

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ ABOUBEKR BELKAID TLEMCEM

FACULTE DE TECHNOLOGIE



Département de Génie Civil
Mémoire pour l'obtention du

Diplôme de Master en Génie Civil

Option **Efficacité Energétique dans les Bâtiments de Construction**

Intitulé

**CARACTERISATION MECANIQUE, THERMIQUE
D'UN BETON EN TERRE COULEE**

Présenté par

RACHEDI ABDELOUAHAB

Soutenu en septembre 2022 devant le jury composé de

SELKA Ghouti

Maître de Conférences

Président

BENACHENHOU Kamila A. ép. HAKIKI

Maître de Conférences

Encadrante

KHELIFI Zakia

Maître de Conférences

Encadrante

ZADJAOUI Abdeldjalil

Professeur

Examineur

DEDICACES

ALLAH Le créateur, le tout miséricordieux, le tres miséricordieux pour m'avoir assisté dans ma vie Jusqu'ici. Qu'ALLAH nous pardonne. Qu'ALLAH nous guide dans le bon chemin.

A ma très chère mère

*Je sais que tu as beaucoup supporté pour notre bonheur...j'espère que ce jour, tu seras la plus heureuse au monde. J'espère que tu es fière de moi.
Que dieux te garde et te prête une longue vie. Sans toi je ne suis rien.
Je t'aime...*

A mon cher père

*Unique et irremplaçable, aucune dédicace ne saurait exprimer la reconnaissance, le respect et l'amour que je te porte. Ton aide, tes encouragements et tes prières m'ont été d'un grand secours tout au long de mes études. Tu es pour moi l'exemple du sérieux et de la droiture.
Que dieux te garde et te prête une longue vie.*

A mes très chers/e frères et sœur

Rachedi ibrahim, Oulhaci aicha, Rachedi redouane

*Vous avez toujours été présents pour moi. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.
Que dieu vous protège et consolide les liens sacres qui nous unissent.*

A mon âme sœur : Fatima ;

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'estime que j'ai pour toi. Ton dévouement, tes encouragements et ta gentillesse, ont été pour moi d'un grand soutien. Je te remercie pour ta présence dans ma vie.
Que Dieu te protège et te procure joie et bonheur.*

A Mes Cher (e) s ami (e) s et collègues ;

Au niveau de l'université de Tlemcen. En souvenir des moments agréables passés ensemble, veuillez trouver dans ce travail l'expression de mes sentiments les plus respectueux avec mes vœux de succès, de bonheur et de bonne santé. A tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

RACHEDI Abdelouaheb

REMERCIEMENTS

A l'heure de terminer ce mémoire, mes plus chaleureux remerciements vont naturellement à mes encadrantes, Madame Benachenhou Kamila et Mademoiselle Khelifi enseignantes au département de Génie-civil de l'université de TLEMCEM, qui ont été à la fois d'un grand conseil et d'une écoute toujours attentive et précieuse, et qui m'ont éclairé sur les multiples facettes que peut cacher cette problématique. Toutes vos remarques, observations et pistes de réflexions m'ont été d'un énorme apport, merci vivement.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui m'ont suivi durant mon cursus de formation.

Bien entendu, je remercie chaleureusement notre président du jury Monsieur : Selka Ghouti ainsi que Professeur Zadjoui Abdeljalil ; qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Que ce travail témoigne de ma considération et de mon profond respect.

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidé à terminer ce travail.

RÉSUMÉ

La valorisation des matériaux locaux, contribue à la réduction des coûts de construction et de l'énergie consommée. Dans ce cadre, le travail présenté consiste à confectionner un béton en terre coulée, constitué de matériaux bruts locaux de la région de Tlemcen. Pour cela, nous avons défini un protocole expérimental afin d'identifier les caractéristiques physiques des matériaux utilisés pour la confection du béton en terre coulée. Deux formulations ont été utilisées sur la base de la méthode de Dreux-Gorisse où le pourcentage de la terre a été varié. Ensuite, nous avons étudié le comportement mécanique et thermique des éprouvettes en béton de terre coulée.

Mots clés : terre crue ; béton de terre coulée, méthode de Dreux-Gorisse, résistance de compression simple ; conductivité thermique.

ABSTRACT

The valorisation of local materials contributes to the reduction of construction costs and energy consumption. In this context, the work presented consists in making a poured earth concrete, composed of local raw materials from the Tlemcen region. To do this, we defined an experimental protocol in order to identify the physical characteristics of the materials used for the manufacture of cast earth concrete. Two formulations were used according to the Dreux-Gorisse method where the percentage of earth was varied. Then, we studied the mechanical and thermal behaviour of the poured earth concrete specimens.

Key words: Raw earth; poured earth concrete, Dreux-Gorisse method, simple compressive strength; thermal conductivity.

المخلص

تقليل تكاليف البناء واستهلاك الطاقة. في هذا السياق، يتمثل العمل المقدم في صنع خرسانة ترايبية مصبوبة، مصنوعة من مواد أولية محلية من منطقة تلمسان. لهذا الغرض، حددنا بروتوكولاً تجريبياً من أجل تحديد الخصائص الفيزيائية للمواد المستخدمة في "Dreux-Gorisse" تصنيع الخرسانة المصبوبة. تم استخدام تركيبتين على أساس طريقة حيث اختلفت نسبة التربة. ثم درسنا السلوك الميكانيكي والحراري لعينات الخرسانة "المصبوبة".

الكلمة الرئيسية: التراب، صب الخرسانة الأرضية، قوة الانضغاط؛ توصيل حراري،
Dreux-Gorisse

Table des matières

DEDICACES	2
Remerciements.....	3
Résumé en français.....	4
Résumé en anglais.....	5
Résumé en arabe.....	6
Table des matières	7
Liste des figures	10
Liste des tableaux.....	12
Introduction générale.....	13
1. Chapitre 01 Généralité sur les matériaux terre	16
« GENERALITE SUR LES MATERIAUX TERRE.....	16
1. Introduction.....	17
2. La construction en terre à travers le temps.....	17
3. Panorama des techniques de construction en terre	19
3.1. Le torchis	20
3.2. L'Adobe.....	23
3.3. La bauge	25
3.4. Le pisé	26
3.5. Blocs comprimés.....	28
3.6. Terre coulée	28
4. Propriétés des constructions en terre.....	29
4.1. La résistance mécanique.....	29
4.2. La durabilité.....	29
4.3. Résistance au feu	29

4.4.	Esthétique.....	30
4.5.	Acoustique.....	30
5.	Les intérêts de la construction en terre.....	30
5.1.	Les intérêts socio-économiques.....	32
5.2.	Les intérêts écologiques et environnementaux.....	32
5.3.	Intérêt culturel.....	32
6.	Conclusion.....	33
2.	Chapitre 02 : Matériaux et méthodes expérimentales	34
7.	Introduction.....	35
8.	Terre crue.....	35
8.1.	Granulométrie.....	35
8.2.	Limites d'Atterberg.....	36
8.3.	Essai au bleu de méthylène.....	37
8.4.	La masse volumique des grains solides	37
9.	Sable	37
9.1.	Granulométrie.....	38
9.2.	Equivalent du sable.....	38
10.	Ciment	38
11.	Graviers.....	39
12.	Méthode de formulation du béton en terre coulée.....	39
13.	Résistance à la compression simple	40
14.	Conductivité thermique.....	41
15.	Conclusion.....	42
3.	Chapitre 03 : Résultats et discussions	43
1.	Introduction.....	44
2.	Terre crue.....	44

3. Sable	46
4. Gravier	46
5. Résistance à la compression simple.....	47
6. Conductivité thermique du béton de terre coulée	48
7. Conclusion.....	49
Conclusion générale	49
4. Bibliographie	52

Liste des figures

Figure 1-1 La ziggourat d'Etemenanki à Babylone [2]	18
Figure 1-2 Tombeaux de la nécropole de Bagawat [6]	18
Figure 1-3 Repères chronologique de la construction en terre [2]	19
Figure 1-4 Construction en terre à travers le monde [7]	19
Figure 1-5 La roue des techniques de mise en œuvre du matériau terre [8]	20
Figure 1-6 Mur en torchis.....	21
Figure 1-7 Construction en Torchis, Safranbolu (Turquie) (10)	22
Figure 1-8 Construction en Torchis, Diamantina (Brésil) (10)	22
Figure 1-9 Construction en Torchis, Strasbourg (France) (10).....	23
Figure 1-10 Construction en Adobe, Shibam (Yémen) (10)	24
Figure 1-11 Construction en Adobe, Ghadamès (Libye) (10)	24
Figure 1-12 Construction en Adobe, Lima (Pérou) (10)	25
Figure 1-13 Construction d'une maison en bauge (Bénin) (10)	26
Figure 1-14 Les tronçons en pisé de la Muraille de Chine (10)	27
Figure 1-15 Construction en pisé « l'Alhambra », Grenade (10).....	27
Figure 1-16 Ksar Aït-Ben-Haddou à Marrakech (Maroc) (10)	27
Figure 1-17 Les tulous des Hakka (10)	28
Figure 1-18 Le cycle écologique vertueux des architectures de terre : de la terre à la terre [13].....	31
Figure 1-19 Intérêt du matériau terre [13]	31
Figure 2-1 terre crue	35
Figure 2-2 Analyse granulométrique par voie humide du matériau terre.....	35
Figure 2-3 Analyse granulométrique par sédimentation	36
Figure 2-4 Détermination de la limite de liquidité à la boîte de Casagrande.....	36
Figure 2-5 Détermination de la limite de plasticité au rouleau.....	36
Figure 2-6 Détermination de la valeur de VBS.....	37
Figure 2-7 Détermination de la masse volumique des grains solides	37
Figure 2-8 Analyse granulométrique du sable.....	38
Figure 2-9 Essai d'équivalent du sable.....	38
Figure 2-10 Eprouvette du béton en terre de 16×32 cm.	40

Figure 2-11 Illustration d'un essai de compression simple d'une éprouvette en béton de terre.....	41
Figure 2-12 Appareille de mesure Quickline™ 30 utilisé pour l'essai thermique.....	41
Figure 3.1 Courbe granulométrique de la terre crue.....	44
Figure 3.2 Limite de liquidité de la terre crue.....	45
Figure 3.3 Position de la terre crue sur l'abaque de Casagrande.....	45
Figure 3.4 Courbe granulométrique du sable.....	46
Figure 3.5 Analyse granulométrique des deux graviers [25].....	47
Figure 3.6 Eprouvette en béton de terre coulée à la rupture.....	48

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Composition du ciment utilisé	39
Tableau 3-1 Résultats de l'essai de bleu méthylène	45
Tableau 3-2 Résultats de l'équivalent du sable	46
Tableau 3-3 Propriétés physiques des graviers utilisés [25]	47
Tableau 3-4 Résistance à la compression de béton en terre coulée	48

INTRODUCTION GENERALE

Le secteur de la construction est considéré comme l'un des facteurs principaux de la consommation énergétique à l'échelle mondiale et donc des émissions de gaz à effet de serre. Cette problématique pousse les chercheurs à trouver des initiatives qui seront entreprises dans le bâtiment afin de réduire cette surconsommation en proposant des constructions qui s'adaptent aux nouveaux enjeux environnementaux. Et ceux afin de s'intégrer aux dimensions sociale, environnementale et économique du développement durable. En effet, une construction respectueuse de l'environnement vise notamment à réduire la pollution par la diminution de la consommation énergétique, la réutilisation de l'eau ou l'utilisation de matériaux « écologiques », elle se présente comme une nécessité de toute urgence pour notre nouvelle ère. Malheureusement, depuis longtemps, les sociétés humaines agissent souvent sans prendre en compte les conséquences rétroactives qu'impactent leurs activités sur l'environnement. Le secteur de la construction représente une part importante de ces activités et l'histoire témoigne que c'est la maîtrise des techniques de constructions et le choix approprié des procédés et matériaux de construction qui permet entre autres de concilier les impératifs des sociétés avec le respect de l'environnement, afin de préparer leurs évolutions. Dans ce contexte, on s'est intéressé à la valorisation des matériaux locaux, 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.

Ainsi l'objectif principal de notre travail qui s'inscrit dans un cadre expérimental, est de confectionner un béton en terre coulée, étudier la résistance à la compression simple de ce matériau et mesurer sa conductivité thermique.

Afin de mener à bien ce modeste travail, nous allons le structurer en trois parties essentielles.

Le premier chapitre est consacré au matériau terre, son histoire, son évolution dans le temps, son mode d'utilisation dans la construction, ainsi que ses propriétés.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les différents matériaux naturels utilisés pour la confection d'un béton en terre coulée, le protocole expérimental normalisé pour l'identification des caractéristiques physiques des matériaux et étudier le comportement mécaniques et thermiques du béton en terre coulée.

L'objectif du chapitre trois est de présenter et d'interpréter les résultats du protocole expérimental.

Enfin, nous achèverons notre modeste travail par une conclusion générale qui présente les principaux résultats obtenus et observations constatées.

CHAPITRE 01

« GENERALITE SUR LES MATERIAUX TERRE »

« Un matériau n'est pas intéressant pour ce qu'il est mais pour ce qu'il peut faire pour la société. »

John.F.C. Turner

1. Introduction

Depuis l'antiquité, les hommes bâtissent des abris, des villes, « la terre » a été et reste, à travers les traditions historiques et populaires, l'un des principaux matériaux de construction utilisés sur notre planète. C'est ainsi qu'aujourd'hui plus du tiers des habitants de la planète vit dans des habitats en terre.

Dans ce chapitre, nous présenterons le matériau terre, son histoire, son évolution dans le temps, son mode d'utilisation dans la construction, ainsi que ses propriétés. Par la suite, nous tenterons de faire ressortir les intérêts de la construction en terre.

2. La construction en terre à travers le temps

Presque toutes les civilisations urbaines ou rurales de l'antiquité à l'ère moderne ont fait usage du matériau terre. En effet, le comportement instinctif de l'homme l'a conduit, depuis son existence à utiliser pour se protéger, telles les espèces animales, les abris créés par la nature. Il bâtit plus tard des constructions à partir des matériaux qui l'entouraient. Plusieurs témoignages de ce génie de la terre subsistent depuis des siècles et prouvent que la terre peut durer longtemps, sous des conditions d'exposition modérée (1). Les exemples du passé sont nombreux : L'Alhambra de Grenade, Jéricho, la ziggourat d'Etéménanki à Babylone (figure 1.1), les murailles de Badajoz, le château à murailles de terre à Tolède, la première ville de l'histoire, Catal Hüyük, en Anatolie (Turquie), les tombeaux de la nécropole de Bagawat édifiés il y a 1500 ans (figure 1.2), les immeubles de 8 étages au Yémen du sud, etc. La figure 1.3 ci-dessous représente un repère chronologique de la construction en terre (2).

Des études estiment que 30 % de la population mondiale, soit près de 1 500 000 000 d'êtres humains, vit dans un habitat en terre. Pour les seuls pays en voie de développement, il s'agit de 50 % de la population, en majorité rurale, et au moins 20% de la population urbaine et péri-urbaine. Il se peut que ses chiffres soient en deçà des réalités (3). Les constructions en terre sont majoritairement présentes dans presque tout le monde (figure 1.4). Comme le cite l'ingénieur architecte Bachir Agguerabi dans le journal El Watan (4) : « En Afrique, en Asie, en Europe, et aux Amériques, les civilisations, qu'elles soient égyptiennes, perses, grecques, berbères, romaines, musulmanes, ibériques, françaises, indiennes, toltèques, bouddhistes ou impériales de Chine en antiquité au

moyen- âge, ou encore aujourd’hui ont bâti ou bâtissent encore en terre, en apportant chaque fois des améliorations à cet usage naturel ». En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd’hui, on assiste à un regain d’intérêt pour ce matériau, qui s’explique d’abord par la volonté de réaliser une partie du programme consacrée au logement rural (environ 40%), ensuite par le souci d’adapter la législation au nouveau contexte international en matière du développement durable (5).



Figure 1-1 La ziggourat d’Etemenanki à Babylone (2)

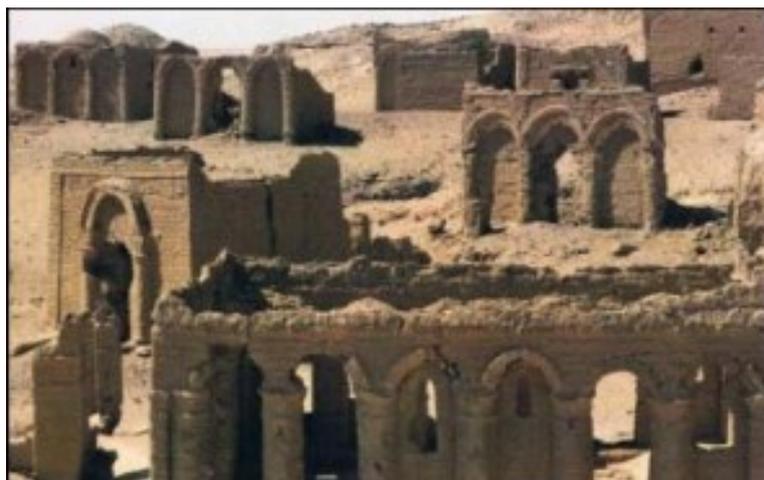


Figure 1-2 Tombeaux de la nécropole de Bagawat (6)

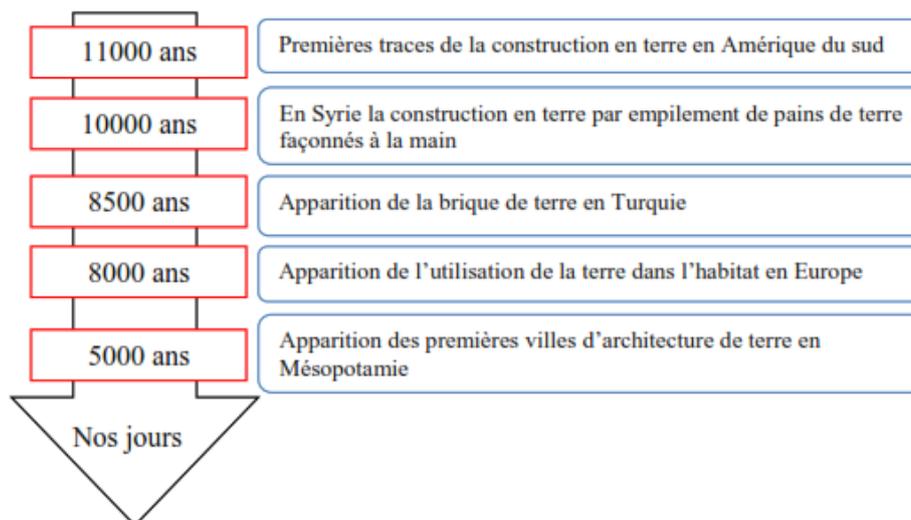


Figure 1-3 Repères chronologique de la construction en terre (2)



Figure 1-4 Construction en terre à travers le monde (7)

3. Panorama des techniques de construction en terre

Les recherches et les études archéologiques, ont permis de recenser de très nombreux modes de construction avec une multitudes de variantes qui traduisent l'identité des lieux et des cultures. En effet, les éléments déterminants de la technique utilisées sont nés de contextes géographiques différents, de modes de vie particuliers, de traditions différentes, de climats variés ou encore selon les matériaux locaux disponibles. La

s'est ensuite répandue durant l'époque néolithique le long du Danube avant de s'étendre à toute l'Europe continentale boisée au Vie millénaire. Elle disparaît en Catalogne et en France méridionale, en l'an mille (1000) avant notre ère, par contre se maintient en France septentrionale et dans toute l'Europe tempérée jusqu'à la période romaine (9). La technique du torchis est mise en œuvre à l'état plastique, la terre recouvre une structure en colombages et claires de bois (figure 1.6). Les terres utilisées pour cette technique sont de préférence fines, argileuses et collantes et contiennent peu de sable. Cette terre argileuse, amendée de paille ou d'autres fibres, constitue les parois de la bâtisse.

En ce qui concerne le patrimoine architectural en torchis, on relève les constructions en torchis dans les régions boisées d'Amérique du Sud, d'Afrique et d'Asie, à titre d'exemple : la ville turque de Safranbolu (figure 1.7), la ville brésilienne de Diamantina (figure 1.8). Au Nord de l'Europe, on recense comme exemple, les villes de Strasbourg (figure 1.9), Troyes, Tours, Colmar et encore bien d'autres. Une partie du château de Versailles est également construite en torchis (7).



Figure 1-6 Mur en torchis



Figure 1-7 Construction en Torchis, Safranbolu (Turquie) (10)



Figure 1-8 Construction en Torchis, Diamantina (Brésil) (10)



Figure 1-9 Construction en Torchis, Strasbourg (France) (10)

3.2. L'Adobe

La brique séchée au soleil est plus communément connue sous le nom d'adobe. Les briques d'adobe sont façonnées à la main ou moulées à partir d'une terre malléable souvent ajoutée à la paille puis séchées à l'air libre. Plus tard (et encore aujourd'hui), elles seront fabriquées manuellement ou avec des machines à l'aide de moules à formes prismatiques variées en bois ou en métal. L'adobe est appelé « banco » en Afrique.

Cette technique a été pratiquée depuis le Néolithique (12000 à 4000 ans avant notre ère) au Proche Orient. Elle a connu une large évolution sur les côtes occidentales de la méditerranée au moment des grandes colonisations : au VIII^e siècle avant notre ère avec les colons phéniciens en Afrique, au sud de l'Espagne et en Sicile, époque à laquelle les premières briques de terre crue, de formes coniques, ont été façonnées à la main sans moule. La plus ancienne brique piriforme retrouvée sur un site archéologique de Jéricho date de 8000 ans ACN. La technique a ensuite évolué vers des formes cylindriques puis semi-sphériques. Les plus anciennes briques rectangulaires, plus récentes que les précédentes, ont été retrouvées en Turquie sur le site de Çatal Höyük et datent quant à elles du VI^e millénaire ACN.

Le patrimoine architectural en adobe est présent sur tous les continents, aussi bien dans l'architecture vernaculaire que dans les bâtiments publics ou les édifices monumentaux. On dénombre une vingtaine de centres historiques bâtis en adobes comme Shibam au Yémen (surnommé le Manhattan du désert) (figure 1.10), Ghadamès en Libye (figure 1.11) ou encore Lima au Pérou (figure 1.12).

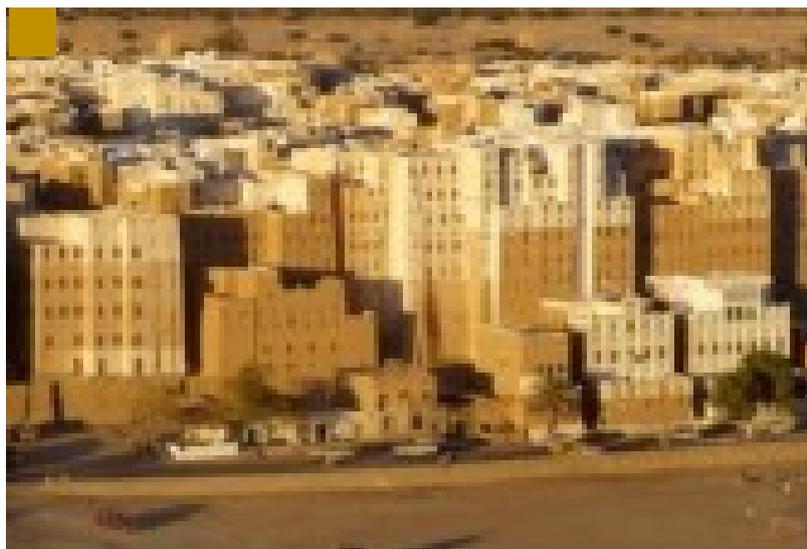


Figure 1-10 Construction en Adobe, Shibam (Yémen) (10)



Figure 1-11 Construction en Adobe, Ghadamès (Libye) (10)



Figure 1-12 Construction en Adobe, Lima (Pérou) (10)

3.3. La bauge

Ce procédé consiste à empiler des boules de terre les unes sur les autres et à les tasser légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à confectionner des murs monolithiques. Habituellement, la terre est amendée de fibres de natures diverses. La figure 1.13 ci-dessous est un exemple de construction en bauge au Bénin. La construction en bauge est apparue au Proche-Orient a bauge vers la fin du Xe millénaire avant J.-C., en même temps que le torchis sur branchages et les briques de terre crue façonnées à la main. Cependant, jusqu'à une date récente, les procédés par façonnage directe, n'étaient pas reconnus en tant que tels dans les fouilles archéologiques (9). La construction en Bauge est présente dans la péninsule arabique, dans l'architecture vernaculaire africaine (Burkina Faso, Bénin, Ghana, Nigeria, etc.) et dans le patrimoine rural du Devon anglais et des Abruzzes italiennes sans oublier les bourrines vendéennes et les longères bretonnes et normandes (11).



Figure 1-13 Construction d'une maison en bauge (Bénin) (10)

3.4. Le pisé

Le pisé dérivé du mot français apparu à Lyon en 1562 d'origine latine. C'est un mélange de terre graveleuse, très faiblement amendé d'eau. La terre est comprimée en masse avec un pilon dans des banches, couche par couche, et banchée par banchée. Ces outils sont en bois. Ce procédé consiste à construire des murs massifs et porteurs de plus de 50 cm d'épaisseur. La construction en pisé est modernisée par la suite grâce à l'utilisation de marteaux adaptés aux marteaux piqueurs et de branches métalliques modulaires. À cause de l'intensité du travail, le pisé est un matériau haut de gamme dans les pays industrialisés (11). Le pisé a été utilisé pour la première fois à Carthage en 814 avant Jésus-Christ (12). Il existe un patrimoine très riche de construction en pisé dont plusieurs sont inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO. A titre d'exemple : certaines parties de la Grande Muraille de Chine (figure 1.14), palais du Potala au Tibet, l'Alhambra à Grenade (figure 1.15), ksar Aït-Ben-Haddou à Marrakech au Maroc (figure 1.16), les tulous des Hakka (figure 1.17). Ce procédé connu aussi en Algérie avant 1962 est encore employé à ce jour au Maroc (4). En Australie, la technique du pisé s'est industrialisée à grande échelle dans les années 1980 avec une normalisation de la construction en terre, en imposant que la terre soit aussi solide que le béton en ajoutant du ciment ou de la chaux.



Figure 1-14 Les tronçons en pisé de la Muraille de Chine (10)



Figure 1-15 Construction en pisé « l'Alhambra », Grenade (10)



Figure 1-16 Ksar Aït-Ben-Haddou à Marrakech (Maroc) (10)

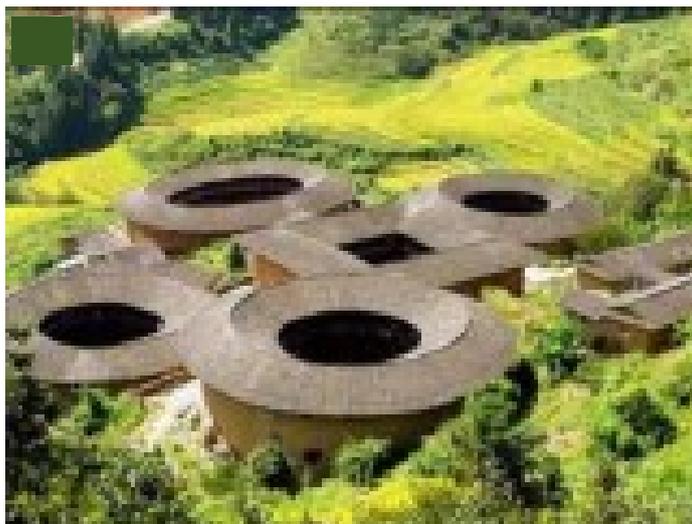


Figure 1-17 Les tulous des Hakka (10)

3.5. Blocs comprimés

Depuis longtemps, les blocs de terre ont été fabriqués à l'aide de moules dans lesquels on comprimait la terre à l'aide d'un petit pilon ou en rabattant avec force un couvercle très lourd. Par la suite, ce procédé a été mécanisé et on utilise aujourd'hui des presses de toutes sortes. La première presse pour fabriquer les briques de terre comprimé (BTC) a été mise au point en 1952 par l'ingénieur Raul Ramirez. Les BTC ont connu un réel succès durant les années 1980 et 1990 pour la réalisation d'habitats économiques en Afrique, en Amérique du Sud et dans le sous-continent indien.

3.6. Terre coulée

La technique de la terre coulée peut être comparée à la technique du béton maigre coulé. Elle met en œuvre la terre à l'état de boue liquide et de granularité assez sableuse, voire graveleuse. Les avantages de cette technique sont multiples : préparation aisée du matériau, facilité de mise en œuvre et large registre d'applications, mais elle comporte également un gros désavantage : le retrait au séchage est important. La stabilisation peut néanmoins résoudre ce problème. On peut également compartimenter les constructions afin de réduire le retrait ou alors par une obturation ultérieure des fissures lorsque de graves malfaçons structurales ne sont pas à déplorer. Par ailleurs, la terre coulée est adaptée à l'utilisation de toute la gamme de la technologie du béton. La terre coulée permet de fabriquer des briques, des pavés et des murs, armés ou non (7). Ce procédé sera l'objet de notre étude expérimentale détaillée dans le chapitre 2.

4. Propriétés des constructions en terre

Dans les maisons construites en terre règne souvent une singulière harmonie ; elle est due à la fois au même matériau et à la qualité des espaces et des rythmes architecturaux. Mais le confort des architectures de terre n'est pas seulement spirituel ; il est aussi thermique ; Il y fait frais en été et chaud en hiver. Par leur nature, les murs épais en terre protègent des excès climatiques extérieurs et participent à une régulation thermique naturelle qui, traditionnellement, assure des économies d'énergie appréciable. Bien utilisé, le matériau terre offre partout un « confort thermique » très apprécié qui assure une régulation naturelle optimale entre les températures extérieure et intérieure (13).

En plus de ses qualités de régulateur hygrothermique et d'isolant thermique, la construction en terre comporte d'autres qualités. On va citer quelques-unes ci-après.

4.1. La résistance mécanique

La terre résiste bien à la compression mais ne résiste pas à la traction, spécialement à l'état humide. Quand elle est utilisée comme éléments porteurs, les forces doivent être acheminées dans la masse des éléments, ce qui explique leur épaisseur.

4.2. La durabilité

L'analyse du patrimoine ancien existant à travers le monde prouve la durabilité des constructions en terre. A ce titre, on retrouve, les vastes enceintes urbaines défensives construites dès le XIIe siècle autour de multiples villes d'Afrique (Marrakech, Fès, Rabat, etc.), d'Europe méridionale ou du Moyen-Orient, attestent de la force et de la solidité que peuvent témoigner les constructions en terre. La durabilité des constructions en terre, relève aussi bien du respect de la mise en œuvre des règles constructives que du matériau.

4.3. Résistance au feu

La terre est un matériau incombustible qui procure aux constructions une bonne résistance au feu.

4.4. Esthétique

La terre crue permet une grande variété d'aspects de surface selon les modes de mises en œuvre choisis, des parois brutes à des surfaces finement travaillées. Le spectre de couleur des terres est très large : on trouve non seulement les classiques allant du blanc et du beige aux ocres jaunes et rouges voire bruns, mais aussi tout le spectre des verts et des gris et même des bleus, dans des nuances claires ou sombres. Les juxtapositions et les contrastes obtenus avec différentes terres ou entre la terre et d'autres matériaux naturels, et notamment le bois, sont toujours harmonieux.

4.5. Acoustique

Les parois en terre peuvent offrir des ambiances acoustiques variées, en fonction de leur masse et de de leur finition de surface. Les parois en terre étant souvent moins lisses que beaucoup de matériaux conventionnels de finition, les sons sont plus facilement amortis, ce qui aide à limiter l'écho.

5. Les intérêts de la construction en terre

Un des intérêts de mener un projet de construction en terre est de pouvoir utiliser le gisement local de proximité et de limiter ainsi l'énergie grise liée à la construction (réduction des distances parcourues). Présent sur le territoire depuis des siècles, la construction en terre a prouvé sa durabilité et sa bonne intégration dans le paysage. L'exploitation du matériau préserve les ressources et limite l'atteinte à l'environnement. De son extraction et sa mise en œuvre, il ne subit aucune transformation polluante. En cas de destruction, il peut être réutilisé pour ériger d'autres murs ou rendu à la terre sans qu'aucune décontamination ne soit nécessaire. « Il est recyclable à l'infini » (14). Construire en terre aujourd'hui, c'est repenser l'emploi des ressources naturelles et sociales, et préparer un avenir véritablement éco-responsable (2). La figure 1.18 ci-dessous, schématise le cycle de vie du matériau terre, de la carrière au recyclage.

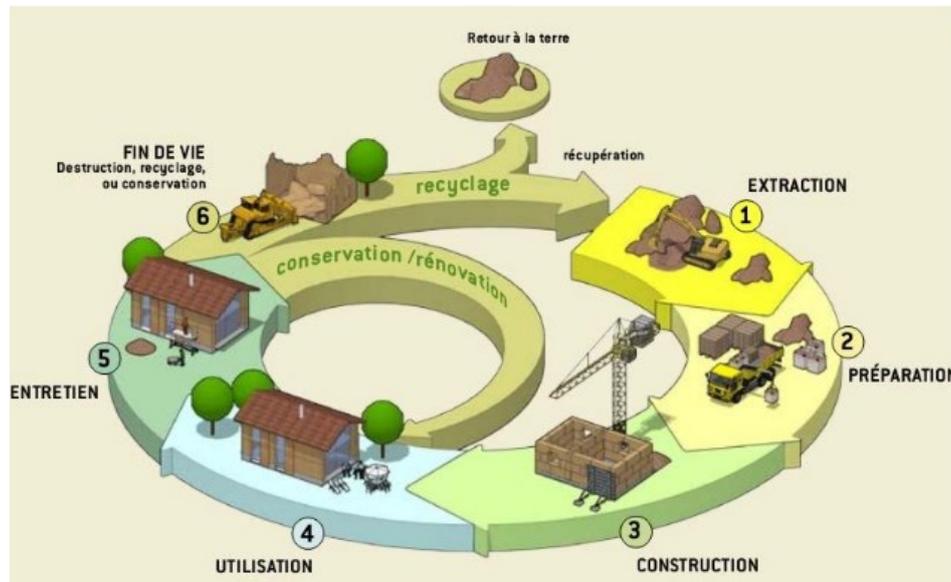


Figure 1-18 Le cycle écologique vertueux des architectures de terre : de la terre à la terre (14)

De ce fait, la terre est facilement recyclable, elle offre des qualités environnementales, sociales, culturelles et économiques favorables à un développement raisonné du secteur de la construction (figure 1.19).

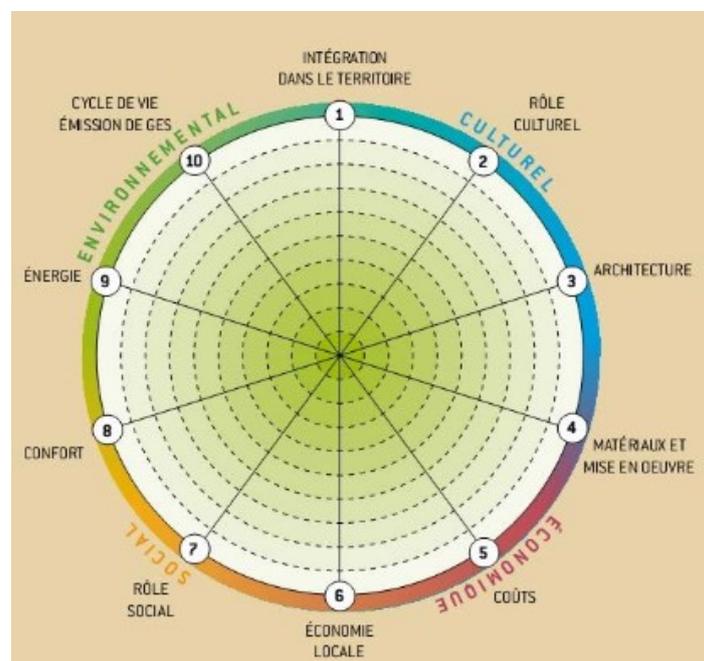


Figure 1-19 Intérêt du matériau terre (14)

5.1. Les intérêts socio-économiques

La terre est incontestablement le matériau le plus économique et le plus facilement exploitable. Cet avantage économique constitue probablement l'aspect le plus démonstratif de la nécessité de promouvoir l'utilisation de la terre comme matériau de construction. En effet, les faibles coûts des réalisations en terre peuvent agir comme un levier social pour améliorer considérablement les conditions de vie des gens.

A titre d'exemple, en Algérie, une étude menée par le CNERIB (Centre National d'Etudes et de Recherches intégrées au Bâtiment) a montré que l'utilisation de briques en terre crue comme remplissage d'une ossature en béton armé peut réduire de 32% le coût global des habitations, comparées à l'utilisation des matériaux conventionnels (15).

5.2. Les intérêts écologiques et environnementaux

Le souci environnemental constitue un nouveau défi à tous les acteurs de la construction, à savoir architecte, ingénieur, maître d'ouvrage, etc., qui doit désormais s'insérer dans le concept de développement durable en réfléchissant à des solutions moins nuisibles à l'environnement et qui ne compromettent pas l'avenir des générations futures. Ainsi, la construction en terre se propose comme l'une des solutions les plus prometteuses du fait qu'elle ne génère pas d'émission de carbone lors de sa production. En effet, comme elle n'est pas cuite mais le plus souvent seulement malaxée avant d'être mise en œuvre, la terre crue nécessite peu d'énergie pour sa transformation ; ce qui est un avantage certain par rapport au béton armé. Il est de plus souvent possible d'utiliser une terre disponible localement, parfois prise sur le site même de la construction, ce qui limite les besoins en énergie pour le transport. Elle est donc, biodégradable, recyclable, elle ne génère pas ou très peu de déchets de chantier. Enfin, il est aussi possible de renforcer la résistance de la terre en ajoutant des matériaux naturels (fibres végétales, bois, pierre, etc.), peu gourmands en énergie, ceci est un atout supplémentaire pour la terre.

5.3. Intérêt culturel

Les constructions en terre sont très anciennes, on avait présenté quelques sites dans le paragraphe 2. Comme exemple, on peut reprendre la ville de « Shibam » au Yémen qui compte 500 tours d'habitations en terre pouvant atteindre la vingtaine d'étages et qui comporte une tradition millénaire vivante de construction en terre ; le site de Mati en

Syrie qui date de plus de 4000 ans. Plusieurs sites à travers le monde composent la liste de l'héritage mondial de l'UNESCO. L'intérêt pour ce patrimoine est apparu en 1972 avec les conférences internationales sur la conservation de l'architecture de terre, qui ont débuté en Iran.

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons passé en revue l'évolution de la construction en terre à travers le temps. Le matériau terre présente de nombreux avantages et les méthodes et les techniques de sa mise en œuvre sont nombreuses. Par la suite, on a présenté, les propriétés et les intérêts de la construction en terre. Ainsi la terre crue est un matériau de construction de qualité avec de nombreux atouts : recyclable, économique, hygrothermique, durable, de forte inertie, biodégradable, sans dégagement chimique, esthétique. La terre peut être aussi combiné avec d'autres matériaux. Une des technologies développer est la technique de béton en terre coulée. Ce procédé fera l'objet de notre étude expérimentale détaillée dans le chapitre 2.

CHAPITRE 02

**« Matériaux et méthodes
expérimentales »**

7. Introduction

On se propose dans ce chapitre de présenter les différents matériaux naturels utilisés pour la confection d'un béton en terre coulée. Pour cela, un protocole expérimental normalisé a été défini afin d'identifier les caractéristiques physiques des matériaux et d'étudier le comportement mécaniques et thermiques du béton en terre coulée.

8. Terre crue

8.1. Granulométrie

La terre crue testée dans cette étude est un matériau local, de la région de Remchi (Tlemcen, Algérie) (figure 2.1).



Figure 2-1 terre crue

Deux méthodes ont été utilisées pour déterminer la granulométrie de la terre crue (fig.2.2 ; 2.3) : le tamisage à voie humide XP P94-041, 1995 (16) et sédimentométrie NF P 94-057 (17).



Figure 2-2 Analyse granulométrique par voie humide du matériau terre



Figure 2-3 Analyse granulométrique par sédimentation

8.2. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg du matériau ont été déterminées selon la norme NF P 94-051 (18). Cet essai a été réalisé en deux phases :

- La première phase : est pour déterminer la limite de liquidité à l'aide de la boîte de Casagrande (fig.2.4).



Figure 2-4 Détermination de la limite de liquidité à la boîte de Casagrande

- La deuxième phase : est pour déterminer la limite de plasticité au rouleau (fig.2.5).



Figure 2-5 Détermination de la limite de plasticité au rouleau

8.3. Essai au bleu de méthylène

L'essai de bleu méthylène a été réalisé selon la norme NF P 94-068 (19) (fig2.6). Cet essai permet de déterminer la valeur de bleu du sol (VBS) et à partir de cette valeur on peut déduire la surface spécifique des particules constituant le sol (S_{ST}).



Figure 2-6 Détermination de la valeur de VBS

8.4. La masse volumique des grains solides

La masse volumique des grains solides a été déterminée en utilisant un pycnomètre et un liquide non réactif avec le matériau sol qui est le toluène (fig2.7).



Figure 2-7 Détermination de la masse volumique des grains solides

9. Sable

Le sable utilisé provient de la carrière de l'entreprise nationale des granulats (E.N.G) (SIDI EL ABDELI), Tlemcen.

9.1. Granulométrie

La granulométrie du matériau sable a été déterminée conformément à la norme NF EN 933-1 (fig2.8) (20).



Figure 2-8 Analyse granulométrique du sable

9.2. Equivalent du sable

L'analyse de la nature du sable (fig2.9) a été déterminée selon un essai d'équivalent du sable conformément à la norme NF P 18-598 (21).



Figure 2-9 Essai d'équivalent du sable

10. Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé (CPJ-CEMII/A 42.5 N) provient de la cimenterie de Béni-Saf, Aïn Témouchent. Le ciment composé répond aux exigences de la norme européenne NA 442-2013 (22). Sa composition est résumée dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Composition du ciment utilisé

	Clinker	Ajout calcaire	Constituants secondaires
Taux (%)	80-94	06-20	0-5

Sa résistance mécanique simple est donnée par le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Résistance mécanique à la compression du ciment utilisé

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)		Temps de début de prise (min)
	A 2 jours	A 28 jours	
42,5 N	≥ 10	$\geq 42.5 \text{ \& } \leq 62,5$	≥ 60

11. Graviers

Les graviers utilisés dans cette étude sont de deux classes granulaires 3/8 et 8/16. Ils proviennent de la carrière de Sidi Abdelli (Tlemcen), propriété de l'Entreprise Nationale des Granulats (ENG). L'analyse granulométrique des types de graviers ont été effectuées conformément à la norme NA 2607 (23). Les caractéristiques physiques de ces gravillons ont été déterminées par (23).

12. Méthode de formulation du béton en terre coulée

Pour la confection du béton en terre coulée, on a pris comme référence la formulation utilisée dans le projet des logements d'astreinte (Groupe Kherbouche) à Tlemcen. Cette formulation est basée sur la méthode de Dreux-Gorisse. Cette dernière permet de déterminer les quantités optimales de matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton. Les deux formulations utilisées sont citées dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 Formulations utilisées pour la confection du béton en terre coulée

	Ciment CEMII/A 42.5 N	Gravier 8/16	Gravier 3/8	Sable	Terre crue	Eau
Formulation 1 (%)	5	7	38	22	22	6
Formulation 2 (%)	2	7	38	22	25	6

Le mélange du béton en terre a été effectué à l'aide d'une bétonnière. Après malaxage le matériau béton en terre est rempli dans des moules de dimensions de 16×32 cm (fig2.10). Ensuite les éprouvettes ont été démoulées après 24 heures et stockées dans une salle de 28°C de température et de 55% d'humidité relative pour le durcissement.



Figure 2-10 Epreuve du béton en terre de 16×32 cm.

13. Résistance à la compression simple

L'essai de résistance à la compression a été réalisé sur des éprouvettes de 16× 32 cm conformément à la norme NF EN 12390-3 (23) . Le dispositif expérimental est composé d'une presse de capacité maximale de 2000 kN semi-automatisée. Le principe de l'essai est de soumettre l'échantillon à une vitesse de chargement constante provoquée par le déplacement du vérin de la presse, et de mesurer la force axiale qui sera affichée à la fin de l'essai sur le cadran (fig.2.11). Les essais de compression ont été réalisés pour trois cures : 7, 14 et 8 jours.



Figure 2-11 Illustration d'un essai de compression simple d'une éprouvette en béton de terre.

14. Conductivité thermique

Afin de mesurer la conductivité thermique du béton en terre coulée, des éprouvettes de $27.5 \times 27.5 \times 4$ cm ont été confectionnées pour les deux formulations étudiées. Les conductivités thermiques sont mesurées selon la norme ASTM : D5334, à l'aide de l'appareil Quickline-30 (ANTAR CORPORATION PITTSBURG, PA (USA)) (fig2.12). Il utilise le principe de la méthode de la ligne de chaleur transitoire qui permet de réduire le temps de test. La conductivité thermique de l'échantillon est mesurée à l'aide d'une sonde équipée d'un serpentin chauffant. Le temps de mesure de l'appareil Quickline-30 se situe entre 16 et 20 min (24).



Figure 2-12 Appareil de mesure Quickline™ 30 utilisé pour l'essai thermique.

15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les matériaux nécessaires pour notre démarche expérimentale. Par la suite, nous avons présenté les différents essais normalisés utilisés pour identifier chaque matériau.

Ensuite nous avons défini le protocole expérimental adapté pour notre étude en donnant les différentes formulations choisies afin de confectionner le béton en terre coulée. A la fin, nous avons présenté les essais normalisés utilisés pour étudier le comportement mécanique et thermique des éprouvettes en béton de terre coulée.

Les résultats des essais d'identifications des matériaux utilisés pour la confection des éprouvettes en béton coulé ainsi que les résultats des essais mécaniques et thermiques seront présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 03

« Résultats et discussions »

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter et d'expliquer les résultats du protocole expérimental que nous avons effectué au laboratoire et qui nous a permis d'étudier l'influence du dosage de la terre crue sur le comportement mécanique et thermique du béton de terre coulée.

2. Terre crue

La courbe granulométrique obtenue de la terre utilisée est présentée sur la fig.3.1. Le résultat met en avant le caractère argileux du matériau puisque la majorité de ses particules ont un diamètre inférieur à $80\ \mu\text{m}$ ($\sim 92\%$).

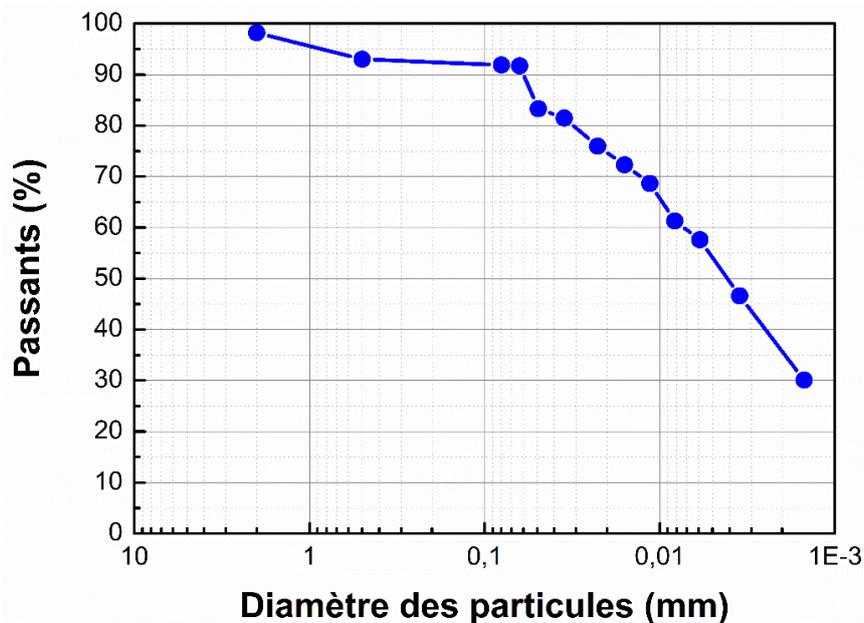


Figure 3.1 Courbe granulométrique de la terre crue.

En effet, pour connaître la nature de cette argile, nous allons utiliser la classification de Casagrande basée sur les limites d'Atterberg déterminées par l'essai effectué et cité dans le chapitre 2. La figure 3.3 montre le résultat de la limite de liquidité W_L déterminée à l'aide de la coupelle de Casagrande.

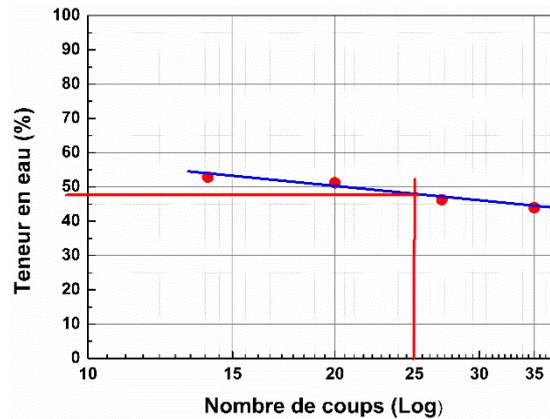


Figure 3.2 Limite de liquidité de la terre crue.

D'après la fig3.2, nous avons trouvé que $W_L = 47,87 \%$. La limite de plasticité W_P déterminé avec l'essai à rouleau a donné une valeur de $W_P = 25,5 \%$. L'indice de plasticité déduit est de l'ordre de $I_P = 22,37 \%$.

En se basant sur la valeur de W_L et de I_P , la classification de notre terre crue d'après l'abaque de Casagrande (fig3.3), montre que c'est une argile peu plastique.

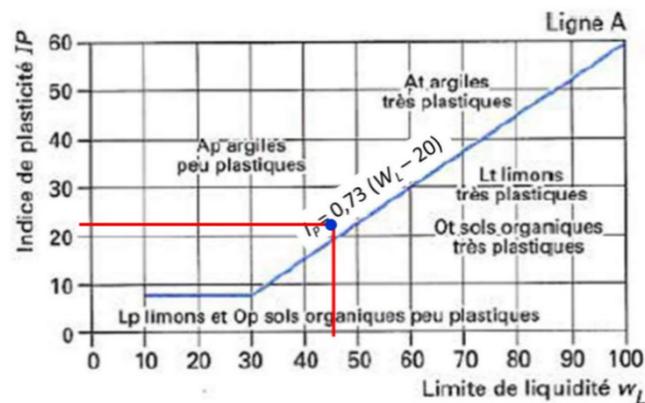


Figure 3.3 Position de la terre crue sur l'abaque de Casagrande.

Le résultat de l'essai de bleu méthylène est donné par le tableau 3.1.

Tableau 3-1 Résultats de l'essai de bleu méthylène

Valeur de VBS	La surface spécifique S_{st} (m^2/g)
3,5	73,5

D'après les valeurs de la surface spécifique notre terre est une argile Kaolinite. Sa densité déterminée est de l'ordre de 2,7.

3. Sable

La courbe granulométrique du sable utilisé est montrée sur la fig.3.4.

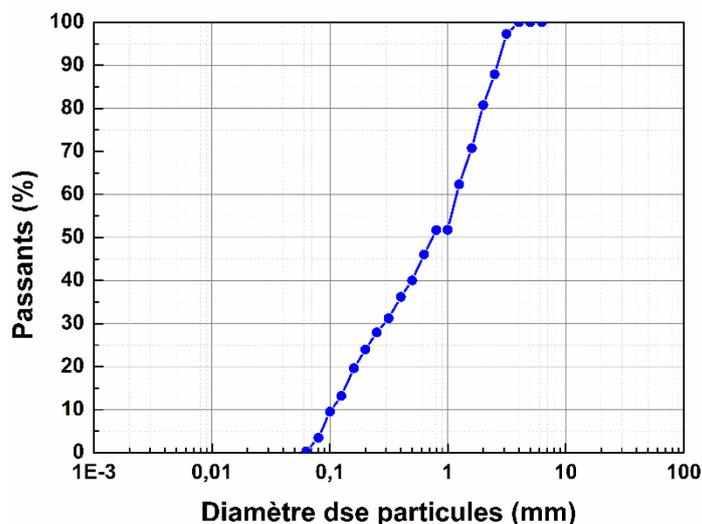


Figure 3.4 Courbe granulométrique du sable.

D'après l'analyse granulométrique, ses coefficients d'uniformité et de courbure sont de l'ordre de 12 et 0,75, respectivement, dont la teneur en fine est de l'ordre $\sim 3,15\%$. En se basant sur ces résultats, sa classification selon LCPC-USCS montre que c'est un sable propre mal gradué Sm (SP).

Les valeurs de l'équivalent du sable sont données par le tableau 3.2. Les résultats trouvés montrent que c'est un sable propre à faible pourcentage de fines argileux.

Tableau 3-2 Résultats de l'équivalent du sable

	ESV	ESP
Valeurs (%)	76,75	65,41

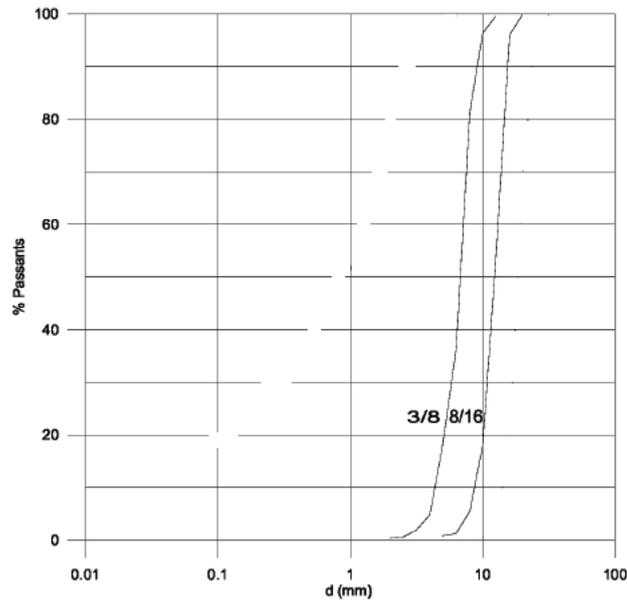
4. Gravier

Les caractéristiques physiques des graviers 3/8 et 8/16 utilisés sont représentées dans le tableau 3.3 (25).

Tableau 3-3 Propriétés physiques des graviers utilisés (25)

Désignation	Gravier (3/8)	Gravier (8/16)
M_V absolue (g/cm^3)	2,587	2,587
M_V appar (g/cm^3)	1,355	1,423
Coefficient d'aplatissement (%)	19	8
Propreté (%) (PS)	1,92	1,3
Los Angeles (%)	27	31
Micro – Deval (%)	15	11

Les courbes granulométriques des deux graviers sont représentées par la figure 3.5 (25).

**Figure 3.5 Analyse granulométrique des deux graviers (25).**

5. Résistance à la compression simple

La résistance à la compression est mesurée pour trois cures 7, 14 et 28 jours (fig3.6).



Figure 3.6 Epreuve en béton de terre coulée à la rupture

Les résultats de la résistance à la compression sont donnés dans le tableau 3.4.

Tableau 3-4 Résistance à la compression de béton en terre coulée

	7 jours	14 jours	28 jours
Formulation 1	0,415 Mpa	0,895 Mpa	0,945 Mpa
Formulation 2	0,115 Mpa	0,165 Mpa	0,205 Mpa

D'après les résultats, on remarque que la résistance à la compression des éprouvettes de la formulation 1 est plus grande par rapport à la première formulation. Ceci est dû à la diminution du dosage du ciment utilisé de 5 à 2%. Mais les valeurs restent acceptables sachant que pendant la confection aucun adjuvant pour améliorer la résistance mécanique n'a été utilisé.

6. Conductivité thermique du béton de terre coulée

Les résultats de l'essai thermique sont donnés dans le tableau 3.5.

Tableau. Résultats de l'essai thermique sur les éprouvettes du béton de terre coulée.

Formulation	Conductivité thermique (W/m.K)
Formulation 1	0,470
Formulation 2	0,522

D'après les résultats de l'essai thermique, on peut remarquer la meilleure conductivité thermique est donnée par la formulation 1.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté les résultats des essais réalisés sur les éprouvettes en béton de terre coulée. On a examiné l'effet du dosage de la terre crue sur le comportement mécanique et thermique. On a trouvé que la résistance à la compression a diminué en augmentant le pourcentage de la terre. En ce qui concerne le comportement thermique, la formulation 1 présente une bonne conductivité.

CONCLUSION GENERALE

Depuis la nuit des temps, la terre crue est utilisée dans la construction, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète, vu son intérêt économique, sa disponibilité et sa facilité d'exploitation. En effet, dès l'antiquité, on fait un usage très abondant de ce matériau en Mésopotamie ou dans l'Égypte des Pharaons. En Afrique, en Asie, en Europe, et aux Amériques, les civilisations, qu'elles soient égyptiennes, perses, grecques, berbères, romaines, musulmanes, ibériques, françaises, indiennes, toltèques, bouddhistes ou impériales de Chine - en antiquité au moyen-âge, ou encore aujourd'hui - ont bâti ou bâtissent encore en terre, en apportant chaque fois des améliorations à cet usage naturel (4). Aujourd'hui, on dénombre des réalisations exemplaires en terre, notamment aux Etats Unis (Arizona, Nevada et New Mexique). On retrouve aussi la même initiative dans le pays du tiers Monde à titre d'exemple, des milliers de Ksours algériens s'évertuent à sauvegarder, la moindre trace de leurs très modestes constructions en terre. Les organismes spécialisés des Nations Unies encouragent moyennant finances ce type de programmes dans des pays en développement. Ces démarches s'appuient sur un renouveau de la tradition et font appel aux "racines", le retour à l'utilisation du matériau de nos ancêtres, la terre crue un matériau de construction de qualité avec de nombreux atouts : recyclable, économique, hygrothermique, durable, de forte inertie, biodégradable, sans dégagement chimique, esthétique. On a vu aussi qu'il existe de très nombreux modes de construction avec une multitudes de variantes qui traduisent l'identité des lieux et des cultures dont le procédé du béton de la terre coulée l'objet de notre étude expérimentale.

L'étude au laboratoire constituait à :

- Confectionner le matériau béton de terre coulée ;
- Identification des matériaux utilisés ;
- Confection des éprouvettes en béton en se basant sur la méthode de Dreux-Gorisse, en variant le pourcentage de la terre ;
- Etudier la résistance à la compression simple du béton de terre coulée ;
- Mesurer la conductivité thermique du béton de terre coulée.

Les résultats montrent que :

- La résistance à la compression obtenue est acceptable à savoir qu'aucun adjuvant n'a été utilisé.
- Les valeurs de la conductivité thermique trouvées sont inférieures d'un béton ordinaire.

Bibliographie

1. **Fouad, Ghomari.** *Matériau en terre crue compactée : Amélioration de sa durabilité à l'eau.* 1989.
2. **Houda, Mesli.** *Construire une architecture Bioclimatique par le retour aux origines traditionnelles (cas de Taghit).* 2017.
3. **Guillaud, H., Joffroy, T., Odul, P., & CRATerre-EAG.** *Blocs de terre comprimée. Volume II. Manuel de conception et de construction.* s.l. : Eschborn, GTZ., 1995.
4. **Bachir, AGGUERABI.** *Architecture : de la terre à la terre - L'avenir salubre.* 2009.
5. **Benouali H, Brara A, Mahdad M, Mokhtari F.** *Caractérisation thermophysique et suivi thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimés.* Tlemcen : s.n., 2011.
6. **Jean, DETHIER.** *Des architectures de terre, l'avenir d'une tradition millénaire.* Lyon : Centre George Pompidou, 1982. pp. 23-24.
7. **Guillaud, H., & Houben, H.** *Traité de construction en terre (2ème édition).* Marseille : Parenthèses., 1995.
8. **Jessica, ADJOUA.** *Le renouveau de l'Architecture de terre crue dans les années 80, Histoire, Ambition et impact international du Domaine de la Terre.* Ecole Nationale d'Architecture et de Paysage de Lille. Lille : s.n., 2013.
9. **Mohammed Yazid, HARBIT.** *Patrimoine en Pisé : Etude et Modélisation.* Université de Tlemcen. Tlemcen : s.n., 2005. Memoire de Magister en Genie-Civil.
10. **JEHANNE, PAULUS.** *CONSTRUCTION EN TERRE CRUE:DISPOSITIONS QUALITATIVES, CONSTRUCTIVES ET ARCHITECTURALES – Application à un cas pratique : Ouagadougou.* France : Université de Liege, 2015.
11. **Jordan, HURET.** *Quel avenir pour les constructions en terre crue dans les.* Université de Normandie. Caen : s.n., 2019. Memoire de Master en Geographie.
12. **Solène, DELAHOUSSE.** *L'architecture de terre en mouvement en France et au Mali, Bati ancien et technologie innovantes de restauration (Batir).* Université de Nantes. Nantes : s.n., 2011.

13. **Jessica, GIBOULET.** *Les perception de la matiere Terre comme matière à vivre et à construire dans l'architecture.* Ecole nationale supérieure d'Architecture. Montpellier : s.n., 2017.
14. **Sébastien Moriset et Arnaud Misse, CRATERRE-ENSAG.** *Rénover et construire en pisé dans le parc naturel régional Livradois-Forez.* 2011.
15. **CNERIB.** *Conception de logements économiques à base de produits localement disponibles.* s.l. : CNERIB, 2000. p. 31.
16. **Norme AFNOR XP P 94-041.** *Sols : reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage.* 1995.
17. **Norme AFNOR : NF P 94-057.** *Analyse granulométrique des sols : Méthode par sédimentation.* 1992.
18. **Norme AFNOR : NF P 94-051.** Détermination des limites d'Atterberg : Limite de liquidité à la coupelle – limite de plasticité au rouleau. 19 juin 1993.
19. **Norme AFNOR : NF P 94-068.** Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tâche. 1998. 51.
20. **NF EN 933-1.** Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : détermination de la granularité - Analyse granulométrique par tamisage. 2012.
21. **P18-598.** Granulats - Équivalent de sable. 10 juin 1991.
22. **GIGA.** Groupe industriel des ciments d'Algérie. Casablanca : s.n., 2019.
23. **AFNOR.** NF EN 12390-3, Essais pour béton durci - Partie 3 : résistance à la compression des éprouvettes. 2012.
24. **Amel Aattache, Abdelkader Mahi , Rabah Soltani , Mohamed Mouli , Ahmed Soufiane Benosman.** *Experimental study on thermo-mechanical properties of Polymer.* 2013. pp. 459–469.
25. **Sidi Mohammed El Amine BOUKLI HACENE.** *CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA RESISTANCE CARACTERISTIQUE DES BETONS.* s.l. : Université de Tlemcen, 2009.



--

