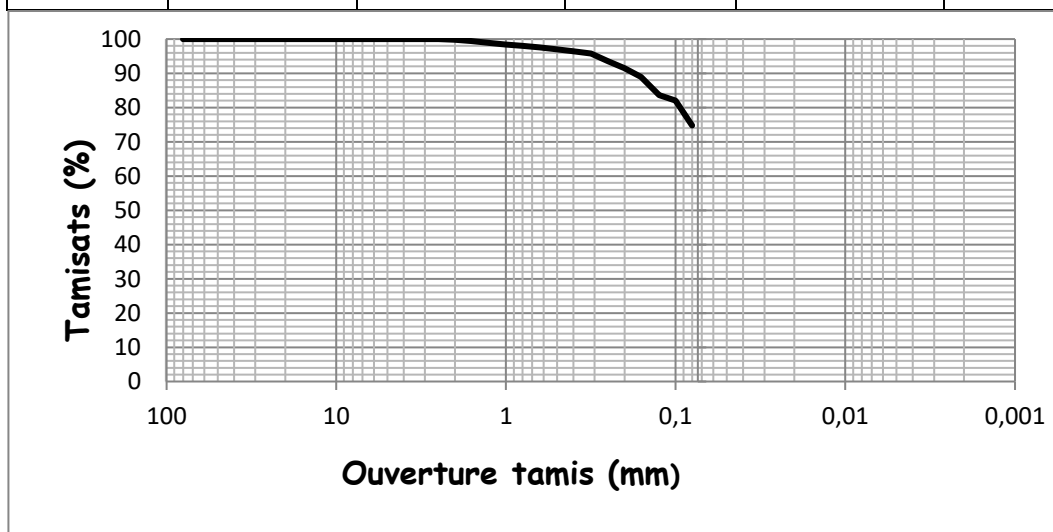


Figure III-7 composition granulométrique du sol K3

La figure III.8 illustre la composition granulométrique par sédimentométrie de l'échantillons K3 :

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K3

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

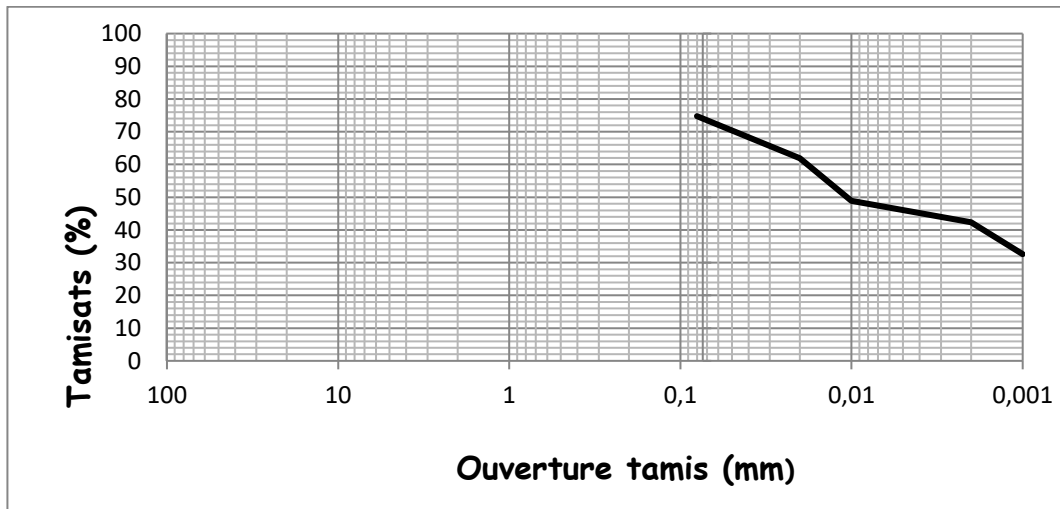


Figure III-8 composition granulométrique du sol K3

La figure III.9 illustre la composition granulométrique par tamisage-sédimentométrie de l'échantillons K3 :

A-G PAR TAMISAGE-SEDIMENTOMETRIE SOL K3

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

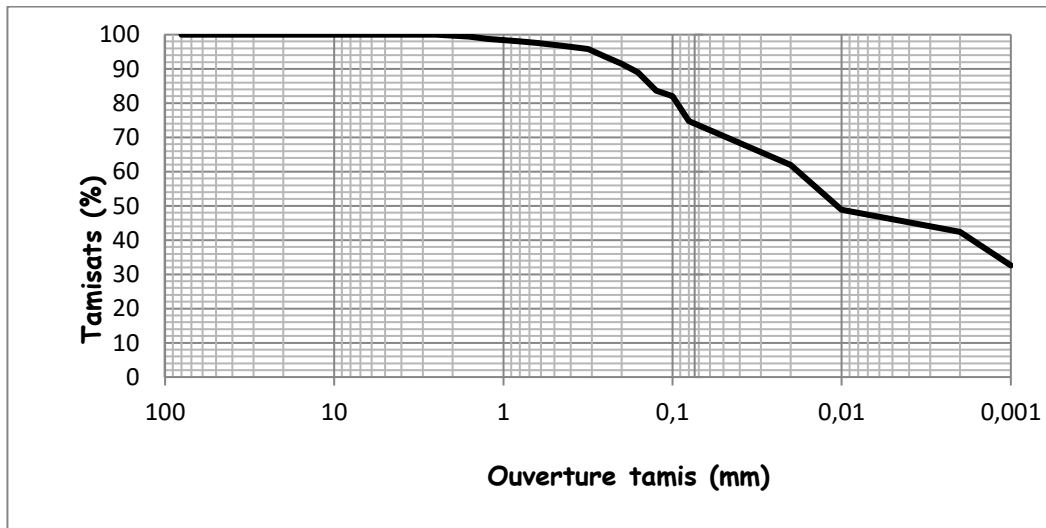


Figure III-9 composition granulométrique du sol K3

Les courbes granulométriques obtenue et illustrées aux figures III.7 et III.8 ci haut montrent que le pourcentage des fines est de 74.768 % c'est-à-dire les particules passant au tamis de 0,080mm mais également la courbe tend vers le 100% des tamisât aux particules de dimensions 1mm. Il en

découle que l'échantillon K2 de sol de KALUA-NYANGEZI appartient également à la classe des sols fins.

D) LIMITE D'ATTERBERG

Les limites d'Atterberg de deux sols étudiés sont déterminées selon la procédure de la norme NF P 94 051. Les résultats des essais sont présentés sur le tableau III.3 :

Tableau III-3 caractéristique de consistance des sols

	Limites d'atterberg(%)		
	Limite de liquidité WL	Limite de plasticité WP	Indice de plasticité IP
KALUA(K1)	30	16,4	13,6
KALUA(K2)	33	25,1	7,9
KALUA(K3)	33,4	17	16,4

Les limites d'atterberg moyenne obtenue pour les trois échantillons traités sont reprises dans le tableau III.3 et de part ces valeurs, le sol K3 donne une grande valeur de limite de liquidité tandis que le sol K2 donne une grande valeur de limite de plasticité.

Des figures III.10, III.11, III.12 ci-dessous l'on peut lire une valeur des limites de liquidité.

- **Limite de liquidité sol K1**

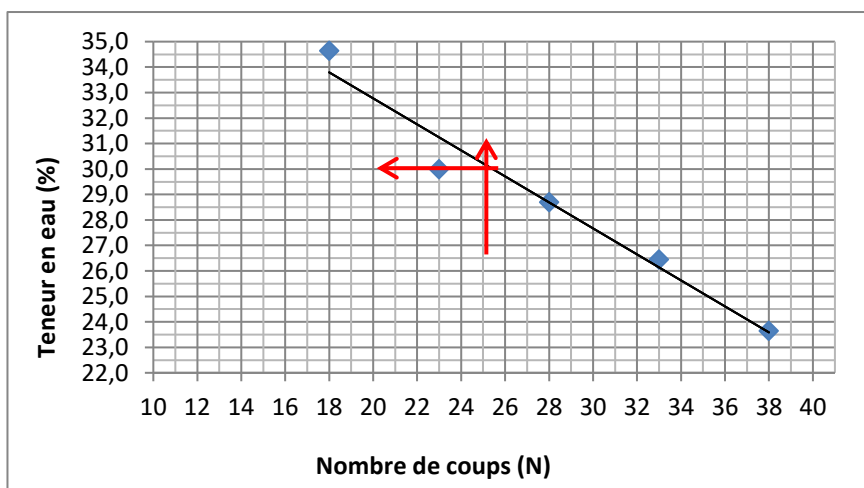


Figure III-10 limite de liquidité du sol K1

• **Limite de liquidité sol K2**

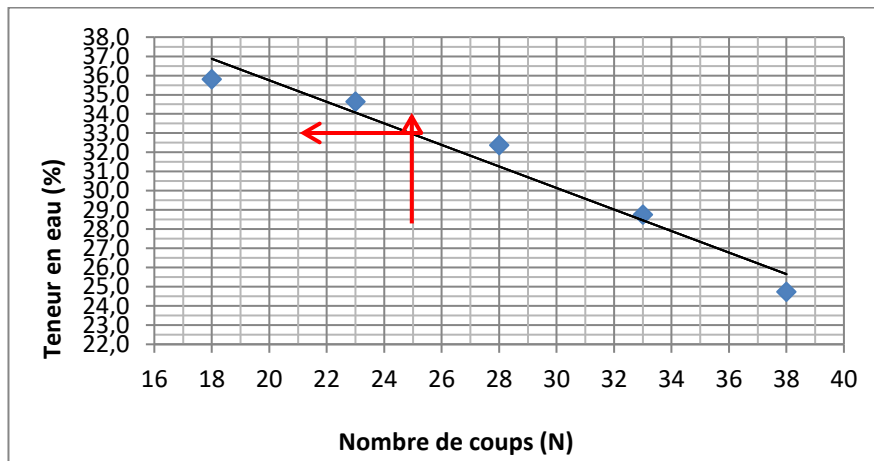


Figure III-11 limite de liquidité du sol K2

• **Limite de liquidité sol K1**

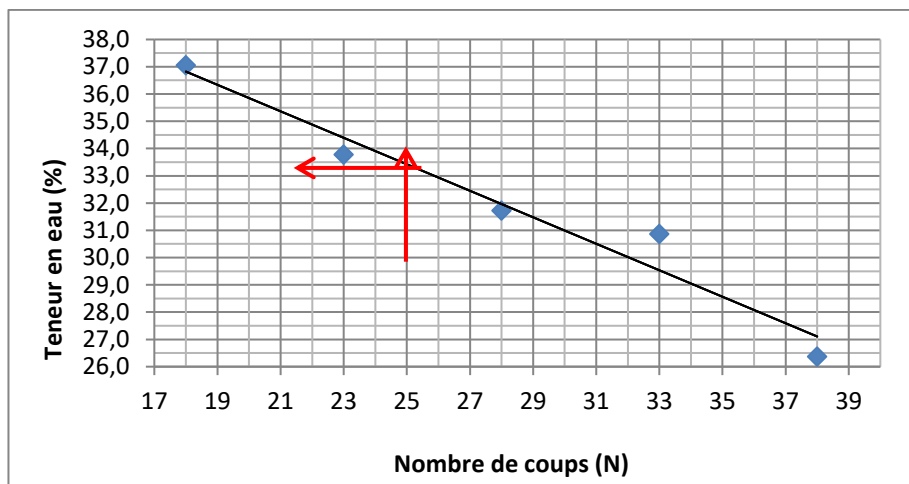


Figure III-12 limite de liquidité du sol

Les figures III.10, III.11, III.12 montrent les valeurs des limites de liquidité pour chaque type de sol lesquelles sont reprises dans le tableau III.3.

E) VALEUR AU BLEU DU SOL

Les résultats des essais au bleu de méthylène sont présentés sur le tableau III.4 :

Tableau III-4 les valeurs au bleu des sols

VBS		
KALUA(K1)	KALUA(K2)	KALUA(K3)
1,6	2,6	2

D'après le tableau III.4 nous remarquons que la valeur au bleu du sol de l'échantillons de sol K2 de KALUA-NYANGEZI est plus grand que les autres.

F) LIANT UTILISE

Le tableau III.5 présente Les caractéristiques des liants utilisés pour la confection des BTC:

Tableau III-5 caractéristique des liants utilisés

CIMENT HIMA			CHAUX ETEINTE
consistance	Prise		Masse volumique (g/cm ³)
35%	Début	fin	2,916
	4h22'33''	6h20'10''	

III.1.2.1 ADEQUATION DE LA TERRE ET CLASSIFICATION DES MATERIAUX POUR LA PRODUCTION DES BTC.

La granularité de la terre sera de préférence inscrite dans les fuseaux du diagramme de texture et elle épousera l'allure générale.

La figure III.13 illustre les courbes granulométriques des échantillons des sol K1 ; K2 et K3 de KALUA-NYANGEZI étudié qui ne sont pas inscrites dans le fuseau de diagrammes des textures c'est ainsi qu'une stabilisation physique a été effectuée à cet effet

a) Courbe et fuseau de granulométrie

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

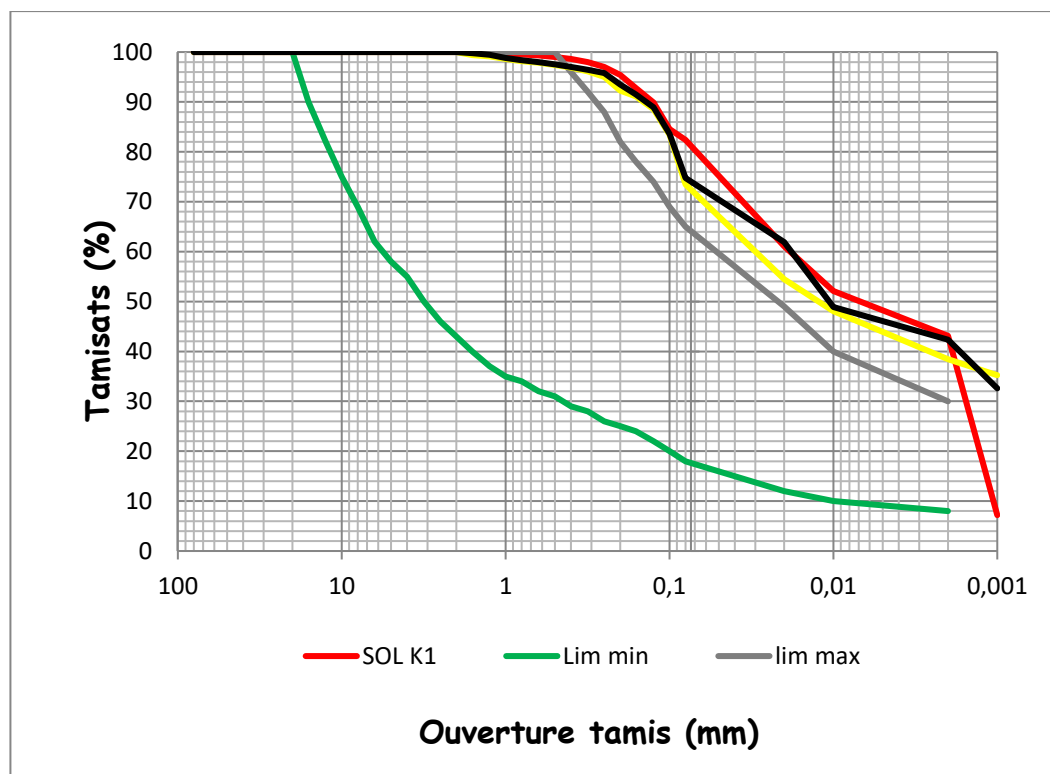


Figure III-13 fuseau granulométrique des sols

La classification a été faite suivant la norme **V Rigassi et Cratère-EAG (1998)** et la norme **NF P 11 300 et G.T.R.** Les résultats des essais d'identification ainsi obtenues permettent de classer le sol en effectuant la combinaison des valeurs issues des essais granulométriques, plasticité et valeur au bleu de méthylène.

a) Fuseau de plasticité

La figure III.14 ci-dessous illustre le diagramme de plasticité des sols.

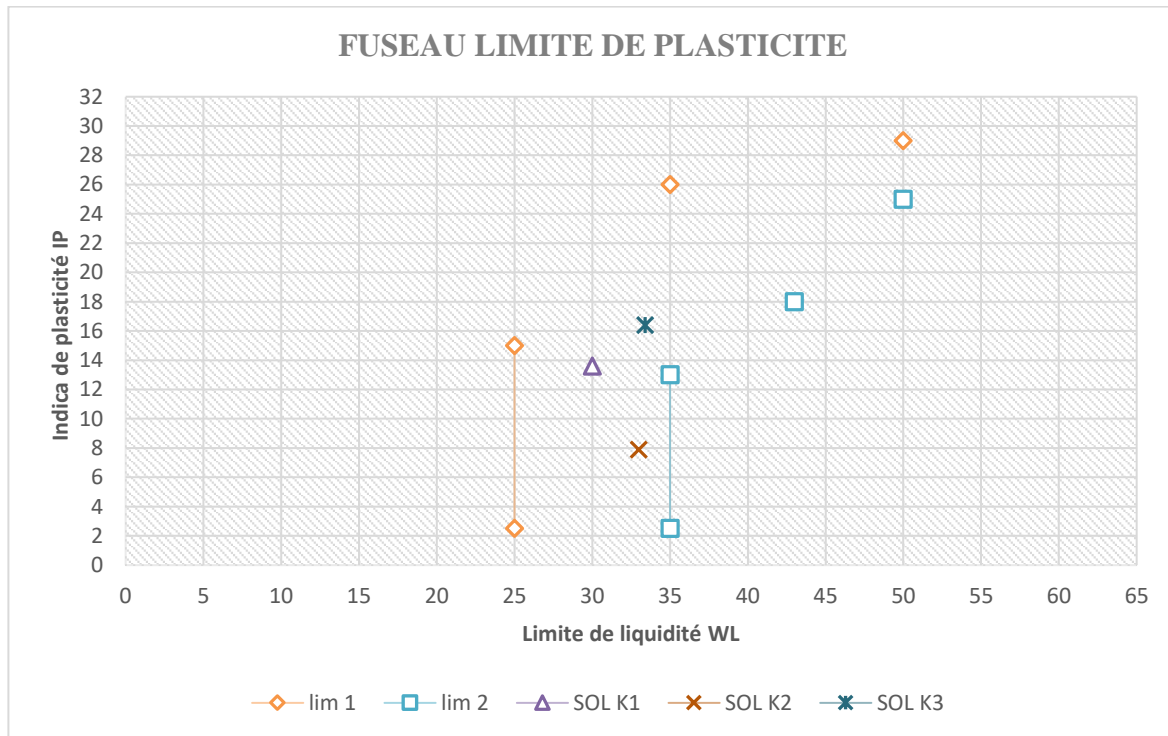


Figure III-14 fuseau de plasticité des sols

Nous remarquons que les caractéristiques de plasticité de tous les sols sont inscrites dans le diagramme de plasticité représenté sur la *figure III.14*

La convenance générale des terres ramène notre échantillon dans les zones représenté dans le tableau III.6.

*Etude comparative entre la stabilisation des briques en terres comprimées (BTC) p
et la chaux éteinte*

Tableau III-6 caractérisation des sols

	SOL K1				SOL K2				S
Caractéristique	Tamisât 0,08mm	Tamisât 2mm	IP	VBS	Tamisât 2mm	Tamisât 0,08mm	IP	VBS	T
	77,84	99,9	13,6	1,6	99,3	73,48	7,9	2,6	7
Zone	A2 ou A1, B2				A1 ou A2, B2				A
Classification	matériau acceptable mais ayant trop des fines ou un peu trop des fines ; sable fin, argileux, limons, argile et marnes peu plastique arènes				matériau acceptable mais ayant un peu trop des fines ou ayant trop des fines ; limon plastique, loess, silts alluvionnaire, sable fin peu plastique				m d li p

La classification nous montre que d'une part un matériau acceptable mais présentant un peu trop des fines et ou trop des fines ; d'autre part un matériau acceptable mais ayant un léger déficit des fines, cela pose un petit souci étant donné que le matériau est tellement fin et que sa courbe granulométrique se trouve en dehors du fuseau prescrit par **CRATERRE** c'est ainsi que la stabilisation physique par ajout de la fraction 0/5 a été faite pour le sol K1 et 0/8 pour les sols K2 et K3.

III.2 CORRECTION DU MATERIAU

La caractérisation et les courbes de nos sols nous ont montré que notre sol est trop fin c'est-à-dire ne respectant pas toutes les proportions requises pour son utilisation quoi qu'étant comprises dans le fuseau limite des BTC. C'est ainsi que nous avons procédé à la stabilisation physique qui consistait à corriger la granulométrie des sols en y ajoutant 35% de sable concassé de fraction 0/5 pour le sol K1 et 50% pour les sols K2 et K3. C'est ainsi que nous avons obtenu des résultats pour les sols corrigés noté K1' ; K2' et K3'. Le tableau III.7 suivant présente les résultats concernant les caractéristiques physiques de ces sols :

Tableau III-7 caractéristique physiques des sols

SOL	Masse volumique		limites d'atterberg			valeur au bleu du sol
	apparente	absolue	WL	WP	IP	
SOL K1'	1,7	2,41	31,5	13,2	18,3	2,2
SOL K2'	1,75	2,44	32	16,1	15,9	2,4
SOL K3'	1,8	2,42	34	23,4	10,6	1,8

La figure III.15 illustre la composition granulométrique par tamisage de l'échantillons K1' :

A-G PAR TAMISSAGE SOL K1'

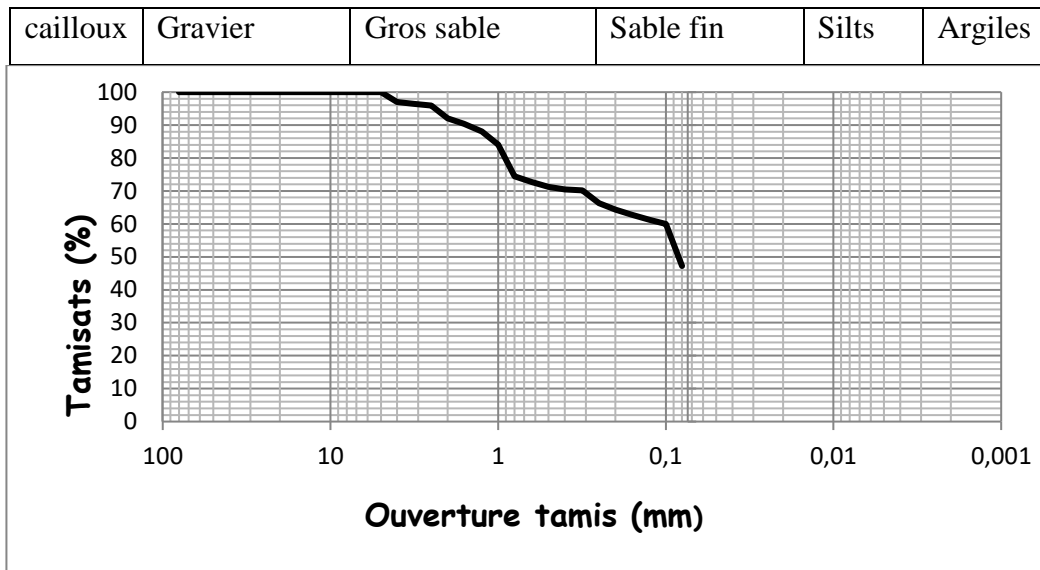


Figure III-15 composition granulométrique du sol K1'

La figure III.16 illustre la composition granulométrique par sédimentométrie de l'échantillon K1' :

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K1'

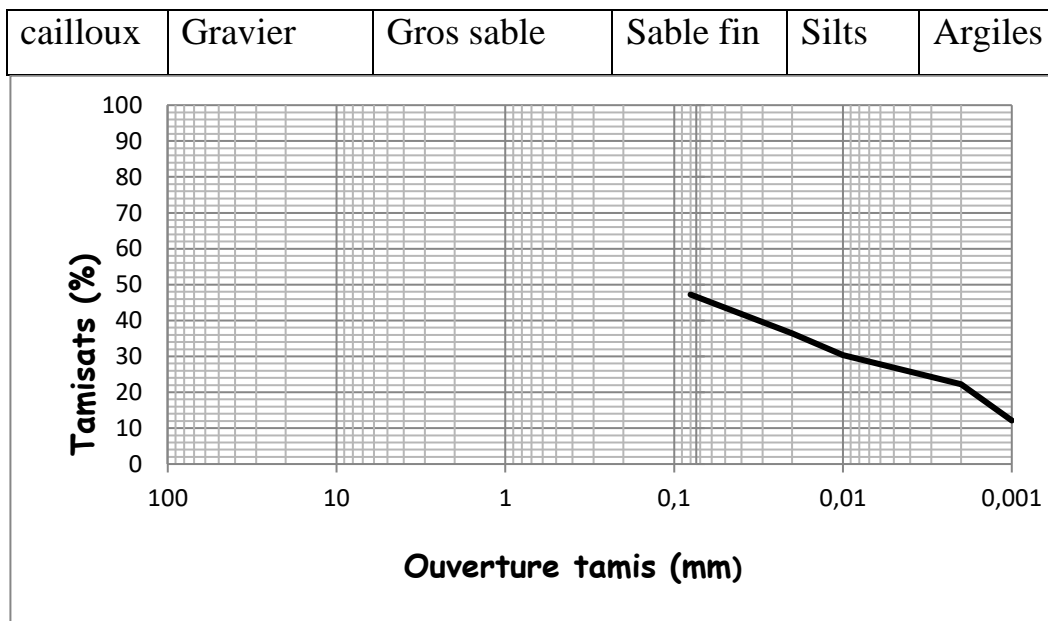


Figure III-16 composition granulométrique du sol K1'

La figure III.17 illustre la composition granulométrique par tamisage-sédimentométrie de l'échantillons K1' :

A-G PAR TAMISAGE-SEDIMENTOMETRIE SOL K1'

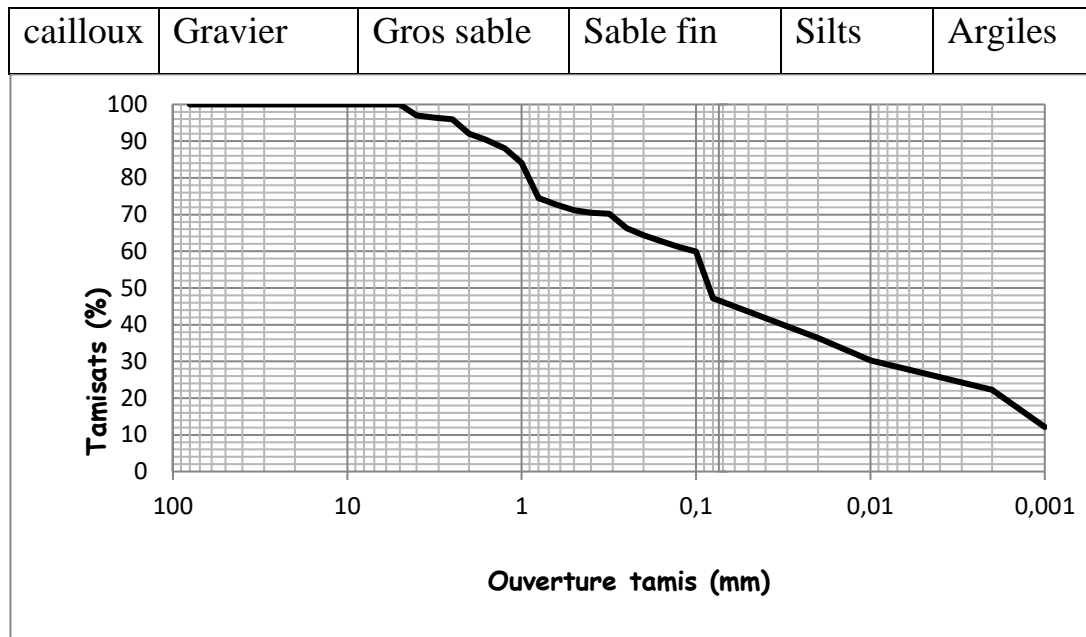


Figure III-17 composition granulométrique du sol K1'

Les courbes granulométriques obtenue et illustrées aux figures III.15 et III.16 ci haut montrent que le pourcentage des fines est de 47.2224 % c'est-à-dire les particules passant au tamis de 0,080mm. Nous remarquons une diminution considérable bien que l'échantillons K1' de sol de KALUA-NYANGEZI appartient toujours à la classe des sols fins.

La figure III.18 illustre la composition granulométrique par tamisage de l'échantillons K2' :

A-G PAR TAMISSAGE SOL K2'

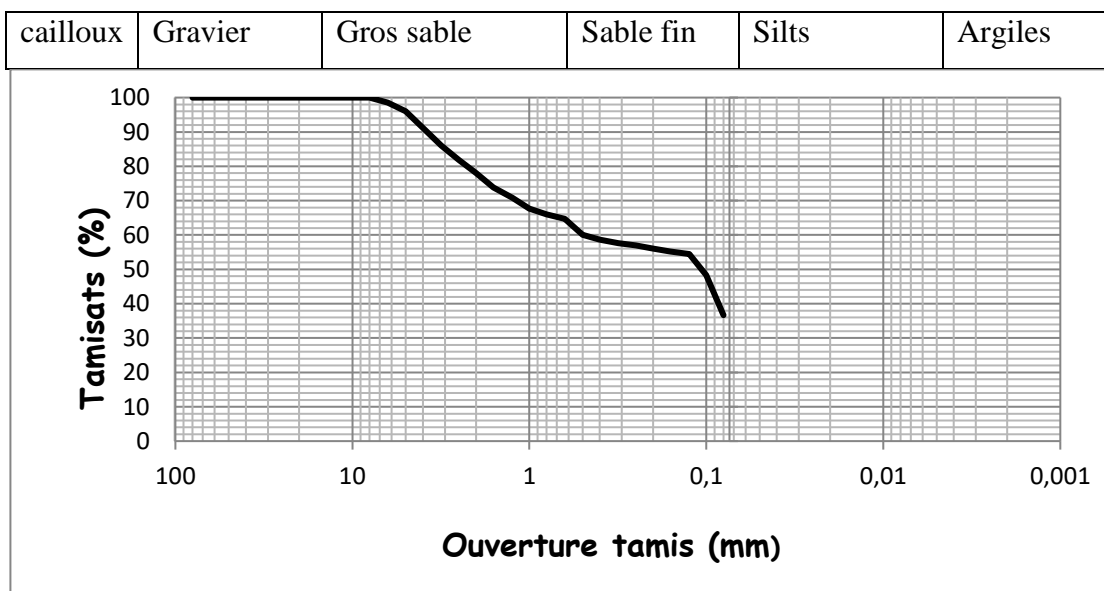


Figure III-18 composition granulométrique du sol K2'

La figure III.19 illustre la composition granulométrique par sédimentométrie de l'échantillons

K2' :

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K2'

cailloux	Gravier	Gros sable	Sable fin	Silts	Argiles
----------	---------	------------	-----------	-------	---------

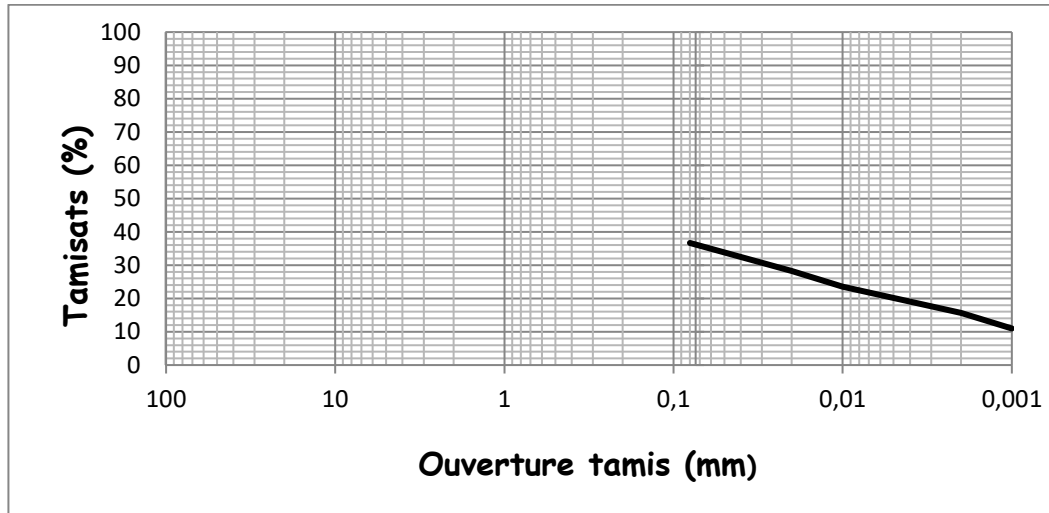


Figure III-19 composition granulométrique du sol K2'

La figure III.20 illustre la composition granulométrique par tamisage-sédimentométrie de l'échantillons K2' :

A-G PAR TAMISAGE-SEDIMENTOMETRIE SOL K2'

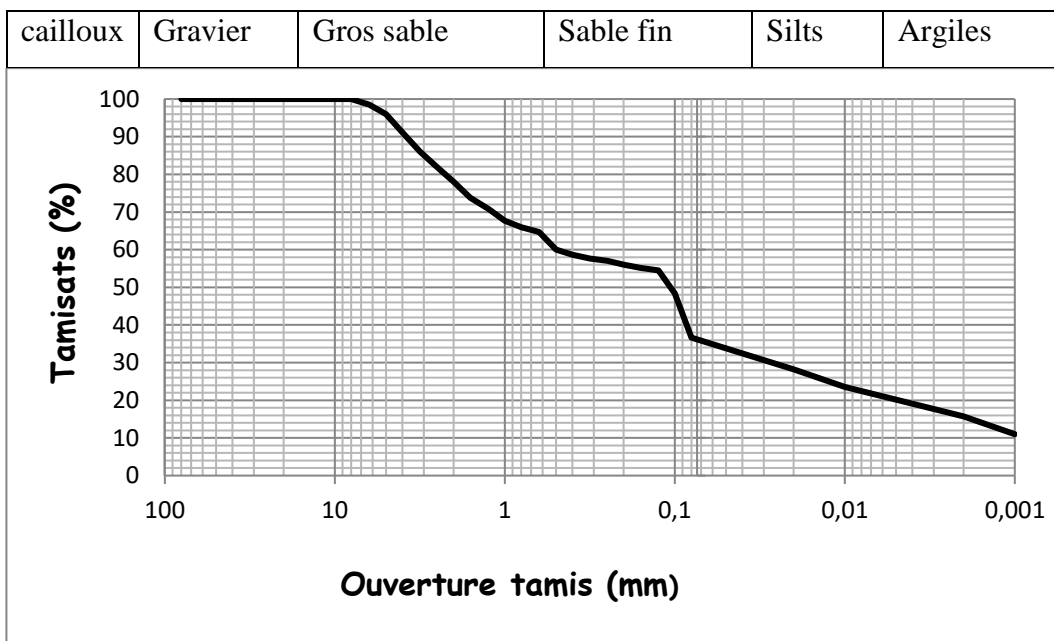


Figure III-20 composition granulométrique du sol K2'

Les courbes granulométriques obtenue et illustrées aux figures III.18 et III.19 ci haut montrent que le pourcentage des fines est de 36.66 % c'est-à-dire les particules passant au tamis de

0,080mm. Nous remarquons une diminution considérable bien que l'échantillons K2' de sol de KALUA-NYANGEZI appartient toujours à la classe des sols fins.

La figure III.21 illustre la composition granulométrique par tamisage de l'échantillons K3' :

A-G PAR TAMISSAGE SOL K3'

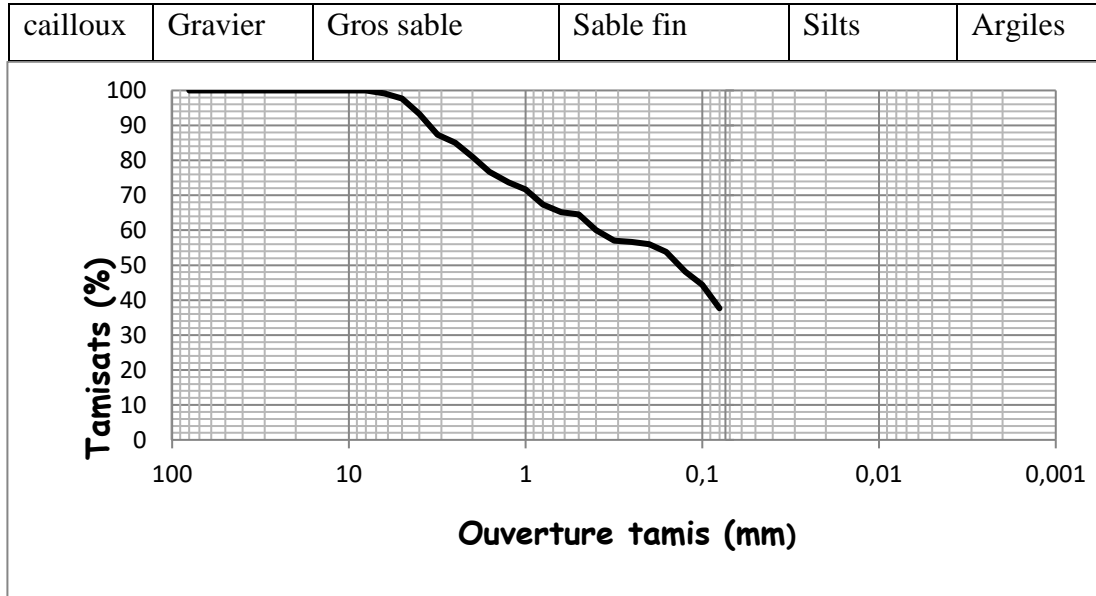


Figure III-21 composition granulométrique du sol K3'

La figure III.22 illustre la composition granulométrique par sédimentométrie de l'échantillons K3' :

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K3'

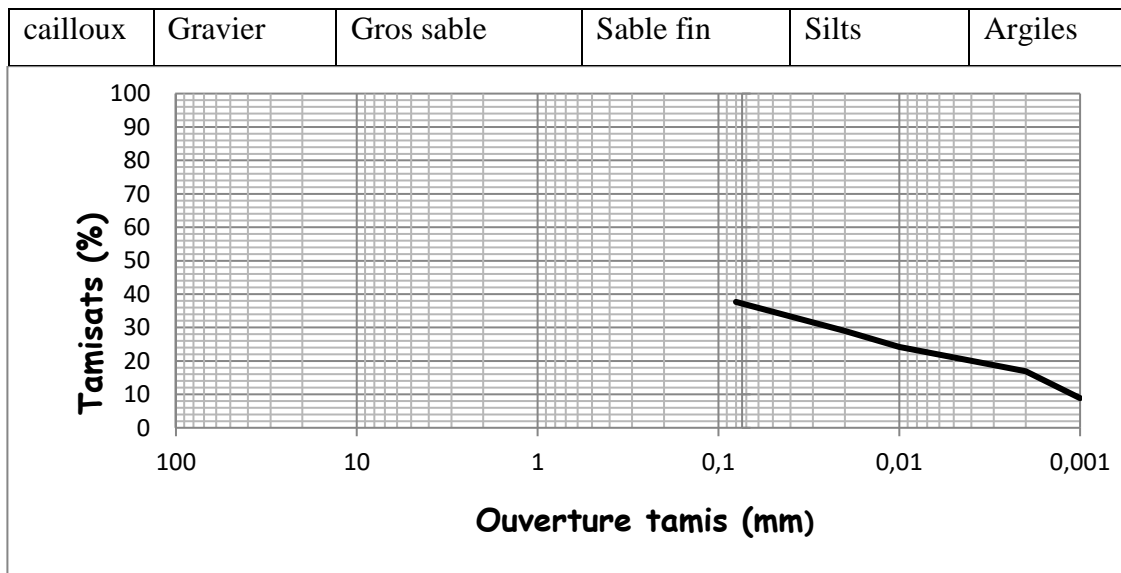


Figure III-22 composition granulométrique du sol K3'

La figure III.23 illustre la composition granulométrique par tamisage-sédimentométrie de l'échantillons K3' :

A-G PAR TAMISAGE-SEDIMENTOMETRIE SOL K3'

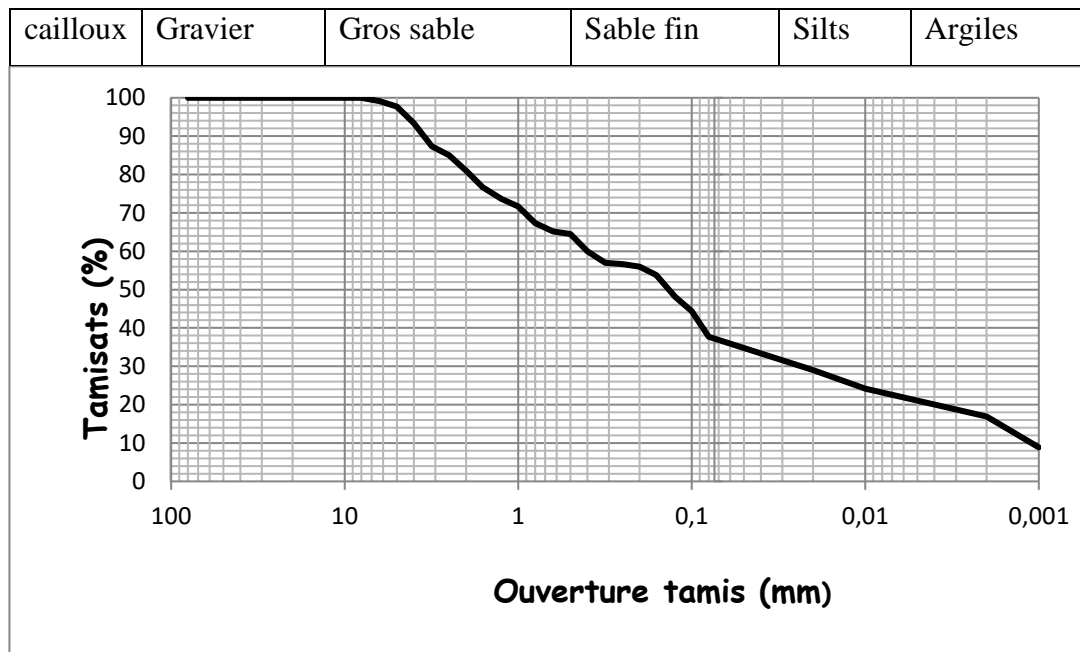


Figure III-23 composition granulométrique du sol K3'

Les courbes granulométriques obtenue et illustrées aux figures III.21 et III.22 ci haut montrent que le pourcentage des fines est de 37.66 % c'est-à-dire les particules passant au tamis de 0,080mm. Nous remarquons une diminution considérable bien que l'échantillons K2' de sol de KALUA-NYANGEZI appartient toujours à la classe des sols fin.

III.2.1 Adéquation de la terre et classification des matériaux pour la production des BTC.

a) Courbes et fuseau de granulométrie

La figure III.24 illustre les courbes granulométriques des échantillons des sol corrigé K1' ; K2' et K3' de KALUA-NYANGEZI étudié qui sont inscrites dans le fuseau de diagrammes des textures.

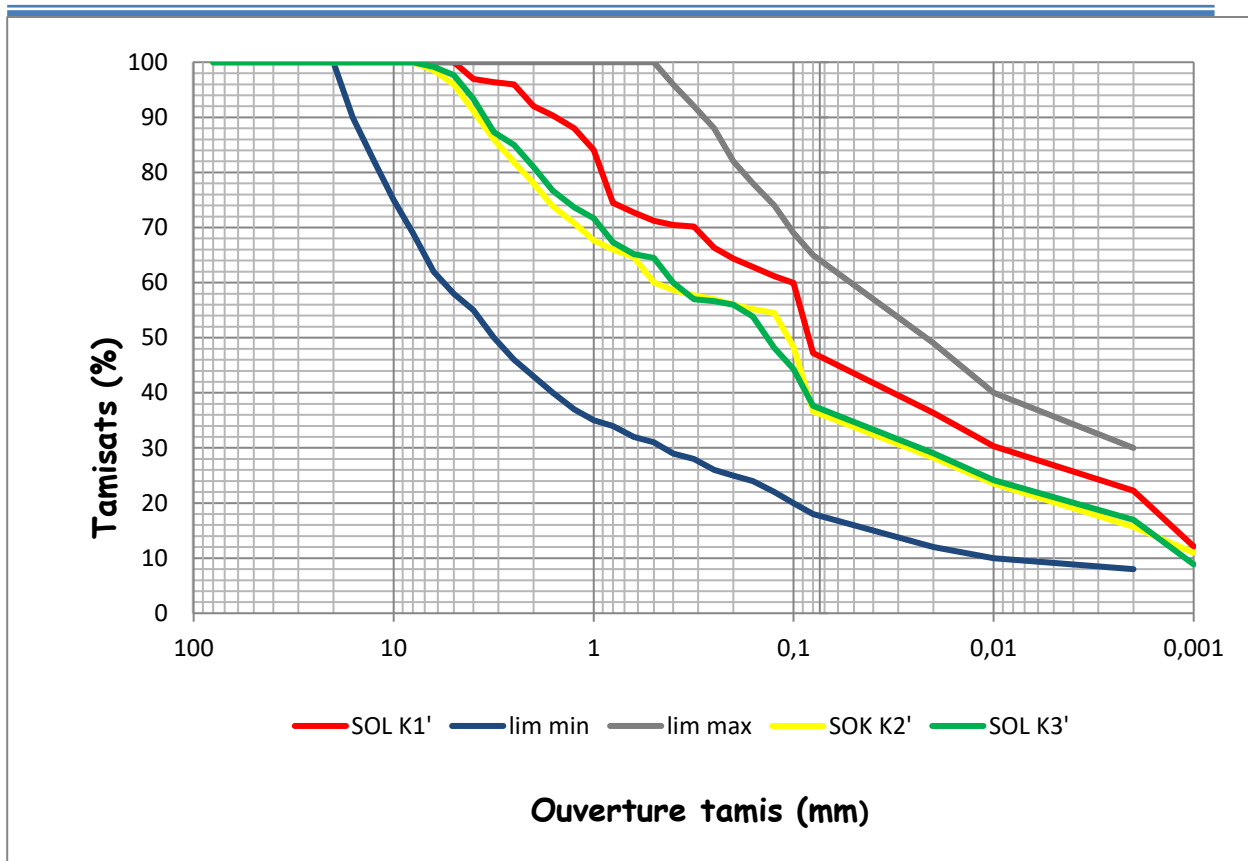


Figure III-24 fuseau limite de granulométrie

b) Diagramme et Fuseau de plasticité

➤ **Diagramme SOL K1'**

De la figures III.25 ci-dessous, l'on peut lire une valeur des limites de liquidité.

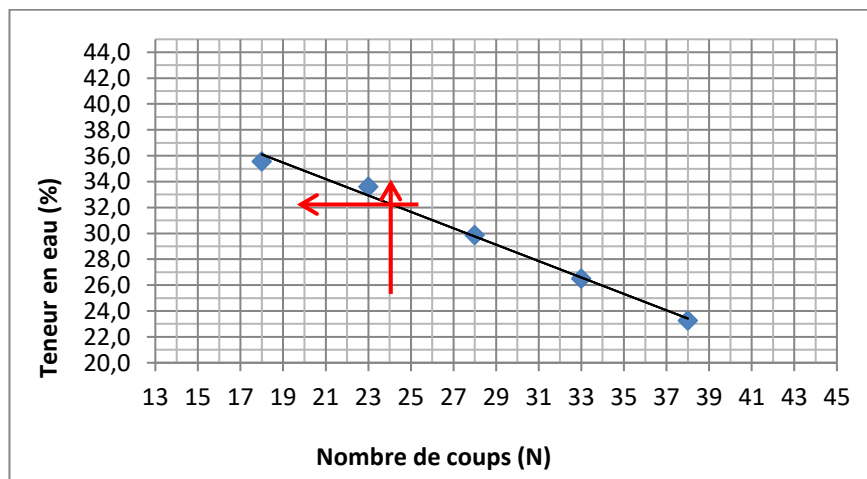


Figure III-25 limite de liquidité du sol K1'

De la figures III.26 ci-dessous, l'on peut lire une valeur des limites de liquidité.

➤ Diagramme SOL K2'

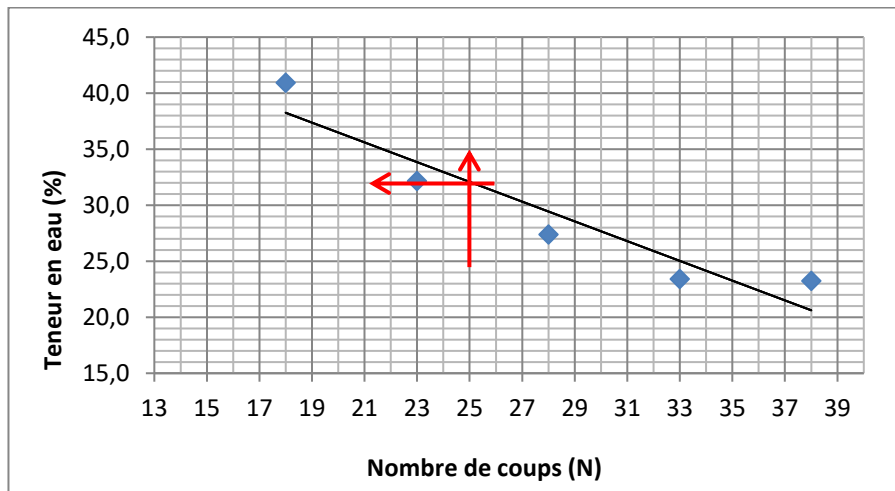


Figure III-26 limite de liquidité du sol K2'

De la figures III.27 ci-dessous, l'on peut lire une valeur des limites de liquidité.

➤ Diagramme SOL K2'

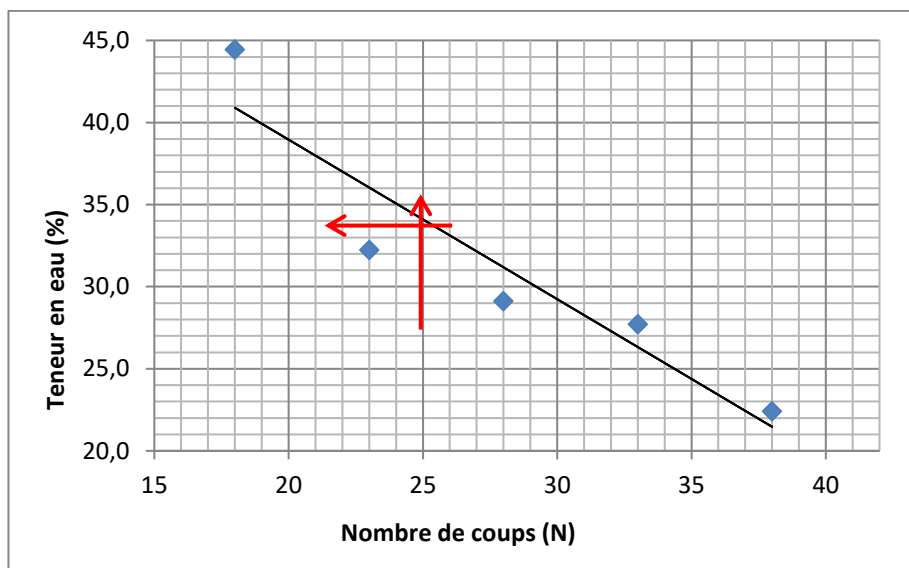


Figure III-27 limite de liquidité du sol K3'

➤ Fuseau de plasticité

La figure III.28 ci-dessous illustre le diagramme de plasticité des sols.

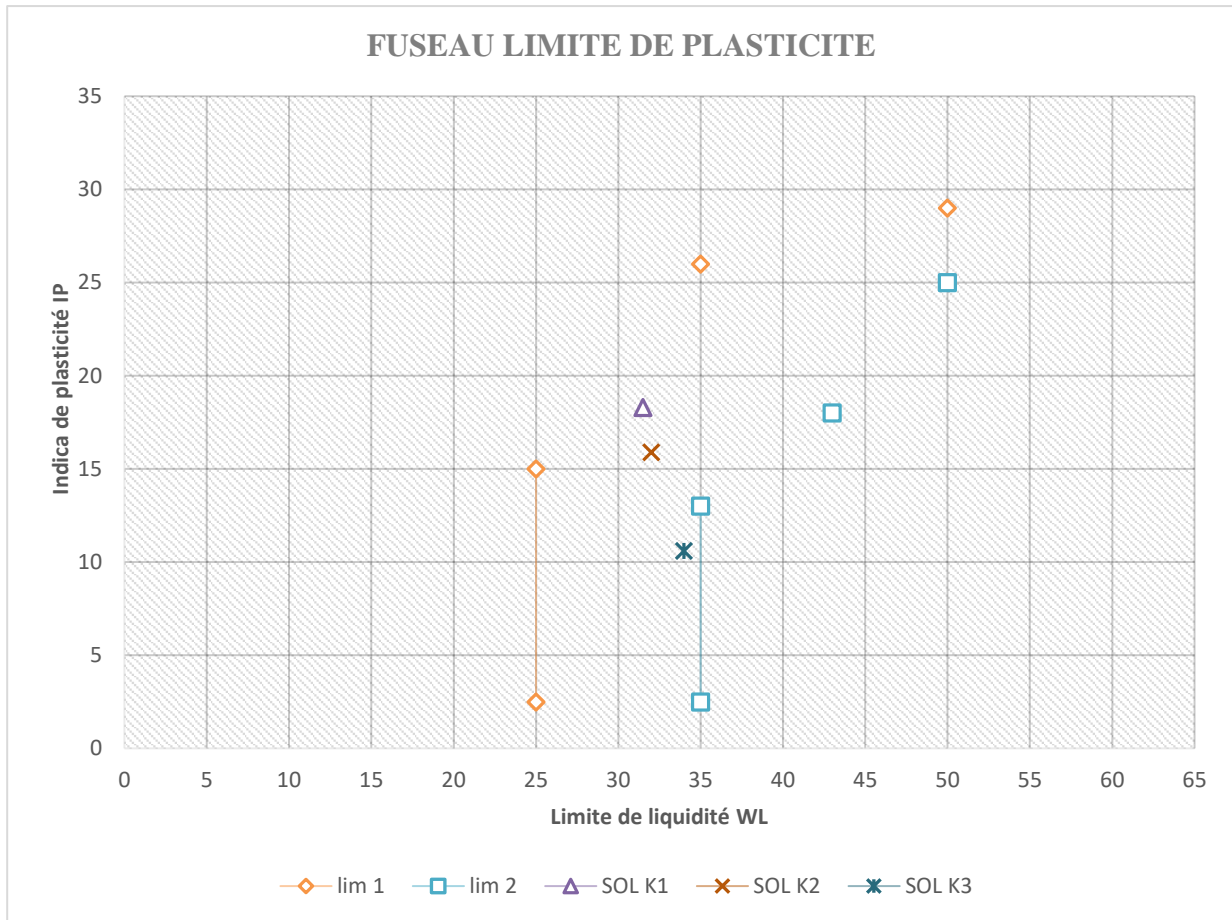


Figure III-28 fuseau limite de plasticité

Nous remarquons que les caractéristiques de plasticité de tous les sols sont inscrites dans le diagramme de plasticité représenté sur la figure III.28

La convenance générale des terres ramène notre échantillon dans les zones représenté dans le tableau III.8 suivant :

Tableau III-8 caractérisation des sols

	SOL K1'				SOL K2'				SOL
Caractéristique	Tamisât 0,08mm	Tamisât 2mm	IP	VBS	Tamisât 2mm	Tamisât 0,08mm	IP	VBS	Tam 0,08
	47,22	92,028	18,3	2,2	78	37,6	15,9	2,4	36,6
Zone	A2, B2				A2, B2				A1.B
Classification	matériau acceptable mais ayant trop des fines ; sable fin, argileux, limons, argile et marnes peu plastique arènes				matériau acceptable mais ayant trop des fines ; limon plastique, lœss, silts alluvionnaire, sable fin peu plastique				maté peu argile peu p

La classification nous montre que d'une part un matériau acceptable mais présentant un peu trop des fines et ou trop des fines ; d'autre part un matériau acceptable mais ayant un léger déficit des fines et ou un déficit de fines la classification peut rester telle quelle car la quantité des fines a baissé considérablement par rapport aux résultats précédents et selon **H Houben et V Rigassi EAG CRA terre 1996**.

III.4 COMPRESSION SECHE

Avant de soumettre les briques à l'essai de compression, elles sont d'abord bien choisies ensuite pesées pour déterminer leurs masses volumiques à la période d'écrasement.

Le tableau III.9 présente la période de cure pour chaque bloc ainsi que le nombre total des BTC sélectionné pour l'essai de compression sèche.

Tableau III-9 période de cure et nombre des blocs écrasés sèches

	Epreuve témoin			Epreuve K1'			Epreuve K2'			Epreuve K2'		
	K1	K2	K3									
Durée de cure (j)	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Taux de stabilisation	0%	0%	0%	4%	6%	8%	4%	6%	8%	4%	6%	8%
Nombre des briques	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
TOTAL	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

La résistance à la compression exprime la capacité des BTCS à résister à la destruction sous l'action des contraintes dues à la charge de compression. Le test est réalisé sur 3 éprouvette puis la résistance en compression est égale à la moyenne des 3 valeurs.

Le tableau III.10 présente les résultats des contraintes moyennes de compression après 14 jours de cure et séchage.

Tableau III-10 Comparaison des propriétés mécaniques en compression

échantillon	dosage en %	résistance en compression							
		ciment				chaux			
		1.00	2.00	3.00	MOY	1.00	2.00	3.00	MOY
sol stabilisé physiquement									
K1	K1'-0	2.70	3.08	2.37	2.71	2.70	3.08	2.37	2.71
K2	K2'-0	2.33	1.83	2.22	2.12	2.33	1.83	2.22	2.12
K3	K3'-0	2.02	1.58	2.10	1.90	2.02	1.58	2.10	1.90
sol stabilisé Chimiquement									
K1	K1'-4	4.18	3.48	3.68	3.78	1.50	1.41	1.38	1.43
	K1'-6	3.45	4.50	4.05	4.00	1.53	1.46	1.47	1.49
	K1'-8	4.28	4.25	4.43	4.32	1.49	1.36	1.72	1.53
K2	K2'-4	3.70	3.72	4.18	3.87	0.76	0.95	0.92	0.88
	K2'-6	4.22	4.53	4.73	4.49	1.19	0.98	1.00	1.06
	K2'-8	4.38	4.71	5.43	4.84	1.30	0.93	1.19	1.14
K3	K3'-4	3.04	3.46	2.61	3.04	1.07	0.76	0.89	0.91
	K3'-6	4.34	4.07	3.86	4.09	0.97	1.01	1.16	1.05
	K3'-8	3.81	5.29	4.35	4.48	1.16	1.12	2.26	1.51

En représentation graphique ; la *figure III.29* illustre clairement l'évolution de la résistance moyenne à la compression à l'état sec en fonction du taux de stabilisation.

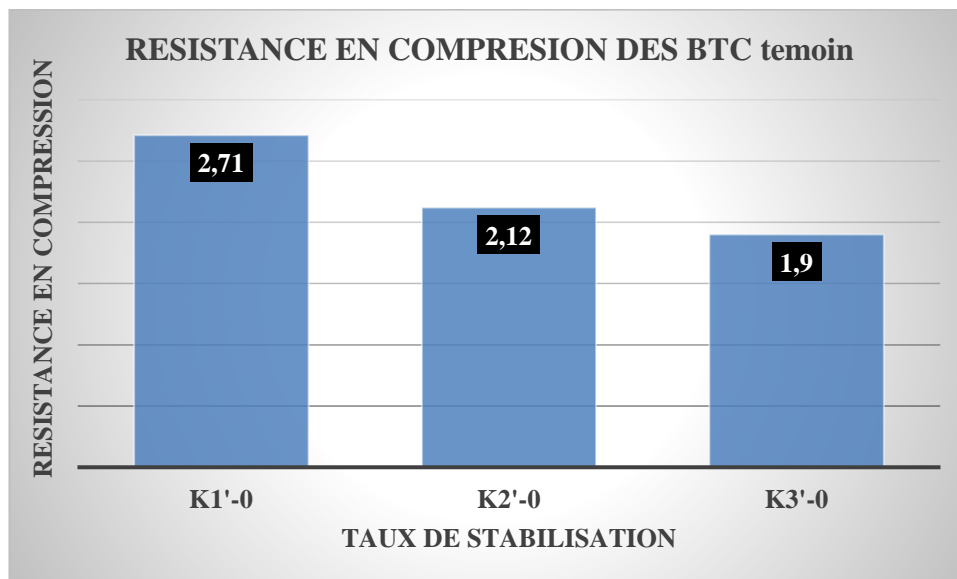


Figure III-29 les contraintes de compression des BTC témoin

La *figure III.30* illustre clairement l'évolution de la résistance moyenne à la compression à l'état sec en fonction du taux de stabilisation.

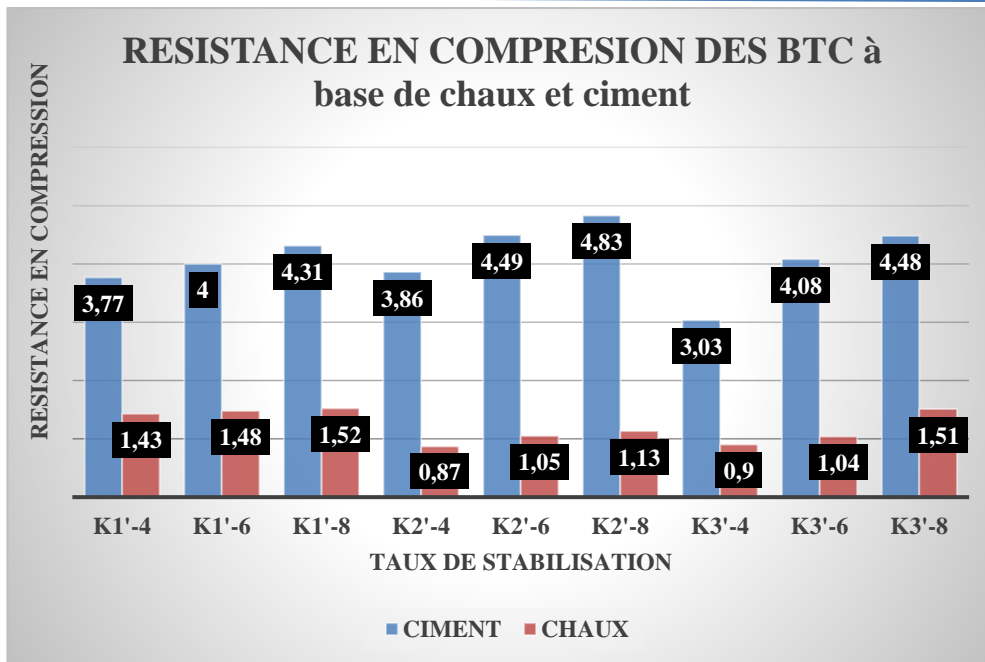


Figure III-30 les contraintes de compression des BTC stabilisé à base du ciment et de la chaux

Le tableau III.11 présente les résultats des contraintes moyennes de compression après 14 jours de cure et séchage et Leurs différences en terme de pourcentage entre les BTC témoin et les BTS à base du ciment.

Tableau III-11 différence en terme de pourcentage entre les BTC témoin et BTS à base du ciment

échantillon		BTC témoin (%)	Différence (%)
K1'-0	K1'-6	62.86	37.14
K2'-0	K2'-6	43.88	56.12
K3'-0	K3'-6	42.41	57.59

Le tableau III.12 présente les résultats des contraintes moyennes de compression après 14 jours de cure et séchage et Leurs différences en terme de pourcentage entre les BTS à base du ciment et celles à base de la chaux.

Tableau III-12 différence en terme de pourcentage entre BTS à base du ciment et celles à base de la chaux

échantillon	BTS chaux (%)	différence en (%)
K1'-6	35.33	64.67
K2'-6	23.51	76.49
K3'-6	33.71	66.29

Les résultats observés dans le tableau III.14 et figure III.30 Indiquent que les valeurs des différents essais de compression augmentent tous en fonction du dosage et que les résistances en

compression des briques stabilisé à base du ciment sont largement supérieure à celle stabilisé à base de la chaux la différence max est évalué à 76.49 % comme présenté dans le tableau III.16. on peut également remarquer dans le tableau III.15 la différence évalué à 57.59 % entre les valeurs telles que les valeurs de l'écrasement à 14 jours des sols non stabilisés et ceux stabilisé. Ici les valeurs de la résistance à la compression des BTC témoins sont supérieure à celles des BTS stabilisées à base de la chaux, ce n'est pas du tout satisfaisant car habituellement les valeurs de la résistance augmentent lorsque le stabilisant est utilisé.

Cela peut être due à un temps de cure très petit, la chaux n'a pas atteint sa maturité étant donné que selon plusieurs auteurs, la résistance en compressions des BTS stabilisé à base de la chaux augmente en fonction du temps de cure ; ce qui n'est pas le cas dans le présent essai. Par contre les valeurs de la résistance à la compression avec les briques non stabilisées, et des briques stabilisées à base du ciment à 4%, 6% et 8% présenté dans le tableau III.14; On sent l'augmentation au fur et mesure que le dosage en stabilisant augmente.

Mais également la résistance à la compression des BTS K1' stabilisées à base de la chaux sont supérieure à celles des BTS K2' et K3' stabilisées à base de la chaux. Ceci peut être due à une très grande quantité de sable dans les échantillon K2' et K3' soit par une mauvaise préparation des échantillons de K2' K3'.

Le tableau III.13 présente les résultats des masses volumique apparente des BTC témoins et ceux stabilisé a base du ciment et de la chaux.

Tableau III-13 les masses volumique des BTC

échantillon	dosage en %	MASSE VOLUMIQUE APPARENTE							
		CIMENT			Moy	CHAUX			Moy
		1.00	2.00	3.00		1.00	2.00	3.00	
K1'	K1'-0	1.65	1.57	1.75	1.65	1.65	1.57	1.75	1.65
K2'	K2'-0	1.73	1.71	1.67	1.70	1.73	1.71	1.67	1.70
K3'	K3'-0	1.67	1.73	1.71	1.70	1.67	1.73	1.71	1.70
K1'	K1'-4	1.43	1.39	1.39	1.40	1.71	1.73	1.57	1.67
	K1'-6	1.61	1.75	1.75	1.70	1.73	1.67	1.75	1.71
	K1'-8	1.55	1.57	1.57	1.56	1.65	1.57	1.67	1.63
K2'	K2'-4	1.65	1.57	1.75	1.65	1.43	1.39	1.39	1.40
	K2'-6	1.73	1.71	1.67	1.70	1.61	1.75	1.75	1.70
	K2'-8	1.67	1.73	1.71	1.70	1.55	1.57	1.57	1.56
K3'	K3'-4	1.43	1.39	1.39	1.40	1.71	1.73	1.57	1.67
	K3'-6	1.61	1.75	1.75	1.70	1.73	1.67	1.75	1.71
	K3'-8	1.55	1.57	1.57	1.56	1.65	1.57	1.67	1.63

Graphiquement sur la figure III.31 on peut remarquer les différentes valeurs des masses

volumiques apparentes des BTC témoin.

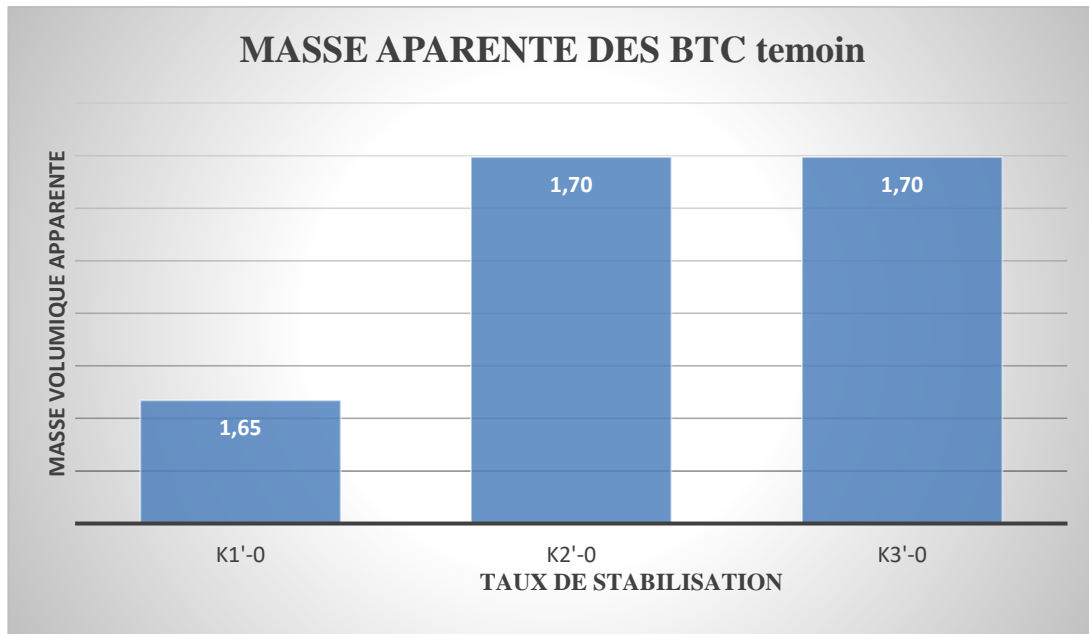


Figure III-31 masse volumique des BTC témoin

Graphiquement sur la figure III.32 on peut remarquer également les différentes valeurs des masses volumiques apparentes des BTC témoin et celles stabilisé au ciment et à la chaux.

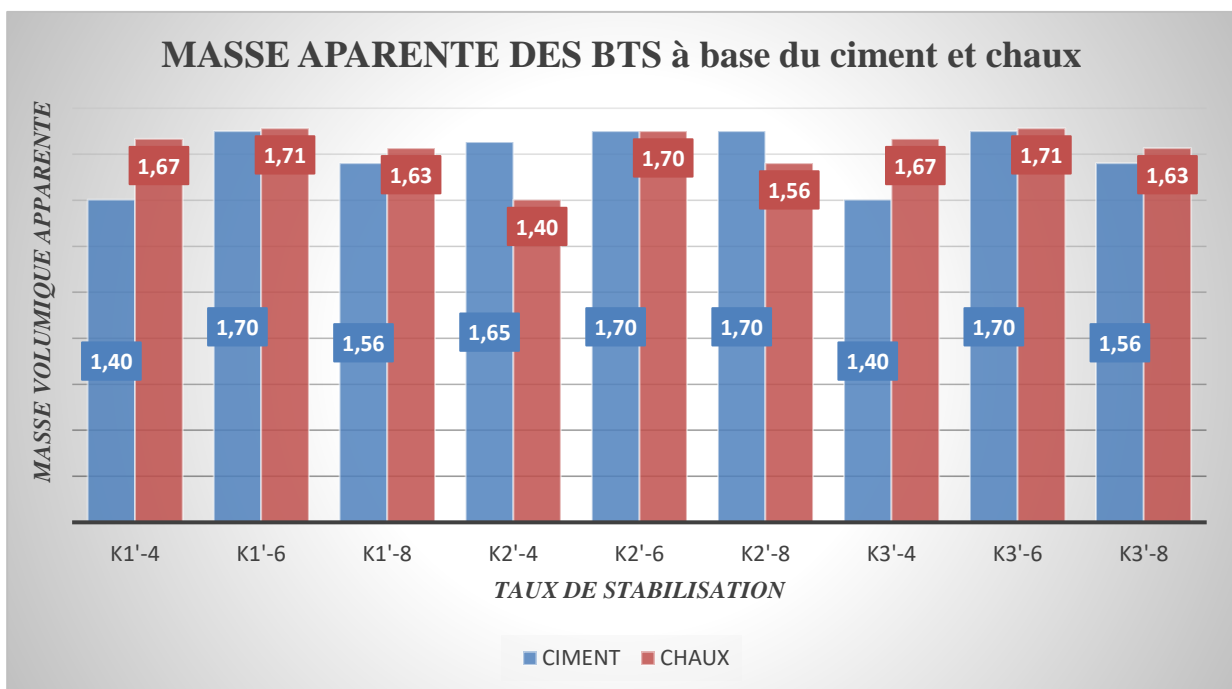


Figure III-32 masse volumique des BTC témoin et celles stabilisé au ciment et à la chaux.

Il se fait remarquer dans le tableau III.16 et sur les figures III.31 et III.32 que la stabilisation au ciment n'a pas assez d'influence sur les BTC Car les densités apparentes sont faible, presque uniforme et la majorité des valeurs ne sont pas dans l'intervalle 1700 à 2200Kg/m³ donné par

EAG CRAterre, Hugo Houben 1998 cela est due à une faible pression de compression qui a été de 1MPa pour toutes les éprouvettes confectionnées. L'augmentation de la contrainte de compactage diminue les vides entre les particules et augmente ainsi la valeur de la masse volumique apparente.

III.5 ABSORPTION CAPILLAIRE

Le tableau III.14 présente les valeurs des coefficients d'absorption capillaire des BTC témoins et ceux stabilisés à base de ciment et de la chaux exprimée en g/cm².min.

Tableau III-14 tableau des propriétés physique des BTC

échantillon	dosage en %	ciment	Chaux
		Cb (g/cm ² .min)	Cb (g/cm ² .min)
sol stabilisé corrigé			
K1	K1'-0	20.32	20.32
K2	K2'-0	19.19	19.19
K3	K3'-0	18.63	18.63
sol stabilisé Chimiquement			
K1	K1'-4	18.52	18.97
	K1'-6	18.40	18.74
	K1'-8	18.18	18.52
K2	K2'-4	17.73	18.29
	K2'-6	18.63	18.07
	K2'-8	18.07	17.95
K3	K3'-4	17.50	17.84
	K3'-6	16.94	18.07
	K3'-8	16.37	17.61

Il se fait remarquer à la lumière des résultats qui sont dans le tableau III.18 montrent que le ciment et la chaux restent des bons stabilisants pour les BTC car leur utilisation permet de réduire l'absorption par capillarité ; le problème qui se pose est que cette diminution ne garantit pas la durabilité des BTC dans le temps car les valeurs des coefficients d'absorption étant toujours élevées cela est due à la faible contrainte de compactage lors de la confection des éprouvettes ; notons qu'une faible contrainte de compactage n'imperméabilise pas très bien le sol en ne réduisant pas totalement les vides se trouvant entre les grains ce qui augmente son absorption d'eau.

Nous pouvons dire que, les liants étudiés (ciment et Chaux éteinte) agissent donc positivement en tant qu'agent de stabilisation. Ils réduisent également l'absorption par capillarité des BTC.

Pour valider les procédures d'essai, les briques doivent présenter une certaine qualité répondant à des propriétés ou performances minimales pour pouvoir être utilisées dans la construction. C'est ainsi que des nombreux essais que nous avons réalisés, nous permettent d'avancer certaines idées

sur la Stabilisation des briques par le ciment et la chaux éteinte.

Les résultats ont montré aussi qu'un sol contenant plus de sable et moins d'argile est plus approprié à la stabilisation au ciment grâce à la réaction sable -ciment, alors qu'un sol contenant un taux d'argile plus élevé est meilleur pour la stabilisation de chaux grâce à la réaction argile-chaux.

Les briques stabilisées au ciment sont sec à partir du 14^e jour alors que celles stabilisées à la chaux présentent un peu d'humidité. Nous pouvons tenter d'expliquer cette différence mais nous savons que la chaux nécessite plus de temps pour sa réaction par rapport au ciment. Avec le ciment une cure humide de 28 j est largement Suffisante, au-delà de cette période la variation de la résistance du ciment est petite et négligeable, mais avec la chaux il faut au moins 45 jours.

En ce qui concerne les résistances ciblées, nos briques ont des résistances en compression qui respectent le seuil donné par les normes : les BTC ont une résistance minimale en compression de 2MPa et la résistance à la compression max est de 4,8 MPa, ce qui n'est pas le cas pour les BTC confectionné et stabilisé à base de la chaux.

En générale pour améliorer cela il faudrait privilégier le stabilisant chimique que le stabilisant physique, pour avoir des améliorations, il faudrait augmenter le pourcentage de la chaux où faire une étude sur d'autre terre plus argileuse, mais l'augmentation de la quantité de chaux aura pour conséquence un accroissement des coûts.

Pour la stabilisation au ciment, on note qu'il n'y a pas des limites ou techniques : C'est-à-dire qu'en augmentant la teneur en ciment on trouvera des matériaux de plus en plus résistant, la limite pour le dosage est donc de type économique en fonction des applications et par conséquence des résistances ciblés.

III.6 CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre présente et interprète les résultats obtenus lors des différents essais physique et mécanique sur les BTC confectionné. L'utilisation du sol de KALUA pour la production des BTC nécessite une correction à 30% et 50% de sable concassé et une stabilisation chimique maximale à 8% de ciment ou de chaux.

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ce travail, nous souhaitons étudier comment améliorer le comportement Mécanique des blocs de terre comprimée, en vue de rendre utilisable dans la construction des Maisons, il est nécessaire de s'assurer qu'ils possèdent des propriétés mécaniques suffisante (résistance à la compression) que vis-à-vis de leur tenue à l'eau. Des essais de convenance de terre ont été élaborés par les différents moyen qui nous ont permis de faire les tests d'identification avant de procéder à la stabilisation et à la confection, une bonne maitrise des techniques d'identification qui a montré que le sol était très fin a orienté nos choix en matière de stabilisation.

Les résultats obtenus ont montré que la stabilisation au ciment donne les résultats en résistance sèche qui s'avère être au maximum 76.49% supérieure par rapport à la chaux. on peut également remarquer la différence évalué à 57.59 % entre les valeurs telles que les valeurs de l'écrasement à 14 jours des sols non stabilisés et ceux stabilisé. A remarquer que la stabilisation au ciment améliore considérablement la résistance mécanique et réduit l'absorption d'eau par capillarité qui est beaucoup plus faible (16.37 g/cm².min) dans le cas des briques à fort pourcentage que dans le cas à faible pourcentage. Par contre, dans le cas de stabilisation à la chaux, l'addition n'apporte que peu d'amélioration au niveau de résistance mécanique qu'en absorption d'eau qui était de 17.61 g/cm².min.

Pour obtenir de bonnes résistances sèches, il faudrait employer des terres ne contenant pas plus de 30% de l'argile en cas d'stabilisation au ciment et environ 30 à 70% en cas de stabilisation à la chaux. Les bonnes performances des terres stabilisées ou non dépendent largement de la granulométrie pour qu'une terre donne des briques ayant de bonnes caractéristiques mécaniques. L'emploi d'une terre adaptée à la production de BTC influence fortement la durabilité du matériau. Un guide pour le choix de la terre et la stabilisation qui lui convient pourrait être élaboré afin d'éviter l'utilisation de matières premières inadéquates et ainsi favoriser la durabilité de l'ouvrage.

La science étant un vaste océan, nous ne saurons prétendre avoir épuisé tous les recoins relatifs à ce sujet. C'est ainsi que nous recommandons aux futurs chercheurs ou soit nous même pour la suite de nos recherches les aspects tels que :

- ✚ Varier la quantité d'argile, le taux de stabilisation avec un pourcentage Supérieure à 8% ainsi que l'âge d'écrasement de 30 à 45 jours des BTS par la chaux afin de déterminer la résistance caractéristique avec comme stabilisant la chaux pour apprécier leur performance. Faire une étude en alliant d'autre stabilisant comme les fibres ou soit des adjuvent n'excluant pas une étude économique pour voir le surcout que les différentes stabilisations apportent au prix de revient des produit BTC afin de faire un choix objectif des produits confectionné a base su sol K1', K2', K3'.

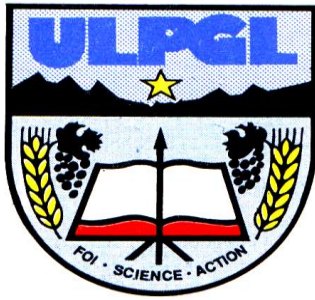
Références

- [1] C. .. Hugo houben, GUIDE Bloc en terre comprimé, équipements de production, CDI, 1996.
- [2] P. G. C. Vincent Rigossi, GUIDE blocs en terre comprimé, FRANCE 52 avenue herremann debroux: CDI, 1996.
- [3] m. saleh, etude comparative entre l'amelioration des briques en terre stabilisees avec le ciment et la chaux etainte, promotion 2ie, 2010.
- [4] G. M. J. Yves, Dynamiques des espaces ruraux dans le monde,, Armand COLIN,, 2011..
- [5] G. perraudin, construction en pierre taillé aujourd'hui. les presses du réel. 64p 978-2-84066-678-3, 2013.
- [6] B. & d. P. R. Horsch, Cours UE82 "Construire en terre crue", Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes., 2014.
- [7] J.-P. Magnan, Description, identification et classification des sols. Techniques de l'Ingénieur 21, 1997.
- [8] H. e. Guillaud, blocs de terre comprimés équipement de production, CRAterre , 2006.
- [9] D. F. NGAPGUE, Mécanique des sols et des roches, notes de cours,, Goma:: inédit;ULPGL, , 2018.
- [10] R. & F. Anger, Grains de bâtisseurs. La matière en grains, de la géologie à l'architecture. Villefontaine, CRAterre, 2005.
- [11] V. R. ., J. T. ., H. H. Guillaud, Blocs de terre comprimée, normes, Belgique : CDI et CRAterre , 1998.
- [12] R. Anger, Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction. Thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon, 2011.
- [13] H. Van Olphen, An introduction to clay colloid chemistry: for clay technologists, geologists, and soil scientists., New York (N.Y.), Etats-Unis d'Amérique, 1977.
- [14] H. S. R. M. Caillère S, Minéralogie des argiles Tome 01 Masson, p. 184., Dunod, editor., 1982.
- [15] H. Murray, Applied Clay Mineralogy - Occurrences, Processing and Application of Kaolins, Bentonites, Palygorskite-Sepiolite, and Common Clays. Elsevier, 2006.
- [16] H. Van Damme, la terre, un beton d'argile pour la science, 2013.

- [17] A. C. Didier, Renforcement des propriétés mécaniques des sols de Nyakavogo par la chaux hydraulique:, GOMA: ULPGL, 2017-2018.
- [18] R. A. Novah, ESSAI DE FABRICATION DE BRIQUE EN TERRE COMPRESSEE STABILISEE AVEC DES LIANTS : CIMENT ET CENDRE VOLANTE, 2012.
- [19] R. & F. L. Anger, Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture., Paris, Belin: Cité des sciences et de l'industrie., 2009.
- [20] S. GUIHÉNEUF, Formulation et renforts de blocs en matériau terre pour une utilisation structurelle, rennes: L'INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES, ECOLE DOCTORALE N° 602 sciences pour l'ingenieur specialiste genie civil, 3 decembre 2020.
- [21] T. Bachir, ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO MECANIQUE DU BLOCS DE TERRE COMPRIE AVEC FIBRES, 2014.
- [22] D. Miracourt, stabilisation de la terre crue pour application en brique de terre comprimé au bourkina faso, liege , 2016-2017.
- [23] V. Rigassi, bloc de terre comprimé : manuel de production. centre allemand d'echange pour les technologies appropriées, CRATerre , 1995.
- [24] J. paulus, CONSTRUCTION EN TERRE CRUE:, Liège, 2015.
- [25] G. BASHIGE, CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA LATERITE DE KARUBA(MASISI) ENVUE DE LA PRODUCTION DES BTC, GOMA: ULPGL, 2016-2017.
- [26] I. C.-F. J. & M. F. (. Cañas, Cañas, I., Cid-Fa"Assessment of compressed earth blocks made in Spain : International durability tests". Construction and Building Materials, 37, pp. 738-745..
- [27] I. & R. F. (. Rahman, The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks. Universiti Tun Hussein Onn Malaysia..
- [28] H. & H. H. Guillaud, Traité de construction en terre (2ème édition), Marseille: Editions Parenthèses., 1995.
- [29] d. l. d. l. d. t. e. d. t. p. ministère de l'équipement, paris , 1987.
- [30] H. H. V Rigassi, BLOC DE TERRE COMPRIE procedure d'essai, EAG CRATerre , CDE, 2000.
- [31] D. H. Sleiman, Analyse granulométrique par sédimentométrie, tripoli: Département de génie civil, Université Libanaise-Faculté de génie, 12 janvier 2015.

- [32] TP1 essai au bleu de methylene ou essai à la tache, UNIVERSTITE CHEIKH ANTA DIOP, mai 2000.
- [33] M. S. F. & O. A. Ahmed, Effet du Sable sur la Durabilité du Béton de Terre Stabilisée, 2018_2019.
- [34] R. A. Novah, ESSAI DE FABRICATION DE BRIQUE EN TERRE COMPRESSEE STABILISEE AVEC DES LIANTS : CIMENT ET CENDRE VOLANTE, ANTANANARIVO, 2012.
- [35] R. SIVWIRA, INFLUENCE DE L'ADJUVANT HYDROFUGE DE MASSE SUR LES PROPRIETES PHYSICO-MECANQUES DES BTC, goma : ULPGL , 2014-2015.
- [36] N. Cabane, Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: contribution à l'identification et analyse des elements perturbateur de stabilisation, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale des mines de saint etienne: Université Jean Monet, 182 p, 2004..
- [37] I. Ouarda, Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des, 2016.
- [38] S. O. SORE, ETUDES TECHNIQUES DES BTC STABILISES A LA CHAUX ETEINTE, 2013.
- [39] K. MEFTAH, Cours et exercices de mécanique des sols..
- [40] T. V. Duy, Etude de l'amélioration des sols par traitement à la chaux; Travail de fin d'étude, : Inédit;, Liège: Université de Liège, , 2013. .

ANNEXES

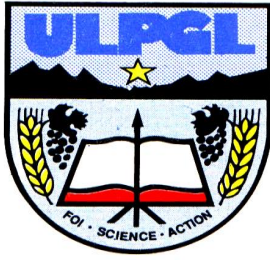


SOL K1
UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil

N° Echantillon : **K1** Masse total sèche Echantillon: 2500 g
NYANGEZI
 Provenance : **KALUA** Masse sèche : 554 g

N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	%	%
8	35	2.38	2.5			100
10	34	2	2	1.51	0.0604	99.9396
12	33	1.68	1.6	3.2	0.128	99.872
16	32	1.19	1.25	8.76	0.3504	99.6496
18	31	1	1	12.56	0.5024	99.4976
20	30	0.84	0.8	16.65	0.666	99.334
30	29	0.59	0.63	24.75	0.99	99.01
35	28	0.5	0.5	34.02	1.3608	98.6392
40	27	0.4	0.4	50.02	2.0008	97.9992
50	26	0.315	0.315	74.73	2.9892	97.0108
60	25	0.25	0.25	114.75	4.59	95.41
70	24	0.2	0.2	179.72	7.1888	92.8112
100	23	0.16	0.16	252.36	10.0944	89.9056
120	22	0.125	0.125	386.03	15.4412	84.5588
140	21	0.1	0.1	420.83	16.8332	83.1668
200	20	0.08	0.08	554	22.16	77.84

annexe 1 analyse granulométrique du sol K1



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil
A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K1

temps(min)	lecture R	T °C	Hr	F	D(mm)	D(um)	Rc=R+c	P	T*P
0.5	22	21	13	0.015	0.0769	76.913	22.5	98.1	76.361
1	21	21	13.4	0.015	0.0552	55.216	21.5	93.74	72.968
2	19.5	21	14	0.015	0.0399	39.908	20	87.2	67.877
5	16.5	21.5	15.1	0.015	0.0262	26.213	17	74.12	57.695
10	15.5	21.5	15.5	0.015	0.0188	18.779	16	69.76	54.301
20	14	21.55	16.05	0.015	0.0135	13.513	14.5	63.22	49.211
40	13.5	22	16.2	0.015	0.0096	9.5994	14	61.04	47.514
80	12	21.5	16.8	0.015	0.0069	6.9123	12.5	54.5	42.423
240	11.5	22	17	0.015	0.004	4.0145	12	52.32	40.726
1440	1.5	22	21	0.015	0.0018	1.8216	2	8.72	6.7877

annexe 2 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K1



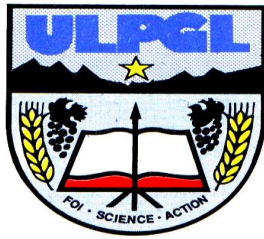
UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil
LIMITES D'ATTERBERG / Norme NF P 98-051

Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE		
	18	23	28	33	38	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B	C
Poids total humide (g)	16,4	16,83	16,14	15,63	15,9	15,45	14,28	15,02
Poids total sec (g)	15,8	16,35	15,83	15,22	15,7	15,35	14,14	14,94
Poids de la tare (g)	14,3	14,75	14,75	13,67	14,7	14,72	13,57	14,02
Poids net d'eau (g)	0,53	0,48	0,31	0,41	0,22	0,1	0,14	0,08
Poids net du matériau sec (g)	1,53	1,6	1,08	1,55	0,93	0,63	0,57	0,92
Teneur en eau (%)	34,64	30,00	28,70	26,45	23,66	15,87	24,56	8,70
				WL=	30,0	WP =		16,4
					IP =	13,6		

Teneur en eau (%)	34,6	30,0	28,7	26,5	23,7
Limite moyenne de liquidité "WL" (%)	28,7				

annexe 3 limite d'atterberg du sol K1

A-G SOL K2



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil

Masse
 N° Echantillon : K2 Echantillon: 2500 g
 Provenance : NYANGEZI KALUA Masse sèche : 663.3 g

N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	%	%
8	35	2.38	2.5			100
10	34	2	2	15.93	0.6372	99.3628
12	33	1.68	1.6	21.21	0.8484	99.1516
16	32	1.19	1.25	34.3	1.372	98.628
18	31	1	1	46.34	1.8536	98.1464
20	30	0.84	0.8	53.24	2.1296	97.8704
30	29	0.59	0.63	65.2	2.608	97.392
35	28	0.5	0.5	77.05	3.082	96.918
40	27	0.4	0.4	96.87	3.8748	96.1252
50	26	0.315	0.315	124.89	4.9956	95.0044
60	25	0.25	0.25	192.61	7.7044	92.2956
70	24	0.2	0.2	221.9	8.876	91.124
100	23	0.16	0.16	286.31	11.4524	88.5476
120	22	0.125	0.125	415	16.6	83.4
140	21	0.1	0.1	478.53	19.1412	80.8588
200	20	0.08	0.08	663.3	26.532	73.468

annexe 4 analyse granulométrique du sol K2



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

B.P 368 Goma

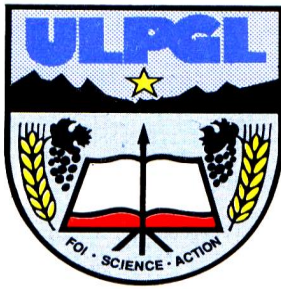
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées

Laboratoire de Génie Civil

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K2

temps(min)	lecture R	T°C	Hr	F	D(mm)	D(um)	Rc=R+c	P	T*P
0.5	22	21	13	0.01508	0.0769	76.913	22.5	98.1	72.072
1	21	21	13.4	0.01508	0.0552	55.216	21.5	93.74	68.869
2	19.5	21	14	0.01508	0.0399	39.908	20	87.2	64.064
5	16.5	21.5	15.1	0.01508	0.0262	26.213	17	74.12	54.455
10	15.5	21.5	15.5	0.01508	0.0188	18.779	16	69.76	51.252
20	14.5	21.55	15.9	0.01508	0.0134	13.449	15	65.4	48.048
40	13	22	16.4	0.01508	0.0097	9.6584	13.5	58.86	43.243
80	12.5	21.5	16.6	0.01508	0.0069	6.8711	13	56.68	41.642
240	11.5	22	17	0.01508	0.004	4.0145	12	52.32	38.439
1440	10.5	22	17.4	0.01508	0.0017	1.6581	11	47.96	35.235

annexe 5 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K2



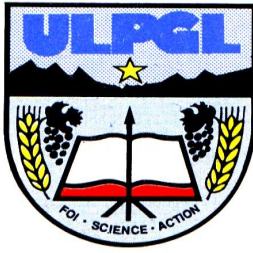
UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil
LIMITES D'ATTERBERG / Norme NF P 98-051
SOL K2

	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	18	23	28	33	38	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B	C	
Nombre de coups									
Poids total humide (g)	16,3	16,81	16,14	15,64	15,9	15,45	14,28	15,02	
Poids total sec (g)	15,77	16,28	15,8	15,2	15,7	15,3	14,12	14,85	
Poids de la tare (g)	14,29	14,75	14,75	13,67	14,7	14,72	13,57	14,02	
Poids net d'eau (g)	0,5	0,5	0,3	0,4	0,2	0,1	0,2	0,2	
Poids net du matériau sec (g)	1,5	1,5	1,1	1,5	0,9	0,6	0,5	0,8	
Teneur en eau (%)	35,8	34,6	32,4	28,8	24,7	25,9	29,1	20,5	
			WL=	33,0	WP =		25,1		
				IP = 7,9					

Teneur en eau (%)						
		35,8	34,6	32,4	28,8	24,7
Limite moyenne de liquidité "WL" (%)		31,3				

annexes 6 limite d'atterberg du sol K2

A-G SOL K3



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil

N° Masse
 Echantillon : **K3** Echantillon: 2500 g
 Provenance : **NYANGEZI** Masse sèche : 630,8 g

	N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
	ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	%	%
8	35	2.38	2.5				100
10	34	2	2	5.93	0.2372		99.7628
12	33	1.68	1.6	13.25	0.53		99.47
16	32	1.19	1.25	29.3	1.172		98.828
18	31	1	1	40.34	1.6136		98.3864
20	30	0.84	0.8	50.25	2.01		97.99
30	29	0.59	0.63	61.28	2.4512		97.5488
35	28	0.5	0.5	75.05	3.002		96.998
40	27	0.4	0.4	88.37	3.5348		96.4652
50	26	0.315	0.315	104.52	4.1808		95.8192
60	25	0.25	0.25	162.31	6.4924		93.5076
70	24	0.2	0.2	211.89	8.4756		91.5244
100	23	0.16	0.16	276.51	11.0604		88.9396
120	22	0.125	0.125	409.15	16.366		83.634
140	21	0.1	0.1	448.43	17.9372		82.0628
200	20	0.08	0.08	630.8	25.232		74.768

annexe 7 analyse granulométrique du sol K3



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K3

temps(min)	lecture R	T °C	Hr	F	D(mm)	D(um)	Rc=R+c	P	T*P
0.5	21.5	21	13.2	0.01508	0.0775	77.503	22	95.92	71.72
1	20.5	21	13.6	0.01508	0.05563	55.627	21	91.56	68.46
2	19.5	21	14	0.01508	0.03991	39.908	20	87.2	65.2
5	18.5	21.5	14.3	0.01508	0.02551	25.509	19	82.84	61.94
10	17.5	21.5	14.7	0.01508	0.01829	18.288	18	78.48	58.68
20	14.5	21.55	15.9	0.01508	0.01345	13.449	15	65.4	48.9
40	13.5	22	16.2	0.01508	0.0096	9.5994	14	61.04	45.64
80	12.5	21.5	16.6	0.01508	0.00687	6.8711	13	56.68	42.38
240	11.5	22	17	0.01508	0.00401	4.0145	12	52.32	39.12
1440	9.5	22	17.8	0.01508	0.00168	1.677	10	43.6	32.6

annexe 8 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K3



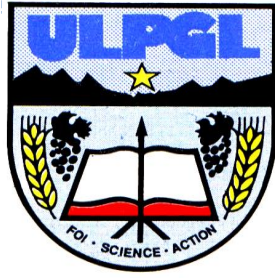
UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil
LIMITES D'ATTERBERG / Norme NF P 98-051
SOL K3

Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	18	23	28	33	38	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B	C	
Poids total humide (g)	16,3	16,7	16,12	15,62	15,9	15,45	14,28	15,02	
Poids total sec (g)	15,7	16,2	15,79	15,16	15,7	15,34	14,14	14,94	
Poids de la tare (g)	14,3	14,8	14,75	13,67	14,7	14,72	13,57	14,02	
Poids net d'eau (g)	0,5	0,5	0,3	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	
Poids net du matériau sec (g)	1,4	1,5	1,0	1,5	0,9	0,6	0,6	0,9	
Teneur en eau (%)	37,1	33,8	31,7	30,9	26,4	17,7	24,6	8,7	
			WL=	33,4		WP = 17,0			
				IP = 16,4					

Teneur en eau (%)								
		37,1	33,8	31,7	30,9	26,4		
Limite moyenne de liquidité "WL" (%)	32							

annexe 9 limite d'atterberg du sol K3

Etude comparative entre la stabilisation des briques en terres comprimées (BTC) par le ciment et la chaux éteinte



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

B.P 368 Goma

Faculté des Sciences et Technologies Appliquées

Laboratoire de Génie Civil

N°

Masse

Echantillon : K1'

Echantillon: 2500 g

Provenance : **NYANGEZI**

Masse sèche : 1319,44 g

N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR		%	%
3/16"	38	4.76	5			100
5	37	4	4	75.52	3.0208	96.9792
6	36	3.36	3.15	90.1	3.604	96.396
8	35	2.38	2.5	100.76	4.0304	95.9696
10	34	2	2	199.3	7.972	92.028
12	33	1.68	1.6	241.06	9.6424	90.3576
16	32	1.19	1.25	299.02	11.9608	88.0392
18	31	1	1	398.64	15.9456	84.0544
20	30	0.84	0.8	638.42	25.5368	74.4632
30	29	0.59	0.63	682.32	27.2928	72.7072
35	28	0.5	0.5	719.28	28.7712	71.2288
40	27	0.4	0.4	737.7	29.508	70.492
50	26	0.315	0.315	745.04	29.8016	70.1984
60	25	0.25	0.25	841.72	33.6688	66.3312
70	24	0.2	0.2	891.32	35.6528	64.3472
100	23	0.16	0.16	929.08	37.1632	62.8368
120	22	0.125	0.125	970.1	38.804	61.196
140	21	0.1	0.1	1001.38	40.0552	59.9448
200	20	0.08	0.08	1319.44	52.7776	47.2224

annexe 10 analyse granulométrique du sol K1'

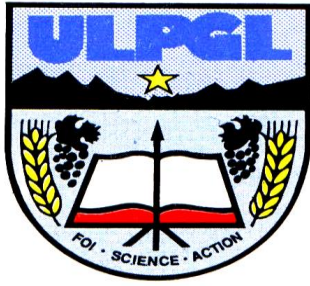
UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil



A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K1'

temps(min)	lecture R	T°C	Hr	F	D(mm)	D(um)	Rc=R+c	P	T*P
0.5	19.5	24	14	0.0148	0.0781	78.099	20	85.616	40.43
1	18.5	24	14.3	0.0148	0.05581	55.813	19	81.336	38.409
2	17.5	24	14.7	0.0148	0.04001	40.014	18	77.055	36.387
5	17.5	24.2	14.7	0.0148	0.02531	25.307	18	77.055	36.387
10	15.5	24.2	15.5	0.0148	0.01838	18.375	16	68.493	32.344
20	14.5	24.5	15.9	0.0148	0.01316	13.16	15	64.212	30.323
40	13.5	24.5	16.2	0.0148	0.00939	9.3928	14	59.932	28.301
80	12.5	24.6	16.6	0.0148	0.00672	6.7232	13	55.651	26.28
240	10.5	24	17.4	0.0148	0.00397	3.9741	11	47.089	22.237
1440	5.5	24	19.3	0.0148	0.00171	1.7087	6	25.685	12.129

annexe 11 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K1'



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

B.P 368 Goma

Faculté des Sciences et Technologies Appliquées

Laboratoire de Génie Civil

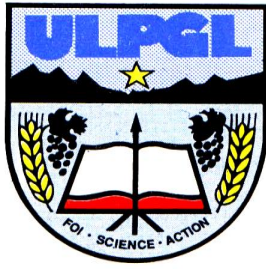
LIMITES D'ATTERBERG / Norme NF P 98-051

SOL K1'

	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	18	23	28	33	38	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B	C	
Nombre de coups	18	23	28	33	38	-	-	-	-
Poids total humide (g)	17,8	15,29	15,9	15,79	14,2	14,87	14,35	15,03	
Poids total sec (g)	17	14,89	15,67	15,57	14,1	14,85	14,31	14,98	
Poids de la tare (g)	14,8	13,7	14,9	14,74	13,7	14,72	14,1	14,02	
Poids net d'eau (g)	0,8	0,4	0,23	0,22	0,1	0,02	0,04	0,05	
Poids net du matériau sec (g)	2,25	1,19	0,77	0,83	0,43	0,13	0,21	0,96	
Teneur en eau (%)	35,56	33,61	29,87	26,51	23,26	15,38	19,05	5,21	
			WL=	31,5		WP =		13,2	
				IP =		18,3			

Teneur en eau (%)		35,6	33,6	29,9	26,5	23,3
Limite moyenne de liquidité "WL" (%)	29,76					

annexe 12 limite d'atterberg du sol K1'



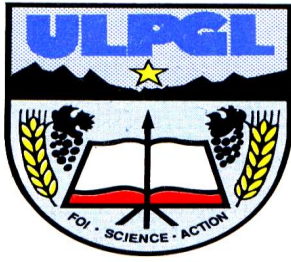
UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil

Masse

N° Echantillon : Echantillon: 3000 g
 Provenance : **NYANGEZI SOL K2'** Masse sèche : 1900 g

N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	%	%
1/3"	40	7.93	8			100
1/4"	39	6.35	6.3	45	1.5	98.5
3/16"	38	4.76	5	120	4	96
5	37	4	4	265	8.83333333	91.1666667
6	36	3.36	3.15	420	14	86
8	35	2.38	2.5	545	18.1666667	81.8333333
10	34	2	2	660	22	78
12	33	1.68	1.6	785	26.1666667	73.8333333
16	32	1.19	1.25	875	29.1666667	70.8333333
18	31	1	1	970	32.3333333	67.6666667
20	30	0.84	0.8	1020	34	66
30	29	0.59	0.63	1060	35.3333333	64.6666667
35	28	0.5	0.5	1200	40	60
40	27	0.4	0.4	1240	41.3333333	58.6666667
50	26	0.315	0.315	1270	42.3333333	57.6666667
60	25	0.25	0.25	1290	43	57
70	24	0.2	0.2	1320	44	56
100	23	0.16	0.16	1345	44.8333333	55.1666667
120	22	0.125	0.125	1365	45.5	54.5
140	21	0.1	0.1	1550	51.6666667	48.3333333
200	20	0.08	0.08	1900	63.3333333	36.6666667

annexe 13 analyse granulométrique du sol K2'



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

B.P 368 Goma

Faculté des Sciences et Technologies Appliquées

Laboratoire de Génie Civil

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K2'

temps(min)	lecture R	T°C	Hr	F	D(mm)	D(um)	Rc=R+c	P	T*P
0.5	19.5	24	14	0.0148	0.0781	78.099	20	85.616	31.393
1	18.5	24	14.3	0.0148	0.05581	55.813	19	81.336	29.823
2	17.5	24	14.7	0.0148	0.04001	40.014	18	77.055	28.253
5	17.5	24.2	14.7	0.0148	0.02531	25.307	18	77.055	28.253
10	15.5	24.2	15.5	0.0148	0.01838	18.375	16	68.493	25.114
20	14.5	24.5	15.9	0.0148	0.01316	13.16	15	64.212	23.545
40	13.5	24.5	16.2	0.0148	0.00939	9.3928	14	59.932	21.975
80	12.5	24.6	16.6	0.0148	0.00672	6.7232	13	55.651	20.405
240	9.5	24	17.8	0.0148	0.00402	4.0195	10	42.808	15.696
1440	6.5	24	18.9	0.0148	0.00169	1.6909	7	29.966	10.987

annexe 14 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K2'

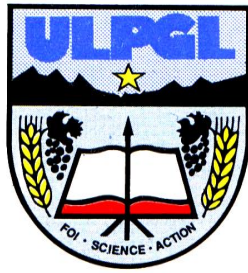


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil
LIMITES D'ATTERBERG / Norme NF P 98-051
SOL K2'

Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	18	23	28	33	38	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B	C	
Poids total humide (g)	17,8	16,3	16,9	17,9	14,2	14,77	14,36	15,03	
Poids total sec (g)	16,9	15,7	16,47	17,3	14,1	14,76	14,32	14,98	
Poids de la tare (g)	15	14	14,9	14,74	13,7	14,7	14,1	14,02	
Poids net d'eau (g)	0,9	0,6	0,4	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0	
Poids net du matériau sec (g)	2,2	2,0	1,6	2,6	0,4	0,0	0,2	1,0	
Teneur en eau (%)	40,9	32,2	27,4	23,4	23,3	25,0	18,2	5,2	
			WL=	32,0		WP =		16,1	
				IP = 15,9					

Nombre de coups		18	23	28	33	38
Teneur en eau (%)		40,9	32,2	27,4	23,4	23,3
Limite moyenne de liquidité "WL" (%)		29,43				

annexes 15 limite d'atterberg du sol K2'



UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil

N°

Masse

Echantillon : **K3'**

Echantillon: 3000 g

Provenance : **NYANGEZI**

Masse sèche : 1870 g

N° TAMIS		OUVERTURE en mm		REFUS CUMULES		TAMISAT
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	g	%	%
1/3"	40	7.93	8			100
1/4"	39	6.35	6.3	25	0.83333333	99.1666667
3/16"	38	4.76	5	70	2.33333333	97.6666667
5	37	4	4	200	6.66666667	93.3333333
6	36	3.36	3.15	380	12.6666667	87.3333333
8	35	2.38	2.5	450	15	85
10	34	2	2	570	19	81
12	33	1.68	1.6	700	23.3333333	76.6666667
16	32	1.19	1.25	790	26.3333333	73.6666667
18	31	1	1	850	28.3333333	71.6666667
20	30	0.84	0.8	980	32.6666667	67.3333333
30	29	0.59	0.63	1045	34.8333333	65.1666667
35	28	0.5	0.5	1065	35.5	64.5
40	27	0.4	0.4	1200	40	60
50	26	0.315	0.315	1290	43	57
60	25	0.25	0.25	1300	43.3333333	56.6666667
70	24	0.2	0.2	1320	44	56
100	23	0.16	0.16	1385	46.1666667	53.8333333
120	22	0.125	0.125	1555	51.8333333	48.1666667
140	21	0.1	0.1	1670	55.6666667	44.3333333
200	20	0.08	0.08	1870	62.3333333	37.6666667

annexes 16 analyse granulométrique du sol K3'

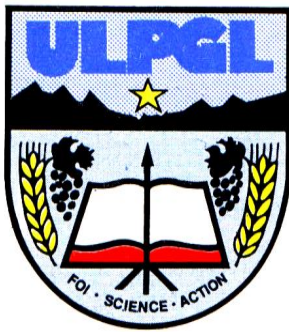


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
Laboratoire de Génie Civil

A-G PAR SEDIMENTOMETRIE SOL K3'

temps(min)	lecture R	T °C	Hr	F	D(mm)	D(um)	Rc=R+c	P	T*P
0.5	19.5	24	14	0.014759	0.078099	78.099	20	85.61644	32.2489
1	18.5	24	14.3	0.014759	0.055813	55.8129	19	81.33562	30.6364
2	18	24	14.5	0.014759	0.039741	39.7407	18.5	79.19521	29.8302
5	17.5	24.2	14.7	0.014759	0.025307	25.307	18	77.05479	29.024
10	15.5	24.2	15.5	0.014759	0.018375	18.3752	16	68.49315	25.7991
20	14.5	24.5	15.9	0.014759	0.01316	13.1598	15	64.21233	24.1866
40	13.5	24.5	16.2	0.014759	0.009393	9.39277	14	59.93151	22.5742
80	12.5	24.6	16.6	0.014759	0.006723	6.72319	13	55.65068	20.9618
240	10	24	17.6	0.014759	0.003997	3.99684	10.5	44.94863	16.9307
1440	5	24	19.5	0.014759	0.001718	1.71752	5.5	23.54452	8.86844

annexes 17 analyse granulométrique par sédimentométrie du sol K3'

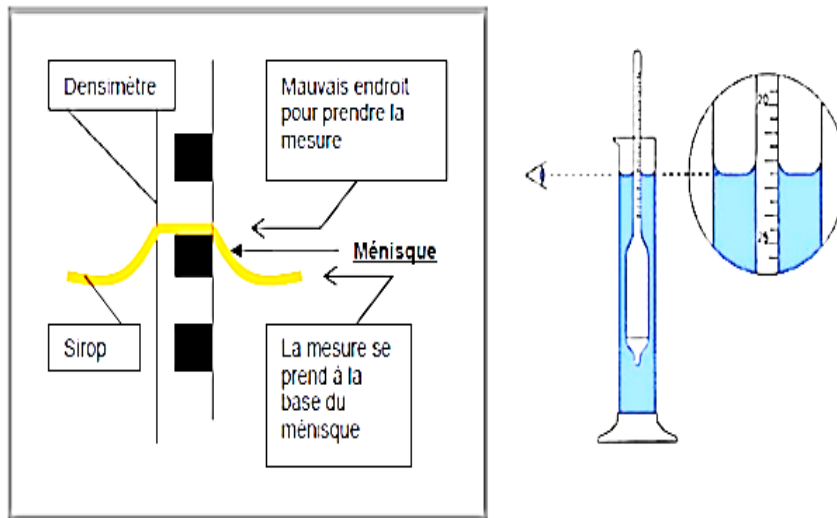


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
 B.P 368 Goma
 Faculté des Sciences et Technologies Appliquées
 Laboratoire de Génie Civil
LIMITES D'ATTERBERG / Norme NF P 98-051
SOL K3'

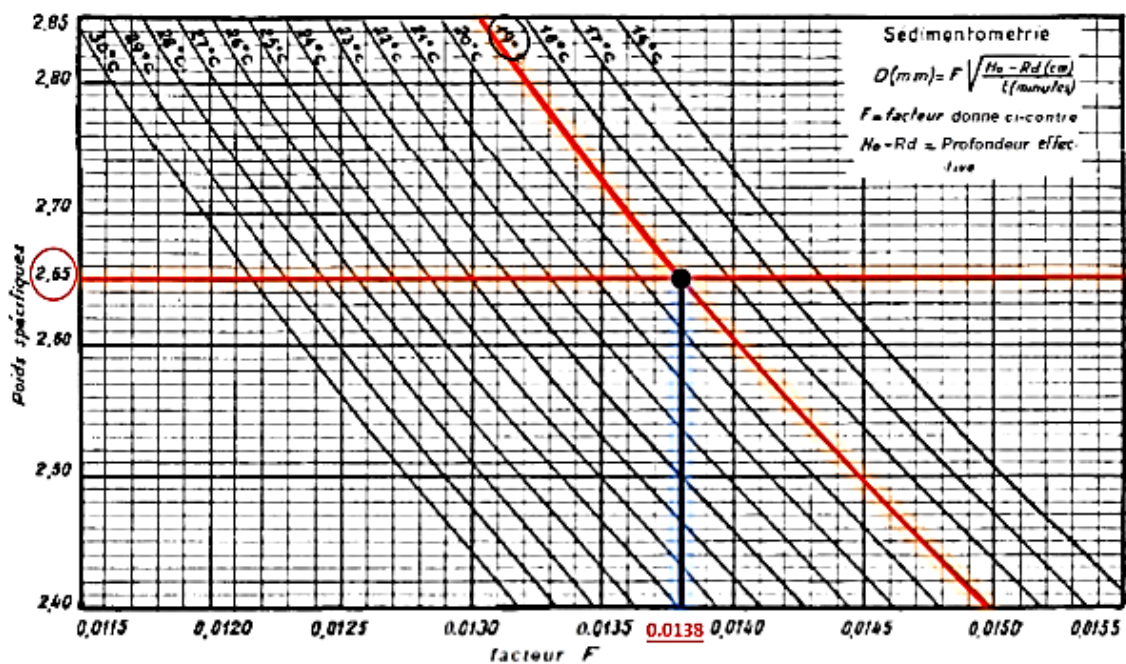
Nombre de coups	LIMITE DE LIQUIDITE					LIMITE DE PLASTICITE			
	18	23	28	33	38	-	-	-	-
	I	II	III	IV	V	A	B	C	
Poids total humide (g)	18	15	15,9	15,8	14,4	14,9	14,4	15,13	
Poids total sec (g)	17	15	15,7	15,57	14,3	14,9	14,3	14,98	
Poids de la tare (g)	15	14	14,9	14,74	13,7	14,7	14,1	14,02	
Poids net d'eau (g)	1,0	0,4	0,2	0,2	0,1	0,0	0,0	0,2	
Poids net du matériau sec (g)	2,3	1,2	0,8	0,8	0,6	0,1	0,2	1,0	
Teneur en eau (%)	44,4	32,2	29,1	27,7	22,4	30,8	23,8	15,6	
				WL=	34,0	WP =		23,4	
					IP = 10,6				

Nombre de coups		18	23	28	33	38
Teneur en eau (%)		44,4	32,2	29,1	27,7	22,4
Limite moyenne de liquidité "WL" (%)		31,2				

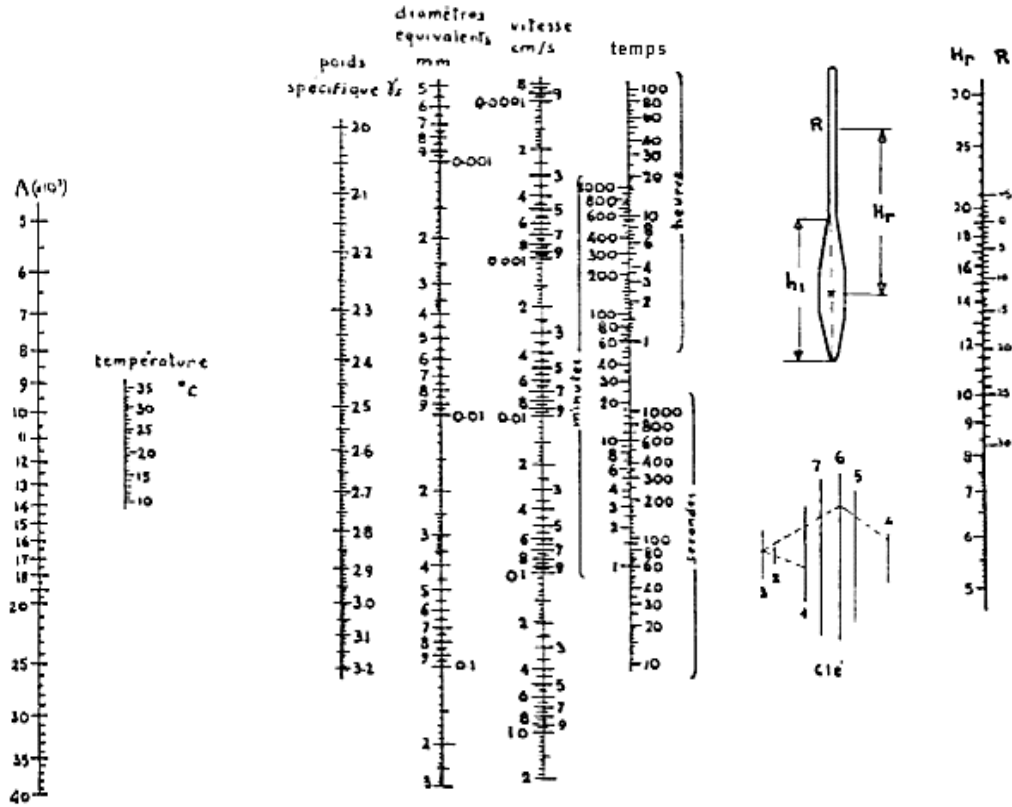
annexes 18 limite d'atterberg du sol K3'



annexes 19 illustration de la prise de mesure sous le ménisque

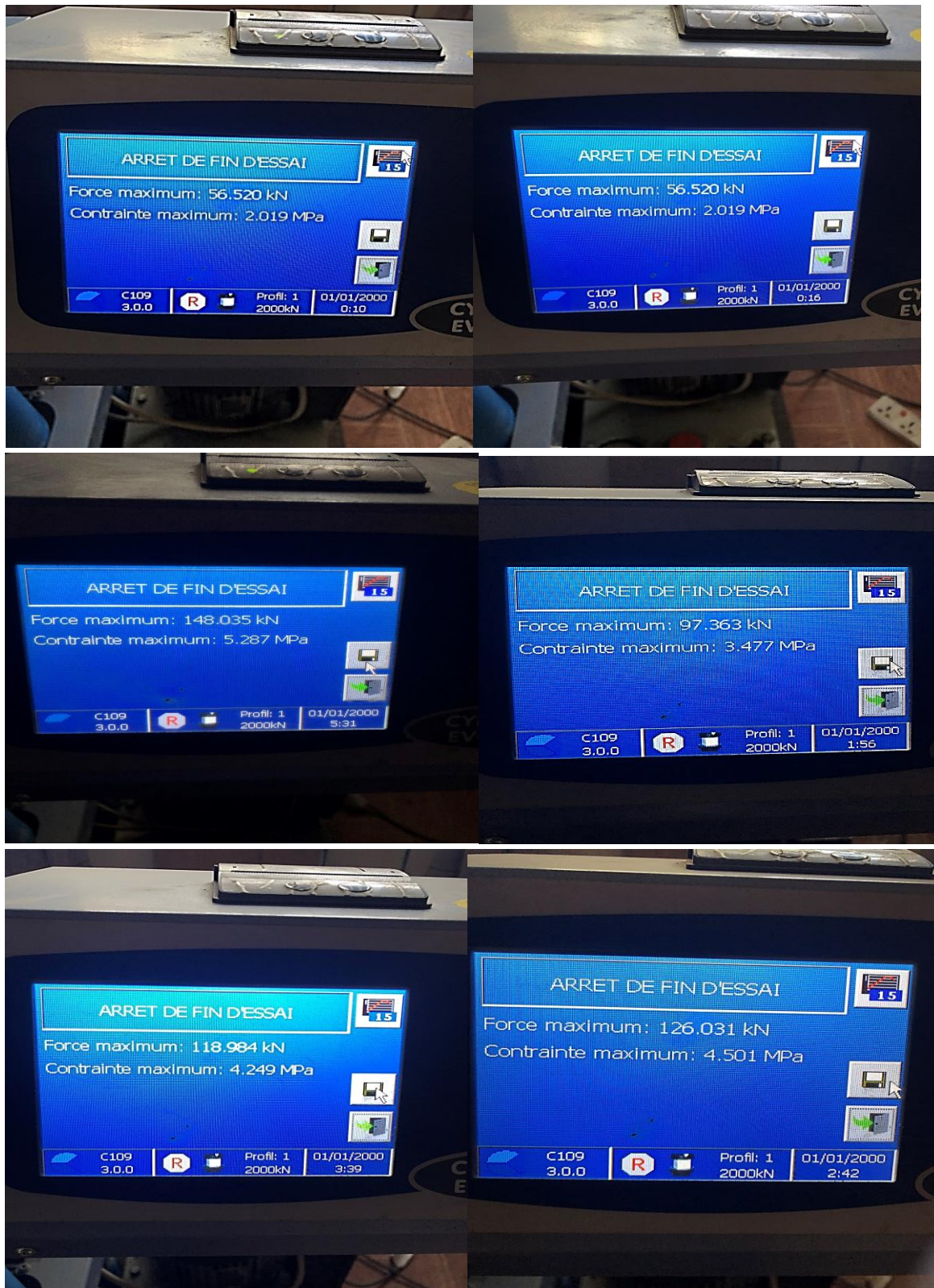


annexes 20 abaque de la détermination du facteur F

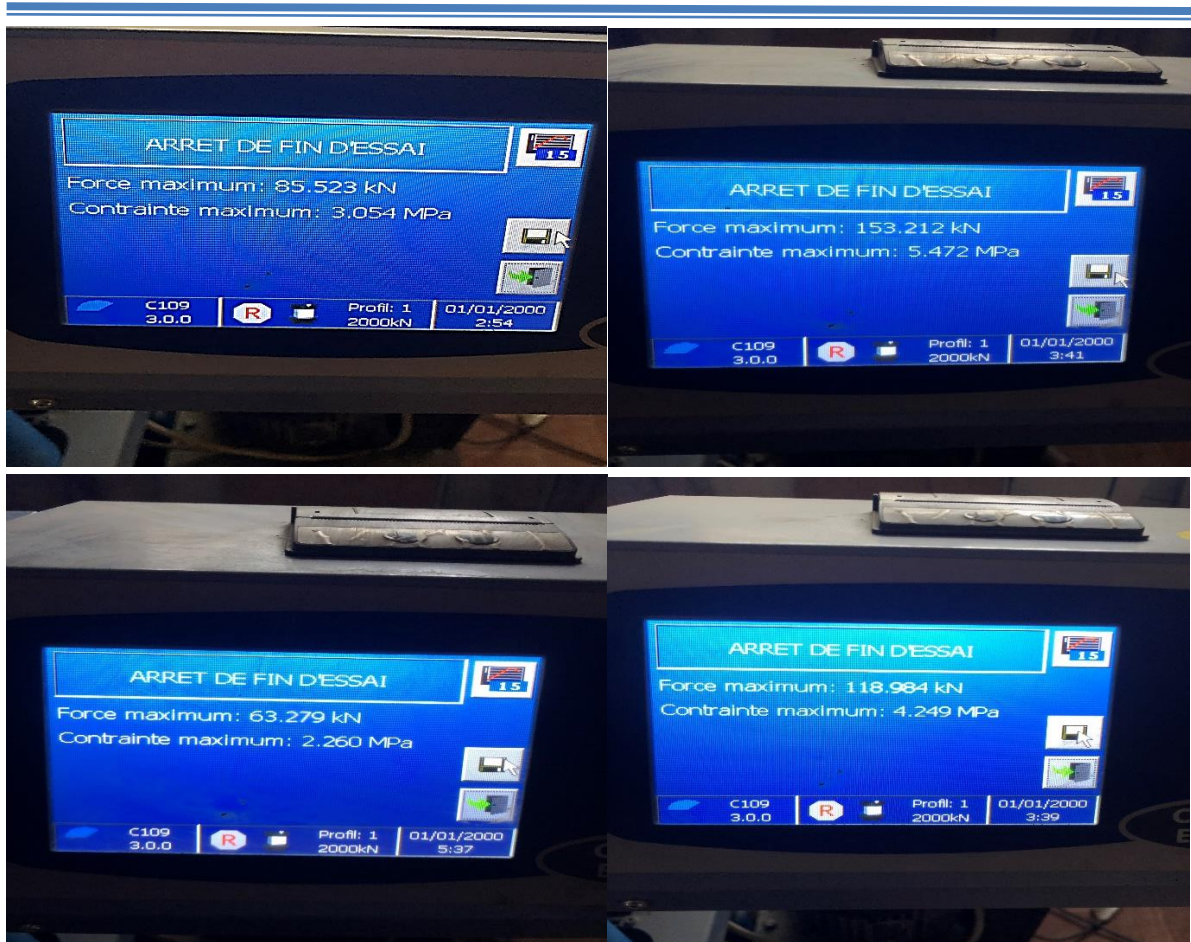


annexes 21 Nomogramme d'après CASAGRANDE de calcul des diamètres équivalent

ECHANTILLON DE QUELEQUES IMAGES MONTRANT LES VALEURS DES CONTRAINTES DE COMPRESSION



Etude comparative entre la stabilisation des briques en terres comprimées (BTC) par le ciment et la chaux éteinte



annexes 22 résultat des essai en compression



annexe 23 courbe d'évolution de la charge en fonction du temps



annexe 24 les BTC confectionnées