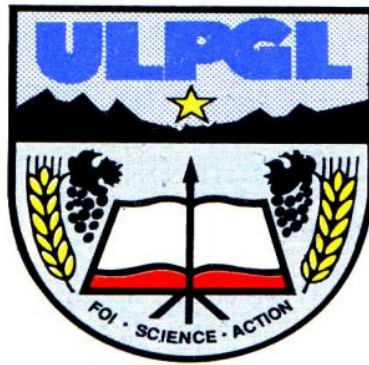


UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS

**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUEES**



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

**ETUDE D'UN ÉCO- BETON A BASE DE TERRE
STABILISE AU CIMENT : APPLICATION AU SOL DE
KATANA (SUD-KIVU)**

Par : AGANZE MUHIMANYI Benjamin

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

Option : Structures et Ouvrages d'Arts

Directeur : Dr. Ally. ALINABIWE

Encadreur : Ir. CIRHUZA BADESIRE Paterne

ANNEE ACADEMIQUE 2023 – 2024

ÉPIGRAPHE

*« La crainte de l'Eternel est le commencement de la sagesse, Tous ceux qui l'observent
ont une raison saine »*

Psaumes 111 : 10

DÉDICACE

A ma sœur WIVINE MUHIMANYI, pour son courage et son soutien.

AGANZE MUHIMANYI Benjamin

REMERCIEMENTS

L'accomplissement de ce présent travail n'est pas un fruit d'un effort personnel mais des plusieurs personnes qui méritent bel et bien nos mots de reconnaissance.

Nos remerciements les plus profonds s'adressent en premier lieu à l'Eternel Dieu de bonté qui est la source d'inspiration et le maître non seulement de notre vie mais aussi de toute bonne œuvre que nous puissions réaliser. Que son nom soit glorifié éternellement et à jamais.

Notre profonde gratitude s'adresse à Monsieur le Docteur **Ally. ALINABIWE** et l'encadreur Monsieur **Ir. CIRHUZA BADESIRE Paterne**, qui, malgré leurs multiples occupations, ont acceptés de diriger et d'encadrer notre travail. Aussi, nous ne pouvons oublier d'adresser des vifs remerciements à l'Université Libre des Pays de Grands Lacs (ULPGL), en particulier la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées (FSTA) qui, par son accueil, a contribué à notre formation avec beaucoup de patience et de tolérance.

Nous adressons aussi notre plus grande reconnaissance à notre précieuse famille notamment à notre père MUHIMANYI MUNUNU Léopold et à notre mère NZIGIRE RUSANGIZA Esperance, à notre Pasteur Rév. BARHASIMA Pacifique et à nos frères et sœurs pour tous leurs sacrifices, conseils et encouragements...

A tous nos camarades et amis, qui ont fait de ce parcours une expérience inoubliable, nous adressons notre profonde reconnaissance.

AGANZE MUHIMANYI Benjamin

SIGLES, ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS

Ic	: Indice de consistance
Il	: Indice de liquidité
Ip	: Indice de plasticité
Kg	: Kilogramme
Md	: Masse sèche de l'échantillon
Mh	: Masse humide de l'échantillon
NF	: Norme Française
Wl	: Limite de liquidité
Wp	: Limite de plasticité
P	: Masse volumique
Pd	: Masse volumique sèche
ρ_{dmax}	: Densité sèche maximale
Ps	: Masse volumique des grains solides
σ_{c28}	: Résistance caractéristique du béton a 28 jours
ES	: Équivalent de sable
C	: Proportion du ciment
E	: Proportion de l'eau
S	: Proportion du sable
G	: Proportion de gravier
AG	: Analyse Granulométrique
MPa	: Méga pascal
W	: Teneur en eau
Wopt	: Teneur en eau optimale

E/C	: Rapport eau sur ciment
D_{max}	: Dimension maximale du plus gros grain des granulats
AG	: Analyse granulométrique
Ab24	: Taux d'absorption à 24h
AFNOR	: Association française de normalisation
C	: Dosage en ciment
cm	: Centimètre
Dmax	: Diamètre maximale de granulats
E	: Dosage en eau
E/C	: Rapport eau ciment
ES	: Equivalent de sable
ESv	: Equivalent sable visuel
ESp	: Equivalent sable au piston
EN	: Norme européenne
fc28	: Résistance caractéristique du béton à 28 jours
Kg	: Kilogramme
KN	: Kilonewton
LA	: Coefficient Los Angeles
Mf	: Module de finesse du sable
MPa	: Méga pascal
n	: Porosité
NF	: Norme française
NF P	: Norme française applicable au bâtiment et génie civil
ρ_{app}	: masse volumique absolue eng/ m^3
G	: Proportion en gravier en kg
S	: Proportion en sable en kg
ρ_{app}	: Masse volumique apparente
Rcj	: Résistance à la compression à j jours

RÉSUMÉ

Cette étude porte sur la formulation d'un éco-béton à base de terre, dans lequel le ciment est partiellement et totalement remplacé par de l'argile, suivant la méthode Dreux-Gorisse. L'objectif est d'évaluer les performances mécaniques de ce béton appliqué aux sols de Katana (Sud-Kivu) et de déterminer son potentiel pour les constructions durables. Quatre mélanges ont été testés en laboratoire : un béton témoin BO-D (ciment seul), un béton BT-D (argile à 100 % comme liant), un béton BS1-D (avec 10 % de ciment) et un béton BS2-D (avec 20 % de ciment). Les essais de résistance en compression ont montré des valeurs de 12,8 MPa pour le béton BO-D, 0,544 MPa pour le béton BT-D, 1,919 MPa pour le béton BS1-D et 4,42 MPa pour le béton BS2-D. les bétons stabilisés au ciment Par rapport au béton 100 % argile, le mélange BS1-D présente une augmentation de résistance de 252 %, tandis que le BS2-D montre une augmentation de 712 %. Ces résultats indiquent que l'ajout de ciment améliore considérablement la résistance, mais que l'utilisation de l'argile comme liant présente une réduction de 260 Kg/m³, soit 60% de la consommation de ciment et donc la production de CO₂. L'utilisation de ce matériau offre une alternative prometteuse pour des applications structurelles à faible charge, telles que les cloisons intérieures ou les pavages écologiques, favorisant ainsi une approche de construction plus écologique et adaptée aux ressources locales.

Mots clés : Éco-béton, Béton de terre, Substitution du ciment, Méthode Dreux-Gorisse.

ABSTRACT

This study focuses on the formulation of an eco-concrete based on earth, in which cement is partially and totally replaced by clay, following the Dreux-Gorisse method. The objective is to evaluate the mechanical performance of this concrete applied to the soils of Katana (South Kivu) and to determine its potential for sustainable construction. Four mixtures were tested in the laboratory: a control concrete BO-D (cement only), a concrete BT-D (100% clay as a binder), a concrete BS1-D (with 10% cement), and a concrete BS2-D (with 20% cement). The compressive strength tests showed values of 12.8 MPa for concrete BO-D, 0.544 MPa

for concrete BT-D, 1.919 MPa for concrete BS1-D, and 4.42 MPa for concrete BS2-D. The cement-stabilized concretes show that compared to the 100% clay concrete, the BS1-D mixture presents a strength increase of 252%, while BS2-D shows an increase of 712%. These results indicate that the addition of cement significantly improves strength, but the use of clay as a binder results in a 60% reduction in cement consumption and thus CO₂ production. The use of this material offers a promising alternative for low-load structural applications, such as interior partitions or ecological paving, thereby promoting a more ecological construction approach that is adapted to local resources.

Keywords : Eco-concrete, Earth concrete, Cement substitution, Dreux-Gorisse

TABLE DE MATIERES

ÉPIGRAPHE.....	i
DÉDICACE	ii
REMERCIEMENTS.....	iii
SIGLES, ABRÉVIATIONS ET NOTATIONS.....	iv
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT.....	vii
TABLE DE MATIERES	viii
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DE TABLEAUX.....	xii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I.1 Contexte	1
I.2 Identification et formulation du problème	2
I.3 Questions de recherche.....	2
I.4 Formulation des hypothèses	2
I.5 Justification du choix du sujet et motivations	3
I.6 Énoncé des objectifs de recherche	3
Objectif général	3
Objectifs spécifiques.....	3
I.7 Méthodologie et délimitation du travail	4
I.8 Structure du mémoire	4
Chapitre I. GENERALITES	5
I.1 Généralité sur le béton de terre	5
I.1.1 Historique de la construction en de terre	5
I.1.2 Méthodes de construction à base de terre crue	6
I.1.3 Caractéristique du béton de terre	10
I.2 Caractéristiques du béton	15
I.2.1 Etats Frais.....	15
I.2.2 Etats durcis.....	16

I.3	La méthode de formulation du béton	16
I.3.1	Méthode de Dreux-Gorisse	16
I.3.2	La méthode de substitution	17
I.4	Domaines d'utilisation du béton de terre	17
	Conclusion partielle.....	17
Chapitre II.	MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET MATÉRIAUX	19
II.1	Introduction	19
II.2	Nature et origine des constituants	20
II.2.1	Le Ciment.....	20
II.2.2	Les granulats	20
II.2.3	L'eau de gâchage	20
II.2.4	Sol argileux	20
II.3	Caractérisation des granulats.....	20
II.3.1	Essais de caractérisation du sol argileux.....	21
II.3.2	Essais sur le sable.....	24
II.3.3	Essais d'identification des concassés	28
II.4	Caractérisation du béton.....	29
II.4.1	Mesure de la maniabilité.....	29
II.4.2	Essai sur le béton durci	30
II.5	Formulation du béton	30
II.5.1	Méthode de dreux-gorisse.....	30
II.5.2	Méthode de substitution.....	36
II.6	Programme expérimental	36
	Conclusion partielle.....	37
Chapitre III.	PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS	38
III.1	Présentation des résultats	38
III.1.1	Caractéristiques des granulats.....	38
III.1.2	Caractéristiques de l'argile	40
III.2	Résultats de la formulation.....	42
III.2.1	Données de base.....	43
III.2.2	Calcul des dosages en divers éléments	43

III.3	Caractéristiques des bétons d'étude	46
III.3.1	Caractéristique des bétons à l'état frais	46
III.3.2	Caractéristiques des bétons à l'état durci.....	46
III.3.3	Impact économique du béton de terre	47
III.3.4	Impact environnemental du béton de terre.....	48
III.4	Discussion des résultats.....	49
III.4.1	L'ouvrabilité	49
III.4.2	Résistance mécanique	50
	Conclusion partielle.....	50
	CONCLUSION GENERALE.....	51
	BIBLIOGRAPHIE.....	52
	ANNEXE	55

LISTE DES FIGURES

<i>Figure I:1. Construction en pisé.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I:2. Technique de fabrication de l'adobe.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I:3. Construction d'un mur en bauge.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I:4. Préparation de torchis.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I:5. Maison en terre pailler.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I:6. Le sol argileux.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I:7. Sol pour la construction</i>	<i>11</i>
<i>Figure I:8. Triangle d'identification à texture du sol</i>	<i>12</i>
<i>Figure II:1. Programme expérimental globale du travail.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II:2. Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.</i>	<i>32</i>
<i>Figure III:1. Courbes granulométriques du béton</i>	<i>39</i>
<i>Figure III:2. Triangle d'interprétation des résultats de l'essais granulométrique par sédimentation.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure III:3 : Répartition des granulats du béton</i>	<i>44</i>
<i>Figure III:4. Valeurs de l'affaissement obtenues pour les bétons étudiés.....</i>	<i>46</i>
<i>Figure III:5. Résistances en compression des bétons d'étude.....</i>	<i>47</i>
<i>Figure III:6. Les coûts de production de chaque béton étudié.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III:7. Production du CO₂ par m³ des bétons.....</i>	<i>49</i>

LISTE DE TABLEAUX

<i>Tableau I-1 : Classification de ciments selon la composition [25].</i>	15
<i>Tableau II-1 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire [26].</i>	31
<i>Tableau II-2 : Correction en % sur le dosage en eau en fonction D des granulats [25].</i>	32
<i>Tableau II-3 : Valeurs du terme correcteur K [25].</i>	33
<i>Tableau II-4 : Valeurs du coefficient de compacité [26].</i>	34
<i>Tableau III-1. Masses volumiques des matériaux</i>	38
<i>Tableau III-2 : Teneur en eau naturelle du sol</i>	41
<i>Tableau III-3 : Valeurs de W, W_L, W_P, I_P, I_C du sol de Katana</i>	42
<i>Tableau III-4 : Données de base</i>	43
<i>Tableau III-5 : Dosage en liant et en eau</i>	43
<i>Tableau III-6 : Dosages en divers constituants des bétons</i>	45
<i>Tableau III-7: La moyenne et l'Ecart type de la résistance du béton de terre</i>	47

INTRODUCTION GÉNÉRALE

I.1 Contexte

L'Afrique, par ses grandes réserves en terre est considérée comme la région la plus écologique au monde dans le domaine de construction à base de la terre crue avec le Mali et le Niger qui regorge des grandes superficies en constructions traditionnelles à base de terre crue [6].

Depuis les temps les plus reculés, la terre crue composée essentiellement d'argile et de particules fines, constitue un matériau de base de forte importance. En effet, elle est disponible en grande quantité partout. Elle nécessite que très peu d'énergie pour sa fabrication et ne génère pas de déchets. La terre crue a été utilisée dans la construction sous différentes formes tels que : l'adobe, le pisé, la terre paille, le torchis, les briques de terre compressée, la bauge (terre crue empilée) [1].

La particularité de l'utilisation de la terre crue pour construire repose sur un principe simple : elle devient malléable lorsqu'elle est mélangée à l'eau et durcit ensuite lors de son séchage. La construction est en général facile et rapide, et le réemploi toujours possible et ce presque de façon infinie [2].

De nos jours, le changement climatique est l'un des défis les plus complexes. Les humains sont en face des phénomènes extrêmes tels que le réchauffement de la planète, la fonte de la glace polaire, les inondations, les incendies de forêt, les tremblements de terre, les tsunamis, etc. Une des différentes causes responsables du réchauffement climatique est les émissions de gaz à effet de serre notamment le CO₂. La production de ciment est responsable de 8% des émissions de CO₂ mondiales [1].

Les éco-matériaux à base de sol argileux représentent l'avenir de la construction. On assiste ces dernières années à des changements de comportement et une volonté de voir les bétons classiques remplacés par des bétons contenant une forte proportion de produits dits « écologiques » variés pour favoriser cette mutation. Ces bétons écologiques ont pour objectif de réduire la consommation du ciment, donc la production de CO₂ et maintenir des propriétés acceptables. De nos jours, les constructions sont des structures plus complexes, plus grandes et nécessitent des matériaux plus performants [2].

D'où une caractérisation de béton de terre s'avère d'une importance capitale. La mise en œuvre et la répartition proportionnelle des matériaux d'un béton influencent directement des caractéristiques telles que la résistance à la compression, la perméabilité, la durabilité du béton [28].

Plusieurs travaux ont été fait dans le même contexte, dont celui présenté par **Nahouo SORO et Duc Chinh NGO** portant sur *les techniques de traitement de béton de terre pour l'amélioration des propriétés mécaniques du béton de terre*. Ils ont constaté que le traitement du béton de terre au liant (chaux ou ciment), contribue à une augmentation de la résistance à la compression du béton de terre [1].

Pour ce qui est de notre travail, il fait objet de l'étude de l'influence de la substitution du ciment par la terre crue sur les propriétés mécaniques d'un béton de terre, formulé selon la méthode de Dreux-Gorisse.

I.2 Identification et formulation du problème

La production de béton traditionnel à base de ciment entraîne des émissions importantes de CO₂, ce qui a un impact négatif sur l'environnement. Cependant, la construction en terre crue, bien qu'écologique, est souvent limitée par une résistance mécanique inférieure à celle du béton conventionnel. Le défi consiste donc à améliorer les propriétés mécaniques d'un béton écologique à base de terre, avec une substitution partielle ou totale du ciment par de l'argile, afin de le rendre adapté aux exigences structurelles pour certaines applications.

I.3 Questions de recherche

Le parcours de notre recherche sera guidé par deux questions qui sont entre autres :

- Dans quelle mesure la stabilisation du béton de terre par le ciment, selon la méthode de Dreux-Gorisse, affecte-t-elle la résistance en compression de ce béton ?
- Le béton à base de terre avec un pourcentage spécifique de ciment peut-il offrir une alternative viable et écologique pour des applications structurelles à faible charge, tout en maintenant une résistance mécanique suffisante ?

I.4 Formulation des hypothèses

Cette problématique mentionnée nous amène aux hypothèses selon lesquelles :

- Le béton de terre présente généralement des résistances inférieures à celle des bétons traditionnels, mais peut être améliorée par des additifs ce qui est avantageux pour certaines applications.
- Un béton de terre comprenant entre 10 % et 20 % de ciment pourrait atteindre une résistance suffisante pour des applications à faible charge, comme les cloisons et les pavages écologiques, et offrir une alternative écologique viable aux bétons traditionnels.

I.5 Justification du choix du sujet et motivations

La terre, matériau disponible en quantité et omniprésent, est utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l'habitat le plus répandu au monde [2]. Malheureusement, cette technique aux nombreux avantages tend à disparaître dans de nombreux pays au profit de la construction en béton à cause de sa faible résistance en compression.

Le projet s'inscrit dans la dynamique du développement durable et comporte un double avantage. Il contribue aux efforts de réduction des gaz polluants et donc à la lutte contre le réchauffement climatique. Il faciliterait par ailleurs, à terme, l'accès au logement par les populations par la réalisation d'habitations ou de constructions spécifiques et donc résoudre le problème en mettant en valeur les avantages de sol. La crise du logement observée dans certains milieux ruraux de la République Démocratique du Congo.

I.6 Énoncé des objectifs de recherche

Objectif général

Cette étude vise à étudier un béton de terre stabilisé au ciment, en vue d'optimiser ses performances mécaniques pour des applications dans des constructions durables adaptées aux ressources locales des sols de Katana (Sud-Kivu).

Objectifs spécifiques

Le présent travail poursuit les objectifs spécifiques suivants :

- Déterminer les caractéristiques du béton au liant argileux.
- Analyser l'influence de la stabilisation sur la résistance en compression d'un béton à base de terre.

I.7 Méthodologie et délimitation du travail

Afin d'accéder à ces objectifs, des essais sur le sable moyen de Rwanda, le sol de KATANA et les graviers concassés ont été effectués. Ainsi il a été nécessaire d'utiliser la méthode expérimentale et les Techniques analytiques.

La méthodologie générale de l'étude se déroule autour de trois principaux axes correspondants aux trois sous-objectifs déterminés :

- Caractériser le sol disponible pour l'étude.
- Par la méthode de Dreux-Gorisse, formuler respectivement un béton ordinaire et les bétons à base de terre ;
- Par différents essais, déterminer les propriétés des bétons formulés ;
- Sur base des résultats issus des recherches précédemment effectuées sur le béton de terre, tirer une conclusion ;

I.8 Structure du mémoire

Ce travail contient trois chapitres dont : Le premier chapitre présente les généralités, qui consiste en la présentation des matériaux du béton étudié, de leurs propriétés et de leurs constituants. Le deuxième chapitre est consacré à la méthodologie des essais sur les matériaux. Le troisième chapitre présente les résultats ainsi que leur analyse

Chapitre I. GENERALITES

INTRODUCTION

Ce chapitre aborde les généralités concernant les mots clés du travail, notamment celles relatives au béton de terre et à la méthode de formulation.

I.1 Généralité sur le béton de terre

Ce sous point du chapitre présente une littérature sur les bétons d'étude notamment : la définition, l'historique, les caractéristiques des constituants et une théorie sur la méthode de formulation utilisée pour notre travail.

I.1.1 Historique de la construction en de terre

Le béton de terre a connu un énorme succès dans les domaines de construction des maisons individuelles grâce aux avantages qu'il apporte aux concepteurs et producteurs, sur les plans technique et économique, comme : son faible cout, sa rapidité de mise en place, bonnes isolations thermique et acoustique et la bonne hygrométrie pour l'environnement interne. La pratique de la terre comme matière première dans la construction remonte de l'antiquité sous plusieurs formes, elle a servi à faire des briques par des techniques qui ont évolués au cours du temps, des mortiers de pose, des enduits pour les murs, etc. Le plus bel exemple est la muraille de Chine qui a été commencée dès le Ve siècle avant Jésus-Christ [1].

De grandes réalisations en terre par tout dans le monde en Afrique, au moyen orient, en Asie, en Australie. Par exemple, la ville de Shibām au Yémen est constituée de gratte-ciels en terre d'où son nom de Manhattan du désert. Les immeubles en terre crue de Shibām sont les plus vieux gratte-ciels du monde (XVIe) [7].

L'architecture de terre est présente dans tous les continents habités. Selon le département de l'énergie américain, 50 % de la population mondiale vit dans une construction en terre crue [1]. L'utilisation des matériaux béton et acier dans la construction est relativement récente dans l'histoire de l'habitation humaine : le béton a été découvert au 19e siècle alors que la production de la fonte et du fer-forgé a commencé au 18e siècle pour aboutir à celle de l'acier au 19e siècle. Les performances des nouveaux matériaux sont en effet indéniables, car ils ont permis à l'homme de réaliser des infrastructures d'envergures telles que les immeubles gratte-ciels, les ouvrages d'art exceptionnels et cela dans des

environnements où il n'est pas toujours possible de construire en terre. Les performances techniques dépassent celles de la terre [1].

I.1.2 Méthodes de construction à base de terre crue

Dans le domaine de la construction, la terre crue a été utilisée depuis des milliers d'années. De nombreuses méthodes existent pour utiliser la terre crue en construction dont cinq très couramment employés : torchis, bauge, pisé, terre paille, adobe.

I.1.2.1 Pisé - terre damée dans des coffrages

Le pisé est une terre damée dans des coffrages. Il est utilisé pour construire des murs monolithiques en compactant les couches successives de terre humide à l'intérieur des coffrages. Le mur est décoffré immédiatement après que la terre a été damée. L'épaisseur des murs en pisé peut varier de 30 à 120 cm et en moyenne de 50 cm. Le séchage du mur en pisé se fait lentement par l'évaporation d'eau sur ses surfaces (façades extérieure et intérieure) [1]. La Figure I :1 présente une application du pisé pour réaliser un bâtiment individuel.



Figure I:1. Construction en pisé

I.1.2.2 Adobe - brique moulée

L'adobe est une brique de terre crue. Elle est fabriquée de façon manuelle en utilisant des moules. Elle est durcie par le séchage à l'air libre (au soleil) comme illustrer sur la Figure I :2.

Depuis longtemps, les blocs en adobe sont largement utilisés dans la construction. Ces blocs séchés au soleil ont été utilisés 8000 ans avant JC [2].

On peut facilement trouver des maisons construites en terre dans différents pays en Asie (ex. Iran, Inde), en Amérique du Sud et en Afrique. Dans les pays en voie de développement, environ 50% des habitants vivent dans des logements de terre [1]. La

brique de terre crue est souvent choisie pour construire les logements des pauvres puisque le budget de construction est limité et la technique est très facile à appliquer.



Figure I:2. Technique de fabrication de l'adobe

I.1.2.3 Bauge - terre empilée et façonnée

La bauge (terre empilée) est un système constructif par des couches de terre comme sur la Figure I :3. C'est une technique de construction ancienne, répandue en Europe (en France : Bretagne), Afrique, Asie, Amérique et notamment dans le bassin rennais. La bauge permet de réaliser des murs porteurs dans des régions où le sous-sol est pauvre en pierres. Elle permet aussi de donner une bonne isolation thermique pour une maison à ossature bois [6].

La bauge est un mélange composé de terre crue à l'état plastique et de fibres végétales (parfois animales) :

- La terre extraite directement du chantier sous la couche de terre végétale. Cette terre doit être moyenne argileuse : avec une bonne cohésion suffisante pour qu'elle ne fissure pas.
- Les fibres retiennent la cohésion et limitent le retrait et la fissuration de la terre au séchage. S'il y a plus de fibres, la résistance du mélange est plus importante mais difficile à mettre en œuvre.
- Ensuite, on ajoute l'eau au mélange (10% à 20%) pour obtenir une pâte compacte, plastique, homogène et pas trop mouillée.



Figure I.3. Construction d'un mur en bauge

I.1.2.4 Torchis ou terre de remplissage d'un treillis en bois

Le torchis est un matériau de construction à base de fibres végétales (parfois animales) et de terre argileuse (environ 20% de fibres et 80% de terre) comme représenté sur la Figure I :4. Il n'a pas un rôle structurel et il a besoin d'une structure d'accroche (le lattis entre autres), une structure bois posée qui constitue l'ossature du bâti. Le rôle principal du torchis est l'isolation thermique et phonique [6].

Les sols peuvent avoir un comportement suivant :

- Sableux, s'ils contiennent plus de 90% de sable. Dans ce cas, la densité du mélange dépend peu de la teneur en eau et l'optimum de densité est relativement faible ;
- Sablo-argileux, s'ils contiennent entre 80 et 70% de sable. L'optimum de densité est mieux marqué ;
- Argilo-sableux, s'ils contiennent moins de 70% de sable. Dans ce cas, la densité du mélange dépend fortement de la teneur en eau et la densité optimale est élevée.



Figure I:4. Préparation de torchis

I.1.2.5 Terre paille

La terre paille est un mélange de terre et de la paille avec un taux de terre/paille de 20% et 80%. Elle est banchée en remplissage d'une structure à poteaux. Cette technique permet d'atteindre une isolation thermique importante, naturelle (écologique) et moins cher.

Tout d'abord, on mélange la terre avec l'eau pour fabriquer la barbotine par une bétonnière ou un malaxeur. Ensuite, on tamise cette barbotine des cailloux < 5 mm afin d'obtenir une barbotine très liquide et bien homogène comme sur la Figure I :5. Puis, on mélange cette barbotine et la paille trempée pour créer la terre paille [1].

- La paille est la tige de blé, d'orge, de seigle ou de toute autre plante contenant de l'air.
- La terre peut être extraite directement du terrassement de la maison



Figure I:5. Maison en terre pailler

I.1.3 Caractéristique du béton de terre

Le béton de terre possédant les mêmes caractéristiques que le béton ordinaire ; Les bétons à base de terre se différencient des bétons classiques par leur plus forte déformabilité [6].

I.1.3.1 Les composants

La résistance et la durabilité de la terre sont largement influencées par le type et la nature des matériaux choisis. Le béton de terre est constitué par les mêmes composants que le béton ordinaire. Pour arriver à de meilleures performances du béton de terre, ainsi de répondre aux différentes exigences techniques, il est important de choisir correctement les différents composants. La qualité finale d'un mélange du béton de terre est donc liée de la qualité de ses composant [6].

a. Le sol

Les définitions du sol sont liées à son utilisation. Pour un ingénieur civil le sol est un support sur lequel sont construites les routes et sont fondés les bâtiments.

Le sol est le support de la vie terrestre. Il résulte de la transformation de la couche superficielle de la roche-mère, la croûte terrestre, dégradée et enrichie en apports organiques par les processus vivants. Hors des milieux marins et aquatiques d'eau douce, il est ainsi à la fois le support et le produit du vivant [10]

➤ L'Argile

L'argile désigne une matière rocheuse naturelle à base de silicates et/ou d'aluminosilicates hydratés de structure lamellaire, provenant en général de l'altération de silicates à charpente tridimensionnelle, tels que les feldspaths [28].

Les sols dits « argileux » comprennent les limons (silts) et les argiles qui sont par définition des sols à grains fins dont plus de 50 % de leur poids sec est constitué de particules inférieures à 0,075mm. Leur consistance peut varier de très molle à dure. Ils sont caractérisés par des teneurs en eau habituellement élevées, ce qui les rend généralement compressibles, indépendamment de leur consistance. Dans un sens étendu, il s'agit aussi d'un sédiment composé de particules fines issues de l'altération de diverses roches, parfois des roches sédimentaires argileuses métamorphisées en schistes [28].

La Figure I :6 présente un sol argileux.



Figure I:6. Le sol argileux

➤ Sols pour la construction

Le prélèvement du matériau doit répondre idéalement à une méthodologie d'échantillonnage conformément aux normes appropriées si l'on n'est pas limité par des contraintes d'ordre administratives. La terre pourrait être prélevée à une profondeur correspondant à la zone B. Cela permet d'éviter, d'une part, la matière organique située dans les couches superficielles et, d'autre part, la roche si on va trop en profondeur. Cette procédure ne pourrait cependant pas s'appliquer s'il s'agit de recycler des terres issues d'excavation pour fondations, de terrassements.

Il faut en outre, en fonction du volume de travaux à effectuer, envisager d'utiliser les seules terres disponibles. Il n'y a pas de type de sol ou de granulométrie fixe ou figée pour la construction en béton de terre. Par ailleurs, selon Chen et Wang (2006), la présence de matières organiques dans la terre empêche l'obtention d'une bonne résistance à la stabilisation au ciment de celle-ci [1]. Représenter sur la Figure I :7.

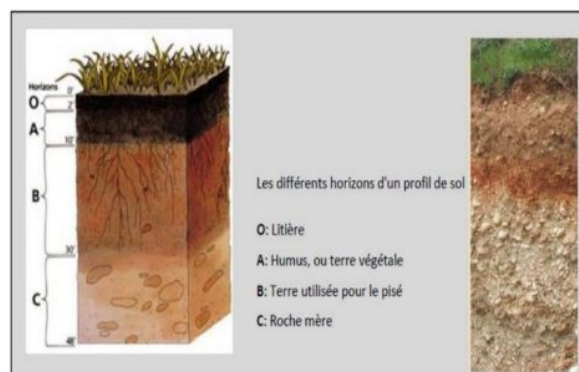


Figure I:7. Sol pour la construction

➤ Granulométrie des sols pour la construction en terre

Le sol pour la construction en terre doit avoir une granulométrie appropriée. Selon Gernot (2000), le sol de préférence doit être composé d'argile, de silt, de sable et parfois des particules de gravier et de cailloux. La répartition de ses particules doit varier de 0,002 mm à 2 mm comme indiqué sur le triangle de distribution des particules. Toujours selon Gernot (2000), le sol doit comprendre 10 % à 30 % d'argile. Comme illustré sur la Figure I :8.

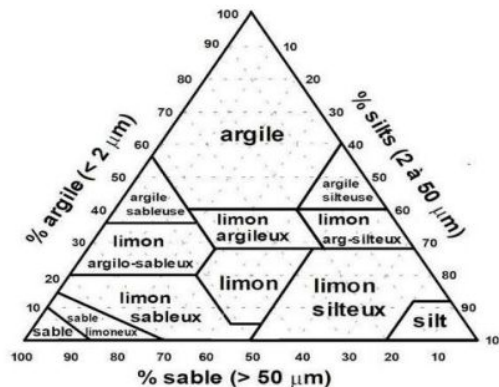


Figure I:8. Triangle d'identification à texture du sol

a) L'eau

La quantité d'eau utilisée dans les bétons de terre n'est pas nécessairement évaluée en fonction du rapport eau/liant comme dans les bétons usuels plutôt par des essais de compaction comme l'essai optimum Proctor Modifié (variable en fonction de la méthode de formulation). Il faut noter qu'un excès d'eau influe négativement sur la résistance du béton de terre tandis qu'un manque d'eau entraîne des défauts de cohésion des matériaux [18].

b) Les granulats

Les granulats sont des matériaux minéraux inertes qui entrent dans la composition des bétons. On en distingue les sables et les graviers ou cailloux. C'est l'ensemble des grains de diamètre compris entre 0 et 125 mm dont l'origine peut être naturelle, artificielle ou provenant de recyclage.

Son rôle dans un mélange de béton est de permettre de produire un matériau ayant une résistance et une durabilité appropriées avec le moindre coût possible. Ils contribuent à

l'amélioration de la compacité, de l'homogénéité, de l'ouvrabilité et de la résistance du béton.

Leur choix doit être judicieux et doit s'orienter vers des granulats durs, propres, de granulométrie continue, chimiquement inerte, et ne contenant pas certaines impuretés. Pour la formulation du béton, deux facteurs ont longtemps été considérés comme ayant une influence sur les propriétés du béton.

La granulométrie du sable caractérisée, par exemple, par son module de finesse. Le module de finesse d'un sable pour béton est généralement compris entre 2,2 et 2,8. La granularité des granulats concerne la distribution dimensionnelle des grains.

Normalement, la courbe granulométrique des granulats doit être continue en sorte que les petits grains puissent bien remplir les vides créés par les grains ayant un aille plus grande. Par ailleurs, un rapport optimal de Gravillon/Sable permet d'obtenir une meilleure compacité des granulats [25].

I.1.3.2 Traitement du sol au liant

Afin d'atteindre des bonnes propriétés mécaniques dans le domaine de la construction en utilisant la terre crue, il faut utiliser des techniques pour traiter les sols. Ces techniques ont pour but d'améliorer leurs caractéristiques mécaniques et de limiter certaines pathologies comme le gonflement et le retrait [18].

Le traitement est utilisé ainsi pour réduire la sensibilité du sol aux variations volumiques dues à la plupart du temps aux variations de la teneur en eau. Le traitement des sols au ciment apparait après l'apparition du ciment dans les années 1830.

a) La chaux

La chaux est obtenue à partir d'un calcaire (CaCO_3 et autres minéraux) sous la décompression thermique à environ 1000°C .

Le calcaire se décompose en chaux vive et en dioxyde de carbone, selon la formule suivante : Calcaire (CaCO_3) (Cuisson à 1000°C) $\rightarrow$ Chaux Vive (CaO) + CO_2

La chaux est utilisée afin de diminuer la teneur en eau des sols argileux et faciliter la mise en œuvre. Ses propriétés sont définies par les normes NF P98-101 et NF EN 459-1 [2].

On distingue :

- La chaux vive qui est avide d'humidité et est le produit direct de la thermolyse (ou calcination) du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO).
- La chaux aérienne ou chaux éteinte est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau ; elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium (Ca (OH)₂) et réagit avec le CO₂ de l'air comme la réaction ci-dessous : $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca (OH)}_2$ (Chaux éteinte) + 15.5 kcal
- La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaire argileux ; ses propriétés se rapprochent de celles des ciments.

b) Le ciment

Le ciment est un produit composé principalement du clinker et d'autres additifs. Le clinker qui contient un mélange de calcaire d'environ (80%) et d'argile de l'ordre de (20%) est porté à des températures de 1450 – 1550°C et broyé en poudre fine inférieure à 80µm [2].

Le ciment a quatre composés anhydres :

- Les aluminates tricalciques (C3A)
- Les silicates bicalciques (C2S)
- Les silicates tricalciques (C3S)
- Les aluminoferrites tétracalciques (C4AF)

Les propriétés des ciments varient en fonction des pourcentages respectifs de ces différentes phases. C'est ainsi qu'un ciment contenant 60% de C3S et au moins 10% de C3A présentera de fortes résistances initiales et pourra être avantageusement utilisé en temps froid, alors qu'un ciment contenant au moins 40% de C3S et dont le pourcentage de C3A n'excède pas 5%, présentera une chaleur d'hydratation réduite et sera avantageusement utilisé en temps chaud.

➤ Classification des Ciments en fonction de leur composition

Selon que des constituants, autres que le gypse, sont ajoutés ou non au clinker lors de la fabrication, on obtient les différents types de ciments définis par la norme. Le tableau I-1 reprend la liste des différents types de ciments courants normalisés avec indication, pour chacun d'eux, de leur désignation propre et des pourcentages respectifs de constituants qu'ils contiennent [25].

Tableau I-1 : Classification de ciments selon la composition [25].

Types de ciments	Désignation	Teneur en clinker	Teneur des constituants secondaires
Ciment portland	CPA-CEM II/A	95 à 100%	0 à 5%
Ciment portland composé	CPJ-CEM II/A	80 à 94%	0 à 5%
	CPJ-CEM II/B	65 à 79%	0 à 5%
Ciment de haut fourneau	CHF-CEM III/A	35 à 64%	0 à 5%
	CHF-CEM III/B	20 à 34%	0 à 5%
	CLK-CEM III/C	5 à 19%	0 à 5%
Ciment pouzzolanique	CPZ-CEM IV/A	65 à 95%	0 à 5%
	CPZ-CEM IV/B	45 à 64%	0 à 5%
Ciment au laitier et aux cendres	CLC-CEM V/A	40 à 64%	0 à 5%
	CPA-CEM VII/B	20 à 39%	0 à 5%

I.2 Caractéristiques du béton

I.2.1 Etats Frais

Les principales propriétés du béton de terre à l'état frais sont : la maniabilité, la masse volumique, la ségrégation et la teneur en eau.

I.2.1.1 La maniabilité

La maniabilité est une propriété importante du béton de terre à l'état frais. Elle détermine la facilité de mise en place et fournit une indication sur le mode de compactage sur le matériau frais [25].

I.2.1.2 La masse volumique

La mesure de la masse volumique à l'état frais permet de contrôler l'uniformité du mélange et aussi de comparer sa densité, par rapport aux valeurs théoriques ou par rapport aux valeurs idéales trouvées pendant les essais préliminaires et pour notre béton, la masse volumique à l'état frais est généralement mesurée sur l'essai Proctor.

I.2.2 Etats durcis

I.2.2.1 Résistance à la compression

L'étude démontre que pour une teneur en eau donnée, la résistance augmente avec l'âge de l'éprouvette. Cette résistance décroît avec la teneur en eau pour un âge donné. Généralement, la résistance en compression des matériaux de construction à base de terre est une propriété qui continue à augmenter plusieurs années après la production du béton. Le choix de réaliser le test à l'âge de 7 jours, 28 jours et 180 jours permet d'évaluer cette évolution avec le temps. La résistance à la compression varie entre 1 et 2,4 MPa à 28 jours et entre 2,5 et 5 MPa à 180 jours [25].

I.3 La méthode de formulation du béton

La formulation d'un béton revient à déterminer les quantités de ciment, de sable, de gravier, de l'eau et éventuellement des adjuvants entrant dans la composition d'un m³ de béton partant des propriétés recherchées [26].

I.3.1 Méthode de Dreux-Gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode pratique simplifiée qui permet de définir de façon simple et rapide une formule de composition à peu près adaptée au béton d'étude mais que, seules quelques gâchées d'essais et la confection des éprouvettes permettront d'ajuster au mieux la composition à adopter définitivement en fonction des propriétés souhaitées et des matériaux utilisés. Les données de base utilisées pour cette méthode sont notamment la nature de l'ouvrage, la résistance souhaitée à 28 jours et la consistance souhaitée. Outre ces trois données de base, la dimension maximale des granulats D_{max} est aussi un paramètre utile dans la composition du béton d'étude, d'où il ne doit pas être négligé [26].

I.3.2 La méthode de substitution

La méthode de substitution est une méthode qui repose sur le principe de calcul des proportions des matériaux nécessaires à la fabrication du béton en fonction de leurs volumes spécifiques [29]. Cette méthode considère chaque matériau en fonction du volume absolu qui sont à leur tour additionnés pour atteindre le volume total souhaité. En utilisant cette méthode les ingénieurs peuvent concevoir des mélanges de béton qui répondent à des spécifications précise en matière de résistance et durabilité.

La méthode de substitution est un outil fondamental dans la conception des mélanges de béton, offrant une approche systématique pour optimiser les matériaux utilisés tout en répondant aux exigences du projet [29].

I.4 Domaines d'utilisation du béton de terre

Cette section rappelle quelques applications dans le monde pour le béton de terre dans l'évolution des constructions traditionnelles vers les constructions modernes. Cette forme de béton peut avoir plusieurs utilisations dans le bâtiment telles que le pavage écologique, le remplissage de trous, les murs de refends non porteurs. La construction de l'habitation de Ginette Dupuy dans les cantons de l'est, réalisée en béton de terre, est l'une des premières réalisations au Québec [1].

Pour une utilisation du béton de terre dans les murs structuraux, le béton de terre devra satisfaire les exigences de performance imposées par les normes appliquées. Comme pour un béton traditionnel, des essais destructifs et non destructifs peuvent également être faits [1].

Conclusion partielle

Ce premier chapitre présente une brève explication sur les généralités du béton, ses constituants, la revue de littérature permet de constater que la terre a toujours été utilisée pour construire à travers le monde. Par contre, les constructions d'aujourd'hui qui nécessitent des performances mécaniques importantes n'utilisent plus ce matériau depuis l'invention du béton à base de ciment. Pour atteindre des bonnes performances, plusieurs techniques de traitement peuvent être utilisées dont le traitement aux liants est l'une des

techniques les plus utilisées pour améliorer la résistance mécanique et la durabilité de ces matériaux.

Chapitre II. MÉTHODOLOGIE EXPÉRIMENTALE ET MATÉRIAUX

II.1 Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie de ce travail, qui s'articule autour de trois phases : la caractérisation des constituants, la formulation et la confection du béton, ainsi que la caractérisation mécanique de celui-ci. Ces phases sont détaillées dans l'organigramme présenté à la Figure II :1.

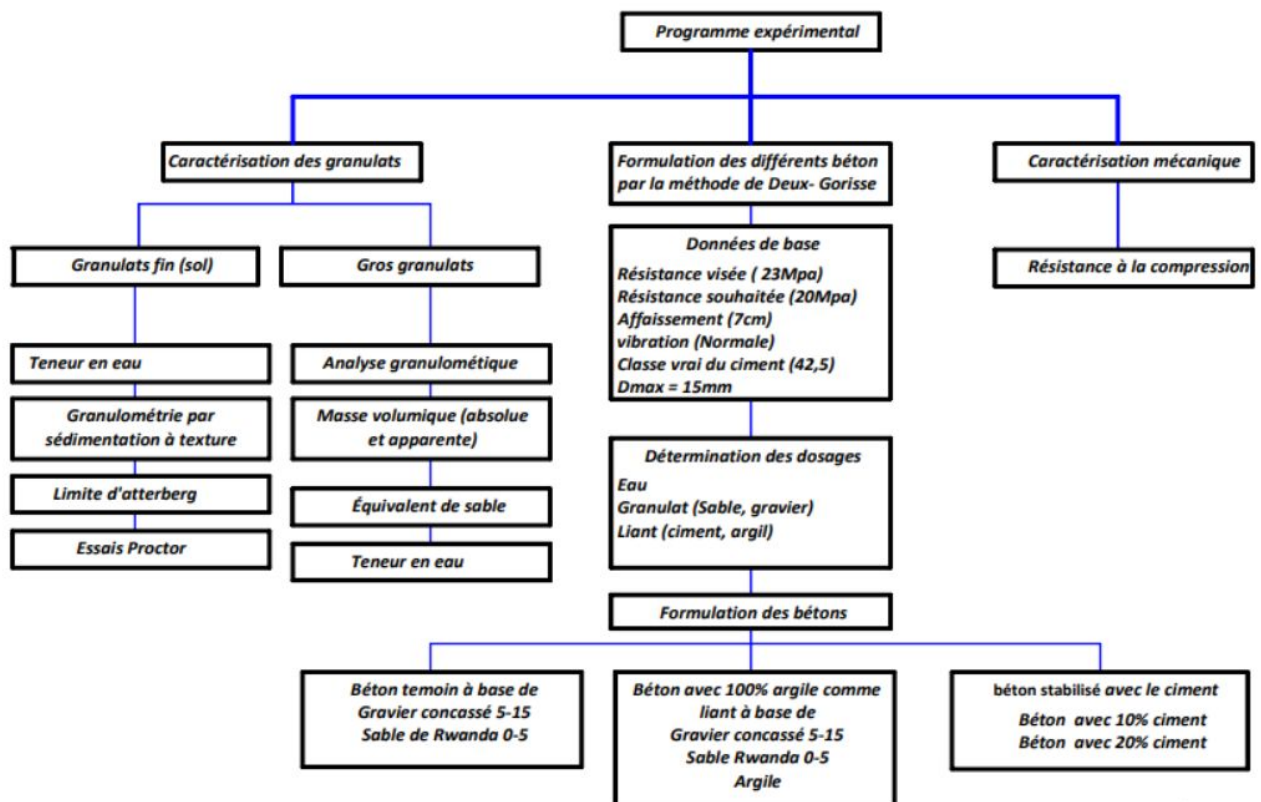


Figure II:1. Programme expérimental globale du travail

L'objectif est d'établir le cadre méthodologique nécessaire au déroulement de l'étude expérimentale. La description de la nature et de l'origine des constituants, suivie de la caractérisation des matériaux ainsi que d'une présentation précise du programme expérimental, permettront d'assurer la fiabilité et la reproductibilité des résultats qui seront présentés dans le chapitre suivant.

Le béton, comme on le sait, est constitué des granulats, d'un liant et de l'eau. Dans cette étude, le liant sera l'argile ou le ciment en proportion complémentaire.

II.2 Nature et origine des constituants

Les constituants utilisés dans la confection du béton de terre sont de diverses natures et origines. Le béton de terre est un béton certes différent des bétons ordinaires, mais ces constituants restent les mêmes, il est constitué par le ciment, les granulats, l'argile et l'eau.

II.2.1 Le Ciment

Pour ce travail on a utilisé le ciment CIMARWA produit au RWANDA à cause de sa disponibilité dans le milieu ayant déjà fait l'objet de plusieurs études dont : la classe vraie, la prise et la résistance à 28 jours et qui présente des performances mécaniques et des caractéristiques physico- chimiques à la norme NA442 et EN197-1.

II.2.2 Les granulats

Les granulats utilisés dans cette étude sont des concassés, le sable est roulé provenant du RWANDA, les graviers sont issus du concassage de la roche volcanique de Goma, ils sont produits par l'entreprise CARRIGO Sarl.

II.2.3 L'eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est une eau potable fournie par la REGIDESO et recueillie au robinet.

II.2.4 Sol argileux

Le sol argileux utilisé dans cette étude a été tiré d'un site de construction après les travaux de terrassement à KATANA dans le Sud-Kivu. Il a été extrait du site par excavation sous une profondeur de 1m, après décapage de la couche superficielle qui contenait un sol organique sous laquelle on a trouvé un bon sol avec une capacité portante plus ou moins acceptable.

II.3 Caractérisation des granulats

Cette partie se rapporte aux principaux essais réalisés au laboratoire de génie civil de la FSTA à l'ULPGL Goma pour connaître les propriétés de la terre et des gravats qui vont servir à faire le béton de terre. Pour la terre, les essais suivants ont été réalisés : la teneur en eau, la granulométrie par sédimentation, l'essai Proctor normalisé, les limites d'Atterberg et la densité et l'absorption. Pour les gravats, les essais de granulométrie, de la masse volumique absolue et apparente, de la densité et de l'absorption ont été effectués.

II.3.1 Essais de caractérisation du sol argileux

II.3.1.1 Teneur en eau

Cet essai détermine le pourcentage pondéral d'eau se trouvant dans les matériaux à l'état naturel, elle est calculée avec la norme NF P 94-05 [26]. Voici les matériels utilisés : la balance, le récipient, l'étuve. Il consiste à : Peser le récipient, Peser l'échantillon humide plus la tare, Sécher l'échantillon dans l'étuve pendant 24h, Peser l'échantillon sec et calculer la teneur en eau, calculer à l'aide de la formule (2.1).

$$W = \frac{M_w}{M_s} \times 100 \quad (2.1)$$

M_w = masse de la tare et du sol humide (g) ;

M_s = masse de la tare du sol sec (g) ;

W = Teneur en eau.

II.3.1.2 Analyse granulométrique par sédimentation

Il permet de déterminer approximativement la répartition des particules passant le tamis de 80 μ m. Les échantillons des essais par sédimentation sont préparés par quartage sur du passant de 2 mm et le test se fait selon la procédure définie par les normes [NQ 2501-025 ; LC 21-040][1]. Les mesures effectuées selon le mode opératoire se déroulent sur 24 h. Les particules les plus lourdes sont les premières à se déposer au fond du cylindre de sédimentation tandis que les plus légères progressent lentement vers le fond. Les matériels utilisés pour l'analyse granulométrique sédimentation : Une balance de portée 5kg, précision 1kg, une tamiseuse, une main écope pour le remplissage, 3 l'éprouvettes en plastique conforme à la norme ASTM D422.

II.3.1.3 Détermination des Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont les limites qui séparent divers états de consistance du sol en teneur en eau. Elles permettent de déterminer l'argilosité d'un sol d'où l'identifier et le caractériser.

a) Limite de liquidité (WL)

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

Le but de cet essai est de déterminer la teneur en eau d'un échantillon à son passage de l'état liquide à l'état plastique. L'essai consiste à déterminer le nombre de coups à la coupelle de Casa grande permettant de refermer d'environ 10mm les deux lèvres de la rainure et de déterminer la teneur en eau correspondant au nombre de coups. On répète l'opération cinq fois et on trace la droite de la limite de liquidité appelée courbe d'écoulement représentant la teneur en eau en fonction du nombre des coups. La limite de liquidité est ainsi obtenue à partir de cette droite et correspond à la teneur en eau avec 25 coups à la coupelle de [13].

La limite de liquidité a été déterminée à l'aide de l'appareil de casa grande suivant la norme NF P 94-051[13].

On utilise : Un plateau pouvant contenir tout le matériau après lavage, Un tamis de 0.4mm pour lavage, une pipette d'eau, un appareil de cas grande avec tous ses accessoires, un bac pour le malaxage, une étuve pour la détermination de la teneur en eau, une balance et des tares.

Mode opératoire consiste à placer la pâte homogène délicatement sur le plateau de la coupelle, à l'aide de l'outil à rainurer (un des accessoires de l'appareil de casa grande), on crée d'un seul mouvement une rainure axiale séparant complètement la pâte en deux ; On effectue une série de chocs réguliers d'environ deux coups par seconde à l'aide de la manivelle de la coupelle jusqu'à ce que les lèvres de la rainure se rejoignent sur à peu près 10mm, on note alors le nombre de coups et on prélève une quantité au niveau où l'échantillon s'est renfermé et une autre quantité à sa gauche et à sa droite et ensuite on les met dans la tare pour déterminer la teneur en eau à l'étuve après avoir pesé la masse humide. L'opération est répétée environ 5 fois et cela suivants des teneurs en eau croissantes ou décroissantes. Les résultats sont rapportés sur une droite qui traduit la relation entre les nombres de coups et les teneurs en eau correspondantes. La teneur en eau correspondant à 25 coups est la limite de liquidité W_L .

b) Limite de plasticité (W_p)

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

L'essai consiste à déterminer la teneur en eau d'un sol de son passage de l'état liquide à l'état solide. Le principe de l'essai consiste à rouler à la main et contre une plaque, pour

former un cylindre avec un échantillon de sol jusqu'à observer l'apparition des fissures et procéder à la détermination de la teneur en eau dès l'apparition de ces fissures [13].

La limite de plasticité a été déterminée suivant la norme NF P 94-051. Le matériau est roulé sous forme d'un petit rouleau plein d'environ 3 à 4mm.

On utilise : Un tamis de 0.4mm, une plaque métallique, une pipette et une étuve.

Mode opératoire consiste à confectionner un cylindre de terre enroulé à la main et contre une plaque d'un échantillon de sol jusqu'à ce qu'il présente les dimensions suivantes : un diamètre de 3 ± 0.5 mm et une longueur d'environ 12 ± 2.5 mm ; On s'arrête dès l'apparition des fissures sur le cylindre, on découpe ensuite ce cylindre en 3 ou 4 parties que l'on partage dans deux tares ; Répéter l'opération 5 ou 6 fois et tout en déterminant la masse humide des cylindres dans les tares, les tares sont ensuite mises à l'étuve pour la détermination de la teneur en eau.

c) Indice de plasticité

L'indice de plasticité permet d'établir la plasticité d'un sol donné c'est-à-dire de déterminer une zone dans laquelle on considérera que le sol est à l'état plastique. Plus l'indice de plasticité est élevé, plus grande est la zone dans laquelle le sol est à l'état plastique, et plus ce sol contient de l'argile. Il a été déterminé suivant la norme NF P 94-057 par la **formule (2.2)**.

$$I_p = W_L - W_p \quad (2.2)$$

Avec ; W_L : la limite de liquidité

W_p : la limite de plasticité

d) Indice de liquidité

L'indice de liquidité correspond à l'écart entre la teneur en eau naturel et la limite de plasticité sur l'indice de plasticité. Il permet de savoir rapidement si un sol est à l'état liquide, plastique, semi solide ou solide. Plus Il est élevé, plus l'argile est proche de l'état liquide et plus elle est dangereuse. Il a été déterminé par la relation 2.3 [13].

$$I_l = \frac{W - W_p}{I_p} \quad (2.3)$$

Avec ; **W** : la teneur en eau naturelle du sol

W_p : la limite de plasticité

I_p : l'indice de plasticité

e) **Indice de consistance**

L'indice de consistance correspond à l'écart entre la limite de liquidité et la teneur en eau naturel sur l'indice de plasticité. Il a été déterminé par la relation (2.4).

$$I_c = \frac{W_L - W}{I_p} \quad (2.4)$$

Avec ; **W_L** : la limite de liquidité

W : la teneur en eau naturel

I_p : l'indice de plasticité

II.3.2 Essais sur le sable

II.3.2.1 Equivalent de sable

Cet essai est déterminé par la norme **NFP 18-598** et permet de mettre en évidence la proportion relative des particules fines nuisibles d'éléments argileux dans les sols ou agrégats fins. Il sert à donner le degré de propreté pour le sable qui consiste à séparer le sable des particules fines qui remontent par floculation à la partie supérieure de l'éprouvette où l'on a effectué le lavage. Lors que l'équivalent de sable est élevé ; les matériaux possèdent moins des particules fines [25]. Voici les matériels utilisés : l'éprouvette en plastique avec 2 traits repères et bouchon, l'entonnoir, une bombonne de 5l, le bouchon pour cette bombonne avec siphon et tube souple de 1,5m environ, le tube laveur, le tube souple métallique, l'agitateur électrique, la réglette de mesure, le piston taré, le tamis de 5mm, la balance et chronomètre.

Le mode opératoire consiste à peser deux masses m_1 et m_2 de 120g chacun, remplir les 2 éprouvettes jusqu'au premier trait, La quantité de sable est versée dans chaque éprouvette, éliminer les bulles d'air à la main et reposer pendant 10 minutes, Les

éprouvettes étant bouchées, agiter horizontalement pendant 30 secondes, laver, rincer et remplir les éprouvettes jusqu'au deuxième trait ; laisser reposer pendant 20 min ; Prélever les mesures suivant la règle de la hauteur h_1 (pour le sable propre) et h_2 (pour le sable propre + flocculant), Ensuite, on effectue la lecture à piston, à l'aide du piston introduit dans le tube jusqu'à niveler la surface du sable propre pour besoin de précision, L'équivalent de sable est donné par la formule (2.5)

$$ES = \frac{H_1}{H_2} \times 100 \quad (2.5)$$

Les résultats des degrés de propretés des sables, exprimés en pourcentage ; sont interprétés comme suit, $ES \geq 80$: Bon sable ; $70 < ES < 80$: utilisé à condition d'employer le ciment Portland. $ES < 70$: A laver pour éliminer les éléments fins [20].

II.3.2.2 Analyse granulométrique (AG)

L'AG, sert à caractériser les granulats en déterminant la grosseur des grains qui les constituent et les pourcentages des grains de chaque grosseur. Le matériau étudié est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration des tamis. L'AG, Par voie sèche des granulats est déterminée selon la norme **NF P 18-320**. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égale à 0.1mm. On utilise : la balance, l'étuve réglable à 105°C et la tamiseuse électrique [5]. Le mode opératoire consiste à sécher l'échantillon pendant 24h dans l'étuve ; peser 2000g de matériaux, emboîter des tamis 0,1 ; 0,16 ; 0,125 ; 0,315 ; 0,5 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 4 ; 5 ; 6,3. verser le matériau sur le tamis supérieur de la tamiseuse, le tamisage se fait pendant une durée de 20 minutes, et peser les refus partiels sur chaque tamis. Les résultats obtenus sont exprimés sous forme des courbes dont les abscisses sont les modules ou les dimensions des mailles des tamis et les ordonnées sont soit les pourcentages cumulés des passants (tamisât) soit ceux des refus partiels des différents tamis.

a) Le coefficient d'uniformité (Cu)

Il est encore appelé coefficient de Hazen, trouver entre le D_{60} et D_{10} , il permet d'exprimer l'étalement de la courbe granulométrique, déterminé selon la norme **NFP 18-540**. Et se donne par la formule (2.6)

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2.6)$$

Voici la classification des matériaux suivant le coefficient de courbure :

Si C_u est inférieur à 2, la granulométrie est dite serrée. Et si C_u est supérieur à 2, la granulométrie est dite étalée.

b) Le coefficient de courbure (C_z)

Il classifie les granulats suivant la granulométrie et permet de décrire la forme de la courbe granulométrique entre les diamètres D_{10} et D_{60} . Selon la norme **NFP 18-540**. Il est déterminé par la formule (2.7)

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (2.7)$$

On peut noter quelques dimensions importantes des particules : Le diamètre effectif D_{10} c'est celui correspondant à l'ordonnée 10% ; Le diamètre effectif D_{60} c'est celui correspondant à l'ordonnée 60% ; Le diamètre effectif D_{30} c'est celui correspondant à l'ordonnée 30%.

Lorsque la valeur du coefficient de courbure se situe entre 1 et 3 et que le coefficient d'uniformité est supérieur à 4 pour le gravier et à 6 pour le sable, la courbe granulométrique descend d'une façon assez régulière, indiquant ainsi la présence d'une grande variété de diamètres ici on dit que la granulométrie est bien graduée.

Lorsque la valeur du coefficient de courbure dépasse 3, la courbe granulométrique commence à prendre la forme d'un creux orienté vers le bas ; plus la valeur augmente, plus le creux s'accroît. Si cette valeur est inférieure à 1, le creux de la courbure s'oriente plutôt vers le haut. Un coefficient de courbure trop grand ou trop petit indique l'absence de certains diamètres entre les diamètres effectifs D_{10} et D_{60} : la granulométrie est alors mal graduée. On parle de granulométrie uniforme si les grains sont à peu près tous de même taille et de granulométrie étalée si toutes les tailles des grains sont représentées [25].

c) Masse volumique absolue

Pour un échantillon, la masse volumique absolue est la masse par unité de volume prenant en compte les vides entre les particules. Déterminée suivant la norme **NFP 18-555** à l'aide de la méthode de l'éprouvette graduée. Les matériels à utiliser : l'éprouvette graduée, la

balance et l'eau. Le mode opératoire consiste à remplir l'éprouvette d'un volume d'eau ; peser une masse ($M = 300\text{g}$) de sable, introduire la masse dans le volume V_1 , éliminer des bulles d'air et faire la nouvelle lecture du nouveau volume V_2 , déterminer le volume absolu ($V = V_2 - V_1$). Cette masse est déterminée par la formule (2.8).

$$f_{abs} = \frac{M_1}{v_2 - v_1} \quad (2.8)$$

d) Masse Volumique apparente

La masse volumique apparente c'est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains le constituant. L'essai de la masse volumique apparente s'est effectué selon la norme **NF P 18-555**. Il consiste au remplissage d'un récipient vide de volume (V) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique selon la formule (2.9) :

$$f_{app} = \frac{M}{v} \quad (2.9)$$

e) Module de finesse

A partir de l'analyse granulométrique on détermine également le module de finesse. Les sables doivent présenter une granulométrie telle que les éléments fins soient, ni en trop faible proportion. S'il y a trop de grains fins, il sera nécessaire d'augmenter le dosage en eau du béton tandis que si le sable est trop gros, la plasticité du mélange sera insuffisante et rendra la mise en place difficile. Le caractère plus ou moins fin d'un sable peut être quantifié par le calcul du module de finesse (MO). Celui-ci correspond à la somme de pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour le tamis de modules 0,063 ; 0,16 ; 0,315 ; 0,63 ; 1,25 ; 2,5 ; 3,15 ; 5.

Il est déterminé par la norme **NFP18-101**. Notons que le module de finesse aide à caractériser le sable. Un bon sable pour béton doit avoir un module de finesse d'environ **2,2 à 2,8** ; au-dessous, le sable a une majorité d'éléments fins et très fins ; au-dessus, le sable manque de fines [5].

$$M_f = \frac{1}{100} \Sigma \% \text{ Refus cumulés} \quad (2.10)$$

II.3.3 Essais d'identification des concassés

Les concassés de dimension 15/25 utilisés dans la présente étude proviennent du concassage de basalte que nous avons acheté chez CARRIGO.

II.3.3.1 Teneur en eau

Cet essai détermine la quantité d'eau se trouvant dans les matériaux à l'état naturel. On a besoin de l'étuve, la tare et la balance. Pour le mode opératoire : On pèse une masse des concassés m_1 ; On sèche cette quantité dans l'étuve ; On obtention d'une nouvelle masse m_2 . La teneur en eau sera obtenue par la formule (2.11) [5] :

$$w = \frac{p_{eau}}{P_{éch}} \quad (2.11)$$

II.3.3.2 Analyse granulométrique

L'AG caractérise les granulats en déterminant la grosseur des grains qui les constituent et les pourcentages des grains de chaque grosseur. Elle a été déterminée en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas. L'AG par voie sèche est déterminée selon la norme **NF P 18-320** [5].

On a besoin de : la tamiseuse, l'étuve et la balance. Le mode opératoire consiste à sécher l'échantillon pendant 24h dans l'étuve, peser 2000g de matériaux, emboîter des tamis 10 ; 12,5 ; 16 ; 20 ; 25 ; 31,5 ; verser le matériau sur le tamis supérieur de la tamiseuse, le tamisage se fait pendant une durée de 20 minutes, peser les refus partiels sur chaque tamis à l'aide de la balance électrique et tracer la courbe granulométrique correspondante.

II.3.3.3 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue d'un échantillon est sa masse par unité de volume prenant en compte les vides entre les particules. Elle a été déterminée suivant la norme **NF P 18-554** à l'aide de la méthode de l'éprouvette graduée. On utilise l'éprouvette graduée, l'eau et la balance.

Le mode opératoire consiste à remplir l'éprouvette d'un volume d'eau : V_1 ; peser une masse M 500g et l'introduire dans l'éprouvette puis bien éliminer les bulles d'air, lire le nouveau volume : V_2 ; Le volume absolu : $V = V_2 - V_1$; La masse volumique sera obtenue par la formule (2.12).

$$f_{abs} = \frac{M_1}{v_2 - v_1} \quad (2.12)$$

II.3.3.4 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente c'est la masse d'un corps par unité de volume total y compris les vides entre les grains le constituant.

L'essai de la masse volumique apparente s'est effectué selon la norme **NF P 18-554**. Il consiste au remplissage d'un récipient vide de volume (V) du matériau sec non tassé qui a été pesé pour en déduire la masse volumique selon la formule (2.13) :

$$f_{app} = \frac{M}{v} \quad (2.13)$$

II.4 Caractérisation du béton

Pour mieux caractériser le béton, il a été nécessaire d'étudier ses propriétés sous ses deux états dont à l'état frais et à l'état durci. Cette caractérisation s'est réalisée par différents essais normalisés sur les bétons d'étude, en premier lieu les essais sur le béton frais ensuite sur le béton durci.

II.4.1 Mesure de la maniabilité

Il s'agit de constater l'affaissement d'un cône de béton sous l'effet de son poids propre. Plus cet affaissement sera grand et plus le béton sera réputé fluide.

L'appareil qui nous permet de faire cet essai se compose de 4 éléments : Un moule tronconique sans fond de 30cm de haut, de 20cm de diamètre en sa partie inférieure et de 10cm de diamètre en sa partie supérieure ; Une plaque d'appui ; Une tige de piquage ; Un portique de mesure.

Pour mesurer l'affaissement on introduit le béton frais dès la fin de sa confection en trois couches recevant chacune 25 coups de piquage. Araser le moule, démouler immédiatement en soulevant le moule. Après mesurer l'affaissement à partir du point le plus bas du béton.

L'affaissement est mesuré par la différence de hauteur entre le moule et le niveau supérieur du béton après démoulage, le résultat obtenu permet de classer les bétons.

II.4.2 Essai sur le béton durci

Etant donné que le béton durci avec le temps tout en acquérant une certaine résistance d'où il est important d'étudier cette caractéristique par l'essai de compression.

II.4.2.1 Résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression simple des bétons s'est faite sur des éprouvettes cylindriques, l'essai a été réalisé conformément à la norme BS 1881R partie 116. la presse est électrique à doubles manomètres et grands plateaux, ayant une capacité 5000kgf [26].

II.5 Formulation du béton

Formuler ou étudier la composition d'un béton consiste à définir le mélange optimal des différents granulats dont on dispose ainsi que le dosage en ciment et eau afin de réaliser un béton dont les qualités soient celles recherchées pour la construction de l'ouvrage ou d'une partie de l'ouvrage. Dans cette section nous présentons la méthode de formulation utilisées dans cette étude, qui est la méthode de Dreux-Gorisse.

II.5.1 Méthode de dreux-gorisse

La méthode de Dreux-Gorisse est une méthode pratique de composition de béton qui a pour seul but de permettre de prévoir les dosages de chacun des constituants du béton pour obtenir un béton conforme ou de bonne qualité. Elle approche de façon significative les paramètres influant sur la résistance, l'ouvrabilité et le volume. Mais cela reste une approche, une approximation de la réalité que seules quelques gâchées d'essai et la confection d'éprouvettes permettront d'ajuster au mieux. La composition à adopter se fera définitivement en fonction des qualités souhaitées et des matériaux utilisés [26].

II.5.1.1 La résistance souhaitée

En général on demandera une résistance f_{c28} en compression à 28 jours et compte tenu des dispersions et de l'écart quadratique s'il faudra viser une résistance moyenne à 28 jours f_c supérieure à f_{c28} ; si l'on admet un coefficient de variation moyen de l'ordre de 15 %, on pourra adopter la règle approximative pour la résistance moyenne à viser [26].

La relation (2.15) permet de déterminer la résistance f_c en compression.

$$f_c = f_{c28} \times 1.15 \quad (2.15)$$

II.5.1.2 Détermination du dosage en ciment

En fonction de la résistance moyenne désirée f_c , on commencera par évaluer approximativement le rapport C/E. Ce rapport est déterminé grâce à la relation (2.16).

$$f_c = G \times F_{CE} \times \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right) \quad (2.16)$$

Avec :

- f_c résistance moyenne en compression désirée (à 28 jours) en MPa,
- FCE classe vraie du ciment (à 28 jours) en MPa,
- C dosage en ciment (en Kg/m³),
- E dosage en eau totale sur matériaux secs (en litre pour 1 m³),
- G coefficient granulaire

Le tableau II.1 présente les différentes valeurs approximatives du coefficient granulaire G.

Tableau II-1 : Valeurs approximatives du coefficient granulaire [26].

Qualité des granulats	Dimension $D_{\max}$ des granulats		
	Fins $D_{\max} < 16$ mm	Moyens $20 < D_{\max} < 31,5$	Gros $D_{\max} > 50$ mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

Le dosage en ciment est ainsi dépendant du rapport C/E mais aussi du dosage en eau E nécessaire pour une ouvrabilité satisfaisante. L'abaque de la Figure II :1 et le Tableau 2-2 permet d'évaluer approximativement C en fonction de C/E et de l'ouvrabilité désirée qui doit être considérée comme une donnée du problème.

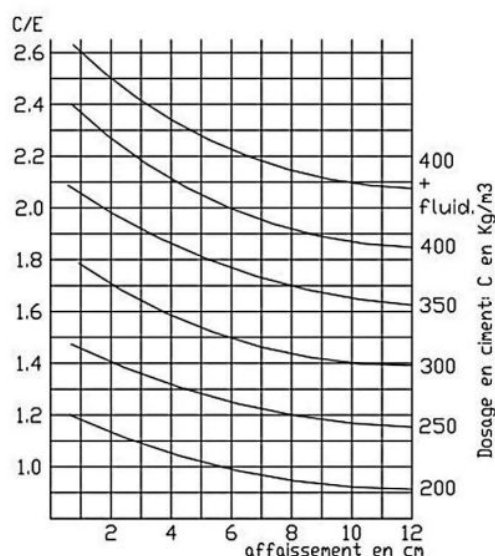


Figure II-2. *Abaque permettant d'évaluer approximativement le dosage en ciment en fonction du rapport C/E et de l'ouvrabilité désirée.*

Tableau II-2 : *Correction en % sur le dosage en eau en fonction D des granulats [25].*

Dimension des granulats D en mm	5	8 à 10	12,5 à 16	20 à 25	30 à 40	50 à 63,5	80 à 100
Correction sur le Dosage en eau (en %)	+15	+9	+4	0	-4	-8	-12

La quantité d'eau totale (sur matériaux supposés secs) étant ainsi approximativement déterminée, on obtiendra la quantité d'eau à ajouter sur les granulats humides en déduisant l'eau d'apport (contenue dans les granulats), à l'aide des indications approximatives du Tableau II.3 (à défaut de mesures plus précises de la teneur en eau des granulats) [25].

II.5.1.3 Tracé de la courbe granulaire de référence

Sur un graphique d'analyse granulométrique type AFNOR (linéaire en module et logarithmique en dimension des granulats), le tracé de la courbe granulométrique de référence consiste à tracer la courbe OAB où le point O correspond à l'origine ; le point B (à l'ordonnée 100%) correspond à la dimension D du plus gros granulat et le point de

brisure A à des coordonnées définies en abscisse (X_A) à partir de la dimension D, et en ordonnée par Y_A (en %). Pour un $D \leq 20$ mm X_A est D/2 et pour un $D > 20$ mm X_A est situé au milieu du segment gravier limité par le module 38 (5 mm) et le module correspondant à D. Y_A est déterminé par la relation 2.17 [26].

$$Y_A = 50 + k + k_s \quad (2.17)$$

Avec :

- K le terme correcteur qui dépend du dosage en ciment, de la puissance de la vibration, de la forme des granulats roulés ou concassés (c'est surtout le sable dont l'influence est ici prépondérante) ;
- K_s correction supplémentaire dépendant du module de finesse du sable obtenu par la relation (2.18) :

$$k_3 = 6M_f - 15 \quad (2.18)$$

Le tableau 2.4 reprend les différentes valeurs de K en fonction du dosage en ciment, de la puissance de vibration et de la forme des granulats (roulés ou concassé).

Tableau II-3 : Valeurs du terme correcteur K [25].

Vibration		Faible		Normal		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment Kg/m ³)	400+fluidifiants	-2	0	-4	-2	-6	-4
	400	0	+2	-2	0	-4	-2
	350	+2	+4	0	+2	-2	0
	300	+4	+6	+2	+4	0	+2
	250	+6	+8	+4	+6	+2	+4
	200	+8	+10	+6	+8	+4	+6

a) Coefficient de compacité

Le coefficient de compacité γ c'est le rapport à un mètre cube du volume absolu des matières solides (ciment et granulats) réellement contenues dans un mètre cube de béton frais en œuvre [26]. Le Tableau II-4 reprend les différentes valeurs du coefficient de compacité fonction de la plasticité, du diamètre maximal et du type de vibration.

Tableau II-4 : Valeurs du coefficient de compacité [26].

Consistance	Serrage/ Vibration	Coefficient de compacité γ						
		D=5	D=10	D=12,5	D=20	D=31,5	D=50	D=80
Molle	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme	Faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,845	0,845
	Normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,850	0,850
	Puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,855	0,855

b) Dosage en granulats

La courbe granulaire de référence OAB est tracée sur le même graphique que les courbes granulométriques des granulats composants. Les lignes de partage sont alors tracées entre chacun des granulats, en joignant le point à 95 % de la courbe granulaire du premier, au point de 5 % de la courbe du granulat suivant et ainsi de suite. Le pourcentage en volume absolu de chacun des granulats sera lu sur la courbe de référence, au point de croisement avec la ou les droites de partage.

➤ Dosage volumique

Si C , est le dosage en ciment et ρ_c la masse spécifique du ciment, le volume absolu des grains de ciment est obtenu par la relation (2.19).

$$v_c = \frac{C}{\rho_c} \quad (2.19)$$

Si γ est le coefficient de compacité choisit dans le Tableau 2.5 en fonction de D , de la consistance et de l'efficacité du serrage ; le volume absolu de l'ensemble des granulats est déterminé par la relation (2.20).

$$v = \gamma - v_c \quad (2.20)$$

Les volumes absolus de chacun des granulats sont par la suite obtenus par la relation (2.21).

$$\begin{cases} V_s = \%S \times V \\ V_g = \%G \times V \end{cases} \quad (2.21)$$

Avec V_s et V_g , respectivement les volumes absolus du sable et des gravillons ; $\%S$ et $\%G$, les pourcentages du sable et des gravillons obtenus sur les compositions optimales des bétons et V , le volume absolu des granulats.

➤ Dosage massique

Connaissant les masses spécifiques ρ_s et ρ_g , respectivement masse spécifique du sable et du gravier, on déduit les masses m_s et m_g , respectivement masse du sable et du gravier, de la relation (2.22).

$$\begin{cases} m_s = v_s \times \rho_s \\ m_G = v_G \times \rho_G \end{cases} \quad (2.22)$$

II.5.2 Méthode de substitution

L'objectif de cette formulation est d'observer l'effet de la stabilisation à l'argile sur la résistance à la compression. Les teneurs des constituants de la formulation sont reprises pour la gâchée de béton en remplaçant le ciment par l'argile. C'est la méthode dite de substitution. Aucun calcul n'est requis [1].

II.6 Programme expérimental

Cette partie, présente le programme expérimental qui montre la procédure utilisée afin d'évaluer l'influence de la stabilisation sur les propriétés mécaniques du béton de terre.

Pour la composition des bétons expérimentés, à base de Ciment Cimerwa (CEM IV/B 42,5 N), nous utilisons un sable naturel de Rwanda avec une taille maximale de 5 mm, les graviers 5/15 mm, le sol argileux de Katana dans le Sud-Kivu. Ces granulats ont fait l'objet d'analyses granulométriques conformément à la norme NF EN 933-1 par voie sèche pour les gros granulats avec une taille granulaire supérieure 2mm et par sédimentation à texture pour granulats fin avec une taille granulaire inférieure 2mm, pour la confection des bétons par la méthode graphique de Dreux- Gorisse.

Selon la méthode de Dreux-Gorisse 4 bétons ont été confectionnés et testés, ils comprennent respectivement :

1. **Béton ordinaire BO-D** : Composé de sable roulé 0/5, de graviers 5/15 mm et du ciment qui est notre béton témoin.
2. **Béton de terre BT-D** : Composé de sable roulé 0/5, graviers 5/15 mm et de l'argile de Katana sans stabilisation ;
3. **Béton stabilisé à 10% Argile BS1-D** : Composé de sable roulé 0/5, graviers 5/15 mm et de l'argile de Katana stabilisé avec 10% de ciment ;
4. **Béton stabilisé à 20% Argile BS2-D** : Composé de sable roulé 0/5, graviers 5/15 mm et de l'argile de Katana stabilisé avec 20% de ciment ;

Au total 16 éprouvettes seront confectionnées en raison de 4 éprouvettes par béton. Nous évaluerons ensuite la résistance à la compression pour chaque type de béton à l'état durci.

Conclusion partielle

Dans ce chapitre il a été question de donner les différents essais à effectuer en laboratoire pour caractériser les matériaux qui vont entrer dans la confection du béton de terre et la méthode de formulation du béton de terre : les méthodes empiriques et le mode d'emploi ainsi que le domaine d'application de notre béton ont été observés. Ce pendant que ces dernières nécessitent plus d'essais et présentent des résultats moins fiables.

Chapitre III. PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Dans ce chapitre, les résultats obtenus grâce à la méthodologie décrite au chapitre précédent sont présentés de manière synthétique. Ces résultats portent sur les caractéristiques d'un béton de terre stabilisé avec du ciment formulé par la méthode de Dreux-Gorisse. Les différents essais, réalisés au laboratoire de l'ULPGL/Goma, incluent la détermination de la masse volumique, le degré de propreté (équivalent sable) et l'analyse granulométrique.

III.1 Présentation des résultats

Dans cette section nous présentons les résultats des essais sur les matériaux qui entre dans la confection de notre béton d'étude.

III.1.1 Caractéristiques des granulats

Cette partie contient les résultats des essais effectués sur les granulats, incluant les masses volumiques, la composition granulaire, le module de finesse, le coefficient de courbure et d'uniformité ainsi que le degré de propreté du sable.

III.1.1.1 Masses volumiques des granulats

Les valeurs des masses volumiques absolues et apparentes des granulats sont présentées dans le Tableau III-1.

Tableau III-1. Masses volumiques des matériaux

Désignation	Sable	Gravier
Masse volumique Absolue ρ_{abs} f_{abs} (g/m ³)	2,521	2,63
Masse volumique apparente f (g/m ³)	1,322	1,23

Les résultats présentés dans le Tableau 3-1 indiquent que nous avons des granulats courant car les masses volumiques sont comprises dans l'intervalle 2 à 3 g/m³.

III.1.1.2 La composition granulaire

Les résultats de la composition granulaire sont présentés sur la Figure III :1 par des graphiques des courbes granulométriques ; l'axe des abscisses reprend les différents modules des tamis (en mm) utilisés et celui des ordonnées les pourcentages cumulés des passants.

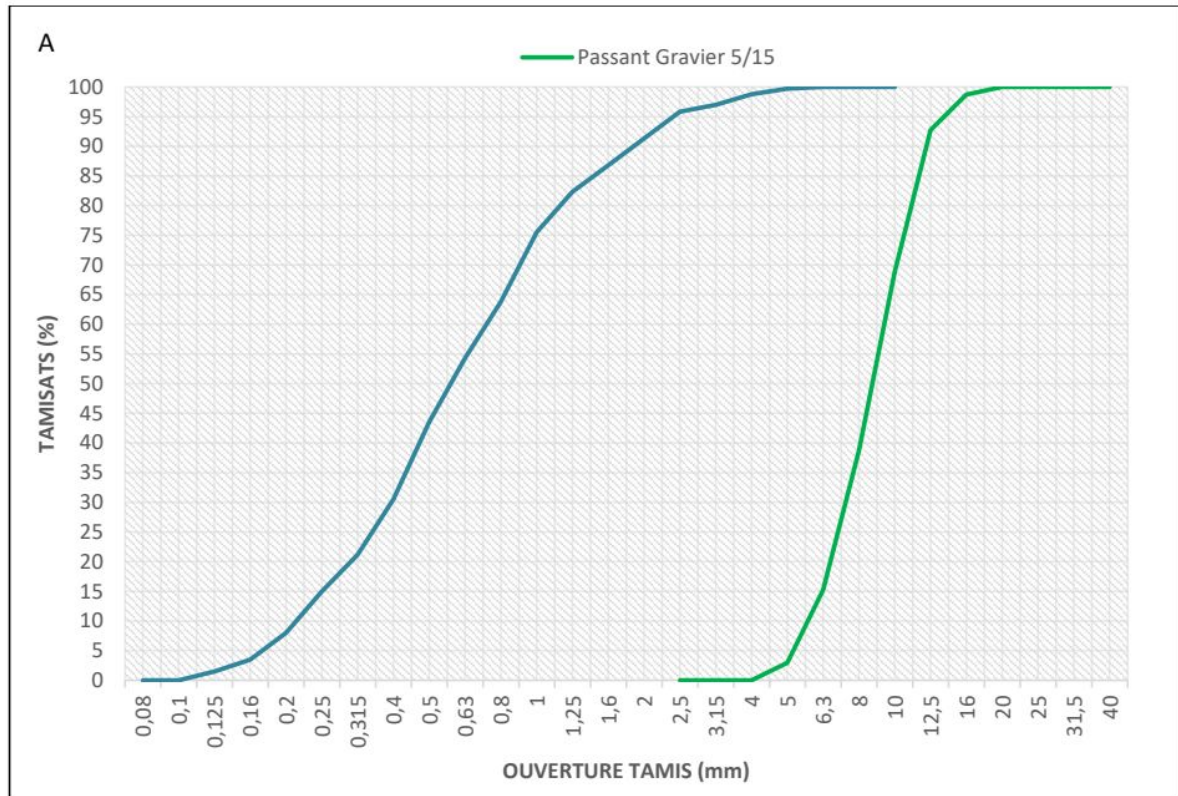


Figure III:1. Courbes granulométriques du béton

La courbe granulométrique présentée à la Figure III :1 décrit la distribution granulométrique continue du sable du Rwanda, montrant une proportion équilibrée d'éléments fins, moyens et gros, favorable à une bonne mise en œuvre du béton [25].

III.1.1.3 Module de finesse

Le module de finesse du sable étudié est de 2,43, une valeur optimale pour le béton puisqu'elle se situe dans l'intervalle recommandé de 2,2 à 2,8. Si le module de finesse avait été inférieur à cette plage, un dosage d'eau plus élevé aurait été nécessaire en raison de la proportion accrue de particules fines. À l'inverse, un module supérieur aurait réduit l'ouvrabilité du béton [25].

III.1.1.4 Le coefficient de courbure (c_z) et le coefficient d'uniformité (c_u)

Ces coefficients sont obtenus respectivement à travers les diamètres effectifs D_{10} , D_{30} et D_{60} . Ces diamètres correspondent à 0,216 ; 0,387 ; et 0,755.

- **Le coefficient de courbure (c_z)**

La relation 2.6 représente les résultats obtenus sur notre matériau.

$$C_z = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = 1.79$$

- **Le coefficient d'uniformité (c_u)**

La relation 2.7 représente les résultats obtenus sur notre matériau.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 3.49$$

Par ce résultat C_u étant égale à 3.49 une valeur supérieure à 2, nous constatons que nous avons une granulométrie étalée.

III.1.1.5 Degré de propreté du sable

Les résultats indiquent un équivalent de sable (ES) de 91,2 %, une valeur bien supérieure au seuil de 80 % généralement requis pour un bon sable pour le béton, ce qui confirme la propreté du sable Rwandais et son adéquation pour la fabrication de béton avec une teneur en eau de 3,30%.

III.1.2 Caractéristiques de l'argile

Cette partie contient les résultats des essais effectués sur l'argile, incluant la teneur en eau naturelle, l'analyse granulométrique, l'essai Proctor et les limites d'Atterberg.

III.1.2.1 Teneur en eau naturelle du sol

La teneur en eau naturelle a été déterminée suivant la norme NF 94-049. Le Tableau III-3 présente la teneur en eau des échantillons du sol.

Tableau III-2 : Teneur en eau naturelle du sol

Echantillons	
Tare 1	W=2,4%
Tare 2	W=1,9%
Tare 3	W=2,45%
Moyenne : 2,2%	
Ecart-type : 0,31 %	

L'écart type obtenu est d'environ 0,31%. Cela signifie que la teneur en eau des échantillons varie de manière relativement faible autour de la moyenne de 2,2%. Cette faible variation suggère une homogénéité dans la teneur en eau naturelle du sol pour les échantillons que nous avons testés.

III.1.2.2 Analyse granulométrique

Les échantillons des essais par sédimentation ont été préparés par quartage sur les passants de 2 mm et le test s'est fait selon la procédure définie par les normes NQ 2501-025 et LC 21-040, Les résultats sont exprimés en pourcentage. Le sol de Katana est constitué de 30% d'argile, 60% de sable et 10% de limon. La Figure III :2 présente l'interprétation des résultats.

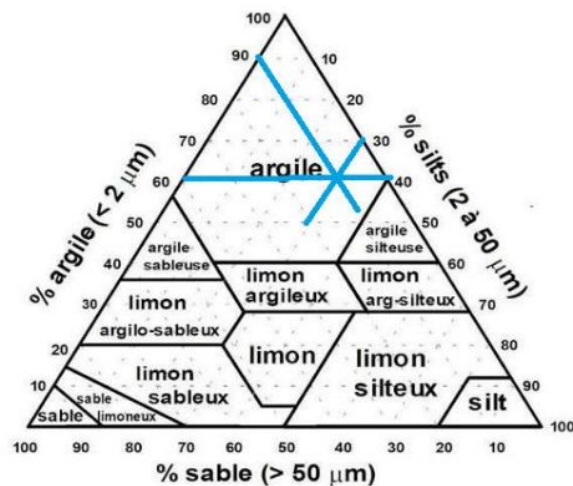


Figure III:2. Triangle d'interprétation des résultats de l'essai granulométrique par sédimentation

Nous constatons d'après la Figure III :2 que notre sol est un sol argileux.

III.1.2.3 Limites d'Atterberg

Selon la norme NF P 94-051, la détermination de la limite d'Atterberg a été effectuée sur des échantillons des passants à travers le tamis de 0,4mm. Les valeurs trouvées de la teneur en eau (W), limite de liquidité (WL), limite de Plasticité (WP), indice de plasticité (IP) et indice de consistance (IC) du sol de Katana sont présentées dans les Tableaux III-3.

Tableau III-3 : Valeurs de W, W_L, W_P, I_P, I_C du sol de Katana

W (%)	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)	IC
8	40	25	15	2,13

Les résultats au Tableau 3-3 nous aide à déterminer la nature du sol de Katana, avec un indice de plasticité de 15% situé dans l'intervalle 12% à 25% certifie que le sol de Katana est peu plastique.

III.2 Résultats de la formulation

Dans cette section, sont présentés les résultats obtenus par la méthode de Dreux-Gorisse, de la formulation des bétons de terre. Les données de base de la formulation, les différents dosages des constituants.

III.2.1 Données de base

Le Tableau III-4 résume les données de base utilisées dans notre étude.

Tableau III-4 : Données de base

Données de base	Béton
Resistance souhaitée	20MPa
Classe vraie du ciment	32.5MPa
Consistance désirée	7cm
Type de vibration	Normale
Dmax	15mm

III.2.2 Calcul des dosages en divers éléments

Cette section présente les résultats de calculs des dosages en éléments constitutifs du béton notamment le dosage en liant, le dosage en eau et enfin le dosage en granulats.

III.2.2.1 Dosage en ciment et en eau

Le dosage en liant et celui en eau pour un m³ de béton. Les valeurs obtenues sont présentées dans le Tableau III-5.

Tableau III-5 : Dosage en liant et en eau

Désignation	Valeurs
Dosage en ciment (kg/m³)	350
Dosage en eau (kg)	233,33

III.2.2.2 Dosage en granulats

Le dosage en granulats a été déterminé à l'aide des proportions du sable et graviers obtenues à partir de la courbe de référence OAB, comme représenté sur la Figure III :4.

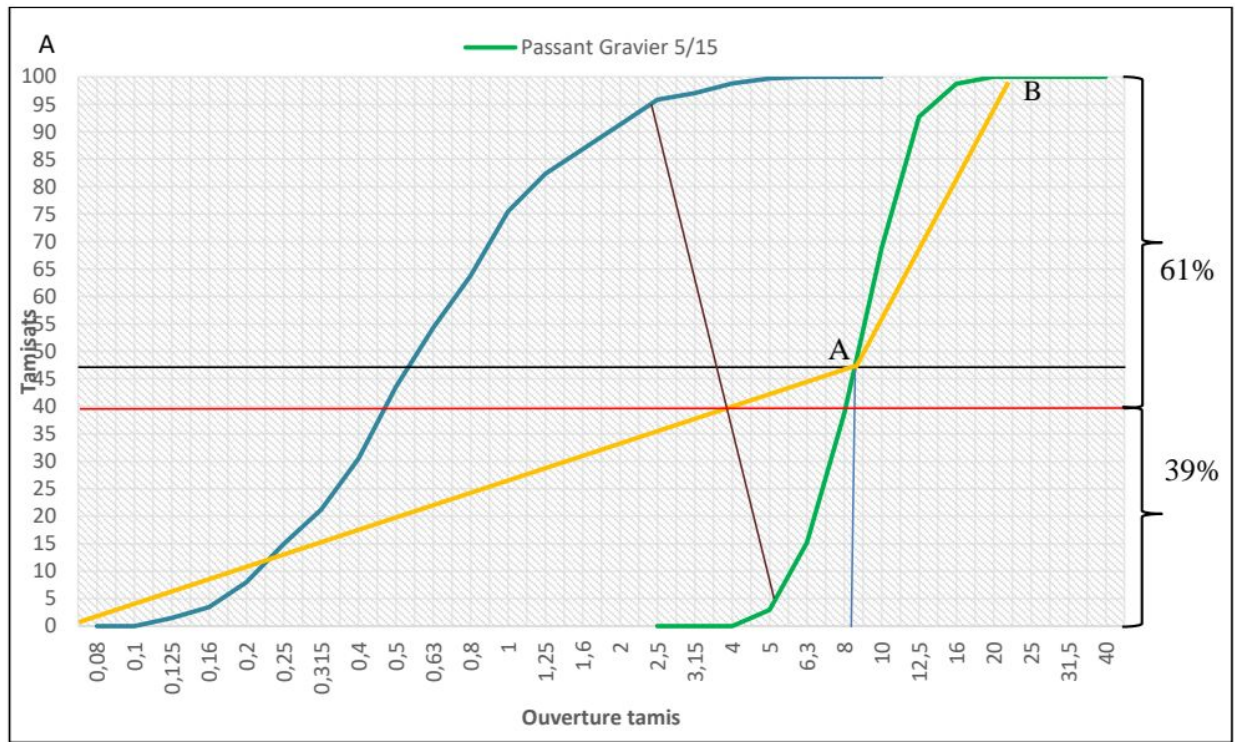


Figure III:3 : Répartition des granulats du béton

Il advient de la Figure III :3 que le sable entre dans la composition du béton à 39%, le gravier à 61%.

III.2.2.3 Présentation des résultats de la formulation

Les résultats de la formulation par la méthode de Dreux-Gorisse ont présenté les dosages en divers éléments pour chaque béton en étude, notamment les bétons Ordinaires et le béton de terre avec substitution partielle et totale du ciment. Dans cette section sont récapitulés ces différents dosages pour un m³ de béton.

Tableau III-6 : Dosages en divers constituants des bétons

	Béton	Constituant	Pour 1m ³ de béton (Kg/ m ³)
Béton ordinaire	BO-D	Ciment	350
		Sable	731,64
		Gravier	1074,88
		Eau	233,33
Béton à base de Terre	BT-D	Argile	350
		Sable	731,64
		Gravier	1074,88
		Eau	233,33
Béton stabilisé	BS1-D	Argile	315
		Ciment	35
		Sable	731,64
		Gravier	1074,88
		Eau	233,33
	BS2-D	Argile	280
		Ciment	70
		Sable	731,64
		Gravier	1074,88
		Eau	233,33

Comme expliqué dans le programme expérimental, pour le béton BO-D, nous avons un béton ordinaire avec 100% Ciment ; pour le béton BT-D nous avons une composition à

100% argile ; Pour les bétons BS1-D et BS2-D, nous avons une composition substituée éventuellement de 10% et de 20% de l'argile par le ciment.

III.3 Caractéristiques des bétons d'étude

Dans cette section sont présentées respectivement les caractéristiques des bétons confectionnés à l'état frais et à l'état durci.

III.3.1 Caractéristique des bétons à l'état frais

Le Figure III :4 présente les valeurs d'affaissement au cône d'Abrams obtenues pour les différents bétons confectionnés.

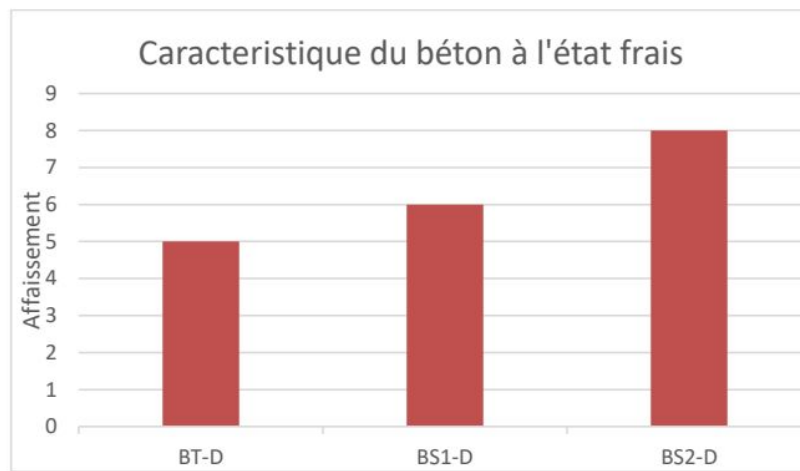


Figure III:4. Valeurs de l'affaissement obtenues pour les bétons étudiés

Il ressort de la Figure III :4 que les différents bétons formulés ont des affaissements compris entre 5 et 9 cm, sont des bétons plastiques susceptible d'être utilisé dans la construction des semelles coffrées, des murs de soutènement, des planchers, de dallage, des poutres et des poteaux. L'écart entre ces affaissements serait dû à la quantité des matériaux fin ajouté lors de la confection.

III.3.2 Caractéristiques des bétons à l'état durci

Dans cette section sont présentés les résultats des essais de la résistance à la compression, et de densité sur les éprouvettes cylindriques 16x32 confectionnées dans cette étude, après 28 jours de temps de cure.

III.3.2.1 Résistance à la compression

La Figure III :5 présente les résultats de l'essai de la résistance à la compression en Mpa des bétons étudiés formulés à partir de la méthode de Dreux-Gorisse.

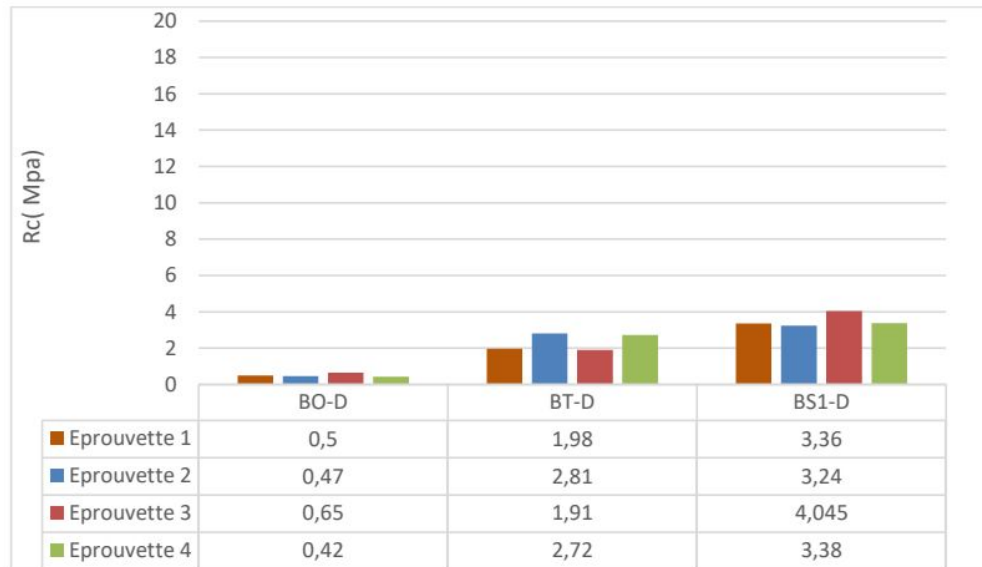


Figure III:5. Résistances en compression des bétons d'étude

Les résultats des essais à la compression pour la formulation par la méthode de Dreux-Gorisse sur la Figure III :5, donnent une résistance maximale de 4Mpa pour des éprouvettes écrasés à 28 jours de cure à la température moyenne de 20 °C. les éprouvettes ont été placés dans presque les mêmes conditions que les éprouvettes formulés par la méthode de substitution.

Tableau III-7: La moyenne et l'Ecart type de la résistance du béton de terre

Béton	Resistance (Mpa)	Moyenne	Ecart type
BT-D	0,54	2,29	1,6
BS1-D	1,91		
BS2-2	4,42		

L'écart type obtenu est d'environ 1,6%. Cela signifie que la résistance des échantillons varie relativement autour de la moyenne de 2,29%. Cette variation suggère une influence de la stabilisation dans le béton de terre.

III.3.3 Impact économique du béton de terre

Dans cette partie, nous évaluons les coûts de production pour chaque 1m³ de béton étudié

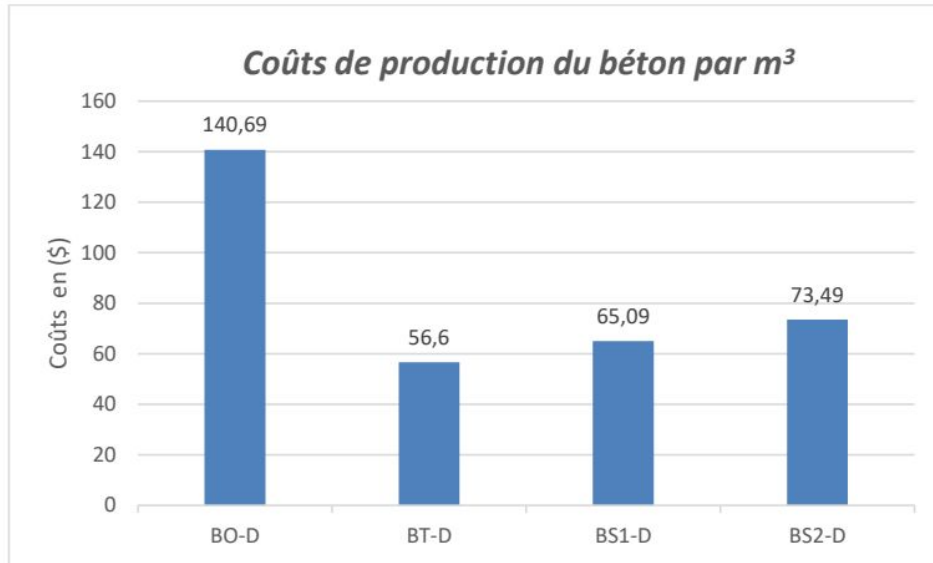


Figure III:6. Les coûts de production de chaque béton étudié

La terre étant un matériau abondant et facile à manipuler pour s'inscrire dans le cadre d'un matériau le plus économique. Nous remarquons à partir de la figure III :6 que les bétons étudiés présentent des coûts de production avec une réduction de 60% par rapport au béton ordinaire. Ceci implique l'impact direct du ciment sur le coût de production car en effet, c'est le ciment qui coûte cher dans le béton.

III.3.4 Impact environnemental du béton de terre

Dans cette partie, nous évaluons l'impact environnemental du béton de terre par rapport au béton ordinaire.

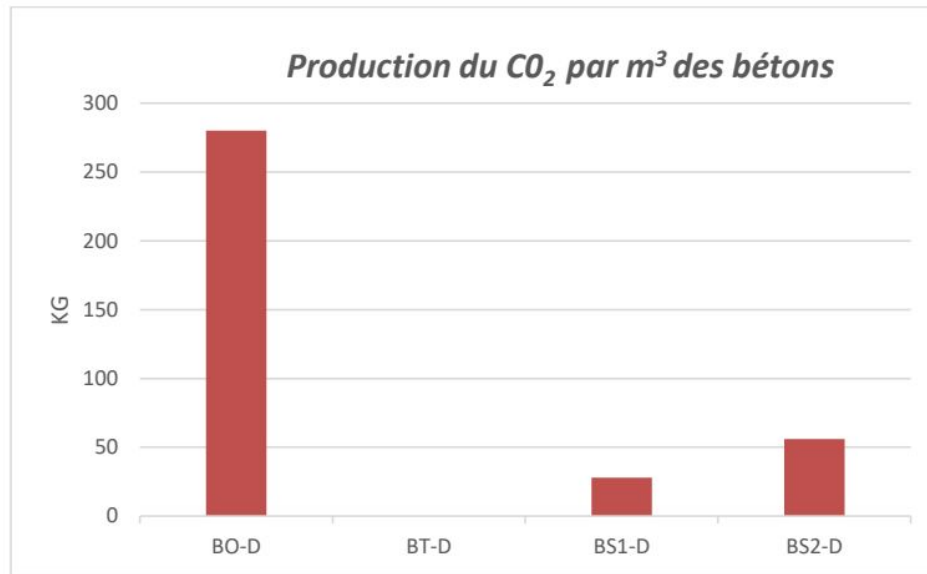


Figure III:7. Production du CO₂ par m³ des bétons

En moyenne, la production de CO₂ par 1 kg de ciment se situe entre 0,8 et 1,0 kg, un Gaz toxique qui est principalement émis lors de la combustion du combustible dans les fours pour chauffer le clinker (le principal composant du ciment) et la décomposition du calcaire (CaCO₃) pendant la fabrication du clinker [29].

Nous remarquons à partir de la Figure III :7 que le béton de terre présente une réduction considérable voir même totale de l'empreinte du CO₂ dans le monde, mais pour des raisons mécaniques nous avons besoin de stabiliser l'argile par le Ciment si on veut avoir un béton écologique avec presque les mêmes propriétés mécaniques que le béton ordinaire.

III.4 Discussion des résultats

Dans cette section, nous allons présenter l'interprétation des résultats obtenus. Étant donné la faiblesse de la littérature dans le domaine du béton de terre, les résultats obtenus seront interprétés ou discutés et arrimés à des études similaires existantes sur ouvrabilité, la résistance à la compression, l'impact économique et environnemental. S'il y a lieu, Les résultats de cette étude exploratoire pourront par ailleurs constituer une base de données qui servira aux études ultérieures.

III.4.1 L'ouvrabilité

Les affaissements obtenus varient entre 5cm à 7cm, ce qui correspond à l'objectif visé. Les valeurs d'affaissement allant de 0cm à 4cm déterminent des bétons fermes. Ils indiquent des bétons plastiques pour les valeurs comprises entre 5cm et 9cm comme indiqué dans la

première partie de notre travail. Ces résultats comme repris sur la Figure 3 :4 sont similaires à ceux recommandés par l'Association de Béton terre au Québec dans le manuel Construire en terre Crue.

III.4.2 Résistance mécanique

Les résultats à la compression à 28 jours obtenus dans le présent travail respectivement à 0%, 10% et 20% de stabilisation sont de 0,54 MPa, 1,91Mpa et 4,42MPa.

Ces résultats obtenus sont supérieurs à ceux obtenus par (SORO_Nahouo, Duc Chinh Ngo et la Société de construction en terre) [1] qui sont respectives de 3,42 MPa, 0,19 MPa, 0,44 MPa, 0,39 MPa à 28 jours, soit 30%, suite à une forte intrusion des matières organiques contenues dans le sol qu'avait utilisé Soro Nahouo, et pour Duc Chinh Ngo, il dénonce la méthode de formulation. Notre matériau peut être utilisé dans des applications structurelles à faible charge, telles que les cloisons intérieures, les murs de refends non porteurs ou les pavages écologiques.

Conclusion partielle

Ce chapitre portant sur la présentation des constituants et l'interprétation des résultats a pu montrer les différentes caractéristiques de constituants du béton de terre, ainsi que celles du béton terre à son état frais comme à l'état durci. Nous avons obtenu un résultat de 4Mpa, soit 20% de la résistance. Un résultat moindre par rapport au résultat escompté, les résultats qui avoisines ceux de la confection du béton de terre par la technique dite de substitution

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de fin d'études visait à explorer les possibilités d'utilisation d'un éco-matériau basé sur la terre pour la construction en milieu local, en recherchant une formulation permettant d'atteindre une résistance en compression suffisante pour certaines applications structurales à faible charge. Dans cette optique, l'objectif principal était d'optimiser la composition d'un béton de terre stabilisé par le ciment, suivant la méthode de Dreux-Gorisse.

Pour atteindre cet objectif, nous avons procédé en quatre étapes. D'abord, un béton témoin (100 % ciment) a été formulé selon la méthode de Dreux-Gorisse. Ensuite, trois formulations de béton de terre ont été testées : un béton de terre sans ciment, un béton de terre stabilisé à 10 % de ciment, et un autre stabilisé à 20 % de ciment. Des essais de résistance en compression ont été réalisés sur des éprouvettes cylindriques de 16 x 32 cm, testées après 28 jours de cure.

Les résultats ont montré que la résistance en compression des mélanges stabilisés avec 10 % et 20 % de ciment (1,919 MPa et 4,42 MPa respectivement) reste bien en dessous de celle du béton traditionnel (12,8 MPa), atteignant seulement environ 20 % de la résistance escomptée. Cependant, ces valeurs indiquent une augmentation significative par rapport au béton de terre non stabilisé, et la résistance de ce béton semble continuer à croître au-delà de 28 jours, un comportement qui mérite une attention particulière pour les applications architectoniques ou en tant que matériau de remplissage.

Ce type de béton présente des atouts écologiques non négligeables, notamment par sa faible empreinte carbone et son potentiel de réutilisation, ainsi que par la texture et la couleur naturelle de la terre, qui peuvent enrichir l'esthétique architecturale. Il pourrait être particulièrement adapté pour des applications comme les cloisons intérieures et les pavages écologiques, où une résistance en compression modérée est acceptable.

Pour les recherches futures, il est recommandé de tester d'autres formulations, en ajustant notamment la teneur en eau et en explorant des stabilisants alternatifs à faible impact environnemental, afin d'optimiser encore les performances mécaniques de ce béton de terre. Ces recherches contribueraient à améliorer la durabilité et les applications possibles de ce matériau dans des constructions plus écologiques et adaptées aux ressources locales.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Nahouo SORO, « Étude de caractérisation de la terre jaune, de formulation de bétons de terre et de caractérisation mécanique des bétons de terre confectionnés », école de technologie supérieure novembre 2017
- [2] Jehanne PAULUS, « construction en terre crue : dispositions qualitatives, constructives et architecturales. » Université de liège – faculté des sciences appliquées
- [3] F. e. D.G, « Nouveau guide du béton et ses constituants, » PARIS, Novembre 2006.
- [4] F. d. s. d. l. B. N e. N. Asma, Etude des paramètres influant sur la portance de sol non saturé (Indice CBR), Mémoire de master, Université de Bourmerdes, Algérie, 2016-2017.
- [5] Bureau de Normalisation du Québec (BNQ). (1982). « Granulats-Analyse granulométrique par tamisage ». Norme BNQ 2560-040. QUÉBEC, QC, Canada : Bureau de Normalisation du Québec
- [6] Eid J., 2016. « Elaboration d'un éco-géo-matériau à base de terre crue ». Thèse de doctorat. Normandie Université.
- [7] Duc Chinh Ngo. Submitted on 27 Apr. 2018. « Développement d'un nouveau éco-béton à base de sol et fibres végétales : étude du comportement mécanique et de durabilité ». L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX
- [8] Architecture traditionnelle méditerranéenne. (S.D). « Arts de bâtir : A8-mur en terre banchée (pisé) ». Repéré le 01-09-2016 sur Page Web à http://www.meda-corpus.net/arb/fixes/F2/FRN/AO8_SY.pdf.
- [9] Standards New Zealand. (1998). «Engineering design of earth buildings. Standards NZS 4297 ». Wellington : Standards New Zélande.
- [10] F. d. s. d. l. B. N e. N. Asma, « Etude des paramètres influant sur la portance de sol non saturé (Indice CBR) », Mémoire de master, Université de Bourmerdes, Algérie, 2016-2017.
- [11] Bureau de Normalisation du Québec (BNQ). (1986). « Sols-Détermination de la teneur en eau. Norme CAN/BNQ 2501-170 ». QUÉBEC, QC, Canada : Bureau de Normalisation du Québec.

- [12] Bureau de Normalisation du Québec (BNQ). (1987). « Sols-Analyse granulométrique des sols inorganiques ». Norme NQ 2501-025. QUÉBEC, QC, Canada : Bureau de Normalisation du Québec.
- [13] Bureau de Normalisation du Québec (BNQ). (2005a). « Sols-Détermination de la limite de liquidité à l'aide de l'appareil de Cassagrande et de la limite de plasticité ». Norme CAN/BNQ 2501-090. QUÉBEC, QC, Canada : Bureau de Normalisation du Québec.
- [14] Bureau de normalisation du Québec (BNQ). (2005b). « Sols-Détermination de la relation teneur en eau-masse volumique-Essai avec énergie de compactage normal (600 kNm/m³), 3^{ème} ». Norme CAN/BNQ 2501- 250. Québec, QC, Canada : Bureau de normalisation du Québec.
- [15] EID J., 2011. Béton de terre : « pisé - Formulation et comportement Mécanique ». Thèse de master. Université de Nantes.
- [16] Faure, 1978. « Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains ».
- [17] Gallipoli D., Bruno A., Perlot C. et Mendes J., 2016. « Terre crue compactée à haute pression et méthodes de stabilisation : propriétés mécaniques, hydriques et durabilité. Chez Constructions en terre crue : avancées scientifiques, Chambéry ».
- [18] Guettala A., Guenfoud M., 1997. « Béton de terre stabilisé, propriétés physico mécaniques et influence des types d'argiles. La technique moderne ». Guillaud H., Houben H. 2006. Traité de construction en terre (Vol. 2006).
- [19] Association Béton Québec. (2014, 2014). « Les facteurs affectant la résistance à la compression des éprouvettes de béton. Techno Béton Bulletin technique ».
- [20] N. F. P. 9.-0. P. AFNOR, France, 2014.
- [21] Houben H. et Guillaud H., 2006. EAG-CRATerre : « Traité de construction en terre ». Editions Parenthèses, 2006.
- [22] Gardère J.F., 2012. « Techniques et matériaux mur en pisé ».
- [23] Itsvan C., 1990. « Comportement des sables argileux ; influence du traitement à la chaux ». Thèse de doctorat CGI, ENSMP, INSA Rennes; 174 p.

- [24] American Society for Testing and Materials (ASTM). (2005). "Standard guide for design of earthen wall building system". Norme E2392/E2392M-10e. Pennsylvania, West Conshohocken, USA: ASTM International.
- [25] Cours-ETS, « Caractéristiques fondamentales du béton, » 2015.
- [26] K. M. Fallope, « étude comparative des méthodes de formulation du béton : cas des méthodes de Dreux, de Scamtaev et de Baron Olivier, » Goma : faculté des sciences et technologies appliquées. ULPGL, 2021-2022.
- [27] Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. (2013). « Matériaux-Microstructures et procédés de mise en œuvre ». DUNOD.
- [28] Khaled MEFTAH. « Cours et exercices de mécanique des sols ». Septembre 2008.
- [29]. Kasmata, S.H., Panarese, W.C. (2023). « Design and control of Concrete Mixtures. 14th Edition ». Portland Cement Association.

ANNEXE

ANNEXE I

L'équivalent de sable par la lecture à la règle

Cylindre1		Cylindre2		Moyenne ES
h1	11,8cm	h1	11,3cm	
h2	11,1cm	h2	10,4cm	
$ES = \frac{h2}{h1} * 100$	94,06cm	$ES = \frac{h2}{h1} *$ 100	92,03cm	
				93,05cm

ANNEXE II

L'équivalent de sable par la lecture au piston

Cylindre1		Cylindre2		Moyenne ES
h1	11,8cm	h1	11,3cm	
h2	10,5cm	h2	10,1cm	
$ES = \frac{h2}{h1} * 100$	89,4cm	$ES = \frac{h2}{h1} * 100$	89,3cm	
				89,3cm

ANNEXE III

Masses volumiques absolue du sable

Essai	Md (g)	V (cm³)	Vtot. = V2-V1	$\rho_{abs} \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{M}{V}$
1	300	350	120	2,5
		470		
2	300	200	118	2,54237288
		318		
3	300	240	119	2,5210084
		359		
$\rho_{abs} \text{ (g/cm}^3\text{) moyenne}$				2,52112709

ANNEXE IV

Masses volumiques apparente du sable

Essai	M(g) récipient	M(g)Sable	Mtot. = M2-M1	V (cm ³)	ρ (g/cm ³) = $\frac{M}{V}$
1	33,7	297,9	264,2	203,13	1,30064491
2	32	302,6	270,6	204,037	1,32623005
3	33,6	305,1	271,5	202,322	1,34192031
ρ (g/cm³) moyenne					1,32293175

ANNEXE V

La teneur en eau de sable

Poids tareP1	M ₁ =13,1g	M ₁ =13,3g	M ₁ =13,2g	M ₁ =13,1g
Poids échant. Humide +tareP2	24,2	24,6	24,5	24,8
Poids tareP3	24	24,2	24	24,4
PA= P2-P1	11,1	11,3	11,3	11,7
PB= P3-P1	10,9	10,9	10,8	11,3
Peau=PA-PB	0,2	0,4	0,5	0,4
w%	1,83486239	3,53982301	4,42477876	3,41880342
Teneur en eau moyenne w%				3,30456689

ANNEXES VI

Analyse granulométrique du sable 0/5

N°TAMIS		OUVERTURE		REFUS	REFUS CUMULES		TAMISATS
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNO R	(g)	(g)	%	%
1/4"	39	6,35	6,3	0	0	0	100

3/16"	38	4,76	5	6,3	6,3	0,3	99,6
5	37	4	4	18,5	24,8	1,2	98,7
8	35	2,38	2,5	59,1	83,9	4,1	95,8
16	32	1,19	1,25	269,4	353,3	17,6	82,3
30	29	0,59	0,63	560,3	913,6	45,6	54,3
35	28	0,5	0,5	215,5	1129,1	56,4	43,5
50	26	0,315	0,315	445,6	1574,7	78,7	21,2
100	23	0,16	0,16	355,9	1930,6	96,5	3,4
120	22	0,0125	0,125	39,4	1970	98,5	1,5
140	21	0,1	0,1	30	2000	100	0

ANNEXES VII

Module de finesse

Tamis(mm)	% Refus cumulés	Module de finesse
0,16	96,5	
0,315	78,7	
0,63	45,6	
1,25	17,6	
2,5	4,1	
5	0,3	
TOTAL	243,1	$M_f = \frac{1}{100} \sum \% Refus\ cumulés$ 2,4312

ANNEXES VIII

Analyse granulométrique des Graviers 5/15

N° TAMIS		OUVERTURE		REFUS	REFUS CUMULES		TAMISATS
ASTM	AFNOR	ASTM	AFNOR	(g)	(g)	%	%
11/4"	46	31.7	16	38	38	1,27	98,7
1"	45	25.4	12,5	180	218	7,27	92,7
3/4"	44	19.1	10	716	934	31,1	68,9
2/3"	43	16.9	8	846	1780	61,3	38,7
1/2"	42	12.7	6,3	682	2462	84,8	15,2
3/8"	41	9.52	5	356	2818	97	2,96
5	40	6,35	4	86	2904	100	0

ANNEXE IX

Composition du béton témoin

Données de base	Béton
Resistance souhaitée	20MPa
Classe vraie du ciment	28MPa
Consistance désirée	6
Type de vibration	Normale
Dmax	31,5mm

Dosage en eau et en Ciment

Désignation	Valeur
Dosage en eau (kg/m3)	233,33
Dosage en ciment (kg/m3)	350

Proportion des Gravier et Sable

Désignation	Proportions (kg/m ³)	massique
Sable	731,64	
Gravier	1074,881	

ANNEXE X

Béton de terre

Essais par sédimentation



Moule pour l'essais de compression

