TABLE DE MATIÈRES

DEDICACE .................................................................................................................. iii
REMERCIEMENTS ......................................................................................................... iv
TABLE DE MATIÈRES ...................................................................................................... v
ملخص .............................................................................................................................. ix
Résumé ............................................................................................................................... ix
Abstract ............................................................................................................................. x
LISTE DES NOTATIONS ET DES ABBREVIATIONS ..................................................... xi
LISTE DES TABLEAUX .................................................................................................... xv
LISTE DES FIGURES ....................................................................................................... xvii
INTRODUCTION GENERALE ........................................................................................ xx

CHAPITRE 01 : GENERALITES SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE

1.1 INTRODUCTION ........................................................................................................ 1
1.2 HISTORIQUE ............................................................................................................. 2
  1.2.1 Chronologies de la construction en terre ............................................................. 2
1.3 La construction en terre en Algérie ......................................................................... 3
1.4 Principaux avantages et inconvénients des constructions en terre crue .............. 5
1.5 Techniques de construction en terre ................................................................. 6
  1.5.1 Adobe ............................................................................................................... 6
  1.5.1 Pisé ................................................................................................................. 8
  1.5.2 Bauge ............................................................................................................. 9
  1.5.3 Torchis ......................................................................................................... 10
  1.5.4 Briques de terre compressée .......................................................................... 11
1.6 La construction contemporaine en terre dans le monde ................................ 13
CHAPITRE 02 : LES NORMES DANS LA CONSTRUCTION EN TERRE

2.1 INTRODUCTION ........................................................................................................... 17
2.2 Définitions et but de la normalisation .......................................................................... 17
2.3 Recommandations pour la normalisation ..................................................................... 17
2.4 Relation CRAterre et Norme ....................................................................................... 17
2.5 L’utilisation des normes : .......................................................................................... 18
2.6 Blocs de terre comprimée (BTC) ................................................................................ 21
2.7 Normes propres aux blocs de terre comprimée (BTC) ............................................... 23
   a. Afrique [NOR98] ........................................................................................................ 23
   b. Inde [VEN 92] ........................................................................................................... 24
   c. Pérou, Brésil et Cuba [CYT 93] ................................................................................ 24
   d. Etats-Unis [CID 91] .................................................................................................. 25
2.8 Recensement des normes et recommandations concernant le BTC .......................... 25
2.9 La Norme XP P 13-901 ............................................................................................... 27
   2.9.1 Objectif .................................................................................................................... 27
   2.9.2 Domaine d’application .......................................................................................... 27
   2.9.3 Caractéristiques mécaniques des blocs ................................................................. 27
2.10 Capillarité .................................................................................................................. 28
2.11 Récapitulatif des caractéristiques des matériaux ...................................................... 28
2.12 Critères de choix des matériaux ................................................................................ 30
   2.12.1 La distribution granulométrique ......................................................................... 31
   2.12.2 Les limites d’Atterberg ....................................................................................... 34
   2.12.3 La plasticité .......................................................................................................... 35
   2.12.4 Compactage ......................................................................................................... 37
   2.12.5 La résistance à la compression simple ................................................................. 37
   2.12.6 Résistance à la flexion (essai 3 points) ................................................................. 41
2.12.7 Durabilité ................................................................. 42
2.12.8 Propriétés chimiques .................................................. 43
2.12.9 La stabilisation .......................................................... 43
2.13 Comparaison thermique entre la terre et le parpaing ............... 43
2.14 Comparaison entre les matériaux de terre crue et bloc de béton .... 44
2.15 CONCLUSION .................................................................. 44

CHAPITRE 03 : RESULTATS EXPERIMENTAUX

3.1 INTRODUCTION .................................................................. 47
3.2 IDENTIFICATION DU MATERIAU ......................................... 47
3.3 Essais au laboratoire ............................................................ 47
3.4 Essais à Kinshasa (Congo) .................................................... 47
   3.4.1 Granulométrie et limites d'Atterberg ............................... 47
3.5 Etude de Construction en terre à damier dans le sud-ouest de la France ...... 53
   3.5.1 Procédures .................................................................. 53
   3.5.2 Résultats ..................................................................... 53
3.6 Essais d’étude secteur sauvegardé de la ville de Laghouat ............... 55
   3.6.1 La localisation des prélèvements des échantillons .............. 55
   3.6.2 Les analyses granulométriques des échantillons .................. 56
   3.6.3 Les limites d’Atterberg .................................................. 56
   3.6.4 Résistance à la compression ........................................... 58
   3.6.5 Préparation du matériau .................................................. 58
   3.6.6 Observation et interprétation : L’Adobe ancien .................. 58
3.7 Confection des briques de terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksour sahariens ................................................................. 59
   3.7.1 Analyse granulométrique du sable de dunes ....................... 59
   3.7.2 Résultats de mesure des propriétés mécaniques .................. 60
3.7.3 Analyse granulométrique par sédimentation pour l’argile (norme NF P 94-056/ NF P 94-057) .................................................................................................................................................. 61
3.7.4 Limite d’Atterberg (Norme NF P 94-051) .................................................................................................................. 61
3.7.5 Variation des Résistances à la flexion et à la compression de l’argile plus fibres 62
3.8 Caractérisation d’un composite terre-fibres végétales : la bauge ......................... 62
  3.8.1 Sols initiaux ......................................................................................................................................................... 62
  3.8.2 Analyse granulométrique ...................................................................................................................................... 63
  3.8.3 Activité argileuse .................................................................................................................................................. 64
  3.8.4 Caractéristiques de compactage .......................................................................................................................... 65
  3.8.5 Formulations des composites terre-fibre ............................................................................................................ 66
3.9 Analyse d’un échantillon de terre de Komboinsé (Ouagadougou Burkina Faso) : ... 66
  3.9.1 Granulométrie et sédimentométrie ....................................................................................................................... 66
  3.9.2 LIMITES D’ATTERBERG ....................................................................................................................................... 67
  3.9.3 ADÉQUATION DE LA TERRE POUR LA PRODUCTION DE BTC .............. 67
3.10 CONCLUSION ......................................................................................................................................................... 71
CONCLUSION GENERALE ................................................................................................................................. 72
BIBLIOGRAPHIE ....................................................................................................................................................... 74
ملخص

يقع هذا العمل في إطار البناء الترابي بشكل عام والمعايير بشكل خاص. تم إجراء دراسة ببليوغرافية عن أنواع الإنشاءات الترابية وخصائصها الرئيسية وتقنيات البناء. بعد ذلك ناقشنا بالتفصيل المعايير المتعلقة بالبناء الترابي بشكل عام والكائلا الترابية المضغوطة بشكل خاص. ننتهي بدراسة مقارنة بين البحث النظري وما توصي به المعايير من حيث حجم الجسيمات واللدونة والمقاومة.

الكلمات الدالة
الأرض الخام ، الطوب الأرضي المضغوط ، المعيار ، حجم الحبوب ، اللدونة ، القوة.

Résumé

Le présent travail s’inscrit dans le cadre de la construction en terre en général et des normes en Particulier.
Une étude bibliographique a été réalisée sur les types de construction en terre et leurs principales caractéristiques et technique constructives.
Après on a abordé d’une façon détaillée les différentes normes qui se rapporte à la construction en terre en général et les blocs de terre comprimés en particulier.
On termine avec une étude comparative entre les recherches théoriques et ce que recommande les normes en matière de granulométrie, plasticité et résistance.

Mots clés
Terre crue, brique de terre compressée, norme, granulométrie, plasticité, résistance.
This work is part of earthen construction in general and standards in particular.

A bibliographical study has been carried out on the types of earthen construction and their main characteristics and construction techniques.

This was followed by a detailed discussion of the various standards relating to earthen construction in general and compressed earth blocks in particular.

It ends with a comparative study between the theoretical research and what the standards recommend in terms of granulometry, plasticity and resistance.

**Key words**

Raw earth, compressed earth brick, standard, granulometry, plasticity, resistance.
LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS

LISTE DES ABREVIATIONS

AFNOR : Association française de normalisation.

CNERIB : centre national d’études et de recherches intégrées du Bâtiment.

BTC : Brique de terre comprimée.

CRAterre : Centre international de la construction en Terre.

CEB : Compressed earth block.

BTM : Brique de Terre Moulée.

ORAN : Organisation Régionale Africaine de Normalisation.

TE : la terre enfoncée.

A : Adobe.

P : Pisé.


CDI : Le centre de développement industriel.

MT : Mortier de terre.

MBTC : Maçonneries de bloc de terre comprimée.

ENTPE : Ecole Nationale des travaux publics de l’état de Lyon.
**WHEAP** : World Heritage Earthen Architecture Programme (le Programme du patrimoine mondial pour l’architecture de terre).

**ICCCROM** : The International Centre for the Study of the Preservation and Restoration of Cultural Property (le Centre international d’études pour la conservation et la restauration des biens culturels).

**ICOMOS** : The International Council on Monuments and Sites (le Conseil international des monuments et des sites).

**ISCEAH** : International Scientific Committee on Earthen Architectural Heritage (Comité scientifique international sur le patrimoine architectural de terre).

**ARSO** : African Regional Organization for Standardization.

**NZS** : New Zélande standard.

**NTE** : NORMA TÉCNICA DE EDIFICACION.

**MOPT** : Ministerio de Obras Públicas y Transportes.
LISTE DES NOTATIONS

**IP** : Indice de plasticité.

**IR** : Indice de retrait.

**WL** : Limite de liquidité.

**WP** : Limite de plasticité.

**WR** : Limite de retrait.

**R** : Module de Rupture.

**λ** : Conductivité Thermique.

**e** : L’épaisseur.

**L** : La Largeur.

**H** : La hauteur.

**F** : La force.

**S** : La surface.

**Rf** : résistance à la flexion.

**Re** : résistance à la compression.

**Dmax** : Diamètre maximale.

**W** : Teneur en eau.

**Wopn** : Teneur en eau optimale.

**ρdopn** : Masse volumique sèche maximale à l’optimum Proctor normal.

**Ca** : Coefficient d’activité.

**VBs** : Valeur au bleu de méthylène.
**fb**: résistance à La Traction.

**fk**: résistance nominale à la compression Sec de la maçonnerie.

**T**: Tolérance de dimensions.

**G**: Cisaillement.

**Cb**: le coefficient d'absorption.

**E**: Effusivité.
LISTE DES TABLEAUX

**TABLEAU 1-1:** Répères chronologiques de la construction en terre (C. Delbecque, 2011) ................................................. 2

**TABLEAU 1-2:** Les opérations de construction en terre en Algérie (Source : CNERIB, 2000) .................................................................................................................................................................................. 4

**TABLEAU 1-3:** Avantages et inconvénients des constructions en terre crue ................................................................. 5

**TABLEAU 1-4:** Avantages et inconvénients des constructions en BTC (Chahma Sabah, 2018) .................................................................................................................................................................................. 12

**TABLEAU 2-1:** Les types de recommandations pour le choix des sols (Taleb Boulerbah, 2019) .................................................................................................................................................................................. 19

**TABLEAU 2-2:** Les types de recommandations pour le choix des sols (Taleb Boulerbah, 2019) .................................................................................................................................................................................. 23

**TABLEAU 2-3:** Listes des normes et recommandations concernant le BTC ................................................................. 26

**TABLEAU 2-4:** Classes de résistance en compression sèche (AFNOR, 2001) ........................................................................... 27

**TABLEAU 2-5:** Classes de résistance en compression humide (AFNOR, 2001) ........................................................................... 27

**TABLEAU 2-6:** Classes de résistance à l’abrasion (AFNOR, 2001) ........................................................................................................ 28

**TABLEAU 2-7:** Les caractéristiques des briques de terre crue (BTC) (ART terre, 2018) .................................................. 28

**TABLEAU 2-8:** Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pise, BTC) (Hakkoum Soumia, 2015) .................................................................................................................................................................................. 29

**TABLEAU 2-9:** Caractéristiques des briques terres crues (Krarti et Reggadi, 2011) .................................................. 30

**TABLEAU 2-10:** Système simplifié de classification des sols selon la norme ASTM D2487 avec une évaluation qualitative de l’aptitude a la construction en terre (Van-Damme et Houben, 2017) .................................................................................................................................................................................. 31

**TABLEAU 2-11:** Normes de détermination de la résistance a la compression. A) Norme [CYT 93] Perou, Bresil et Cuba ; B) Norme Afrique ORAN [NOR 98] ; C) Norme [VEN 92] Inde. Il s’agit de blocs 29,5x14x9, 5 cm (LxLxH, d’apres P’Kla, 2002) .................................................................................................................................................................................. 39

**TABLEAU 2-12:** Normes concernant l’épaisseur du mur en fonction des résistances a la compression pour le pise (Total Boox et TBX, 2012) .................................................................................................................................................................................. 40

**TABLEAU 2-13:** Résistances en compression des briques de terres comprimée (CRATerre, 1995) .................................................................................................................................................................................. 41

**TABLEAU 2-14:** Comparaison thermique d’une paroi de 20cm d’épaisseur (OLIVA, COURGEY, La conception bioclimatique, Editions Terre Vivante, 2006) .................................................................................................................................................................................. 43
TABLEAU 2-15: COMPARAISON ENTRE LE BTC ET D’AUTRES MATERIAUX DE CONSTRUCTION
(Rigassi, 1995 ; Caritas Lubumbashi, 2011 ; Chirhalwirwa Mwilarhe, 2008 ; Moles et al. 2009 ; CRA Terre et Urbplan, 2010 ; Prix-construction, 2019). ................................................................. 44

TABLEAU 3-1: RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES TENEURS DES DIFFERENTES FRACTIONS DU SOL. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES TENEURS DES DIFFERENTES FRACTIONS DU SOL (Jimenez et Guerrero, 2007). ........................................................................................................ 47

TABLEAU 3-2: RESULTATS DE L’ANALYSE DES LIMITES D’ATTERBERG. (Jimenes et Guerrero, 2007) .............................................................................................................................................. 51

TABLEAU 3-3: CLASSIFICATION DES SOLS SUR BASE DE L’INDICE DE PLASTICITE (Casagrande, 1958 ; Centre de recherches routieres, 1981). ......................................................................................................................................... 51

TABLEAU 3-4: LIMITES DE LIQUIDITE ET INDICES DE PLASTICITE MAXIMUM ET MINIMUM OBTENUS DANS LES REFERENCES D’APRES Jimenez et Guerrero, 2007 ........................................................................................................................................ 52

TABLEAU 3-5: CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES BRIQUES D’ADOBE. (Jean-Emmanuel Aubert, Alain Marcom, Priscia Oliva, Pauline Segui ;2014). ............................................................................................................. 55

TABLEAU 3-6: LES LIMITES D’ATTERBERG DES TROIS ECHANTILLONS « A. B. C » (Taleb Boulerabah, 2019). .................................................................................................................................................. 57

TABLEAU 3-7: RESISTANCE A LA COMPRESSION EN FONCTION DU POURCENTAGE DE PAILLE POUR TOUTES LES TERRES. (Taleb Boulerabah, 2019). ........................................................................................................................................ 58

TABLEAU 3-8: ANALYSE GRANULOMETRIQUE SABLE DES DUNES (Mekhermeche Abdessalme, 2012). ......................................................................................................................................................... 59

TABLEAU 3-9: RESISTANCES A LA FLEXION ET A LA COMPRESSION PAR RAPPORT AU POURCENTAGE DE SABLE DE DUNE (Mekhermeche Abdessalme, 2012). ......................................................................................... 60

TABLEAU 3-10: CLASSIFICATION DES ARGILES SELON Atterberg. (Mekhermeche Abdessalme, 2012). ......................................................................................................................................................... 61


TABLEAU 3-12: PARAMETRES OBTENUES PAR LES COURBES GRANULOMETRIQUES. (Tuan Anh Phung, 2018). .................................................................................................................................................. 63

TABLEAU 3-13: VALEUR AU BLEU DE METHYLENE, LIMITES D’ATTERBERG DES 6 SOLS. (Tuan Anh Phung, 2018). .................................................................................................................................................. 64

TABLEAU 3-14: TENEUR EN EAU L’OPTIMUM PROCTOR ET DENSITE SECHE CORRESPONDANT DES 6 SOLS (Tuan Anh Phung, 2018). .......................................................................................................................................... 65
LISTE DES FIGURES

**FIGURE 1-1**: DEPENSES D’ENERGIE DES DEUX DIFFERENTES TECHNIQUES EN BTC ET EN BETON (Mesbah et Olivier, 2016). .................................................................................................................. 1

**FIGURE 1-2**: ARCHITECTURE DE TERRE DANS LE MONDE (Paulus, 2015). ........................................... 3

**FIGURE 1-3**: ROUE DES DIFFERENTES TECHNIQUES DE CONSTRUCTION EN TERRE. (Guillaud et Houben, 1998; cite par Paulus, 2015). ........................................................................................................... 6

**FIGURE 1-4**: LA GRANDE MOSQUEE DE DJENNE, INSCRITE AU PATRIMOINE MONDIAL DE L’UNESCO AU MALI, EST L’UN DES PLUS GRANDS EDIFICES EN TERRE CRUE DU MONDE. (Source : https://www.saphirnews.com/Mali-la-remarquable-mosquee-de-Djenne-alimentee-a-l-energie-solaire_a26277.html). ................................................................................................................................. 7

**FIGURE 1-5**: CONSTRUCTION EN ADOBE. (La Source : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redecoUVRIR.html). ................................................................................................................................. 7

**FIGURE 1-6**: PHOTO MANSOURAH, TEMECEN. .................................................................................................. 8

**FIGURE 1-7**: CONSTRUCTION EN PISE. (La Source : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redecoUVRIR.html). ................................................................................................................................. 8

**FIGURE 1-8**: MOSQUEE DE BOBO-DIOULASSO .................................................................................................. 9

**FIGURE 1-9**: CONSTRUCTION EN BAUGE ........................................................................................................ 9

**FIGURE 1-10**: UNE MAISON EN TORCHIS DANS LES VILLAGES DE LA VALLEE DE LARGUE, FRANCE ................................................................................................................................. 10

**FIGURE 1-11**: CONSTRUCTION EN TORCHIS. (La Source : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redecoUVRIR.html). 10

**FIGURE 1-12**: MAISON PALMIER A MARRAKECH, MAROC ................................................................................... 11

**FIGURE 1-13**: CONSTRUCTION EN BTC ........................................................................................................... 12


**FIGURE 1-16**: L’ECOLE MATERNELLE DES ROCHES DE CONDRIEU. (La Source : https://www.amc-archi.com/photos/brenas-ducerain-realise-une-ecole-maternelle-aux-roches-de-condrieu,9037/L-ECOLE-MATERNELLE-DES-ROCH.6). ................................................................................................................................. 14
FIGURE 1-17: CENTRE SPORTIF SUR LE CAMPUS UNIVERSITAIRE KERLAN A RENNES « REALISER EN « 2010 - 2012 ». (LA SOURCE :

.................................................................................................................................................. 21

FIGURE 2-2 : NORMES DE DETERMINATION DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION. A) NORME [CYT
93] PEROU, BRESEL ET CUBA ; B) NORME AFRIQUE ORAN [NOR 98] ; C) NORME [VEN 92] INDE. IL
S’AGIT DE BLOCS 29,5X14X9, 5 CM (LXLM, P’KLA, 2002). .............................................................. 24


FIGURE 2-4: Fuseau du diagramme de texture des terres (AFNOR, 2001). ........................................... 35


FIGURE 2-6: Fuseau du diagramme de texture des terres (AFNOR, 2001). ........................................... 38

FIGURE 2-7: Valeurs experimentales et carte de plasticité (A.W. Bruno, D. Gallipoli, C.
Perlot, J. Mende s, N. Salmon ; 2015). .............................................................................................. 39

FIGURE 2-8: Fuseaux de compactage recommandes pour construire en BTC, en pise ou en
adobe selon Houben and Guillaud [1994]...................................................................................... 41

FIGURE 2-9: Resistances a la compression minimales admises pour les BTC (Lavie Arsenoe
Mango-Itulamy ,2019). ......................................................................................................................... 44

FIGURE 2-10: Compressions des materiaux terre (Van-Damme and Houben, 2017). ............ 46

FIGURE 2-11: Schema et dispositif de l’essai de compression (Halleux, 2012, modifie)...... 49

FIGURE 2-12: Propriete mecanique de la terre : la resistance a la compression (Taleb
Boulerbah, 2019). ............................................................................................................................. 50


FIGURE 2-14: Essai d’érosion au goutte-a-goutte (bloc non stabilise) (Jaime CID-FALCETO;
Pablo Mosquera; Francisco Marcos; Cruz Calleja Peruch; Ignacio Cañas, 2012)............ 42

FIGURE 2-15: Essai d’érosion au goutte-a-goutte (bloc stabilise) (Jaime CID-FALCETO;
Pablo Mosquera; Francisco Marcos; Cruz Calleja Peruch; Ignacio Cañas, 2012)............ 42

FIGURE 3-1: Courbes granulométriques des echantillons analyses Wetshondo (2002). . 48

FIGURE 3-2: Repartition de la taille des particules de la terre contene dans les
adobes. (Jean-Emmanuel Aubert, Alain Marcom ,Priscia Oliva, Pauline Segui , 2014). .... 54
FIGURE 3-3: LIMITES ATTERBERG DE LA TERRE CONTENUE DANS LES ADOBES. (JEAN-EMMANUEL AUBERT, ALAIN MARCOM, PRISCIA OLIVA, PAULINE SEGUI, 2014) .......................................................... 54
FIGURE 3-4: PRELEVEMENT DES ECHANTILLONS D’ADOBE A, B, C (TALEB BOULERABAH, 2019) .... 55
FIGURE 3-5: LES COURBES GRANULOMETRIQUES DES TROIS ADOBES. A, B, C. (TALEB BOULERABAH, 2019) ........................................................................................................ 56
FIGURE 3-6: CLASSIFICATION DES SOLS FINS SUR LE DIAGRAMME DE CASAGRANDE ............... 57
FIGURE 3-7: COURBE GRANULOMETRIQUE DE SABLE DES DUNES. (MEKHMERECHE ABDESSALME, 2012) ........................................................................................................... 60
FIGURE 3-8 : COURBE GRANULOMETRIQUE D’ARGILE (MEKHMERECHE ABDESSALME, 2012) .... 61
FIGURE 3-9: SITES DE PRELEVEMENTS DES SOLS (TUAN ANH PHUNG, 2018) ......................... 62
FIGURE 3-10: COURBES GRANULOMETRIQUES DES 6 SOLS (TUAN ANH PHUNG, 2018) ............ 63
FIGURE 3-11: COURBES PROCTOR DES 6 SOLS. (TUAN ANH PHUNG, 2018). .............................. 65
FIGURE 3-12: COURBE GRANULOMETRIQUE DES TROIS SOLS ET DEUX MELANGES (TUAN ANH PHUNG, 2018) ........................................................................................................... 66
FIGURE 3-13: COURBE GRANULOMETRIQUE OBTENUE PAR TAMISAGE ET SEDIMENTOMETRIE(JEHANNE PAULUS, 2015). ................................................................. 67
FIGURE 3-14: GRANULARITE TOUT A FAIT ADAPTEE A LA PRODUCTION DES BTC (JEHANNE PAULUS, 2015) .................................................................................................................. 68
FIGURE 3-15: Fuseau limite du diagramme de plasticité (Jehanne Paulus, 2015) ....................... 69
FIGURE 3-16: ETAT COHESIF DE LA TERRE. (Jehanne Paulus, 2015) ........................................... 69
FIGURE 3-17: COEFFICIENT D’ACTIVITE DE LA TERRE (Jehanne Paulus, 2015) ......................... 70
FIGURE 3-18: EXPANSIVITE DE LA TERRE (Jehanne Paulus, 2015) ............................................. 71
Depuis 10 000 ans, la terre crue a accompagné l’homme dans son habitat. Vu son intérêt économique et sa facilité d’exploitation, elle s’impose de plus en plus dans les constructions écologiques consommant moins d’énergie. Le matériau terre connaît actuellement un regain d’intérêt suite à la crise du logement.

La construction en terre connait un nouvel essor à travers le monde, car elle contribue à faire face aux problèmes liés à l’environnement, et l’épuisement de la ressource naturelle :

• Problème d’épuisement des ressources naturelles : les experts estiment qu’au rythme actuel, nous aurons épuisé les réserves de pétrole d’ici une quarantaine d’année, et la production de pétrole qui fournisse l’énergie pour la construction moderne ne préviendra pas à suivre la croissance de la demande 2015-2035 (ORHL, 2016).

• Problème d’émission des gaz à effet de serre : Le protocole de KYOTO engage les pays qui l’on ratifié à réduire globalement leur émission de 5,2% en moyenne entre 2008 et 2012, par rapport aux niveaux de 1990. Transport et bâtiment les deux causes principales de l’émission de gaz à effet serre.

Par contre en Algérie, l’architecture de terre continue à être écartée de tout programme de développement malgré les difficultés enregistré dans différents domaines :

• L’incapacité de répondre aux besoins de logement, la construction en terre serait d’un soutien inestimable.

• La détérioration du cadre de vie des populations en zones rurales. L’architecture de terre, comme moyen redynamiser l’économie locale et améliorer les conditions de vie.

• Des problèmes environnementaux engendrés par les villes algérienne, incapable de gérer leurs déchets et la pollution de développement, L’architecture de terre l’une des solutions de ces problèmes, vue ses qualité environnementales.

C’est dans cette problématique générale que nous insérons notre travail de l’obtention de master porté sur la connaissance des différentes techniques de construction en terre et les normes utiliser dans ce domaine.

La norme est considérée comme l’un des principales moyennes pour construire en terre, elle permet de connaître les différentes caractéristiques qui autorise le sol à être utilisé dans la construction selon les recommandations citées par la norme.
L’objectif principal de ce travail est de faire une recherche bibliographique de façon générale sur la construction en terre. Pour permettre ensuite d’entamer des investigations sur les normes et de décortiquer la règlementation en détail. Suivant les critères dictés par les normes, on compare si divers matériaux en terre rentrent dans le cadre des recommandations des normes citées ou non. Dans cette optique, ce mémoire sera organisé en trois chapitres.

Après l’introduction générale, le premier chapitre aborde d’une manière globale la construction en terre, ses avantages et inconvénients, ainsi que les différents types de constructions en terre.

Le deuxième chapitre, est consacré à la thématique principale du mémoire en l’occurrence les normes de construction en terre et à propos les documents qui sont utilisés dans différents pays ainsi que leurs critères de granulométrique, plasticité, compactage et à la fin leurs résistances et propriétés thermiques.

Le troisième et dernier chapitre, est dédié aux résultats d’essais trouvés dans la littérature en les comparants avec notre travail réalisé dans le chapitre 02.

Nous terminons notre mémoire par une conclusion générale qui regroupe l’ensemble des points importants abordés dans la littérature recueillie.
CHAPITRE 1

GÉNÉRALITÉS

SUR

LA CONSTRUCTION EN TERRE
1.1 INTRODUCTION

La terre, matériau disponible en quantité, est utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l’habitat le plus répandu au monde. L’architecture de terre permet de construire des édifices simples ou monumentaux dans des environnements variés (Chazelle, 2003).

Cette technique aux nombreux avantages écologiques, thermiques et économiques est supplantée dans de nombreux pays par la construction en béton, type d’architecture qui ne semble pourtant pas adapté à tous les contextes environnementaux et sociaux. Il semble en effet que la construction en terre crue ait acquis une connotation négative (habitat des pauvres, de mauvaise qualité, etc.).

L’énergie d’une construction réalisée à l’aide de la terre crue est très faible par rapport à celle du béton,

Le graphe de la figure 1-1 montre la dépense d’énergie des deux différentes techniques en BTC et en béton :

![Graphique de la figure 1-1](image.png)

**Figure 1-1**: Dépenses d’énergie des deux différentes techniques en BTC et en béton (Mesbah et Olivier, 2016).

Dans ce chapitre nous allons présenter toutes les définitions de base sur le matériau terre.
1.2 HISTORIQUE
La terre est utilisée comme matériau de construction depuis dix millénaires sur tous les continents. Ce terme désigne un matériau sédimentaire naturel présent dans les sols. Il s’agit d’un des matériaux de construction les plus anciens de l’histoire de l’humanité. D’après l’Unesco, 20% du nombre de sites enregistrés comme patrimoine mondial sont partiellement construit en terre.

1.2.1 Chronologies de la construction en terre
Le tableau suivant représente les principales époques historiques de l’utilisation de la terre dans la construction.

**Tableau 1-1:** Repères chronologiques de la construction en terre (C. Delbecque 2011).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Temps</th>
<th>Événement</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>11 000 ans</td>
<td>Premières traces de la construction en terre en Amérique du sud.</td>
</tr>
<tr>
<td>10 000 ans</td>
<td>En Syrie construction en terre par empilement de pains de terre façonnés à la main.</td>
</tr>
<tr>
<td>8 500 ans</td>
<td>Apparition de la brique de terre en Turquie.</td>
</tr>
<tr>
<td>8 000 ans</td>
<td>Apparition de l’utilisation de la terre dans l’habitat en Europe occidentale.</td>
</tr>
<tr>
<td>5 000 ans</td>
<td>Apparition des premières villes d’architecture de terre crue en Mésopotamie.</td>
</tr>
<tr>
<td>1860</td>
<td>Apparition des fours à feux continus qui permettent une production plus industrielle de la brique.</td>
</tr>
<tr>
<td>1918 et 1945</td>
<td>Début des reconstructions suite aux conflits mondiaux et abandon de la terre crue en milieu urbain.</td>
</tr>
<tr>
<td>A partir de 1980</td>
<td>Redécouverte de la terre crue pour la sauvegarde du patrimoine dans un premier temps puis pour ses qualités environnementales.</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Aujourd’hui dans le monde 2 milliards de personnes vivent dans un habitat en terre crue dans 150 pays différents. Géographiquement les constructions en terre crue sont présentes dans presque toute l’Afrique, le Moyen - orient l’Asie, l’Europe, l’Australie et les deux ’Amériques (Voir Figure 1-2).

Figure 1-2 : Architecture de terre dans le monde (Paulus, 2015).

1.3 La construction en terre en Algérie

Juste quelques années après l’indépendance, l’Algérie a manifesté un certain intérêt pour la revalorisation de l’architecture de terre. Dans le tableau 1-2 nous consignons quelques opérations pilotes citées par ordre chronologique.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Année</th>
<th>Réalisation</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>1969</td>
<td>Réalisation de 136 logements en pisé au village agricole de Bouhlilet à Batna.</td>
</tr>
<tr>
<td>1971</td>
<td>Une équipe franco-belge réalise à Zéralda un groupe expérimental d’habitations rurales</td>
</tr>
<tr>
<td>1973</td>
<td>30 des 300 logements du village de Mustapha Ben Brahim (Wilaya de Sidi Belabbès), sont réalisés en pisé.</td>
</tr>
<tr>
<td>1975</td>
<td>Le village d’Abadla a été construit selon le procédé de la terre remplissant</td>
</tr>
<tr>
<td>1976</td>
<td>100 logements du village agricole de Felliache à Biskra sont réalisés en Toub.</td>
</tr>
<tr>
<td>1980</td>
<td>120 logements du village agricole de Madher à Boussaada sont réalisés en BTS.</td>
</tr>
<tr>
<td>1981</td>
<td>40 logements sont réalisés à Chéraga près d’Alger en blocs de terre comprimée (BTC)</td>
</tr>
<tr>
<td>1984</td>
<td>Un prototype bioclimatique fut réalisé à Tamanrasset en BTC. Un prototype fut réalisé au CNERIB en BTC.</td>
</tr>
<tr>
<td>1986</td>
<td>10 logements sont réalisés à Adrar en BTC. 10 logements sont réalisés à Reggane en BTC.</td>
</tr>
<tr>
<td>1994</td>
<td>24 logements sont réalisés à Tamanrasset par l’office de promotion et de gestion immobilière en BTC. 44 logements sont réalisés par l’ETR de Tamanrasset en BTC.</td>
</tr>
<tr>
<td>1996</td>
<td>Un prototype en pisé fut réalisé au CNERIB.</td>
</tr>
<tr>
<td>2006</td>
<td>Un projet intitulé « réalisation d’un logement rural avec efficacité énergétique » est lancée au CNERIB et financé par l’union européenne.</td>
</tr>
</tbody>
</table>
1.4 Principaux avantages et inconvénients des constructions en terre crue

Dans le tableau suivant, nous avons répertorié les avantages et inconvénients de la construction en terre. Parmi les principaux avantages beaucoup de paramètres sont liés à l’environnement (abondance de la matière première, recyclable, bon isolant, économique…).

**Tableau 1-3:** Avantage et inconvénients des constructions en terre crue.

<table>
<thead>
<tr>
<th>Avantages</th>
<th>Inconvénients</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>• Disponible localement en quantité.</td>
<td>• Principal point faible est la durée de mise en œuvre des techniques constructives.</td>
</tr>
<tr>
<td>• Nécessite peu d’énergie de fabrication.</td>
<td>• Absence de règles professionnelles relatives à ces techniques constructives.</td>
</tr>
<tr>
<td>• Matériau à 100% recyclable.</td>
<td>• Demande un savoir-faire particulier que ce soit dans sa mise en œuvre que dans le choix d’utilisation des techniques.</td>
</tr>
<tr>
<td>• Grande inertie calorifique.</td>
<td>• La composition de la terre peut varier très fortement.</td>
</tr>
<tr>
<td>• Très bonne régulation hygrométrique.</td>
<td>• Nécessite une certaine connaissance du terrain.</td>
</tr>
<tr>
<td>• Bonne isolation phonique et thermique</td>
<td>• En fonction de sa composition, la terre crue est plus ou moins sensible aux intempéries.</td>
</tr>
<tr>
<td>• Régulation de l'humidité relative de l'habitation Elle contribue à l'inertie thermique.</td>
<td>• Grande dispersion chimique entre les sols argileux (Dispersion dans l'eau et floculation : les particules fines restent en suspension).</td>
</tr>
<tr>
<td>• Elle est respirante, saine et sans aucune émanation nocive.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>• Contribue au confort acoustique et esthétique de l'habitat.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>• Prix imbattable.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>• Grande durabilité.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>• Peu d’entretien.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>• Excellente résistance au feu.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>• Résistance aux insectes xylophages.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>• Résistance aux champignons et à la moisissure.</td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>
1.5 Techniques de construction en terre

Le choix de la technique de mise en œuvre dépend de la culture et du savoir-faire des maçons ou charpentiers. La terre crue, en opposition à la terre cuite, se trouve à même le sol. Selon la plasticité et la structure granulaire de la terre, les modes de construction varient. Houben et Guillaud (1989) ont répertorié les principales techniques de construction en terre crue (Figure 1-3).

![Figure 1-3: Roue des différentes techniques de construction en terre CRAterre en 1986 (Guillaud et Houben, 1998 ; cité par Paulus, 2015).](image)

Ci-après on présentera d’une manière synthétisée les principales caractéristiques des différents modes de constructions en terre :

1.5.1 Adobe

L’adobe est une brique de terre crue façonnée à la main ou moulée, puis séchée pendant quelques jours à l’air libre. Argiles, limons et sables sont mélangés à de l’eau pour atteindre l’état plastique, et parfois à des fibres pour réduire les fissures lors du séchage.
(voir figure1-5).

Une vingtaine de centres historiques en adobe sont classés au patrimoine mondial, dont Shibam au Yémen et la grande mosquée de Djenné au Mali (figure 1-4).

Figure 1-4 : La grande mosquée de Djenné, inscrite au patrimoine mondial de l’UNESCO au Mali, est l’un des plus grands édifices en terre crue du monde. (Source : https://www.saphirnews.com/Mali-la-remarquable-mosquee-de-Djenne-alimentee-a-l_energie-solaire_a26277.html).

Figure 1-5: Construction en Adobe. (La Source : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redcouvrir.html).
1.5.1 Pisé

Le pisé permet de construire des murs massifs, qui peuvent être porteurs, en damant entre des banches de fines couches de terre pulvérulente. Le mélange étant à peine humide, le décoffrage est immédiat (voir Figure 1-7). Les strates compactées restent visibles, avec une texture riche par son grain et sa couleur.

À cause de la technicité liée à l’usage du coffrage, le pisé est plus récent que l’adobe. De très anciens vestiges (9e siècle avant J.-C.) ont été repérés en Tunisie, et de nombreux sites inscrits au patrimoine mondial de l’UNESCO en témoignent : tronçons de la Grande Muraille de Chine et localement on a le monument de Mansourah à Tlemcen (Figure 1-6).

Figure 1-6: Photo Mansourah, Tlemcen.

Figure 1-7: Construction en pisé. (La Source : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redcouvrir.html).
1.5.2 Bauge

Un mur en bauge est épais de 40 à 60 cm, voire plus, et monolithique comme le pisé. Il est généralement constitué d’un empilement de boules de terre, souvent additionnée de fibres végétales et parfois d’éléments minéraux (éclats de silex ou de terre cuite broyée). Dans la plupart des régions du globe, les murs sont façonnés à la main comme une sculpture géante (voir Figure 1-9).

Figure 1-8 : Mosquée de Bobo-Dioulasso (https://altahine.wordpress.com/2012/05/13/lancienne-mosquee-de-bobo-dioulasso/).

Figure 1-9: Construction en bauge.
1.5.3  Torchis

Les terres à torchis sont généralement fines, limoneuses-argileuses et collantes. L’absence de sable pouvant entraîner des fissurations, on y ajoute souvent des fibres végétales. Le mélange, mis en œuvre à l’état plastique, est étalé sur un lattis (bois, osier, bambou) ou un clayonnage (Voir Figure 1-11), fixé dans une ossature porteuse en bois appelée colombage. On a comme exemple les maisons Ottomanes de Safranbolu en Turquie (Figure 1-10).

Figure 1-10: une maison en torche dans les villages de la vallée de Largue, France.

Figure 1-11: Construction en Torchis. (La Source : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redecouvrir.html).
1.5.4 Briques de terre compressée

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont fabriqués dans des presses manuelles (Figure 1-13) ou mécanisées avec de la terre humide, composée d’une proportion équilibrée d’argiles, limons, sables et petits graviers. L’addition de ciment ou de chaux est courante pour augmenter les caractéristiques mécaniques et la résistance à l’eau.

Les blocs de terre comprimée (BTC) ne sont apparus que très récemment. Vers 1950, la première presse manuelle produisait 300 à 800 briques quotidiennes, elle a conquis le marché international par sa simplicité et sa légèreté. Après plusieurs perfectionnements, la technique a pris son essor dans le cadre de programmes d’habitat économique en Afrique par exemple le Maroc (Figure 1-12) et en Amérique latine.

Figure 1-12: Maison palmier à Marrakech, Maroc
On présente dans le tableau suivant les principaux avantages et inconvénients de la construction en BTC.

**Tableau 1-4: Avantages et inconvénients des constructions en BTC (Chahma Sabah, 2018).**

<table>
<thead>
<tr>
<th>Avantages</th>
<th>Inconvénients</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>• La BTC est un matériau écologique.</td>
<td>• Fabrication des briques sont lente.</td>
</tr>
<tr>
<td>• La BTC procure un confort thermique et phonique excellent.</td>
<td>• Fragilité : au moindre choc la brique se brise ou s’effrite.</td>
</tr>
<tr>
<td>• La BTC offre une grande résistance à la compression.</td>
<td>• Se détériore sous l’effet du gel.</td>
</tr>
<tr>
<td>• La BTC présente un intérêt architectural et esthétique.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>• La BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>• La BTC est simple à mettre en œuvre.</td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>
1.6 La construction contemporaine en terre dans le monde

Dans le cadre de la construction écologique qui respecte l’environnement, la construction en terre devient de nos jours à l’actualité. Il y a plusieurs édifices dans des pays développés qui sont construit en utilisant la terre. Ci-après quelques exemples de cette technique ancestrale qui est devenue de nos jours « à la mode ».

Figure 1-14 : La Maison des Plantes de Laufen « réalisée en 2014 ». (La Source : https://www.espazium.ch/fr/actualites/ricola-ouvre-une-maison-des-plantes-laufon).

Ecole modèle d'architecture moderne et fonctionnelle, construite avec des matériaux locaux et de la main d'œuvre locale. (Architecte : Diébédo Francis Kéré, Burkinabè natif de Gando) (Voir figure 1-15).

Figure 1-16 : L’école maternelle des Roches de Condrieu. (La Source : https://www.amc-archi.com/photos/brenas-doucerain-realise-une-ecole-maternelle-aux-roches-de-condrieu,9037/l-ecole-maternelle-des-roch.6).

Figure 1-17: Centre sportif sur le campus universitaire Kerlan à Rennes « réalisée en « 2010 - 2012 ». (La Source : https://www.architectes.org/sites/default/files/fichiers/actualites/Prix_20architecture%20terre_20-%20Presse2.pdf).
1.7 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté la construction en terre crue d’une manière générale. Aussi, on a défini les différentes techniques de terre crue en mettant en avant les avantages et inconvénients de la construction en terre en général et la brique de terre compressé en particulier car c’est la technique la plus utilisée actuellement.

A travers cette petite recherche bibliographique, nous constatons que les constructions en terre sont d’une part écologique respectant l’environnement et d’autre part économique.

Pour toutes ces raisons des fabricants, des entrepreneurs, des architectes et des chercheurs proposent de redonner à l'architecture en terre ses lettres de noblesse en adaptant les techniques traditionnelles aux exigences actuelles.

Dans le chapitre suivant on va parler des principales normes qui sont en relation avec la construction en terre.
CHAPITRE 2

LES NORMES

DANS LA

CONSTRUCTION EN TERRE.
2.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre on présente les différentes normes de la construction en terre trouvées dans la littérature. Ces normes abordent principalement les critères de sélection des matériaux qui peuvent offrir les meilleures propriétés physiques, mécaniques, et thermiques. À la fin, on compare les valeurs de la résistance à la compression donnée par la brique classique par rapport au bloc de terre crue.

2.2 Définitions et but de la normalisation

D’une façon globale, une norme est reconnue pour des usages communs et répétés, des règles, des lignes directrices ou des caractéristiques, pour des activités ou leurs résultats, garantissant un niveau d’ordre optimal dans un contexte donné.

Les objectifs des normes sont :
- économiques et sociaux.
- faciliter les échanges des biens et produits.
- assurer la protection du citoyen (sécurité, qualité des produits, etc.).

2.3 Recommandations pour la normalisation

Dans le cadre de la construction en terre, l’objectif de la normalisation c’est de disposer d’une procédure valable et commune à tous les produits dont les blocs de terre comprimé (BTC), mortier de terre (MT) et maçonneries de bloc de terre comprimée (MBTC).

2.4 Relation CRAterre et Norme

2.5 L’utilisation des normes :


En France trois anciens textes officiels se rapportent à la construction en terre « Réef DTC 2001 Béton de terre et béton de terre stabilisée, 1945 », « Reef DTC 2101 construire en béton de Terre, 1945 » et « Reef DTC 2102 béton de terre stabilisée aux liants hydrauliques, 1945 ». Le centre de développement industriel (CDI) et le centre de recherche et d’application – Terre (CRATerre) ont publié un guide des normes pour les blocs de terre comprimée qui contient des normes, de la terminologie et des classifications concernant la BTC.

La conservation des structures de terre est une principale préoccupation, comme montrée par l’intérêt des organismes internationaux pour la conservation, telle qu’ICOMOS (ce qui a des comités de la terre) et ICCROM (PROJET TERRA).

Pour le groupe 1, nous avons en 2003 les codes de terre des matériaux de construction du Mexique, États-Unis, par la Division d’industries du bâtiment du règlement et le département d’autorisation ; le pré standard pour CEB d’association française AFNOR des normes ; des normes de la nouvelles Zélande ; règlement résistant d’adobe de tremblement de terre du Pérou, par le service national d’étalonnage, de formation et de recherche pour l’industrie du bâtiment (SENCICO).

Dans le groupe 2, il y a les documents de référence nationaux tels que le Lehmbau allemand Regeln ; Australien, SA et marcheur, bulletin 5 et EBAA ; MOPT espagnol et IETcc ; ou les recommandations pour préparer des normes de CYTED.

Le groupe 3 se compose de la bibliographie générale de la construction en terre qui a été choisie parmi les références les plus citées en articles concernant le bâtiment en terre dans les journaux et les citations. Cela s’appelle les documents techniques.
Le tableau 2.1 englobe l’ensemble de ses trois groupes.

**Tableau 2-1 :** Les types de recommandations pour le choix des sols (Taleb Boulerbah, 2019).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Groupes</th>
<th>Pays</th>
<th>Document</th>
<th>Techniques</th>
<th>Approches pour le choix de sol</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>France</td>
<td></td>
<td>XP P 13-901 (2001)</td>
<td>BTC</td>
<td>Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature du sol</td>
</tr>
<tr>
<td>Afrique régionale</td>
<td>ARSO (1996)</td>
<td>BTC</td>
<td>Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature. Énumérer et classifier les essais de sol, pas de procédures expliquées.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Zimbabwe</td>
<td>SAZS 724 (2001)</td>
<td>TE</td>
<td>Les recommandations pour la granularité, les sels, le contenu organique et le ruban examinant.</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>------------------------</td>
<td>---------------------</td>
<td>-------------</td>
<td>------------</td>
<td>----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------</td>
</tr>
<tr>
<td>Mc. Henry PG (1984)</td>
<td>À, TE</td>
<td>Offre les sols moyens qui ont montré la bonne exécution dans les bâtiments existants</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>OIA (1970)</td>
<td>À, BTC, TE</td>
<td>Convenance par l’essai sur le terrain avec un diagramme de décision. Identification par des essais en laboratoire sans recommandations</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

![Figure 2-1: Normes en terre selon l’année de publication (Jaime Cid-Falceto et al. 2012).]

### 2.6 Blocs de terre comprimée (BTC)

Les BTC sont des éléments de maçonnerie dont le type et les dimensions varient selon le moule utilisé. Les dimensions les plus courantes sont 29,5 x 14 x 9 cm et 20 x 20 x 9 cm (L x l x h) et les types les plus courants sont les blocs pleins, les blocs évidés, les blocs alvéolaires et les blocs à emboîtement (Rigassi, 1995).

Le Bloc de Terre Comprimée (BTC) est déjà utilisé dans un très grand nombre de constructions. Les normes concernant l’usage des BTC trouvées dans la littérature concernent principalement la résistance à la compression.
Ainsi, on peut citer les normes suivantes et leurs pays d'origine : ARS (Afrique), ASTM E2392M-10 (Etats-Unis), NBR (Brésil), NTC 5324 (Colombie), UNE 41410 (Espagne), KS 02-1070 (Kenya), IS 1725 (Inde), NT (Tunisie), NZS (Nouvelle-Zélande), XP P13-901 (France), SLS 1382 (Sri Lanka), NMAC 147.4 (Nouveau-Mexique). A noter que ces normes sont variables d'un pays à l'autre.
2.7 Normes propres aux blocs de terre comprimée (BTC)

Les normes d’utilisation des terres dans la construction en BTC se basent principalement sur leur granulométrie et leur plasticité. Ces caractéristiques influent le comportement des BTC produits (Taleb Boulerbah, 2019).

**Tableau 2-2** : Les types de recommandations pour le choix des sols (Taleb Boulerbah, 2019).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Pays</th>
<th>Documents de référence</th>
<th>Critères de sélection de la terre</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>USA</td>
<td>NMAC 14.7.4 (2000)</td>
<td>Peu de recommandations : les unités constructives doivent être testées</td>
</tr>
<tr>
<td>France</td>
<td>XP P 13-901 (2001)</td>
<td>Granularité, plasticité et nature de la terre</td>
</tr>
<tr>
<td>Nouvelle Zélande</td>
<td>NZS 4297 (1998)</td>
<td>Les unités constructives doivent être testées</td>
</tr>
<tr>
<td>Afrique</td>
<td>ARSO (1996)</td>
<td>Granularité, plasticité et nature de la terre</td>
</tr>
<tr>
<td>Zimbabwe</td>
<td>SAZS 724 (2001)</td>
<td>Granularité, sels, teneur en matière organique et cohésion</td>
</tr>
<tr>
<td>Australie</td>
<td>HB 195 (2002)</td>
<td>Granularité</td>
</tr>
<tr>
<td>Espagne</td>
<td>MOPT (1992)</td>
<td>Granularité</td>
</tr>
</tbody>
</table>

**a. Afrique [NOR98]**

Certains pays ont déjà une norme nationale. Il existe depuis 1998 une norme pour toute l’Afrique élaborée par l’ORAN (Organisation Régionale Africaine de Normalisation). Cette norme ne s’applique que dans des zones non sismiques. La contrainte admissible sur un mur de maçonnerie est donnée par la formule suivante :

\[ f_k = \frac{f_b}{10} \]

Où \( f_b \) est la contrainte moyenne de rupture du bloc. Elle est obtenue par compression sur deux demi-bloc maçonnés soit un élancement de 1,3 (voir figure2-2).
Les blocs entiers sont en général de dimensions 295×140×95 mm³. Il n’y a pas de spécification sur les mortiers, autre que celle des règles de bonnes pratiques de leur élaboration. Ces mortiers sont réalisés avec la même terre que celle utilisée pour les blocs. Leurs caractéristiques mécaniques interviennent pourtant dans la détermination de \( f_b \). En toute rigueur, vu l’influence du mortier, \( f_b \) ne doit pas être désignée par la résistance des blocs.

**Figure 2-2** : Normes de détermination de la résistance à la compression. a) norme [CYT 93] Pérou, Brésil et Cuba ; b) norme Afrique ORAN [NOR 98] ; c) norme [VEN 92] Inde. Il s’agit de blocs 29,5x14x9, 5 cm (Lxlxh, P’kla, 2002).

**b. Inde [VEN 92]**

En Inde, la résistance à la compression de la maçonnerie est prise égale à la résistance de trois blocs maçonnés avec du mortier (figure 2.2).

**c. Pérou, Brésil et Cuba [CYT 93]**

Cette norme commune aux trois pays concerne la construction en Adobe et en BTC. La contrainte admissible à la compression de la maçonnerie en Adobe est donnée par la formule suivante :

\[
f_k = 0,4 f_b F_k
\]

\( f_b \) s’obtient par compression simple sur un empilement de blocs maçonnés de façon à obtenir une éprouvette d’élancement 4 et par la formule suivante :

\[
f_b = \overline{\sigma}_{ rupt moy} S
\]

Où \( \overline{\sigma}_{ rupt moy} \) est la contrainte en compression à la rupture moyenne et S la déviation standard.
Concernant le BTC, la quantité maximale du ciment dans les blocs est fixé à 12% en poids sec.
Leur résistance à la compression à 7 jours doit être supérieure à 2 MPa.

d. États-Unis [CID 91]

La résistance à la compression de la maçonnerie est assurée lorsque :
\[ f_b > 2 \text{ MPa} \]
Avec \( f_b \) contrainte de rupture à la compression du bloc.

Les autres recommandations de la norme sont :
- Les chainages horizontaux sont obligatoires.
- La résistance à la traction doit être supérieure à 0,34 MPA.
- La stabilisation des blocs doit permettre d’arriver à une quantité d’eau absorbée par capillarité au bout de 7 jours de moins de 4%.

2.8 Recensement des normes et recommandations concernant le BTC

On peut classifier les normes qui se rapportent à la BTC par zones géographiques :
- Internationales
- Européennes
- Africaines

Le tableau 2-3 résume ces principales normes.
**Tableau 2-3 : Listes des normes et recommandations concernant le BTC.**

<table>
<thead>
<tr>
<th>Internationales</th>
<th>Européennes</th>
<th>Africaines</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td></td>
<td>- Spence et Cook (1983)</td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>
2.9 La Norme XP P 13-901

2.9.1 Objectif
La présente norme s'applique aux blocs de terre comprimée, fabriqués en atelier, et destinés à la construction de murs et de cloisons de bâtiment, qu'ils soient apparents ou non.

2.9.2 Domaine d’application
- S'applique aux blocs de terre comprimée.
- S’applique uniquement aux blocs destinés à être utilisés dans des ouvrages non soumis à des sollicitations de gel dégel.
- Ne s’applique pas aux blocs obtenus par extrusion, ainsi qu’aux produits agglomérés où le liant hydraulique joue un rôle essentiel pour assurer la cohésion à sec.

2.9.3 Caractéristiques mécaniques des blocs
On distingue deux résistances suivant l’état d’humidité de la brique, l’une sèche et la deuxième humide.

2.9.3.1 Résistance en compression sèche
La valeur choisie dans le tableau ci-dessous pour le fractile 0,05.

Tableau 2-4 : Classes de résistance en compression sèche (AFNOR, 2001).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Blocs plein</th>
<th>BTC 20</th>
<th>BTC 40</th>
<th>BTC 60</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Résistance minimale (R) pour le fractile 0.05-MPa</td>
<td>2</td>
<td>4</td>
<td>6</td>
</tr>
</tbody>
</table>

2.9.3.2 Résistance en compression humide
Cette caractéristique n’est pas prise en compte pour les blocs destinés à être utilisés en milieu sec.

Tableau 2-5: Classes de résistance en compression humide (AFNOR, 2001).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Blocs plein</th>
<th>BTC 20</th>
<th>BTC 40</th>
<th>BTC 60</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Résistance minimale (R) pour le fractile 0.05-MPa</td>
<td>1</td>
<td>2</td>
<td>3</td>
</tr>
</tbody>
</table>
2.9.3.3 Résistance à l'abrasion

Cette caractéristique ne s’applique que pour les blocs destinés à être exposés à des risques d’abrasion résultants de l’activité humaine.

Tableau 2-6 : Classes de résistance à l’abrasion (AFNOR, 2001).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Blocs plein</th>
<th>BTC 20</th>
<th>BTC 40</th>
<th>BTC 60</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Coefficient d’abrasion minimal (Ca) cm²/g</td>
<td>2</td>
<td>5</td>
<td>7</td>
</tr>
</tbody>
</table>

2.10 Capillarité

Cette caractéristique n’est pas prise en compte pour les blocs destinés à être utilisés en milieu sec : catégorie S

Pour les autres catégories, le coefficient Cb d'absorption d'eau par capillarité des blocs destinés aux murs extérieurs doit être au plus égal aux valeurs suivantes :

- Blocs faiblement capillaires : Cb 20
- Blocs peu capillaires : Cb 40

2.11 Récapitulatif des caractéristiques des matériaux

Tableau 2-7 : Les caractéristiques des briques de terre comprimée (BTC) (ART terre, 2018).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Mécanique</th>
<th>BTC 20</th>
<th>BTC 40</th>
<th>BTC 60</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Masse volumique</td>
<td>1900 kg/m³ (de1800 à 2100 kg/m³)</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Résistance moyenne à la compression du bloc</td>
<td>2 MPa</td>
<td>4 MPa</td>
<td>6 MPa</td>
</tr>
<tr>
<td>Résistance moyenne à la traction du bloc</td>
<td>0,2 MPa</td>
<td>0,4 MPa</td>
<td>0,6 MPa</td>
</tr>
<tr>
<td>Cisaillement (G=0,4E)</td>
<td>0,6 GPa</td>
<td>1 GPa</td>
<td>1,6 GPa</td>
</tr>
<tr>
<td>Module de Young</td>
<td>1,5 GPa</td>
<td>2,5 GPa</td>
<td>4 GPa</td>
</tr>
<tr>
<td>Coefficient de Poisson</td>
<td>0,2</td>
<td>0,25</td>
<td>0,3</td>
</tr>
<tr>
<td>Coefficient de Fluage ultime</td>
<td>2 à 3</td>
<td>2 à 3</td>
<td>2 à 3</td>
</tr>
<tr>
<td>HYDRIQUE</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Teneur en eau Massique</td>
<td></td>
<td>1 %</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>HYGROTHERMIQUE</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>
Une comparaison entre les valeurs caractéristiques des différentes techniques de construction en terre est présentée dans le tableau 2-8.

Tableau 2-8: Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé, BTC) (Hakkoum Soumia, 2015).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Caractéristique</th>
<th>Adobe</th>
<th>Pisé</th>
<th>BTC</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Conductivité Thermique</td>
<td>0,416 W(m.k)^{-1}</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Capacité Thermique à (20°C)</td>
<td>800 J (kg.k)^{-1}</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Coefficient d’absorptivité (à Bloc Nu)</td>
<td>0,55 à 0,65</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Perméabilité à la Vapeur d’Eau</td>
<td>1,27.10^{-10}kg (m.s.Pa)^{-1}</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Résistance à la vapeur d’eau</td>
<td>15</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

<table>
<thead>
<tr>
<th>Caractéristique</th>
<th>Adobe</th>
<th>Pisé</th>
<th>BTC</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Masse volumique (kg/m^3)</td>
<td>1200-1700</td>
<td>1700-2200</td>
<td>1700-2200</td>
</tr>
<tr>
<td>Résistance à la compression (MPa)</td>
<td>2-5</td>
<td>&lt; 2,4</td>
<td>&lt; 2,4</td>
</tr>
<tr>
<td>Résistance à la traction (MPa)</td>
<td>/</td>
<td>0,5-1</td>
<td>/</td>
</tr>
<tr>
<td>Conductivité Thermique λ (W/m.°C)</td>
<td>0,46-0,81</td>
<td>0,81-0,93</td>
<td>0,81-1,04</td>
</tr>
<tr>
<td>Chaleur Spécifique (J/kg.°C)</td>
<td>900</td>
<td>850</td>
<td>/</td>
</tr>
<tr>
<td>Capacité Thermique (KJ/m^3. °C)</td>
<td>1350</td>
<td>510</td>
<td>/</td>
</tr>
<tr>
<td>Absorption d’eau (%)</td>
<td>5</td>
<td>10-20</td>
<td>10-20</td>
</tr>
<tr>
<td>Isolation Acoustique (dB)</td>
<td>/</td>
<td>50 dB pour 40 cm</td>
<td>50 dB pour 40 cm</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td>40 dB pour 20 cm</td>
<td>40 dB pour 20 cm</td>
</tr>
</tbody>
</table>
2.12 Critères de choix des matériaux

Le choix de la terre est nécessaire dans le processus de décision concernant le choix d’une technologie de transformation de la terre en matériau de construction pour la fabrication des BTC.

Tableau 2 -9 : Caractéristiques des briques terres crues (Krami et Reggadi, 2011).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Caractéristique</th>
<th>BTC</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Conductivité $\lambda$ (W/m.°C)</td>
<td>0.81 – 1.04</td>
</tr>
<tr>
<td>Absorption d’eau (%)</td>
<td>10 - 20</td>
</tr>
<tr>
<td>Isolation acoustique (dB)</td>
<td>50 dB pour 40cm</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>40 dB pour 20cm</td>
</tr>
<tr>
<td>Retrait au séchage (mm/m)</td>
<td>0.2 – 1</td>
</tr>
<tr>
<td>Résistance en traction (fendage)</td>
<td>0,1 à 0,2Rc</td>
</tr>
<tr>
<td>« Module » d’élasticité</td>
<td>Sec, non stabilisé : 100 à 1000 MPa</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Sec, stabilisé : 3500 MPa</td>
</tr>
<tr>
<td>Caractéristiques thermiques</td>
<td>$\rho$C entre 600 à 800 Wh/m³. K</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>$C$ entre 1200 à 1500 J/ kg. K</td>
</tr>
<tr>
<td>Diffusivité $10^{-6}$m²/s</td>
<td>0.25</td>
</tr>
<tr>
<td>Effusivité J/m²•K•s1/2</td>
<td>0.45</td>
</tr>
</tbody>
</table>
2.12.1 La distribution granulométrique

La distribution granulométrique est la première propriété à prendre en compte lors de l’évaluation de l’aptitude d’un matériau en terre pour la construction.

La connaissance de la granulométrie est une indication importante mais non suffisante à la sélection d'un sol. La terre est un matériau granulaire dont la distribution granulométrique peut être particulièrement large. Le tableau 2-10, résume les principaux types de sols et leur aptitude à être utilisés pour la construction en terre.

**Tableau 2 -10 :** Système simplifié de classification des sols selon la norme ASTM D2487 avec une évaluation qualitative de l’aptitude à la construction en terre (Van-Damme et Houben, 2017).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Principales divisions</th>
<th>Symbole de groupe</th>
<th>Noms de sols typiques</th>
<th>Aptitude à la construction de la terre (non stabilisée)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td><strong>Sols à gros grains &gt; 50% retenus (refus) sur le tamis de 0,075mm</strong></td>
<td>Gravier de 50% retenus (refus) sur le tamis de 4,75 mm</td>
<td>Gravier propre, avec &lt; 5% de passant du tamis 0,075 mm</td>
<td>Gravier bien gradué, Gravier mal gradué (serrée)</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Gravier avec &gt;12% de fines</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Les sables de 50% ou plus passent sur le tamis de 4,75 mm</td>
<td></td>
<td>Gravier limoneux</td>
</tr>
<tr>
<td><strong>Sols à grains fins &gt;50% passent (tamisât) dans le Tamis de</strong></td>
<td>Les sables de 50% ou plus passent sur le tamis de 4,75 mm</td>
<td></td>
<td>Sables propres bien gradué</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Sables propres</td>
<td></td>
<td>Sables propres mal gradué</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Sables avec &gt;12% de fines</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Inorganique</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>
À partir de ces normes, ils ont conclu que les prescriptions relatives à la taille des particules sont plus restrictives pour la construction en BTC, pisé et BTM : (brique de terre moulée comme l’adobe).

Aussi à partir de ces recommandations, des fuseaux granulométriques sont tracés pour distinguer les limites des tailles des particules utilisées dans la construction en terre pour différentes techniques de construction (voir figure 2-3).

<table>
<thead>
<tr>
<th>0,075mm</th>
<th>Sables argileux</th>
<th>désagrège facilement</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Limons et argiles avec plus ou moins 50% limite de liquide</td>
<td>Limons de faibles plasticités, Sables fins limoneux Argiles de faible plasticité, Limon Argileux Limons organiques et argiles de faible plasticité</td>
<td>Approprié, parfois, un sol fin doit être ajouté</td>
</tr>
<tr>
<td>Limons et argiles avec limite de liquidé &gt; 50%</td>
<td>Limons de forte plasticité Argiles de forte plasticité, Argile plastique Argiles et limons organiques de fortes plasticités</td>
<td>Approprié mais manque de cohésion</td>
</tr>
<tr>
<td>Sables argileux</td>
<td>Tourbe et autre sols très organiques</td>
<td>Ne convient pas, parfois acceptable Très rarement approprié</td>
</tr>
<tr>
<td>Inorganiques</td>
<td>Organique</td>
<td>Rarement approprié, un sol sableux doit être ajouté</td>
</tr>
</tbody>
</table>

<table>
<thead>
<tr>
<th>Sols très organiques</th>
<th></th>
<th></th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Limons et argiles avec plus ou moins 50% limite de liquide</td>
<td>Limons de faibles plasticités, Sables fins limoneux Argiles de faible plasticité, Limon Argileux Limons organiques et argiles de faible plasticité</td>
<td>Ne convient pas, parfois acceptable Très rarement approprié</td>
</tr>
<tr>
<td>Limons et argiles avec limite de liquidé &gt; 50%</td>
<td>Limons de forte plasticité Argiles de forte plasticité, Argile plastique Argiles et limons organiques de fortes plasticités</td>
<td>Inapproprié</td>
</tr>
<tr>
<td>Sables argileux</td>
<td>Tourbe et autre sols très organiques</td>
<td>Inapproprié pour les constructions en terre</td>
</tr>
</tbody>
</table>
La granularité du matériau utilisé sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de texture qui suit et dont elle épousera l’allure générale (Figure 2-4).

**Figure 2-3:** Fuseaux de courbes granulométriques conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe (BTM = Brique de Terre Moulée) selon la [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998], MOPT [1992] (Jiménes et Guerrero, 2007).

**Figure 2-4:** Fuseau du diagramme de texture des terres (AFNOR, 2001).
2.12.2 Les limites d’Atterberg

Une classification de terre ne pourra être obtenue, en connaissant uniquement les pourcentages de ces différents constituants, mais elle sera toujours complétée par les limites d’Atterberg (obtenues selon le procédé normalisé ASTM-D-423). Ces limites, une fois déterminées feront l’objet d’une comparaison avec les fourchettes des adobes. La capacité de gonflement de la terre pourra aussi être estimée à partir de ces limites :

Suivant la valeur de l’indice de plasticité Ip, on distingue l’aptitude d’un sol à gonfler :

– Faible < : 0+15%
– Moyen : 10+25%
– Elevée : 25+55%
– Très élevé : > 55%
2.12.3 La plasticité

La plasticité est le pouvoir à se déformer sans se fissurer ou se désintégrer. La plasticité d’une terre et les limites entre différents états de consistance sont déterminées par les mesures des limites d’Atterberg (limite de liquidité LL, limite de plasticité PL, l’indice de plasticité PI).

Pour obtenir la meilleure résistance des matériaux de terre (BTC, pisé et adobe), tant aux sollicitations mécaniques qu’à l’action de l’eau, il est nécessaire de choisir les limites les mieux adaptées pour les blocs de terre selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001].

La figure 2-5 montre les limites de plasticité d’un matériau conseillés par différents auteurs et normes.

**Figure 2-5** : Fuseaux de plasticité conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998] et Houben and Guillaud [1989]. (Jiménes et Guerrero, 2007)

La plasticité du matériau sera de préférence inscrite dans le fuseau du diagramme de plasticité qui suit (figure 2-6). Les limites du fuseau recommandé sont approximatives.
2.12.3.1 **Indice de plasticité**

La figure 2-7 présente l'indice de plasticité en fonction de la limite de liquidité et leur domaine d’utilisation comme matériau de construction [AFNOR 2001, CRA Terre-Eag 1998 et MOPT 1992]. En y portant les résultats des essais de plasticité on en déduit sa classification comme argile inorganique de plasticité moyenne selon le système de classification unifiée des sols de l’USCS (Unified Soil Classification System). Ce matériau se situe bien dans une région admissible pour constituer des blocs de terre crue compressée.

![Diagramme de plasticité et liquidité](image)

**Figure 2-6** : Fuseau du diagramme de texture des terres (AFNOR, 2001).

**Figure 2-7** : Valeurs expérimentales et carte de plasticité (A.W. Bruno, D. Gallipoli, C. Perlot, J. Mendès, N. Salmon ; 2015).
2.12.4 Compactage

Un certain nombre d’études s’est intéressé à la relation entre la densité de la terre et l’effort de compactage. La teneur en eau optimale est celle pour laquelle la masse volumique est maximale. Pour cela on utilise un essai de Proctor normal ou modifié, pour choisir la terre utilisable en fabrication des matériaux terreux (BTC) qui est déconseillé pour les sols argileux mais le compactage statique est mieux adapté aux sols argileux [Mesbah et al., 1999b], (voir Figure 2-9).

Figure 2-8 : Fuseaux de compactage recommandés pour construire en BTC, en Pisé ou en Adobe selon Houben and Guillaud [1994].

2.12.5 La résistance à la compression simple

La résistance à la compression est un paramètre important dans les exigences sur les BTC, chaque norme a définit ses propres intervalles de valeurs minimales de la résistance $R_c$.

La figure 2-9 représente les valeurs des résistances à la compression minimale que doit avoir une brique de terres suivant les exigences de différentes normes.
Figure 2-9 : Résistances à la compression minimales admises pour les BTC (Lavie Arsène Mango- Itulamya, 2019).

La résistance à la compression simple de la terre crue (non stabilisée) séchée à l’air libre est régulièrement de quelques dixièmes de MPa, (0.5 à 1.5 MPa pour la bauge, 1 à 2.5 MPa pour l’adobe) à quelques MPa pour le pisé (1 à 4MPa) et les blocs de terre compressée BTC entre 1 à 7MPa, (figure 2-10), [Van-Damme et Houben, 2017].

Figure 2-10 : Résistance à la compression des matériaux terreaux (Van-Damme et Houben, 2017).
Figure 2-11 : Schéma et dispositif de l’essai de compression (Halleux, 2012, modifié).

Tableau 2-11 : Normes de détermination de la résistance à la compression. a) norme [CYT 93] Pérou, Brésil et Cuba ; b) norme Afrique ORAN [NOR 98] ; c) norme [VEN 92] Inde. Il s’agit de blocs 29,5x14x9, 5 cm (Lxlxh, d’après P’kla, 2002).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Région</th>
<th>Durabilité</th>
<th>Résistance à la flexion (MPa)</th>
<th>Résistance en compression (MPa)</th>
<th>Mise en œuvre</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Afrique [NOR 98]</td>
<td></td>
<td></td>
<td>&gt; 2</td>
<td>(compression 2 demis blocs, h/e = 1,3)</td>
</tr>
<tr>
<td>USA [CID 91]</td>
<td>Capillarité &lt; 4% après 7 jours b</td>
<td>&gt; 0,34 (essai de flexion 3 points)</td>
<td>&gt; 2</td>
<td>Construction limitée à 2 étages, élancement h/e = 10</td>
</tr>
<tr>
<td>Pérou, Brésil, Cuba</td>
<td></td>
<td></td>
<td>0,2ᵃ ; 2ᵇ</td>
<td>(compression simple sur maçonnerie)</td>
</tr>
<tr>
<td>Inde [VEN 92]</td>
<td></td>
<td></td>
<td>2ᵃᵇ</td>
<td>(compression 3 blocs maçonnés)</td>
</tr>
<tr>
<td>Australie</td>
<td>Taux d’érosion &lt; 1mm/min b</td>
<td></td>
<td>≥ 2</td>
<td>Mur extérieur ou intérieur</td>
</tr>
<tr>
<td>Bull. 5</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Nouvelle Zélande [NZS 4298]</td>
<td></td>
<td></td>
<td>3,5ᵇ</td>
<td>(compression d’un bloc entier)</td>
</tr>
<tr>
<td>OIA 1970</td>
<td>Test d’érosion b</td>
<td></td>
<td>≥ 2,1</td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>
D’autres normes donnent la valeur de l’épaisseur du mur en terre en fonction de la résistance à la compression. (Voir tableau 2-12).

**Tableau 2-12 :** Normes concernant l’épaisseur du mur en fonction des résistances à la compression pour le pisé (Total Boox et TBX, 2012).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Pays</th>
<th>Norme</th>
<th>Épaisseur minimale du mur extérieur (mm)</th>
<th>Épaisseur minimale du mur intérieur (mm)</th>
<th>Résistance à la compression (MPa)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Allemagne</td>
<td>Lehmbau Regein (2009)</td>
<td>400</td>
<td>400</td>
<td>0,3-0,5</td>
</tr>
<tr>
<td>Inde</td>
<td>IS : 2110 (1998)</td>
<td>300</td>
<td>200</td>
<td>1,4</td>
</tr>
<tr>
<td>Kirghizstan</td>
<td>PCH-2-87 (1998)</td>
<td></td>
<td></td>
<td>0,63-3,6</td>
</tr>
<tr>
<td>Nouvelle Zélande</td>
<td>NZS 4297-9</td>
<td>250</td>
<td></td>
<td>0,5</td>
</tr>
<tr>
<td>Suisse</td>
<td>Regein Zum Bauen mit Lehm (1994)</td>
<td>300</td>
<td></td>
<td>0,3-0,5</td>
</tr>
<tr>
<td>USA</td>
<td>14.7.4 NMAC (2006)</td>
<td>457</td>
<td>305</td>
<td>1,725-2,07</td>
</tr>
<tr>
<td>Zimbabwe</td>
<td>SAZS 724 (2001)</td>
<td>300</td>
<td></td>
<td>1,5-2</td>
</tr>
</tbody>
</table>

**Figure 2-14 :** Propriété mécanique de la terre : la résistance à la compression (Taleb Boulerbah, 2019).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Caractéristiques</th>
<th>Comprimé à 20 bars</th>
<th>Stabilisé à 8% de ciment, Comprimé à 20-40 bars</th>
<th>Latérite stabilisée 12 à 19% de chaux, comprimée à 300 bars, Étuvées à 95% H.R sous pression à 90°C</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Résistance à la compression Sèche à 28 jours</td>
<td>Env 2 MPa</td>
<td>2 à 5 MPa</td>
<td>&gt;12 MPa</td>
</tr>
<tr>
<td>Résistance à la compression Humide à 28 jours (24h dans l’eau)</td>
<td>0 à 0,5 MPa</td>
<td>&gt;2 MPa</td>
<td>&gt;2 MPa</td>
</tr>
</tbody>
</table>

2.12.6 Résistance à la flexion (essai 3 points)

La résistance à la flexion (ou module de rupture) se calcule par l’intermédiaire d’une charge concentrée, équivalente à une poussée de 250 kg par minute, appliquée sur 5 échantillons placés chacun à leur tour sur des supports parallèles espacés de 25cm. La charge à la rupture de chaque échantillon est notée. Le module de rupture se calcule comme suit :

\[ R = 3 \times 25 \times P \times l \times e^2 \]

Où "R" est le module de rupture en kg/cm², "25" la distance d’appui en cm, "l" la largeur de l’échantillon en cm et "e" l’épaisseur de l’échantillon en cm. On calcule ensuite la moyenne des 5 valeurs obtenues. Celle-ci équivaut au module de rupture de la terre testée.

Figure 2-15 : Schéma et dispositif de l'essai de flexion 3 points (Halleux, 2012, modifié).
2.12.7 Durabilité

Les essais actuellement utilisés pour vérifier l’effet de l’eau sur ce type de matériau sont l’essai d’érosion par pulvérisation et l’essai d’érosion par goutte à goutte (AENOR 2008). Deux types de blocs de terre comprimée sont utilisés dans cette recherche, les blocs non stabilisés (CEB 1) (voir Figure 2-15) et les autres blocs stabilisés (CEB 2) (voir Figure 2-16).

Figure 2-16 : Essai d’érosion au goutte-à-goutte (bloc non stabilisé) (Jaime Cid-Falceto; Pablo Mosquera; Francisco Marcos; Cruz Calleja Perucho; Ignacio Cañas, 2012).

Figure 2-17 : Essai d’érosion au goutte-à-goutte (bloc stabilisé) (Jaime Cid-Falceto; Pablo Mosquera; Francisco Marcos; Cruz Calleja Perucho; Ignacio Cañas. 2012).

Essai d’érosion au goutte-à-goutte - est une méthode valide pour le CEB 1, tandis que pour les blocs stabilisés (CEB 2), on ne trouve pas de différences quantifiables dans leurs résultats.
2.12.8 Propriétés chimiques

L'analyse chimique sert à identifier les principaux groupes d'atomes exprimés en pourcentage massique d'oxydes. Ces éléments justifient plusieurs propriétés des argiles dont la couleur, le degré d'interaction avec des liants, etc... La composition chimique de la kaolinite, fait qu'elle se lie plus aisément à la chaux que l'illite (Konan et al., 2008). Aucune recommandation sur la teneur en pourcentage d'oxydes pour une terre crue n'a été trouvée dans la littérature.

2.12.9 La stabilisation

La stabilisation sert à améliorer les propriétés physiques (texture, granulométrie), chimiques ou mécaniques de la terre. Elle doit être compatible avec la conception des bâtiments, la qualité du matériau, l'économie du projet et la durabilité. La stabilisation n'est pas nécessaire lorsque le matériau n'est pas exposé à l'eau (murs enduits, murs intérieurs, murs protégés) mais devient indispensable dans le cas contraire (Houben et Guillaud, 1989).

2.13 Comparaison thermique entre la terre et le parpaing

Les températures sont plus agréables dans la configuration de l’architecture de terre. Les écarts intérieurs de températures sont moins importants.

**Tableau 2-14** : Comparaison thermique d’une paroi de 20cm d’épaisseur (OLIVA, COURGEY, La conception bioclimatique, Editions Terre Vivante, 2006).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Type de matériau</th>
<th>Masse volumique du matériau en kg/m³</th>
<th>Capacité thermique ρC en Wh/m³.K</th>
<th>Épaisseur de la paroi en m</th>
<th>Inertie de la paroi en Wh/m².K</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Mur en terre crue</td>
<td>1770/1900</td>
<td>785</td>
<td>0,20</td>
<td>I=157</td>
</tr>
<tr>
<td>Parpaing de ciment</td>
<td>850/950</td>
<td>250</td>
<td>0,20</td>
<td>I=50</td>
</tr>
</tbody>
</table>
2.14 Comparaison entre les matériaux de terre crue et bloc de béton

Une comparaison est faite entre les caractéristiques du bloc de béton et les blocs construits à base de terre. Les résultats sont montrés sur le tableau 2-15.

Tableau 2-15 : Comparaison entre le BTC et d’autres matériaux de construction (Rigassi, 1995 ; Caritas Lubumbashi, 2011 ; Chirhalwirwa Mwilarhe, 2008 ; Moles et al. 2009 ; CRAterre et Urbaplan, 2010 ; Prix-construction, 2019).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Caractéristiques</th>
<th>BTC</th>
<th>Adobe</th>
<th>Pisé</th>
<th>Brique cuite</th>
<th>Bloc de béton</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Aspects</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Surface</td>
<td>Lisse Moyen à bon</td>
<td>Irrégulière Pauvre</td>
<td>Rugueuse à lisse Bon à excellent</td>
<td>Rugueuse à lisse Bon à excellent</td>
<td>Rugueuse Moyen</td>
</tr>
<tr>
<td>Esthétique</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Performances :</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>-Résistance en compression (MPa)</td>
<td>1 à 4</td>
<td>0 à 5</td>
<td>0,5 à 3</td>
<td>0,5 à 6</td>
<td>0,7 à 5</td>
</tr>
<tr>
<td>-Dilatation thermique (%)</td>
<td>0,02 à 0,2</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>-Isolation thermique (W/m²°C)</td>
<td>0,81 à 1,04</td>
<td>0,4 à 0,8</td>
<td>1,05</td>
<td>0,7 à 1,3</td>
<td>1 à 1,7</td>
</tr>
<tr>
<td>-Masse volumique (kg/m³)</td>
<td>1700-2200</td>
<td>1200 à 1700</td>
<td>1900</td>
<td>1400 à 2400</td>
<td>1700 à 2200</td>
</tr>
<tr>
<td>-Durabilité</td>
<td>Faible à très bonne</td>
<td>Faible</td>
<td>Faible à très bonne</td>
<td>Faible à excellente</td>
<td>Faible à très bonne</td>
</tr>
<tr>
<td>Emploi en maçonnerie</td>
<td>Porteur</td>
<td>Porteur</td>
<td>Porteur</td>
<td>Porteur</td>
<td>Remplissage</td>
</tr>
</tbody>
</table>

2.15 CONCLUSION

Dans ce chapitre au début on a présenté les différentes caractéristiques sur les matériaux de construction en terre.

Ensuite on a identifié plusieurs normes qui existent en termes de granulométrique, plasticité et encore de compactage.

Enfin on a introduit une comparaison entre les produits terreux et le bloc de béton par rapport à leurs résistances thermiques.
L’ensemble de ces informations nous permet de vérifier notre recherche et comparer avec d’autres chercheurs dans le chapitre suivant.
CHAPITRE 3

RESULTATS

EXPÉRIMENTAUX
3.1 INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre précédent les différentes normes qui existent dans la construction en terre avec ses exigences en termes de granulométrie, plasticité et encore compactage et résistance à la compression. Donc à partir de ces informations recueillies on va essayer de faire des comparaisons entre les recommandations des normes et les résultats de quelques essais trouvés dans la littérature sur les sols destinés à la construction en terre.

Notre choix des exemples traités est dicté par le fait de vouloir brasser différents types de sols dans différents pays et continents pour démontrer que n’importe quel type de sol peut être utilisé dans les constructions en terre. C’est dans cet objectif que le choix des exemples traités s’est porté sur :
- Sols au Congo (Kinshasa)
- Sols en France
- Sols en Algérie Sahara

3.2 IDENTIFICATION DU MATERIAU

Identifier un sol c’est savoir sa nature, sa composition et la répartition des grains de différentes tailles qui le composent (AMEUR et DICH, 2017).

3.3 Essais au laboratoire

L’objectif de ce qui suit est de rapporter les différents résultats d’essais réalisés sur des sols destinés à la construction en terre. Dans cette première partie nous présentons les résultats liés principalement à la granulométrie et la plasticité des sols.

3.4 Essais à Kinshasa (Congo)

3.4.1 Granulométrie et limites d'Atterberg

La figure 3-1 présente les courbes granulométriques de quatre échantillons étudiés dans le cadre de projet de construction en terre au Congo.
On rappelle qu’une courbe granulométrique complète est tracée en combinant deux essais, granulométrie par tamisage et par sédimentométrie.

La granulométrie de l’échantillon Lutendele2* n’a été faite que partiellement. Seule la fraction sableuse a été estimée.

**Figure 3-1 :** Courbes granulométriques des échantillons analysés Wetshondo (2002).

Le tableau 3-1 illustre également les caractéristiques granulométriques des terres crues en fonction des techniques de construction (Jiménez et Guerrero, 2007).
Tableau 3-1 : Recommandations concernant les teneurs des différentes fractions du sol. 
Recommandations concernant les teneurs des différentes fractions du sol (Jiménez et Guerrero, 2007).

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th></th>
<th></th>
<th></th>
<th></th>
<th></th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td></td>
<td>HB 195 (2002) a</td>
<td>Australie</td>
<td>10 - 40</td>
<td>10 - 30</td>
<td>Sable + gravier fin 30 – 75</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Houben et Guillaud (1994)</td>
<td></td>
<td></td>
<td>5 - 29</td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>ARSO (1996)</td>
<td>Afrique</td>
<td>8 - 30</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>HB 195 (2002) a</td>
<td>Australie</td>
<td>10 - 40</td>
<td>10 - 30</td>
<td>Sable + gravier fin 30 – 75</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>MOPT (1992)</td>
<td>Espagne</td>
<td>5 - 34</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Houben et Guillaud (1994)</td>
<td>France</td>
<td>6 - 22</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Rigassi V. (1995) b</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td>6 - 23</td>
</tr>
<tr>
<td>Pisé</td>
<td>SAZS 724 (2001)</td>
<td>Zimbabwe</td>
<td>5 - 15</td>
<td>15 - 30</td>
<td>Sable + gravier fin 30 – 75</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>MOPT (1992)</td>
<td>Espagne</td>
<td>5 - 26</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>IETCC (1971) c,d</td>
<td>CYTED</td>
<td>10 - 40</td>
<td>20 - 40</td>
<td>10 - 40</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Houben et Guillaud (1994)</td>
<td>France</td>
<td>8 - 16</td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>Adobe, BTC, pisé</td>
<td>McHenry (1984) e,f</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>Smith and Austin (1996) g</td>
<td></td>
<td>4 – 15</td>
<td>40</td>
<td>60 - 80</td>
</tr>
</tbody>
</table>

D’après les recommandations dans les abaques de granularité, les argiles désignent les particules < 0,002 mm.

a : argile <0,002 mm ; silt 0,002 à 0,06 mm ; sable 0,06 à 2 mm ; gravier 2-6 mm.

b : argile <0,002 mm ; silt 0,002 à 0,06 mm ; sable 0,06 à 2 mm ; gravier fin 2-20 mm.
D'après les recommandations dans les abaques de granularité, les argiles désignent les particules < 0,002 mm.

a : argile <0,002 mm ; silt 0,002 à 0,06 mm ; sable 0,06 à 2 mm ; gravier 2-6 mm.

b : argile <0,002 mm ; silt 0,002 à 0,06 mm ; sable 0,06 à 2 mm ; gravier fin 2-20 mm.

c : uniquement des indications pour le pisé stabilisé.

d : argile <0,002 mm ; silt 0,002-0,5 mm ; sable 0,5-5 mm ; gravier 5-20 mm.

e : AASHO, argile <0,005 mm ; silt 0,05 à 0,075 mm ; sable fin 0,075 à 0,425 mm ; sable grossier 0,425 à 2,0 mm; gravier > 2,0 mm.

F : les valeurs moyennes des sols qui ont montré de bonnes performances dans les bâtiments existants.

g : argile <0,002 ; limon 0,002 à 0,0625 mm ; sable 0,0625 à 2 mm.

Sur la base de la granulométrie, tous les échantillons analysés sont adaptés à la construction en terre crue d'après Delbecque (2011).

D'après le tableau 3.1, on remarque que d'un auteur à l'autre les compositions granulométriques changent, pour une même technique de construction. Ceci témoigne de l'absence de norme unique vis à vis de la construction en terre crue. Selon les auteurs et les techniques, les échantillons analysés vont s'adapter ou pas à l'une ou l'autre technique de construction en terre crue.

Les matériaux de Kasangulu (Nsaya) sont ceux qui sont relativement mieux adaptés pour la construction en pisé et en BTC. En effet ces deux techniques de construction nécessitent une teneur en argile plus faible en raison de la compression et de la possibilité de fissuration (Jiménes et Guerrero 2007). L'adobe est la technique la moins restrictive vis-à-vis de la granulométrie (Jiménes et Guerrero 2007). Tous nos échantillons sont adaptés pour cette technique mais l'échantillon de Cecomaf serait la mieux adaptée en raison d'une proportion en argile plus importante qui assure une meilleure cohésion.
Du point de vue plasticité, les résultats des limites d'Atterberg sont présentés dans le tableau 3-2. Huit échantillons ont été analysés. La priorité a été accordée aux 4 échantillons qui étaient disponibles en plus grande quantité. Les échantillons C4 Nsaya 1II, C3 Cecomaf et ceux de Lutendele/Kimbaguiste ont été choisis pour mettre en évidence des variations sur un même site.

La plasticité d'une terre augmente avec la teneur en minéraux argileux, et leur surface spécifique (Casagrande, 1958 ; Centre de Recherches routières, 1981). Sur la base de l'indice de plasticité, les sols sont classés en 4 catégories.

Les matériaux de Kasangulu et de Ndjili Cecomaf sont peu plastiques ou plastiques, alors que les matériaux de Lutendele sont non plastiques ou peu plastiques. Cette différence peut s'expliquer par une minéralogie des matériaux de Lutendele marquée par une plus grande quantité d'illite alors que les autres matériaux sont beaucoup plus riches en kaolinite. A titre comparatif, le tableau 3-2 illustre les valeurs résumées par Jiménes et Guerrero, 2007.

**Tableau 3-2 :** Résultats de l'analyse des limites d’Atterberg. (Jiménes et Guerrero, 2007).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Sites</th>
<th>Échantillons</th>
<th>Limite de liquidité</th>
<th>Limite de plasticité</th>
<th>Indice de plasticité</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Nsaya 1b</td>
<td>Nsaya 1III*</td>
<td>34</td>
<td>18</td>
<td>16</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>C3 Nsaya 1III*</td>
<td>34</td>
<td>24</td>
<td>10</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>C4 Nsaya 1III</td>
<td>34</td>
<td>23</td>
<td>11</td>
</tr>
<tr>
<td>Ndjili Cecomaf</td>
<td>Cecomaf*</td>
<td>32</td>
<td>20</td>
<td>12</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>C3 Cecomaf</td>
<td>41</td>
<td>26</td>
<td>14</td>
</tr>
<tr>
<td>Lutendele/Mbudi2</td>
<td>Lutendele2*</td>
<td>32</td>
<td>29</td>
<td>3</td>
</tr>
<tr>
<td>Lutendele/Kimbaguiste</td>
<td>Lutendele3</td>
<td>33</td>
<td>24</td>
<td>9</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>C3 KimbanguIII</td>
<td>26</td>
<td>20</td>
<td>6</td>
</tr>
</tbody>
</table>

**Tableau 3-3 :** Classification des sols sur base de l'indice de plasticité (Casagrande, 1958 ; Centre de recherches routières, 1981).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Ip</th>
<th>Dénomination</th>
<th>Exemples de sol</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Inférieur à 5</td>
<td>Non plastique</td>
<td>Sable limoneux ou argileux, sable</td>
</tr>
<tr>
<td>De 5 à 15</td>
<td>Peu plastique</td>
<td>Limon sableux, limon,</td>
</tr>
<tr>
<td>De 15 à 25</td>
<td>Plastique</td>
<td>Limon, limon argileux</td>
</tr>
<tr>
<td>Plus de 25</td>
<td>Très plastique</td>
<td>Argile</td>
</tr>
</tbody>
</table>

<table>
<thead>
<tr>
<th>Technique</th>
<th>Document</th>
<th>Limite de liquidité</th>
<th>Indice de plasticité</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Adobe</td>
<td>Houben et Guillaud (1994)</td>
<td>31 - 50</td>
<td>16 - 33</td>
</tr>
<tr>
<td>Pisé</td>
<td>Houben et Guillaud (1994)</td>
<td>25 - 46</td>
<td>2 - 30</td>
</tr>
<tr>
<td>BTC</td>
<td>Houben et Guillaud (1994)</td>
<td>25 - 51</td>
<td>2 - 31</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>ARS (1996)</td>
<td>25 - 50</td>
<td>2,5 - 29</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>XP P 13-901 (2001)</td>
<td>25 - 50</td>
<td>2,5 - 29</td>
</tr>
</tbody>
</table>

3.5 Étude de Construction en terre à damier dans le sud-ouest de la France

3.5.1 Procédures

3.5.1.1 Caractérisation chimique et minéralogique

Cette première analyse a été complétée par une caractérisation spécifique des minéraux argileux effectués sur des agrégats orientés et utilisant des préparations autres : séchés à l’air ou naturels, après glycolation et le traitement après la chaleur à 500°C.

3.5.1.2 Distribution de la taille des particules et limites Atterberg

La répartition de la taille des particules de la terre contenue dans les adobes a été analysé à l’aide de deux techniques : la fraction plus grossière (> 80 μm) a été analysée par tamisage humide et la fraction par la méthode de pipette plus fine selon NF P standard 94-057.

3.5.1.3 Caractérisation mécanique

Le test de compression a été effectué à l’aide d’une presse hydraulique sur des échantillons sciées de 5 à 10 cm³ provenant des briques d’adobe.

3.5.2 Résultats

3.5.2.1 La distribution de la taille des particules et limite Atterberg

La répartition de la taille des particules de la terre contenue dans les adobes indiqués sur la figure 3-2. Les limites recommandées par XP 13-901 pour les briques de terre comprimées (CEB) sont également représentées :
Figure 3-2 : Répartition de la taille des particules de la terre contenue dans les adobes. (Jean-Emmanuel Aubert, Alain Marcom, Priscia Oliva, Pauline Segui, 2014).

Les limites Atterberg de la terre contenue dans l’adobe sont indiquées sur la figure 3-3 avec les limites recommandées par la norme sur CEB.

Figure 3-3 : Limites Atterberg de la terre contenue dans les adobes. (Jean-Emmanuel Aubert, Alain Marcom, Priscia Oliva, Pauline Segui, 2014).
3.5.2.2 Caractéristiques mécaniques de l’adobe

Les caractéristiques mécaniques des briques d’adobe (densité, Résistance à la compression et modules d’élasticité) sont présentées dans le Tableau 3-5 :

Tableau 3-5 : Caractéristiques mécaniques des briques d’adobe. (Jean-Emmanuel Aubert, Alain Marcom , Priscia Oliva, Pauline Segui ; 2014).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Échantillon</th>
<th>1</th>
<th>2</th>
<th>3</th>
<th>4</th>
<th>5</th>
<th>6</th>
<th>Min</th>
<th>Moyenne</th>
<th>Max</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Masse volumique (g/cm³)</td>
<td>1,7</td>
<td>1,6</td>
<td>1,7</td>
<td>1,5</td>
<td>1,6</td>
<td>1,7</td>
<td>1,5</td>
<td>1,6</td>
<td>1,7</td>
</tr>
<tr>
<td>Résistance à la décompression (MPa)</td>
<td>2,3</td>
<td>2,4</td>
<td>1,8</td>
<td>1,2</td>
<td>1,4</td>
<td>2,0</td>
<td>1,2</td>
<td>1,9</td>
<td>2,4</td>
</tr>
<tr>
<td>Module (MPa)</td>
<td>388</td>
<td>417</td>
<td>423</td>
<td>243</td>
<td>279</td>
<td>385</td>
<td>243</td>
<td>356</td>
<td>423</td>
</tr>
</tbody>
</table>

3.6 Essais d’étude secteur sauvegardé de la ville de Laghouat

3.6.1 La localisation des prélèvements des échantillons

La zone de prélèvement : Les murs d’où on a extrait la brique

Figure 3-4 : Prélèvement des échantillons d’Adobe A, B, C (Taleb Boulerabah, 2019).
3.6.2 Les analyses granulométriques des échantillons

Pour classifier une terre donnée, le mieux est de référer sa courbe granulométrique aux fuseaux limites types des différentes techniques de construction.

La gamme de résultats des analyses révèle l’insertion de toutes les courbes obtenues dans le faisceau (voir Figure 3-5). Notre choix a été porté sur la courbe représentant la plus parfaite continuité pour une distribution des dimensions de grains quasiment uniforme.

![Figure 3-5: Les courbes granulométriques des trois adobes. A, B, C. (Taleb Boulerabah, 2019).](image)

3.6.3 Les limites d’Atterberg

Une classification de terre ne pourra être obtenue, en connaissant uniquement les pourcentages de ces différents constituants, mais elle sera toujours complétée par les limites d’Atterberg (obtenues selon le procédé normalisé ASTM-D-423).
Tableau 3-6 : Les limites d’Atterberg des trois échantillons « A. B.C » (Taleb Boulerabah, 2019)

<table>
<thead>
<tr>
<th>Échantillon</th>
<th>WL %</th>
<th>WP %</th>
<th>IP %</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>ADOBE A</td>
<td>18,46</td>
<td>8,71</td>
<td>9,75</td>
</tr>
<tr>
<td>ADOBE B</td>
<td>19,22</td>
<td>14,69</td>
<td>4,53</td>
</tr>
<tr>
<td>ADOBE C</td>
<td>42,09</td>
<td>33,37</td>
<td>8,72</td>
</tr>
</tbody>
</table>

Pour déterminer l’état d’argile utilisée, nous reportons les résultats obtenus sur le diagramme de Casagrande (Voir figure 3-6).

Figure 3-6 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande.
D’après les données de la figure 3.6, on peut classer le type de chaque sol si notre sol est sableux ou argileux ou limoneux. Pour l’adobe A et B, il s’agit de sol faiblement argileux et non plastique quant au sol C, il s’agit d’un sol faiblement argileux et plastique.

3.6.4 Résistance à la compression

L’essai préconisé pour la mesure de la résistance à la compression des briques de terre est celui utilisé pour des unités de maçonnerie, présentées en EN 772-1 (norme européenne 2000).

Dans cette norme, on utilise des facteurs de correction d’allongement, ces facteurs de correction dépendent de l’allongement, mais varient selon la largeur de la brique.

3.6.5 Préparation du matériau

Les essais de compressibilité ont été effectués sur un type de presse hydraulique selon la taille des spécimens : une presse d’une capacité Fmax=100 kN. L’essai d’écrasement est entamé sur les éprouvettes préparées (5×5×5 cm) pour mesurer la résistance à la compression.

3.6.6 Observation et interprétation : L’Adobe ancien

<table>
<thead>
<tr>
<th>Échantillon</th>
<th>F en N.</th>
<th>S (mm²)</th>
<th>( \sigma = \frac{F}{S} ) (MPa)</th>
<th>( \sigma = \frac{F}{S} ) Moy (MPa)</th>
<th>fc</th>
<th>Résis, réelles (MPa)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>« A »</td>
<td>6240</td>
<td>2500</td>
<td>2,50</td>
<td>2,03</td>
<td>0,85</td>
<td>17,27</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>4230</td>
<td>2500</td>
<td>1,69</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>4770</td>
<td>2500</td>
<td>1,91</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>« B »</td>
<td>5470</td>
<td>2500</td>
<td>2,19</td>
<td>2,25</td>
<td>0,85</td>
<td>19,11</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>5410</td>
<td>2500</td>
<td>2,16</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>5980</td>
<td>2500</td>
<td>2,39</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td>« C »</td>
<td>4630</td>
<td>2500</td>
<td>1,85</td>
<td>2,46</td>
<td>0,85</td>
<td>20,91</td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>8440</td>
<td>2500</td>
<td>3,38</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
<tr>
<td></td>
<td>5380</td>
<td>2500</td>
<td>2,15</td>
<td></td>
<td></td>
<td></td>
</tr>
</tbody>
</table>

Nous constatons que l’adobe « C » donne une résistance à la compression plus élevée par rapport aux autres briques d’adobe « A » et « B ». 
3.7 Confection des briques de terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksour sahariens

La brique en terre est un mélange composé de sable de dune, d’argile et d’eau de gâchage.

3.7.1 Analyse granulométrique du sable de dunes

L’échantillon représentatif doit avoir une masse comprise entre 200 D et 600 D où D est la plus grande dimension des granulats. Les résultats obtenus sont présents sur le tableau 3-8.

**Tableau 3-8 : Analyse granulométrique sable des dunes (Mekhermeche Abdessalme, 2012).**

<table>
<thead>
<tr>
<th>Ouverture de tamis mm</th>
<th>Refus cumulé en %</th>
<th>Tamisât en %</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>5</td>
<td>0</td>
<td>100</td>
</tr>
<tr>
<td>2,5</td>
<td>0</td>
<td>100</td>
</tr>
<tr>
<td>1,25</td>
<td>0</td>
<td>100</td>
</tr>
<tr>
<td>0,63</td>
<td>0,08</td>
<td>99,92</td>
</tr>
<tr>
<td>0,315</td>
<td>32,42</td>
<td>67,58</td>
</tr>
<tr>
<td>0,16</td>
<td>90,45</td>
<td>9,55</td>
</tr>
<tr>
<td>0,08</td>
<td>97,9</td>
<td>2,10</td>
</tr>
</tbody>
</table>
Figure 3-7 : Courbe granulométrique du sable des dunes. (Mekhermeche Abdessalme, 2012).

La figure 3-7 montre que la courbe granulométrique est partiellement située à l'extérieur du fuseau de référence recommandé par la norme. Cela est dû à la nature du sable de dunes qui est très fin.

3.7.2 Résultats de mesure des propriétés mécaniques

3.7.2.1 Variation des résistances à la flexion et à la compression par rapport au pourcentage de sable de dune

Les résultats de la résistance à la flexion et à la compression sont regroupés dans

Le tableau 3-9 :

Tableau 3-9 : Résistances à la flexion et à la compression par rapport au pourcentage de sable de dune (Mekhermeche Abdessalme, 2012).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Pourcentage de sable</th>
<th>R\textsubscript{f} en MPa</th>
<th>R\textsubscript{c} en MPa (à 28jours)</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>0%</td>
<td>S</td>
<td>0.318±0.04</td>
</tr>
<tr>
<td>10%</td>
<td>S</td>
<td>0.438±0.03</td>
</tr>
<tr>
<td>20%</td>
<td>S</td>
<td>0.882±0.12</td>
</tr>
<tr>
<td>30%</td>
<td>S</td>
<td>0.6±0.07</td>
</tr>
<tr>
<td>40%</td>
<td>S</td>
<td>0.558±0.06</td>
</tr>
</tbody>
</table>
3.7.3 Analyse granulométrique par sédimentation pour l’argile (norme NFP 94-056/ NF P 94-057)

![Diagram of granulometric analysis](image)

**Figure 3-8** : Courbe granulométrique de l’argile (Mekhermeche Abdessalme, 2012).

Les résultats de l’analyse granulométrique par sédimentation (voir figure 3-8) montrent que notre sol est composé de : 10 % d’argile ; 70 % de limon et 20 % de sable fin.

3.7.4 Limite d’Atterberg (Norme NF P 94-051)

Les résultats obtenus sont :

\[ WL = 68,75\% ; WP = 26,54\% \]

Type de sol : argile très plastique \[ IP = 42.21\% \].

3.7.4.1 Classification des argiles selon les limites d’ATTERBERG

Atterberg (1973) classe la plasticité des argiles en trois niveaux comme montré dans le tableau 3-10 :

**Tableau 3-10** : Classification des argiles selon Atterberg. (Mekhermeche Abdessalme, 2012).

<table>
<thead>
<tr>
<th>IP (%)</th>
<th>&lt; 7</th>
<th>7 à 17</th>
<th>&gt; 17</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>Plasticité</td>
<td>Faible</td>
<td>Moyenne</td>
<td>Elevée</td>
</tr>
</tbody>
</table>

L’argile utilisée (IP = 42.21) est une argile très plastique.
3.7.5 Variation des Résistances à la flexion et à la compression de l’argile plus fibres

Les résultats de la résistance à la traction et à la compression sont regroupés dans le Tableau 3-11 :

**Tableau 3-11 :** Variation de la résistance à la flexion et la résistance à la compression en fonction du pourcentage des fibres (Mekhermeche Abdessalme, 2012).

<table>
<thead>
<tr>
<th>Brique</th>
<th>Rf en MPa</th>
<th>Rc en MPa</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>0% F</td>
<td>0.318±0.04</td>
<td>1,500±0.10</td>
</tr>
<tr>
<td>1% F</td>
<td>0.789±0.01</td>
<td>2,883±0.1</td>
</tr>
<tr>
<td>2% F</td>
<td>0.815±0.04</td>
<td>3,233±0.15</td>
</tr>
<tr>
<td>3% F</td>
<td>1.186±0.06</td>
<td>3,550±0.13</td>
</tr>
</tbody>
</table>

3.8 Caractérisation d’un composite terre-fibres végétales : la bauge

3.8.1 Sols initiaux

Pour cette étude, six sols ont été sélectionnés. Ces six sols proviennent de Normandie (Nord-Ouest de la France) et, plus précisément, de Lieusaint (sol 1, sol 3 et sol 4), de Montsurvent (sol 2), de Saint-André-de-Bohon (sol 5) et de Saint-Sébastien-de-Raids (sol 6) (voir Figure 3-9).

**Figure 3-9 :** Sites de prélèvements des sols (Tuan Anh Phung, 2018).
3.8.2 Analyse granulométrique

Les courbes granulométriques des six sols sont données par la Figure 3-10. Parmi les informations obtenues d’une courbe granulométrique, le diamètre maximal (Dmax), le tamisât à 2 mm et la teneur en fines (D < 80 μm) sont des paramètres de nature qui permettent de classer les sols selon la norme (NF P11-300, 1992) (Tableau 3-12).

![Figure 3-10: Courbes granulométriques des 6 sols (Tuan Anh Phung, 2018).](image)

**Tableau 3-12 :** Paramètres obtenues par les courbes granulométriques. (Tuan Anh Phung, 2018).

<table>
<thead>
<tr>
<th></th>
<th>Sol 1</th>
<th>Sol 2</th>
<th>Sol 3</th>
<th>Sol 4</th>
<th>Sol 5</th>
<th>Sol 6</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td><strong>D_{max} (mm)</strong></td>
<td>31,5</td>
<td>20</td>
<td>31,5</td>
<td>31,5</td>
<td>5</td>
<td>20</td>
</tr>
<tr>
<td><strong>Pourcentage passant à 2 mm</strong></td>
<td>63,45</td>
<td>79,81</td>
<td>93,02</td>
<td>95,15</td>
<td>96,70</td>
<td>87,16</td>
</tr>
<tr>
<td><strong>Teneur en fines (TF) &lt; 80μm (%)</strong></td>
<td>12,98</td>
<td>57,25</td>
<td>72,65</td>
<td>89,51</td>
<td>25,61</td>
<td>38,80</td>
</tr>
</tbody>
</table>
3.8.3 Activité argileuse

Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3-13 montrent que, le sol 3 possède la plus grande activité argileuse. Il est à noter que les classements obtenus par l’essai au bleu et par les limites d’Atterberg sont différents. En effet, par exemple, le sol 1 possède un IP supérieur au sol 5 alors qu’elle contraire est observé pour la VBs.


<table>
<thead>
<tr>
<th>Sol</th>
<th>1</th>
<th>2</th>
<th>3</th>
<th>4</th>
<th>5</th>
<th>6</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>VBs (g/100g)</td>
<td>0,30</td>
<td>0,73</td>
<td>0,91</td>
<td>0,55</td>
<td>0,47</td>
<td>0,15</td>
</tr>
<tr>
<td>Limite de liquidité</td>
<td>48,9</td>
<td>49,4</td>
<td>53,3</td>
<td>34,1</td>
<td>34,8</td>
<td>31,3</td>
</tr>
<tr>
<td>Limite de Plasticité</td>
<td>28,5</td>
<td>35,7</td>
<td>24,5</td>
<td>20,4</td>
<td>23,4</td>
<td>23</td>
</tr>
<tr>
<td>IP (%)</td>
<td>20,4</td>
<td>13,7</td>
<td>28,8</td>
<td>13,7</td>
<td>11,4</td>
<td>8,3</td>
</tr>
</tbody>
</table>
3.8.4 Caractéristiques de compactage

Les caractéristiques de compactage sont déterminées par l’essai Proctor (NF P94-093). La Figure 3-11 présente les courbes Proctor des six sols et les paramètres à l’optimum Proctor sont récapitulés dans le Tableau 3-14.

![Figure 3-11 : Courbes Proctor des 6 sols. (Tuan Anh Phung, 2018).](image)

**Tableau 3-14 : Teneur en eau l’optimum Proctor et densité sèche correspondant des 6 sols (Tuan Anh Phung, 2018).**

<table>
<thead>
<tr>
<th>Sol</th>
<th>Sol 1</th>
<th>Sol 3</th>
<th>Sol 4</th>
<th>Sol 5</th>
<th>Sol 6</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>( W_{OPN} (%) )</td>
<td>9,7</td>
<td>15,8</td>
<td>14,0</td>
<td>13,3</td>
<td>10,9</td>
</tr>
<tr>
<td>( \rho_{dOPN} (kg.m^{-3}) )</td>
<td>2034</td>
<td>1771</td>
<td>1827</td>
<td>1905</td>
<td>1951</td>
</tr>
</tbody>
</table>
D’après ces résultats, ces sols sont adaptés à la construction en terre.

3.8.5 Formulations des composites terre-fibre

Les courbes granulométriques de ces mélanges sont présentées sur la figure 3-12. Les courbes granulométriques des 2 formulations sont proches avec une différence pour le diamètre inférieur à 0,3 mm. Le mélange A comporte 26,7 % de gravier ; 40,5 % de sable et 32,8 % de limon et d’argile. Le mélange B comporte 26 % de gravier ; 35,5 % de sable et 38,5 % de limon et d’argile. Les mélanges utilisés sont donc proches d’une formulation classique de bauge.

![Courbe granulométrique des trois sols et deux mélanges (Tuan Anh Phung, 2018).](image)

**Figure 3-12 :** Courbe granulométrique des trois sols et deux mélanges (Tuan Anh Phung, 2018).

3.9 Analyse d’un échantillon de terre de Komboinsé (Ouagadougou Burkina Faso) :

Des logements sont construits à l’aide de BTC stabilisés au ciment, un échantillon de terre servant à la construction a pu être étudié, les résultats donnent (Jehanne Paulus, 2015) :

3.9.1 Granulométrie et sédimentométrie

Grâce à ces 2 essais granulométrie et de sédimentométrie, la courbe granulométrique générale de l’échantillon est tracée en les assemblant (voir figure 3-13) :
3.9.2 LIMITES D’ATTERBERG

Le dernier essai réalisé en laboratoire est celui des limites d’Atterberg, servant à déterminer les limites de liquidité et de plasticité ainsi que l’indice de plasticité de la terre analysée. Les résultats suivants peuvent être déduits :

\[ \text{W}_l = 41,37\% \quad ; \quad \text{W}_p = 26,26\% \quad \text{et} \quad \text{I}_p = 18,12\% . \]

3.9.3 ADÉQUATION DE LA TERRE POUR LA PRODUCTION DE BTC

Les résultats obtenus précédemment suite aux trois tests de laboratoire vont permettre de vérifier si la terre de Kamboinsé convient bel et bien à la production de BTC.

Premièrement, la courbe granulométrique résultant du premier test va être comparée au fuseau limite défini pour les BTC (Doat et al. 1979). La terre doit ainsi contenir de préférence entre 0 et 40% de graviers, 25 et 80% de sables, 10 et 25% de silts et entre 8 et 30% d’argiles. Lorsque les deux courbes sont mises en parallèle, le graphique suivant (fig.3-14) est obtenu :

**Figure 3-13** : Courbe granulométrique obtenue par tamisage et sédimentométrie (Jehanne Paulus, 2015).

![Diagram](image-url)
Figure 3-14 : Granularité tout à fait adaptée à la production des BTC (Jehanne Paulus, 2015).

Courbe idéale et fuseau limite : Comparaison avec les résultats obtenus par tamisage et sédimentométrie (Jehanne Paulus, 2015).

En ce qui concerne sa granulométrie, la terre de Kamboinsé semble parfaitement adaptée à la production des BTC. En effet, comme le montre ce graphique (fig. 3-15), la courbe granulométrique obtenue par tamisage et sédimentométrie est parfaitement incluse dans le fuseau limite défini par les normes pour les BTC.

Les résultats obtenus suite aux essais des limites d’Atterberg sont quant à eux comparés au fuseau limite du diagramme de plasticité (figure 3-15) défini par les normes pour les BTC (Guillaud & Houben, 1995). Les terres dont la plasticité est comprise dans ce fuseau donnent des résultats généralement satisfaisants en ce qui concerne les BTC.
Ce graphique (Figure 3-15) permet d’affirmer que la terre de Kamboinsé présente un indice de plasticité inférieur à 20% il est donc recommandé pour permettre un compactage efficace des BTC. L’indice de plasticité étant ici de 18,12%, il permettrait même un compactage manuel. Des presses hydrauliques étant utilisées à Kamboinsé, le résultat ne pourra en être que meilleur (Doat et al. 1979).

Les résultats des limites d’Atterberg permettent également de caractériser le comportement de la terre. Les graphiques ci-dessous indiquent la cohésion de la terre (Figure 3-16), son coefficient d’activité (Figure 3-17) ainsi que son expansivité (Figure3-18).

Figure 3-15 : Fuseau limite du diagramme de plasticité (Jehanne Paulus, 2015).

Figure 3-16 : Etat cohésif de la terre. (Jehanne Paulus, 2015).

À l’aide de ce graphique (Figure 3-16), il apparaît que la terre de Kamboinsé est
moyennement cohésive.

Le coefficient d’activité permet quant à lui de préciser les risques de déformation du matériau. Ainsi, plus l’indice de plasticité de la terre est important et plus le gonflement du BTC par humidification et son retrait par dessiccation sont élevés. Il se calcule à l’aide de la formule suivante :

\[
Ca = \frac{lp}{\%argiles(\varnothing < 2\mu)}
\]

Dans le cas de la terre de Kamboinsé, le coefficient d’activité vaut : \( Ca = \frac{18,12}{29,61} = 0,61 \) Cette valeur étant inférieure à 0,75, la terre peut être considérée comme inactive.

Ce coefficient d’activité peut également être trouvé à l’aide du graphique suivant :

**Figure 3-17 : Coefficient d'activité de la terre (Jehanne Paulus, 2015).**

Le graphique (Fig. 3-17) donne le même résultat que précédemment. La terre de Kamboinsé peut être désignée comme étant inactive.

Le graphique ci-dessous (Fig. 3-18) permet quant à lui de préciser l’expansivité du matériau :
Figure 3-18 : Expansivité de la terre (Jehanne Paulus, 2015).

Malgré un coefficient d’activité inférieur à 0,75, c’est-à-dire inactif, la terre de Kamboinsé présente une expansivité moyenne. Il faudra donc vérifier le comportement des BTC afin de s’assurer que des fissures trop importantes n’apparaissent pas lors du séchage où lors de fortes pluies.

3.10 CONCLUSION

Nous avons abordé dans ce chapitre plusieurs résultats expérimentaux d’études effectuées sur différents types de sols. Ces essais nous ont permis de voir les résultats obtenus par d’autres chercheurs à travers plusieurs pays.
Ces résultats concernent les principaux critères énumérés dans les différentes normes à savoir : granulométrie, plasticité et résistance à la compression.
Les résultats montrent généralement une bonne concordance des matériaux utilisés pour la construction en terre avec les exigences des principales normes citées dans le chapitre précédent.
Ce qui nous permet de dire que les sols analysés sont effectivement adaptés à la construction en terre.
CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a l’ambition d’étudier les caractéristiques des matériaux destinés à la construction en terre crue. Cette dernière est méconnue et méprisée, car elle est liée à des images d’archaïsme et de pauvreté. Depuis près de 9000 ans, l’homme avait tendance à bâtir des villes entières en terre crue et demeure jusqu’à présent, un des matériaux de construction le plus utilisé sur la planète. Ce remarquable héritage culturel universel a été occulté, depuis que l’homme a connu la technique du béton. Il nous faut donc redécouvrir les évidences de ce que certains ont bien cru synonyme de pauvreté et de précarité.

La revalorisation de l’architecture de terre doit passer par faire la lumière sur une connaissance plus approfondie de la matière, particulièrement de la distribution granulométrique, la plasticité et la résistance à la compression. Ceci dans le but de la maîtriser et mettre en valeur toutes ses vertus écologiques et ses performances thermiques, physiques et mécaniques avec toutes les incidences positives qu’elle peut réaliser sur le plan énergétique, environnemental et esthétique.

Ce manuscrit s’est étalé dans le premier chapitre à donner les principales définitions et caractéristiques de la construction en terre.

Ensuite, on a abordé les différentes normes qu’on a pu trouver et qui donnent des directives sur le matériau sol destiné à la construction en terre. Ces recommandations sont divisées en 3 groupes : le premier groupe concerne les codes du continent américain. Le deuxième groupe il y a les documents de référence nationaux des pays tels que l’Allemagne, l’Australie, l’Espagne.

Le 3ème et dernier groupe se compose de la bibliographie générale de la construction de la terre cela s’appelle les documents techniques.

Dans le chapitre 3 et à titre de travail d’investigation, une comparaison a été faite entre les résultats obtenus par les différents chercheurs et entre les recommandations de certaines normes traitant du domaine en question.
Ces comparaisons ont abordé principalement la granulométrie, la plasticité et la résistance à la compression.
Enfin sur le plan personnel, nous ne prétendons pas avoir fait le tour complet de la question en ce qui concerne l’état de la normalisation dans le domaine de la construction en terre. Néanmoins, nous sommes convaincus que le travail élaboré n’est qu’une étape primaire aussi bien pour une carrière professionnelle que pour des études académiques plus approfondies.


**GIBOULET, J.** (2017). LES PERCEPTIONS DE LA MATIÈRE TERRE COMME MATIÈRE À VIVRE ET À CONSTRUIRE ARCHITECTURE. L’ENSAM.


Département De génie Civil et Hydraulique, Ouargla.


Consulté le 20, 03, 2020, sur : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redecouvrir.html


Consulté le 01, 06, 2020, sur :

https://altahine.wordpress.com/2012/05/13/lancienne-mosquee-de-bobo-dioulasso/.