TABLE DE MATIÈRES

DEDICACE iii

REMERCIEMENTS iv

TABLE DE MATIÈRES v

ملخص ix

Résumé ix

Abstract x

LISTE DES NOTATIONS ET DES ABREVIATIONS 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

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.7 CONCLUSION 15

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 (normeNFP94-056/ 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 المختلفة المتعلقة بالبناء الترابي بشكل عام والكتل 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.

Abstract

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.

UBC: Uniform Building Code.

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.

Rapport-Gratuit.com

WHEAP : World Heritage Earthen Architecture Programme (le Programme du patrimoine mondial pour l'architecture de terre).

ICCROM : 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.

Rc : 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.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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: REPERES CHRONOLOGIQUES DE LA CONSTRUCTION EN TERRE (C. DELBECQUE 2011).. 2
TABLEAU 1-2: LES OPERATIONS DE CONSTRUCTION EN TERRE EN ALGERIE (SOURCE : CNERIB, 2000)..... 4
TABLEAU 1-3: AVANTAGE ET INCONVENIENTS DES CONSTRUCTIONS EN TERRE CRUE..... 5
TABLEAU 1-4: AVANTAGES ET INCONVENIENTS 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 RESISTANCE EN COMPRESSION SECHE (AFNOR, 2001). 27
TABLEAU 2- 5: CLASSES DE RESISTANCE EN COMPRESSION HUMIDE (AFNOR, 2001)..... 27
TABLEAU 2- 6: CLASSES DE RESISTANCE A L'ABRASION (AFNOR, 2001)..... 28
TABLEAU 2-7: LES CARACTERISTIQUES DES BRIQUES DE TERRE CRUE (BTC) (ART TERRE, 2018). .. 28
TABLEAU 2 - 8: LES CARACTERISTIQUES DES BRIQUES DE TERRE CRUE (ADOBE, PISE, BTC) (HAKKOUM SOUMIA, 2015)..... 29
TABLEAU 2 -9: CARACTERISTIQUES DES BRIQUES TERRES CRUES (KRAMI ET REGGADI, 2011)..... 30
TABLEAU 2 -10: SYSTEME SIMPLIFIE DE CLASSIFICATION DES SOLS SELON LA NORME ASTM D2487 AVEC UNE EVALUATION QUALITATIVE DE L'APTITUDE A LA CONSTRUCTION EN TERRE (VAN-DAMME ET HOUBEN, 2017)..... 31
TABLEAU 2- 11: NORMES DE DETERMINATION DE LA RESISTANCE 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'EPAISSEUR DU MUR EN FONCTION DES RESISTANCES A LA COMPRESSION POUR LE PISE (TOTAL BOOX ET TBX, 2012)..... 40
TABLEAU 2-13: RESISTANCES EN COMPRESSION DES BRIQUES DE TERRES COMPRIMEE (CRATERRE, 1995)..... 41

TABLEAU 2-14: COMPARAISON THERMIQUE D'UNE PAROI DE 20CM D'EPAISSEUR (OLIVA, COURGEY, LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE, EDITIONS TERRE VIVANTE, 2006)..... 43

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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 ; CRATERRE ET URBAPLAN, 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 3-11: VARIATION DE LA RESISTANCE DE FLEXION ET LA RESISTANCE DE COMPRESSION EN FONCTION DU POURCENTAGE DES FIBRES (MEKHERMECHE ABDESSALME, 2012). 62
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, TLEMCEN. 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 1-14 : LA MAISON DES PLANTES DE LAUFEN « REALISER EN 2014 ». (LA SOURCE : HTTPS://WWW.ESPAZIUM.CH/FR/ACTUALITES/RICOLA-OUVRE-UNE-MAISON-DES-PLANTES-LAUFON). 13
FIGURE 1-15 : BURKINA FASO ÉCOLE DE GANDO « ANNÉE : 1998-2001 ». (LA SOURCE : HTTP://WWW.A4PERSPECTIVES.COM/WP-CONTENT/UPLOADS/2020/01/ECOLE-PRIMAIRE-GANDO-BURKINA-FASO-CABINET-KERE-ARCHITECTURE.JPG). 13
FIGURE 1-16 : L'ECOLE 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). 14

FIGURE 1-17:CENTRE SPORTIF SUR LE CAMPUS UNIVERSITAIRE KERLAN A RENNES « REALISER EN « 2010 - 2012 ». (LA SOURCE : HTTPS://WWW.ARCHITECTES.ORG/SITES/DEFAULT/FILES/FICHIERS/ACTUALITES/PRIX%20ARCHITECTURE%20TERRE%20-%20PRESSE2.PDF)..... 14
FIGURE 2-1 : NORMES EN TERRE SELON L'ANNEE DE PUBLICATION (JAIME CID-FALCETO ET AL. 2012). 21
FIGURE 2- 2 : NORMES DE DETERMINATION DE LA RESISTANCE 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, P'KLA, 2002). 24
FIGURE 2 -3: FUSEAUX DE COURBES GRANULOMETRIQUES CONSEILLEES POUR CONSTRUIRE EN BTC, EN PISE OU EN ADOBE (BTM = BRIQUE DE TERRE MOULEE) SELON LA [NORME-NF-XP-P13-901, 2001], CRATERRE-EAG [1998], MOPT [1992] (JIMENES ET GUERRERO, 2007)..... 33
FIGURE 2- 4: FUSEAU DU DIAGRAMME DE TEXTURE DES TERRES (AFNOR, 2001). 33
FIGURE 2- 5: FUSEAUX DE PLASTICITE CONSEILLEES POUR CONSTRUIRE EN BTC, EN PISE OU EN BTM SELON LA NORME FRANÇAISE [NORME-NF-XP-P13-901, 2001], CRATERRE-EAG [1998] ET HOUBEN AND GUILLAUD [1989]. (JIMENES ET GUERRERO, 2007) 35
FIGURE 2- 6: FUSEAU DU DIAGRAMME DE TEXTURE DES TERRES (AFNOR, 2001). 36
FIGURE 2- 7: VALEURS EXPERIMENTALES ET CARTE DE PLASTICITE (A.W. BRUNO, D. GALLIPOLI, C. PERLOT, J. MENDE S**,** N. SALMON ; 2015**)**. 36
FIGURE 2- 8: FUSEAUX DE COMPACTAGE RECOMMANDES POUR CONSTRUIRE EN BTC, EN PISE OU EN ADOBE SELON HOUBEN AND GUILLAUD [1994]..... 37
FIGURE 2- 9: RESISTANCES A LA COMPRESSION MINIMALES ADMISES POUR LES BTC (LAVIE ARSENE MANGO- ITULAMYA ,2019)..... 38
FIGURE 2- 10: COMPRESSION DES MATERIAUX TERRE (VAN-DAMME AND HOUBEN, 2017)..... 38
FIGURE 2- 11: SCHEMA ET DISPOSITIF DE L'ESSAI DE COMPRESSION (HALLEUX, 2012, MODIFIE)..... 39
FIGURE 2- 12: PROPRIETE MECANIQUE DE LA TERRE : LA RESISTANCE A LA COMPRESSION (TALEB BOULERBAH, 2019). 39
FIGURE 2- 13: SCHEMA ET DISPOSITIF DE L'ESSAI DE FLEXION 3 POINTS (HALLEUX, 2012, MODIFIE). 41
FIGURE 2-14: ESSAI D'EROSION AU GOUTTE-A-GOUTTE (BLOC NON STABILISE) (JAIME CID-FALCETO; PABLO MOSQUERA; FRANCISCO MARCOS; CRUZ CALLEJA PERUCHO; IGNACIO CAÑAS, 2012)..... 42

FIGURE 2-15: ESSAI D'EROSION AU GOUTTE-A-GOUTTE (BLOC STABILISE) (JAIME CID-FALCETO; PABLO MOSQUERA; FRANCISCO MARCOS; CRUZ CALLEJA PERUCHO; IGNACIO CAÑAS, 2012)..... 42
FIGURE 3-1: COURBES GRANULOMETRIQUES DES ECHANTILLONS ANALYSES WETSHONDO (2002). . 48
FIGURE 3-2: REPARTITION DE LA TAILLE DES PARTICULES DE LA TERRE CONTENUE 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. (MEKHERMECHE ABDESSALME, 2012)..... 60
FIGURE 3-8 : COURBE GRANULOMETRIQUE D'ARGILE (MEKHERMECHE 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 PLASTICITE (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

INTRODUCTION GENERALE

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 ratifier 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 connaitre 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 bibliographie 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.

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LA CONSTRUCTION EN TERRE

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.1INTRODUCTION

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 :

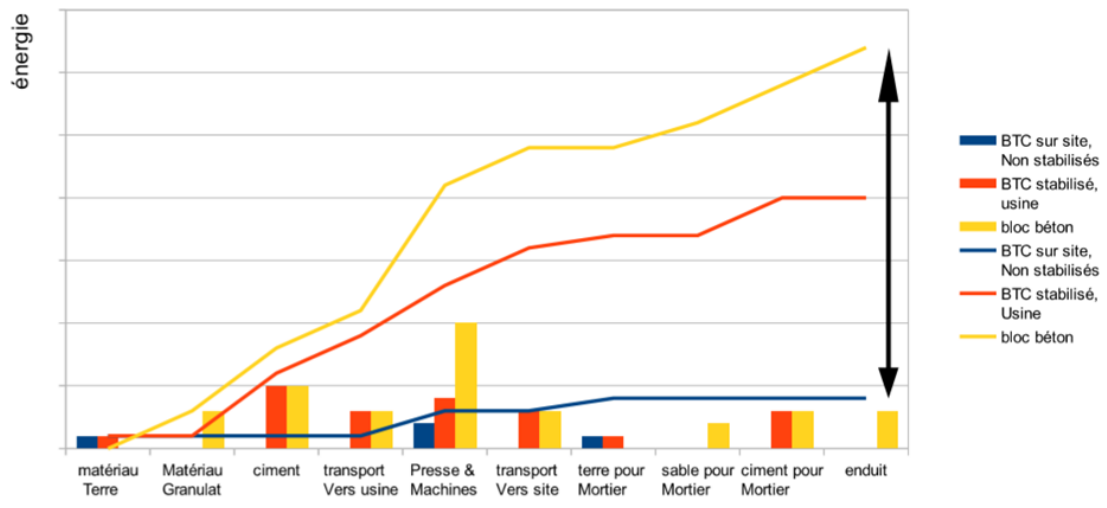

Figure 1-1: Dépenses d'énergie des deux différentes techniques en BTC et en béton (Mesbah et Olivier, 2016).

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).

Temps	Événement
11 000 ans	Premières traces de la construction en terre en Amérique du sud.
10 000 ans	En Syrie construction en terre par empilement de pains de terre façonnés à la main.
8 500 ans	Apparition de la brique de terre en Turquie.
8 000 ans	Apparition de l'utilisation de la terre dans l'habitat en Europe occidentale.
5 000 ans	Apparition des premières villes d'architecture de terre crue en Mésopotamie.
1860	Apparition des fours à feux continus qui permettent une production plus industrielle de la brique.
1918 et 1945	Début des reconstructions suite aux conflits mondiaux et abandon de la terre crue en milieu urbain.
A partir de 1980	Redécouverte de la terre crue pour la sauvegarde du patrimoine dans un premier temps puis pour ses qualités environnementales.

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.

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

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

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

1.4 Principaux avantages et inconvénients des constructions en terre crue

Dans le tableau suivant, nous avons répertoriés 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.

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

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).

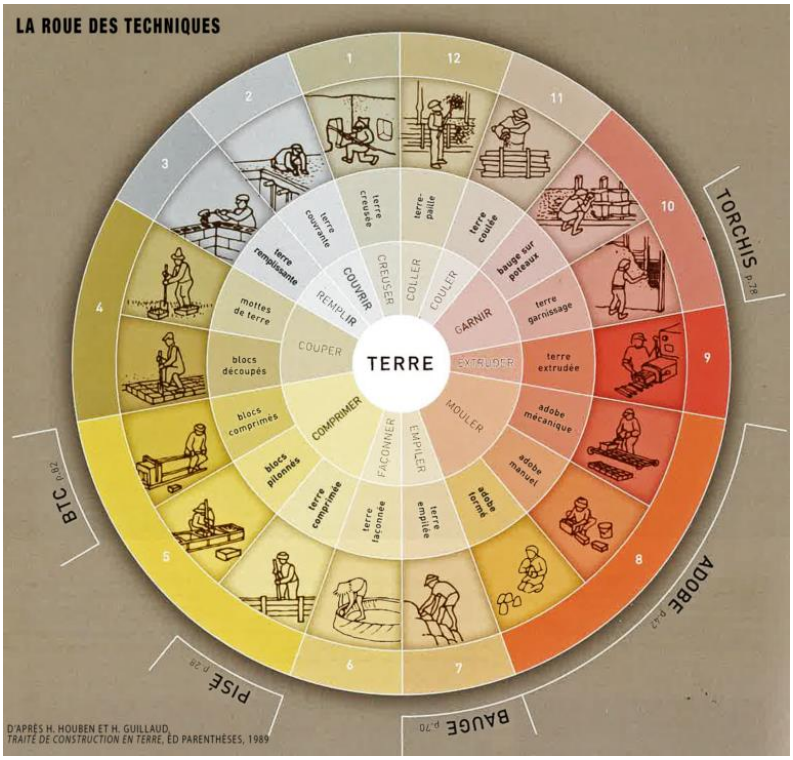

Figure 1-3: Roue des différentes techniques de construction en terre CRATerre en 1986 (Guillaud et Houben, 1998 ; cité par Paulus, 2015).

Ci-après on présentera d'une maniére 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).

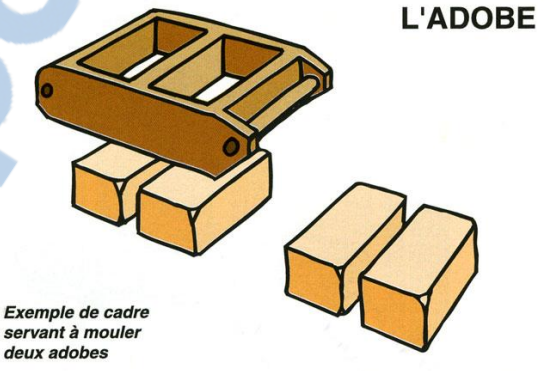

Figure 1-5: Construction en Adobe. (La Source : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redecouvrir.html).

Rapport-Gratuit.com

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 (Figure1-6).

Figure 1-6: Photo Mansourah, Tlemcen.

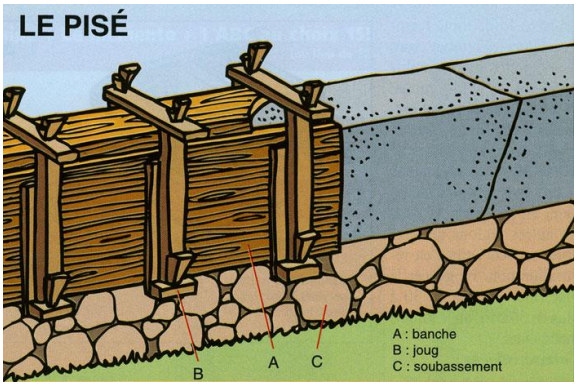

Figure 1-7 : Construction en pisé. (La Source : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redecouvrir.html).

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.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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 torchis dans les villages de la vallée de Largue, France.

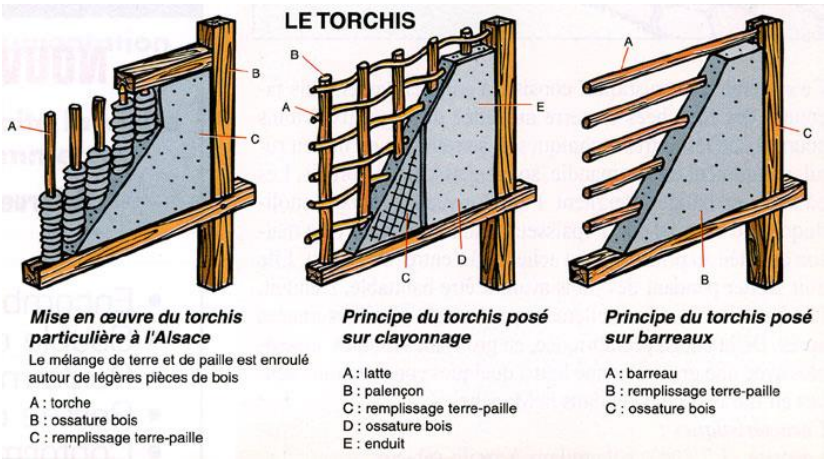

Figure 1-11: Construction en Torchis. (La Source : https://www.batirama.com/article/169-terre-crue-4-techniques-a-redecouvrir.html).

1.5.4 Briques de terre compressée

Les blocs de terre comprimée (BTC) sont fabriqués dans des presses manuelles (Figure1-13) 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

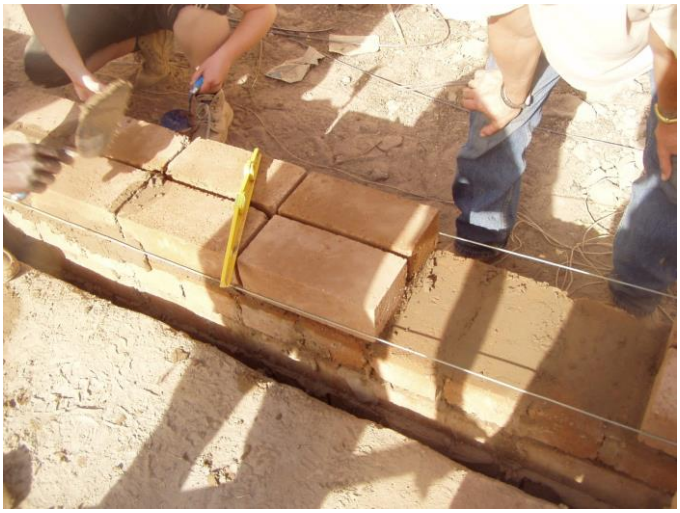

Figure 1-13 : construction en BTC.

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).

Avantages	Inconvénients
• La BTC est un matériau écologique. • La BTC procure un confort thermique et phonique excellent. • La BTC offre une grande résistance à la compression. • La BTC présente un intérêt architectural et esthétique. • La BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation. • La BTC est simple à mettre en œuvre.	• Fabrication des briques sont lente. • Fragilité : au moindre choc la brique se brise ou s'effrite. • Se détériore sous l'effet du gel.

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 1-15 : Burkina Faso École de Gando « ANNÉE : 1998-2001 ». (La Source : http://www.a4perspectives.com/wp-content/uploads/2020/01/ecole-primaire-gando-burkina-faso-cabinet-kere-architecture.jpg).

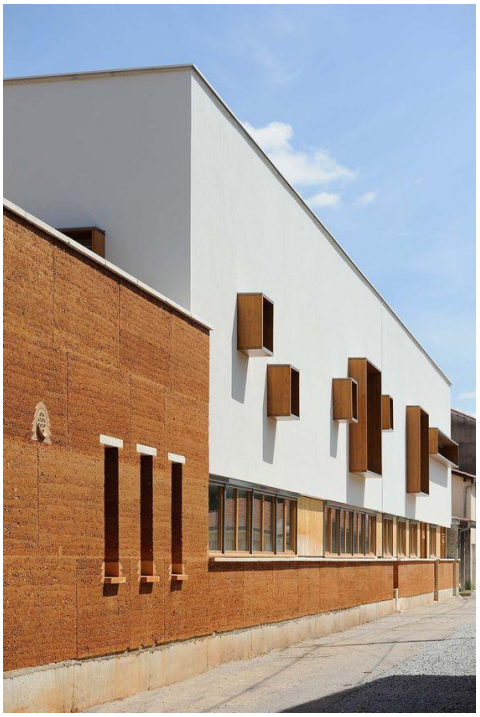

Figure 1-16 : L'école maternelle des Roches de Condrieu. (La Source : https://www.amc-archi.com/photos/brenas-doucerain-realise-une-ecole-maternelle-aux-roches-de-condrieu,9037/l-ecole-maternelle-des-roch.6).

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).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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. A 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

Un guide a été préparé en collaboration entre CRAterre-EAG (centre international de la construction en terre et l'Ecole d'architecture de Grenoble) avec l'appui de l'ORAN (Organisation Régionale Africaine de Normalisation) et du laboratoire géo matériaux URA du CNRS n°1652 de l'ENTPE (Ecole Nationale des travaux publics de l'état à Lyon en France). Le centre pour le développement industriel (CDI), le CRAterre-EAG, l'ORAN, les experts et les consultants fournissent des recommandations et forme un guide pour la réalisation des ouvrages sain. Ils ne peuvent accepter aucune responsabilité du fait d'erreurs, inexactitudes, lacune et omission éventuelles ou de leur conséquence.

Rapport-Gratuit.com

2.5 L'utilisation des normes :

Actuellement, les seuls codes complets qui traitent spécifiquement de la construction en bloc de terre comprimée (BTC) se trouvent en Allemagne et en nouvelle Zélande. Aux Etats-Unis la construction en adobe est intégrée aux codes nationaux de construction. Pendant les années 1970, le ≪ Uniform Building Code (UBC) ≫ était publié au niveau national.
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).

Groupes	Pays	Document	Techniques	Approches pour le choix de sol
1. Normes de NSBsb et règlements	États-Unis	NMAC 14.7.4 (2000)	A, BTC, TE	Petites recommandations. Des unités de construction doivent être examinées.
	France	XP P 13-901 (2001)	BTC	Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature du sol
	Nouvelle-Zélande	NZS 4297 (1998) 4298 NZD 1998) 4299 NZD 1998)	A, BTC, TE	Recommandations non quantitatives au sujet des sols qui ne doivent pas être employés. Mouiller/essai sec nécessaire. Système pour l'essai des unités
	Pérou	NTE E 080 (2000)	A	Les petites recommandations et ceux-ci sont pour la granularité
	Afrique régionale	ARSO (1996)	BTC	Abaques de granularité et de plasticité. Classification par la nature. Énumérer et classifier les essais de sol, pas de procédures expliquées.
	Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	TE	Les recommandations pour la granularité, les sels, le contenu organique et le ruban examinant.
2. Normatifs Documents	Allemagne	Lehmbau Regeln (1999)	A, BTC, TE	Force de loi, plasticité et granularité d'essai essentiel. Énumérer et expliquer les essais en laboratoire simples et donnant des recommandations pour certains d'entre eux.
	Australie	HB 195 (2002) Bulletin 51 992 EBAA (2001)	A, BTC, TE	Énumération de champs et d'essais en laboratoire, avec des procédures données pour certaines. Recommandations de granularité pour chaque technique *Recommandations générale qualitative pour la granularité. Convenance par l'essai des unités. Observation de l'exécution de l'héritage existant *recommandations non quantitatives au sujet des sols.
	Espagne	MOPT (1992) IETcc (1971)	À, BTC, TE	Pour ne pas employer Convenance par l'essai sur le terrain avec un diagramme de décision. Essais en laboratoire recommandés, avec des recommandations pour la granularité.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

	CYTED international	CYTED (1995)	A, CEB, TE	Quelques dispositions pour des états généraux de sol Pas une approche directe pour le choix du sol. Recommandations selon des essais de force sèche
3. Technique documents	Houben et Guillaud (1994)		À, BTC, TE	Propriétés essentielles : granularité, plasticité, compactibilité et cohésion. Préliminaire et essai d'identification de laboratoire expliqué. Abaques pour la granularité, la plasticité et la compactibilité. Classification par la nature
	Rigassi V (1995)		BTC	Granularité, plasticité et compactibilité essentielles. Des essais de sol d'identification de champ et de laboratoire sont expliqués.
	Mc. Henry PG (1984)		À, TE	Offre les sols moyens qui ont montré la bonne exécution dans les bâtiments existants
	Smith et Austin (1996)		A, BTC, TE	L'identification et le choix des sols ne sont pas donnés beaucoup d'importance. Dispositions très petites. Les unités d'essai sont la meilleure manière.
	OIA (1970)		À, BTC, TE	Convenance par l'essai sur le terrain avec un diagramme de décision. Identification par des essais en laboratoire sans recommandations
	Spencer et Cook (1983)		À, BTC, TE	Arrangement essentiel, les propriétés d'index : dimension particulaire, limites d'Atterberg, tassement et classifications des sols bien que recommandations non données. L'essai des unités est essentiel.

La figure 2-1 montre l'évolution des différentes recommandations et normes par pays depuis 1979. Ces recommandations concernant les différentes techniques sont des garanties de la qualité et l'innovation technologique de la construction en terre (blocs de terre comprimée, pisé et adobe). Toutes ces normes sont des documents qui mettent des définitions, des exigences relatives aux produits, des procédures de mise en œuvre, des procédures d'évaluation et de mesures et des normes de qualité (Jaime Cid-Falceto et al, 2012).

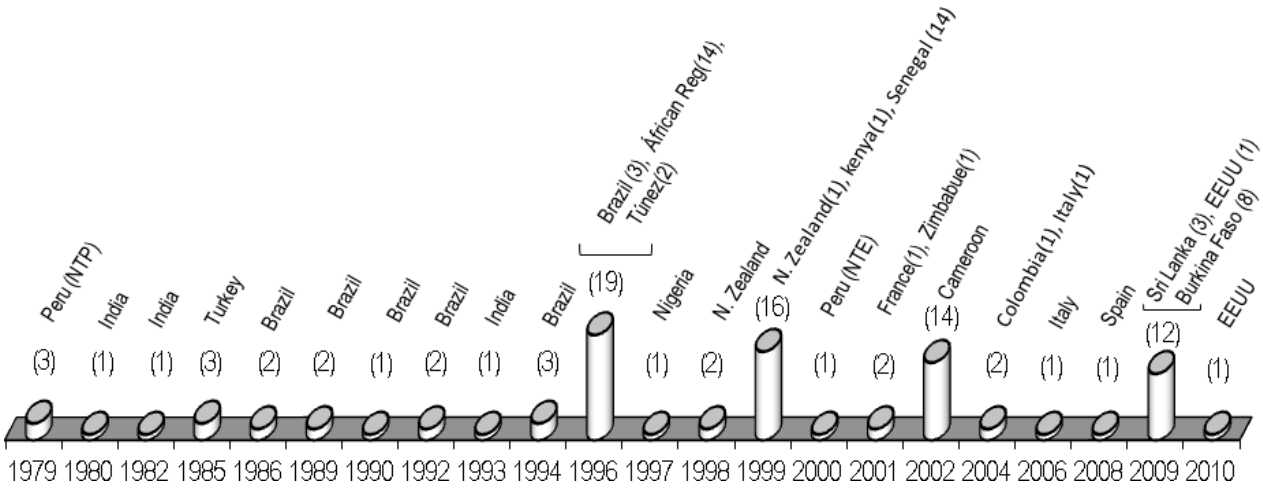

Figure 2-1 : Normes en terre selon l'année de publication (Jaime Cid-Falceto et al. 2012).

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 emboitement (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 Boulerabah, 2019).

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

Pays	Documents de référence	Critères de sélection de la terre
USA	NMAC 14.7.4 (2000)	Peu de recommandations : les unités constructives doivent être testées
France	XP P 13-901 (2001)	Granularité, plasticité et nature de la terre
Nouvelle Zélande	NZS 4297 (1998)	Les unités constructives doivent être testées
Pérou	NTE E 080 (2000)	Granularité
Afrique	ARSO (1996)	Granularité, plasticité et nature de la terre
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	Granularité, sels, teneur en matière organique et cohésion
Allemagne	Lehmbau Regeln (1999)	Force de liaison, plasticité et granularité.
Australie	HB 195 (2002)	Granularité
Espagne	MOPT (1992)	Granularité

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 :

$$f_k = \frac{fb}{10}$$

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 mm^3. 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.

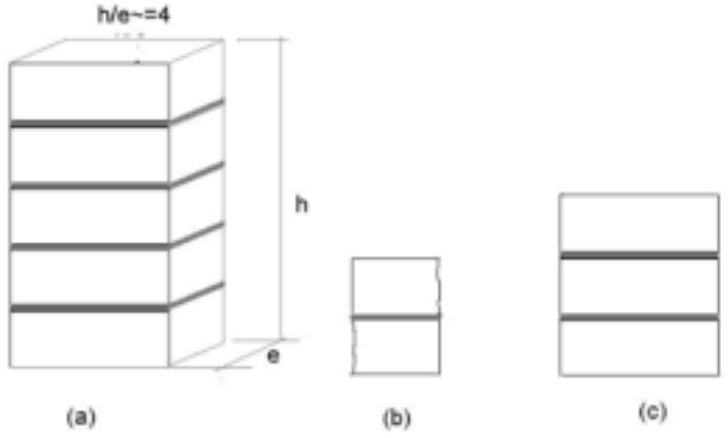

Figure 2- 2 : Normes de détermination de la résistance à la compression. a) norme [CYT 93] Pérou, Brésil et Cuba ; b) norme Afrique ORAN [NOR 98] ; c) norme [VEN 92] Inde. Il s'agit de blocs 29,5x14x9, 5 cm (Lxlxh, P'kla, 2002).

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).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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 :

$$f_{k=}0,4f_b.F_k$$

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 :

$$f_b = \sigma_{rupt\ moy}\text{-}S$$

Où $\sigma_{rupt\ moy}$ 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. Etats-Unis [CID 91]

L'Etat du nouveau Mexique a édité une norme en 1991. Les constructions sont limitées à deux étages et les murs à un élancement de 10.
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.

Internationales	Européennes	Africaines
- Norme NSBs (National Standards Bodies, New Mexico) USA NMAC 14.7.4. 2003 - Normes Nouvelle-Zélande NZS 4297, 4298, 4299 (1998) - Règles de construction en terre, en Australie HB 195 (2002) Bulletin 5 1992 EBAA (2001) - International CYTED recommandation pour la préparation de la norme concernant le matériau terre (1995)	- Norme française XP P 13-901 (2001) - Des documents normatifs : Allemand Lehmbau Regeln (1999) Spain MOPT (1992) [5] -Documents techniques de CRAterre Houben et Guillaud (1994), Rigassi V (1995) - Smith et Austin (1996) - OIA (1970) - Spence et Cook (1983)	- Organisation régionale africaine de normalisation publiée dans un document de CRATERRE), ARSO (1996) - SAZS 724 Zimbabwe (2001) pour les pisés

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).

Blocs plein	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Résistance minimale (R) pour le fractile 0.05-MPa	2	4	6

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).

Blocs plein	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Résistance minimale (R) pour le fractile 0.05-MPa	1	2	3

Rapport-Gratuit.com

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).

Blocs plein	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Coefficient d'abrasion minimal (Ca) cm2/g	2	5	7

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).

Mécanique	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Masse volumique	1900 kg/m^3 (de1800 à 2100 kg/m^3)		
Résistance moyenne à la compression du bloc	2 MPa	4 MPa	6 MPa
Résistance moyenne à la traction du bloc	0,2 MPa	0,4 MPa	0,6 MPa
Cisaillement (G=0,4E)	0,6 GPa	1 GPa	1,6 GPa
Module de Young	1 ,5 GPa	2,5 GPa	4GPa
Coefficient de Poisson	0,2	0,25	0,3
Coefficient de Fluage ultime	2 à 3	2 à 3	2 à 3
HYDRIQUE			
Teneur en eau Massique	1 %		
HYGROTHERMIQUE			

Conductivité Thermique	0,416 W(m.k)$^{-1}$
Capacité Thermique à (20°C)	800 J (kg.k)$^{-1}$
Coefficient d'absorptivité (à Bloc Nu)	0,55 à 0,65
Perméabilité à la Vapeur d'Eau	1,27.10^{-10}kg (m.s.Pa)$^{-1}$
Résistance à la vapeur d'eau	15

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).

Caractéristique	**Adobe**	**Pisé**	**BTC**
Masse volumique (kg/m^3)	1200-1700	1700-2200	1700-2200
Résistance à la compression (MPa)	2-5	< 2 ,4	< 2 ,4
Résistance à la traction (MPa)	/	0,5-1	/
Conductivité Thermique λ (W/m.°C)	0,46-0,81	0,81-0,93	0,81-1,04
Chaleur Spécifique (J/kg.°C)	900	850	/
Capacité Thermique (KJ/m^3. °C)	1350	510	/
Absorption d'eau (%)	5	10-20	10-20
Isolation Acoustique (dB)	/	50 dB pour 40 cm 40 dB pour 20 cm	50 dB pour 40 cm 40 dB pour 20

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Retrait de Séchage (mm/m)	1	1-2	0,2-1

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).

Caractéristique	BTC
Conductivité λ (W/m.°C)	0.81 – 1.04
Absorption d'eau (%)	10 - 20
Isolation acoustique (dB)	50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm
Retrait au séchage (mm/m)	0.2 – 1
Résistance en traction (fendage)	0,1 à 0,2Rc
« Module » d'élasticité	Sec, non stabilisé :100 à 1000 MPa Sec, stabilisé : 3500 MPa
Caractéristiques thermiques	ρC entre 600 à 800 Wh/m³. K C entre 1200 à 1500 J/ kg. K
Diffusivité 10^{-6}m²/s	0,25
Effusivité J/m²•K•s1/2	0,45

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 granulométrie 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).

Principales divisions		**Symbole de groupe**	**Noms de sols typiques**	**Aptitude à la construction de la terre (non stabilisée)**
Sols à gros grains > 50% retenus (refus) sur le tamis de 0,075mm	Graviers de 50% retenus (refus) sur le tamis 4,75 mm	Gravier propre, avec < 5% de passant du tamis 0,075mm	Gravier bien gradué Gravier mal gradué (serrée)	Ne convient pas, il faut amender par des sols fins
		Gravier avec >12% de fines	Gravier limoneux	Ne convient pas, il faut amender par des sols fins appropriés mais manque de cohésion et se désagrège facilement
			Gravier argileux	Approprié, parfois, un sol fin doit être ajouté
Sols à grains fins >50% passent (tamisât) dans le Tamis de	Les sables de 50% ou plus passent sur le tamis de 4,75mm	Sables propres	Sables propres bien gradué	Ne convient pas, il faut amender par des sols fins
		Sables avec >12% de fines	Sables propres mal gradué	Ne convient pas, il faut amender par des sols fins appropriés mais manque de cohésion et se
		Inorganique	Sable limoneux	

0,075mm			Sables argileux	désagrège facilement Approprié, parfois, un sol fin doit être ajouté
Sols très organiques	Limons et argiles avec plus ou moins 50% limite de liquide Limons et argiles avec limite de liquidé > 50%	Organique	Limons de faibles plasticités, Sables fins limoneux Argiles de faible plasticité, Limon Argileux Limons organiques et argiles de faible plasticité	Approprié mais manque de cohésion Ne convient pas, parfois acceptable Très rarement approprié
		Inorganique	Limons de forte plasticité Argiles de forte plasticité, Argile plastique Argiles et limons organiques de fortes plasticités	Rarement approprié, un sol sableux doit être ajouté Inapproprié
		Organique	Tourbe et autre sols très organiques	Inapproprié pour les constructions en terre

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).

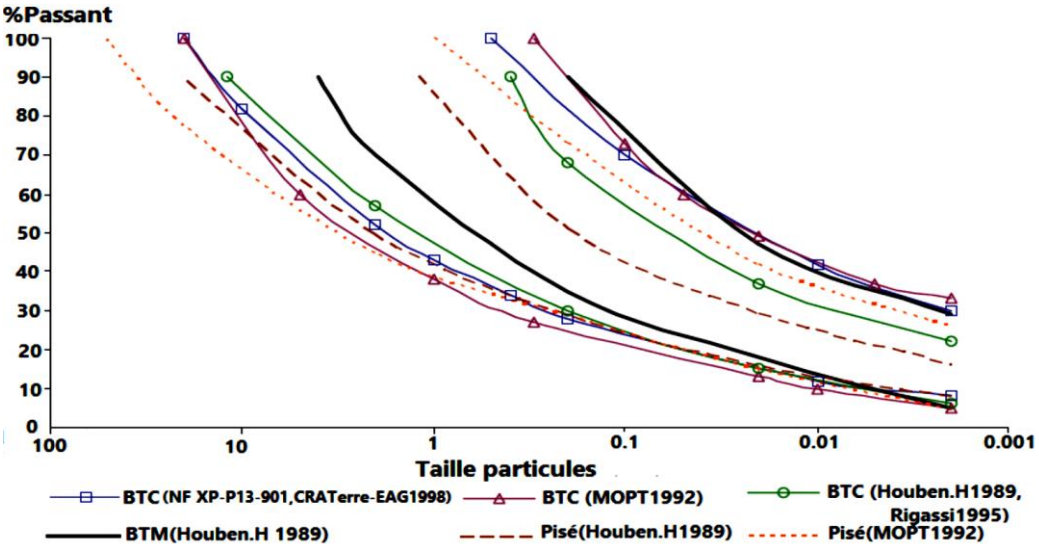

Figure 2-3: Fuseaux de courbes granulométriques conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en adobe (BTM = Brique de Terre Moulée) selon la [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998], MOPT [1992] (Jiménes et Guerrero, 2007).

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).

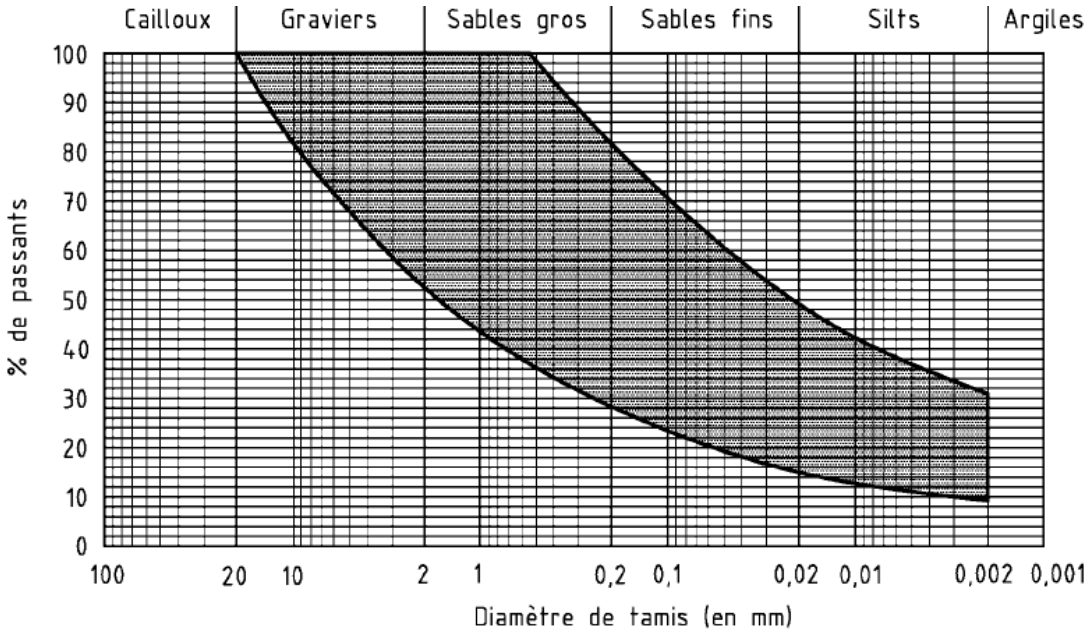

Figure 2-4: Fuseau du diagramme de texture des terres (AFNOR, 2001).

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.

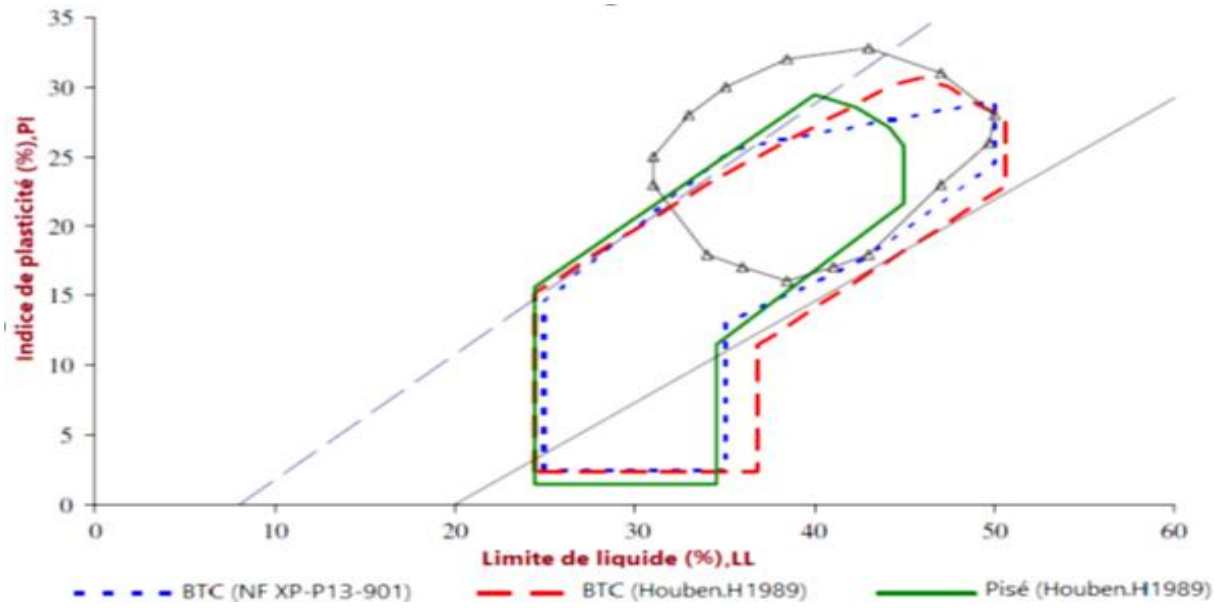

Figure 2-5 : Fuseaux de plasticité conseillées pour construire en BTC, en Pisé ou en BTM selon la norme française [Norme-NF-XP-P13-901, 2001], CRATerre-EAG [1998] et Houben and Guillaud [1989]. (Jiménes et Guerrero, 2007)

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.

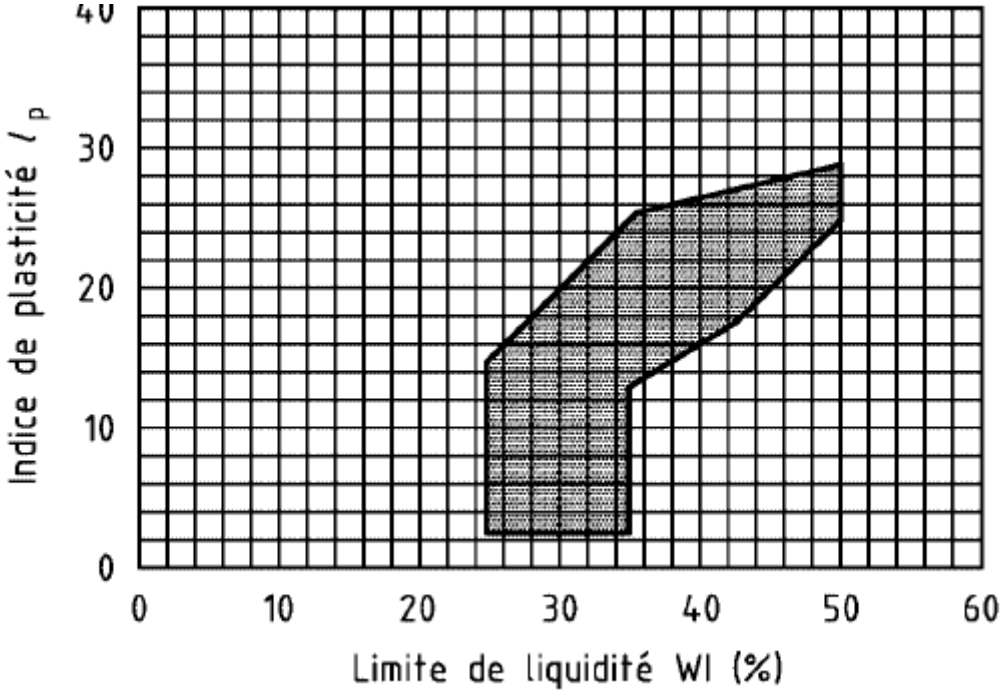

Figure 2-6 : Fuseau du diagramme de texture des terres (AFNOR, 2001).

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, CRATerre-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.

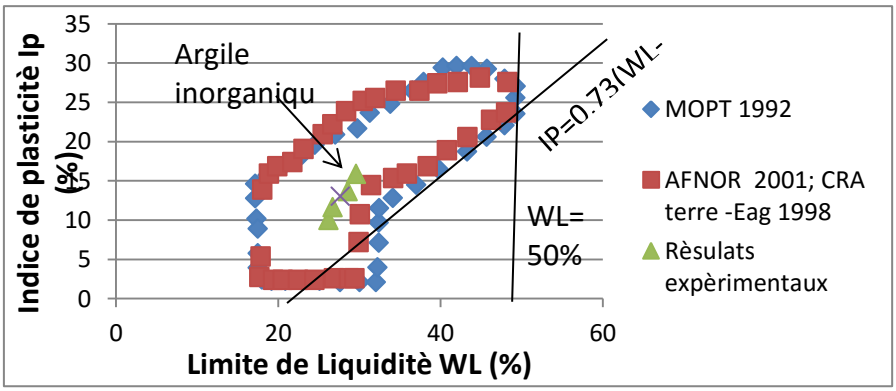

Figure 2-7 : Valeurs expérimentales et carte de plasticité (A.W. Bruno, D. Gallipoli, C. Perlot, J. Mendè s, N. Salmon ; 2015).

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).

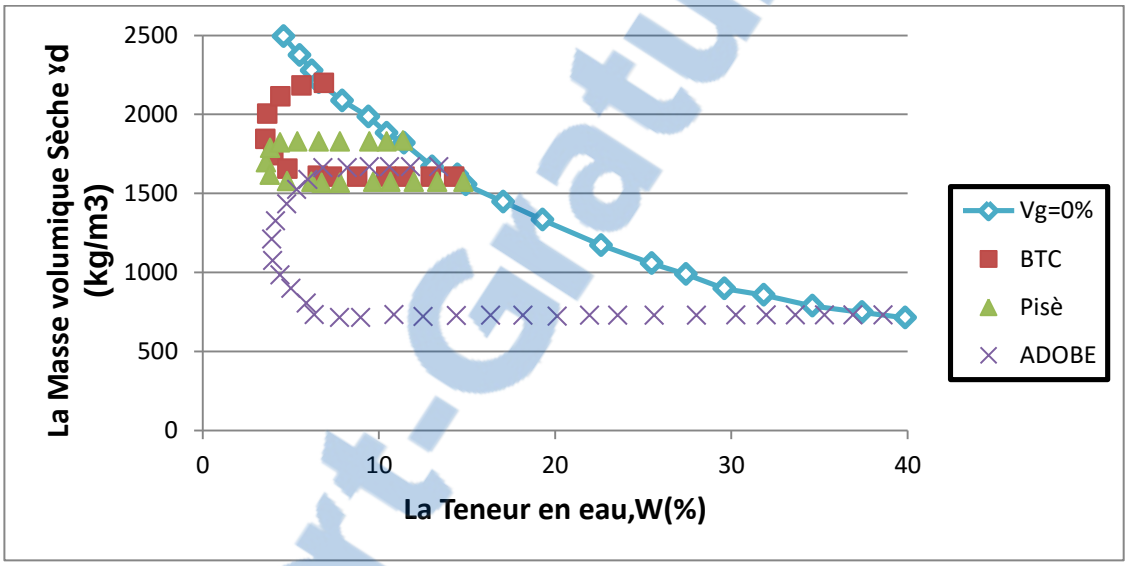

Figure 2-8 : Fuseaux de compactage recommandés pour construire en BTC, en Pisé ou en Adobe selon Houben and Guillaud [1994].

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 Rc.

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.

Rapport-gratuit.com
Le numero 1 mondial du mémoires

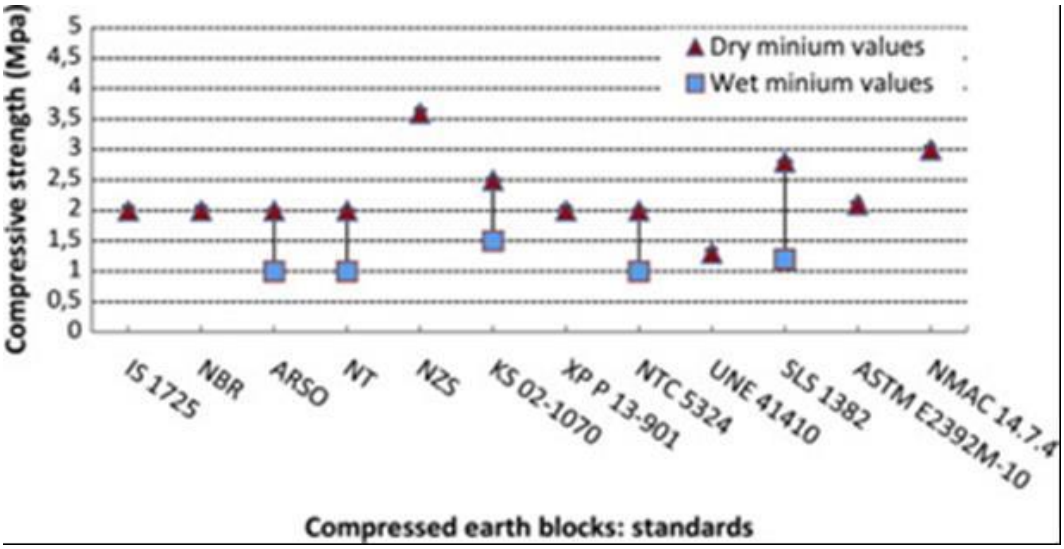

Figure 2-9 : Résistances à la compression minimales admises pour les BTC (Lavie Arsène Mango- Itulamya ,2019).

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].

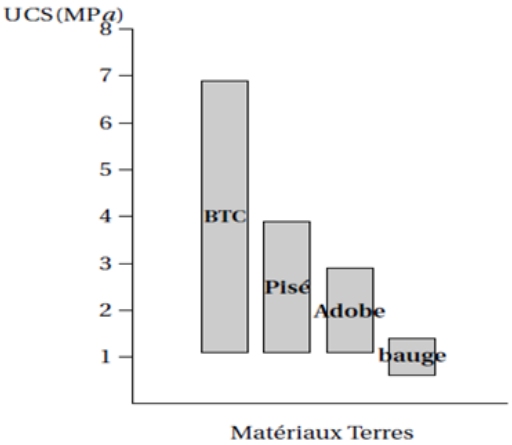

Figure 2-10 : Résistance à la compression des matériaux terreux (Van-Damme et Houben, 2017).

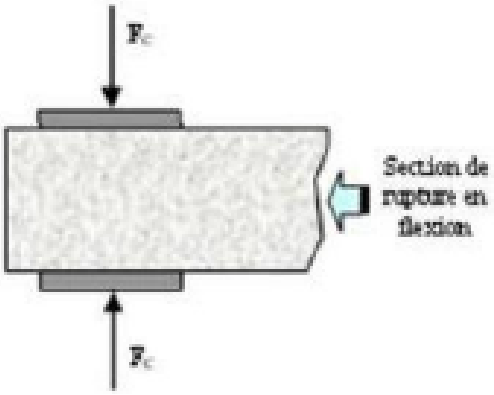

Figure 2-11 : Schéma et dispositif de l'essai de compression (Halleux, 2012, modifié).

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).

Région	Durabilité	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance en compression (MPa)	Mise en œuvre
Afrique [NOR 98]			> 2 (compression 2 demis blocs, h/e = 1,3)	
USA [CID 91]	Capillarité < 4% après 7 jours [b]	> 0,34 (essai de flexion 3 points)	> 2 (compression d'un bloc entier)	Construction limitée à 2 étages, élancement h/e = 10
Pérou, Brésil, Cuba			0,2[a] ; 2[b] (compression simple sur maçonnerie)	
Inde [VEN 92]			2 [a, b] (compression 3 blocs maçonnés)	
Australie Bull. 5	Taux d'érosion < 1mm/min [b]		≥ 2 (compression sur bloc h = 1,3 à 2 fois e)	Mur extérieur ou intérieur
Nouvelle Zélande [NZS 4298]			3,5[b] (compression d'un bloc entier)	
OIA 1970	Test d'érosion[b]		≥ 2,1	

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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).

Pays	Norme	Épaisseur minimale du mur extérieur (mm)	Épaisseur minimale du mur intérieur (mm)	Résistance à la compression (MPa)
Australie	CSIRO Bull. 5 4th ed. (1995) et EBAA (2004)	200	200	0,7-1
Allemagne	Lehmbau Regein (2009)	400	400	0,3-0,5
Inde	IS : 2110 (1998)	300	200	1,4
Kirghizstan	PCH-2-87 (1998)			0,63-3,6
Nouvelle Zélande	NZS 4297-9	250		0,5
Suisse	Regein Zum Bauen mit Lehm (1994)	300		0,3-0,5
USA	14.7.4 NMAC (2006)	457	305	1,725-2,07
Zimbabwe	SAZS 724 (2001)	300		1,5 -2

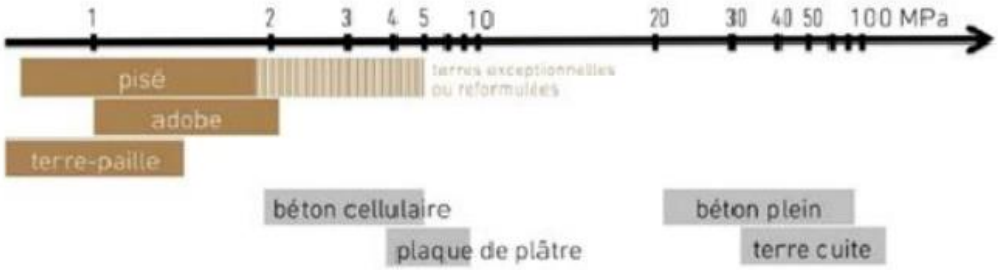

Figure 2-14 : Propriété mécanique de la terre : la résistance à la compression (Taleb Boulerbah, 2019).

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

Caractéristiques	Comprimé à 20 bars	Stabilisé à 8% de ciment, Comprimé à 20- 40 bars	Latérite stabilisée 12 à 19 % de chaux, comprimée à 300 bars, Étuvées à 95% H.R sous pression à 90°C
Résistance à la compression Sèche à 28 jours	Env 2 MPa	2 à5 MPa	>12 MPa
Résistance à la compression Humide à 28 jours (24h dans l'eau)	0 à 0,5 MPa	>2 MPa	>2 MPa

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 :

$$R = 3\ 2 \times 25 \times P\ l \times e^2$$

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.

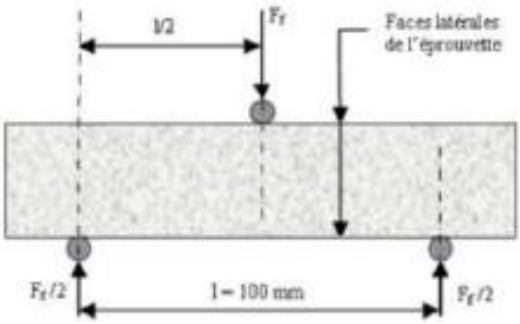

Figure 2-15 : Schéma et dispositif de l'essai de flexion 3 points (Halleux, 2012, modifié).

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).

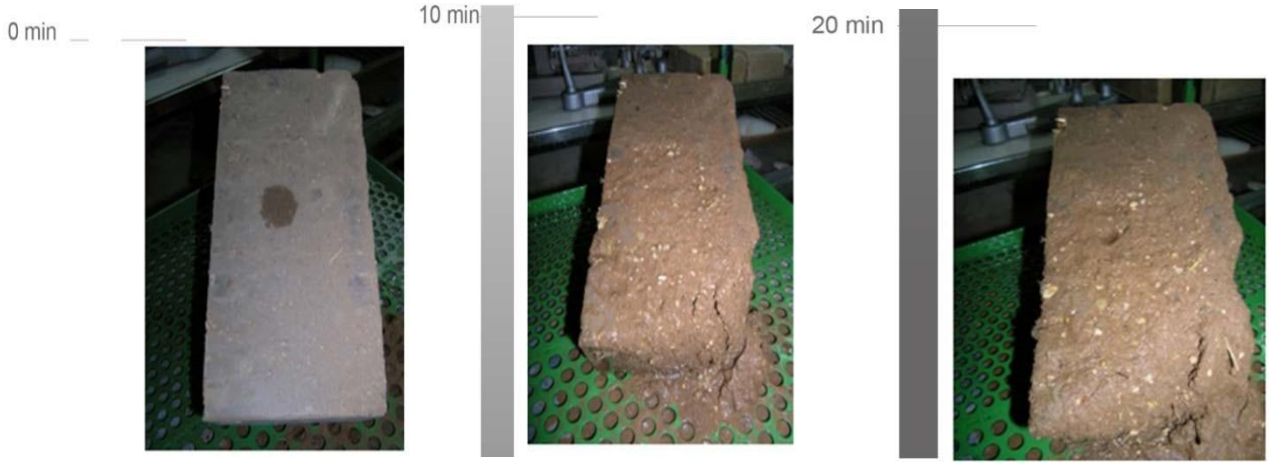

Figure 2-16 : Essai d'érosion au goutte-à-goutte (bloc non stabilisé) (Jaime Cid-Falceto; Pablo Mosquera; Francisco Marcos; Cruz Calleja Perucho; Ignacio Cañas, 2012).

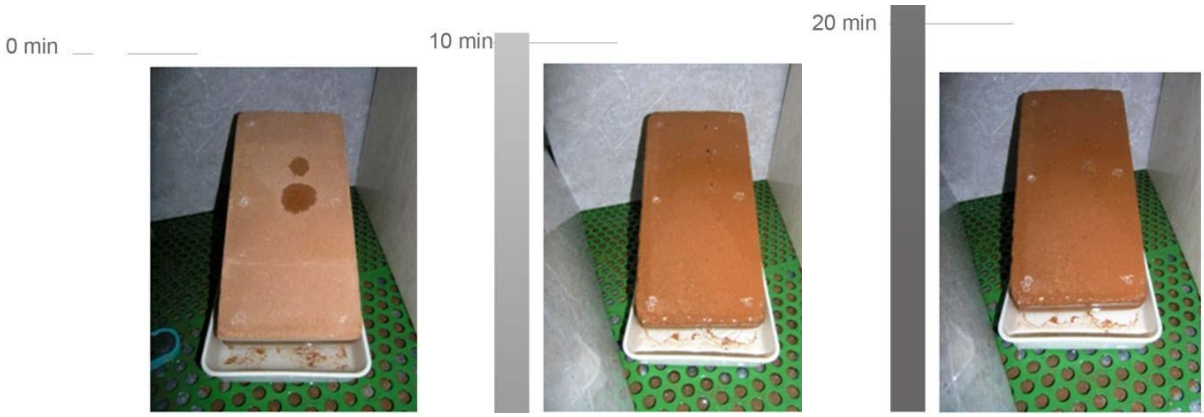

Figure 2-17 : Essai d'érosion au goutte-à-goutte (bloc stabilisé) (Jaime Cid-Falceto; Pablo Mosquera; Francisco Marcos; Cruz Calleja Perucho; Ignacio Cañas, 2012).

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).

Type de matériau	ρ Masse volumique du matériau en kg/m³	Capacité thermique ρC en Wh/m³.K	Épaisseur de la paroi en m	Inertie de la paroi en Wh/m².K
Mur en terre crue	1770/1900	785	0,20	I=157
Parpaing de ciment	850/950	250	0,20	I=50

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).

Caractéristiques	BTC	Adobe	Pisé	Brique cuite	Bloc de béton
Aspects -Surface -Esthétique	Lisse Moyen à bon	Irrégulière Pauvre	Rugueuse à lisse Bon à excellent	Rugueuse à lisse Bon à excellent	Rugueuse Moyen
Performances : -Résistance en compression (MPa)	1 à 4	0 à 5	0,5 à 3	0,5 à 6	0,7 à 5
-Dilatation thermique (%)	0,02 à 0,2			0 à 0,02	0,02 à 0,05
-Isolation thermique (W/m°C)	0,81 à 1,04	0,4 à 0,8	1,05	0,7 à 1,3	1 à 1,7
-Masse volumique (kg/m3)	1700-2200	1200 à 1700	1900	1400 à2400	1700 à 2200
-Durabilité	Faible à très bonne	Faible	Faible à très bonne	Faible à excellente	Faible à très bonne
Emploi en maçonnerie	Porteur	Porteur	Porteur	Porteur	Remplissage

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

3.1INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre précèdent 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.

Rapport-Gratuit.com

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.

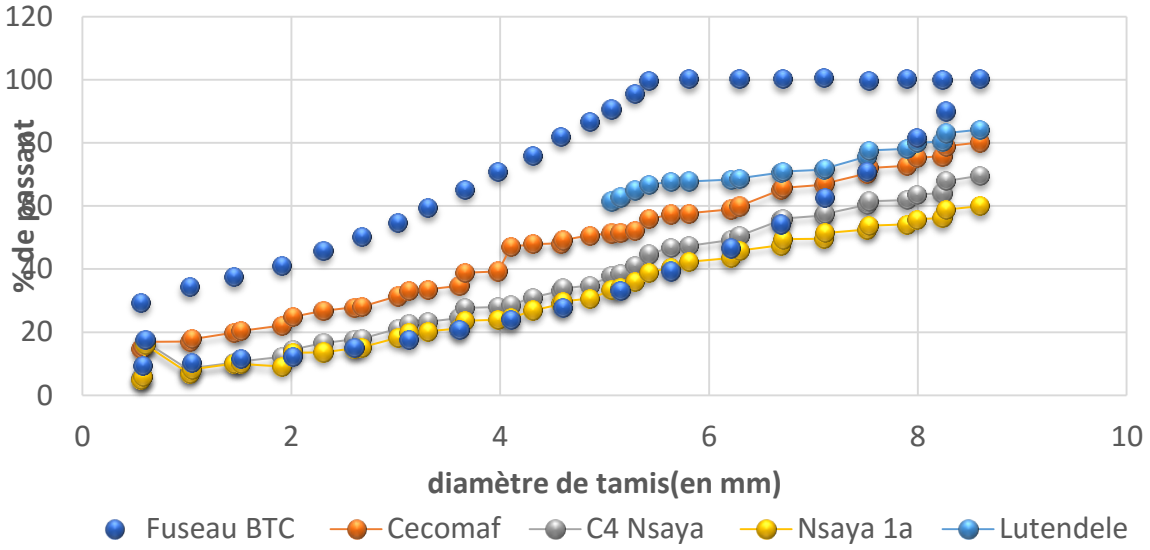

Figure 3-1 : Courbes granulométriques des échantillons analysés Wetshondo (2002).

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).

Adobe	**NTE E 080 (2000)**	**Pérou**	**10 - 20**	**15 - 25**	**55 - 70**	
	HB 195 (2002) [a]	Australie	10 - 40	10 - 30	Sable + gravier fin 30 – 75	
	Houben et Guillaud (1994)		5 - 29			
BTC	XP P 13-901 (2001)	France	10 - 30			
	ARSO (1996)	Afrique	8 - 30			
	HB 195 (2002) [a]	Australie	10 - 40	10 - 30	Sable + gravier fin 30 – 75	
	MOPT (1992)	Espagne	5 - 34			
	Houben et Guillaud (1994)	France	6 - 22			
	Rigassi V. (1995) [b]		8 - 30	10 - 25	25 - 80	0 – 40
	Rigassi V. (1995) [b]		6 - 23			
Pisé	SAZS 724 (2001)	Zimbabwe	5 - 15	15 - 30	Sable + gravier fin 30 – 75	
	MOPT (1992)	Espagne	5 - 26			
	IETCC (1971) [c,d]	CYTED	10 - 40	20 - 40	10 - 40	10 - 20 gravier fin
	Houben et Guillaud (1994)	France	8 - 16			
Adobe, BTC, pisé	McHenry (1984) [e,f]		15	32	30	23
	Smith and Austin (1996) g		4 – 15	40	60 - 80	

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.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRES

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).

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

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

Ip	Dénomination	Exemples de sol
Inférieur à 5	Non plastique	Sable limoneux ou argileux, sable
De 5 à 15	Peu plastique	Limon sableux, limon,
De 15 à 25	Plastique	Limon, limon argileux
Plus de 25	Très plastique	Argile

Tableau 3-4 : Limites de liquidité et indices de plasticité maximum et minimum obtenus dans les références d'après Jiménez et Guerrero, 2007.

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

Sur la base de cette analyse, nous pouvons conclure que tous nos échantillons sont adaptés pour la réalisation de BTC et du Pisé selon Houben et Guillaud (1994), ARS (1996) et XP P 13-901 (2001).

3.5 Etude 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 cm^3 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 :

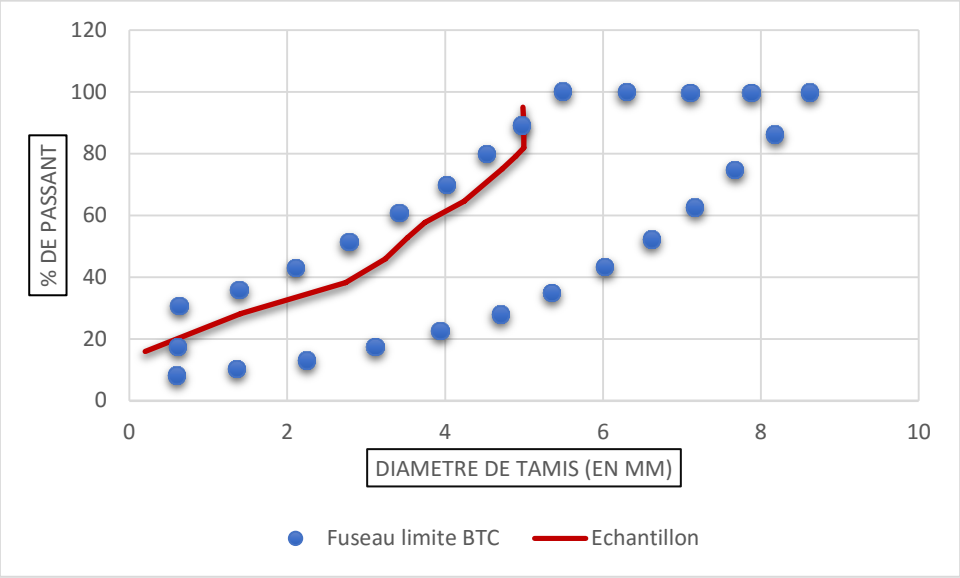

Figure 3-2 : Répartition de la taille des particules de la terre contenue dans les adobes. (Jean-Emmanuel Aubert, Alain Marcom ,Priscia Oliva, Pauline Segui , 2014).

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

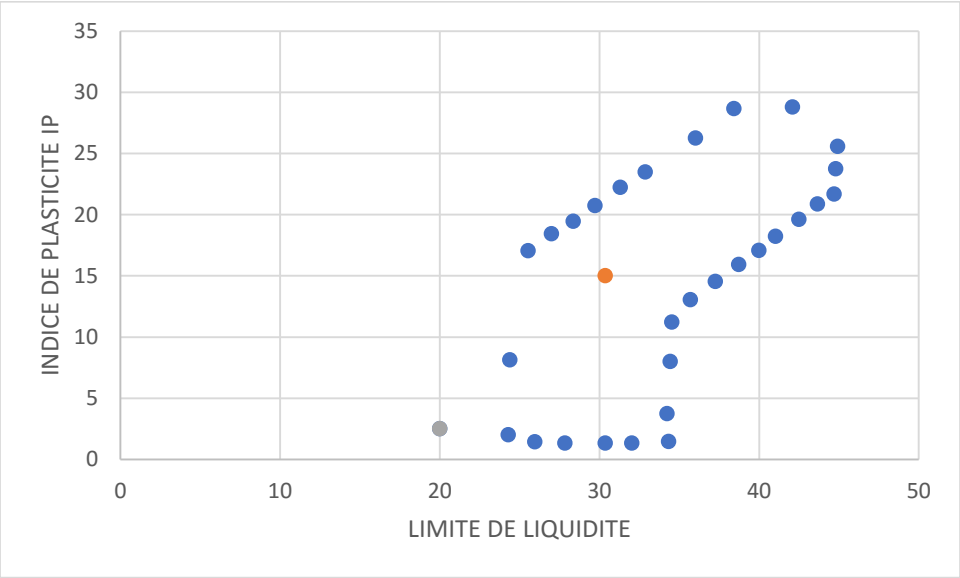

Figure 3-3 : Limites Atterberg de la terre contenue dans les adobes. (Jean-Emmanuel Aubert, Alain Marcom ,Priscia Oliva, Pauline Segui , 2014).

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).

Échantillon	1	2	3	4	5	6	Min	Moyenne	Max
Masse volumique (g/cm^3)	1,7	1,6	1,7	1,5	1,6	1,7	1,5	1,6	1,7
Résistance à la de compression (MPa)	2,3	2,4	1,8	1,2	1,4	2,0	1,2	1,9	2,4
Module (MPa)	388	417	423	243	279	385	243	356	423

3.6Essais 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

Prélèvement D'Adobe « A »

Prélèvement D'Adobe « B »

Prélèvement D'Adobe « C »

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.

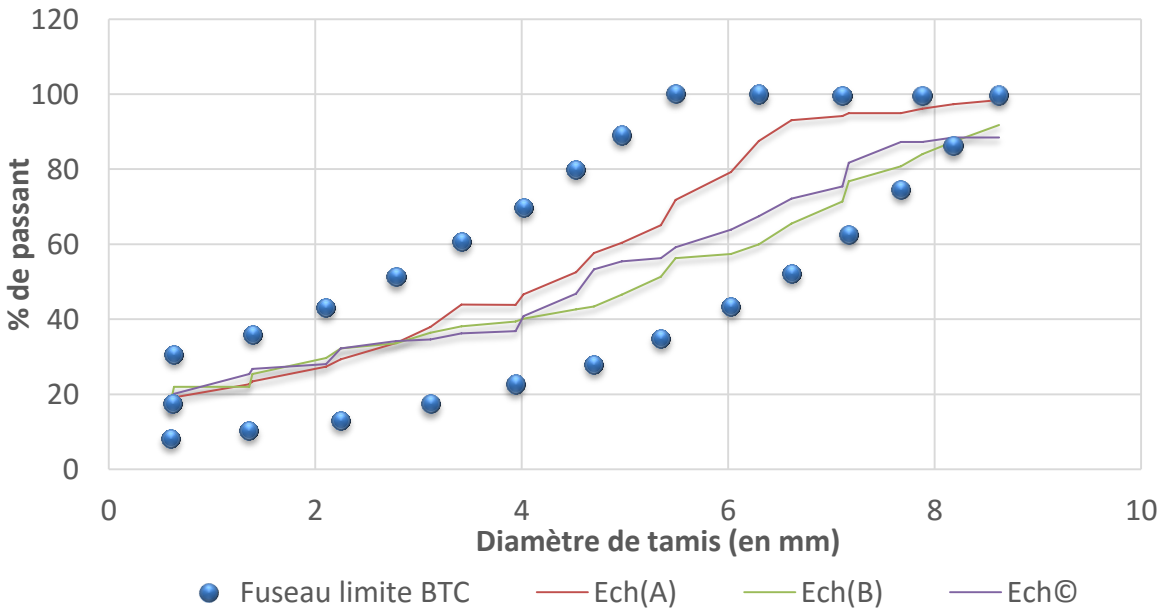

Figure 3-5 : Les courbes granulométriques des trois adobes. A, B, C. (Taleb Boulerabah, 2019).

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)

Échantillon	W L%	WP%	IP%
ADOBE A	18,46	8,71	9,75
ADOBE B	19,22	14,69	4,53
ADOBE C	42,09	33,37	8,72

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

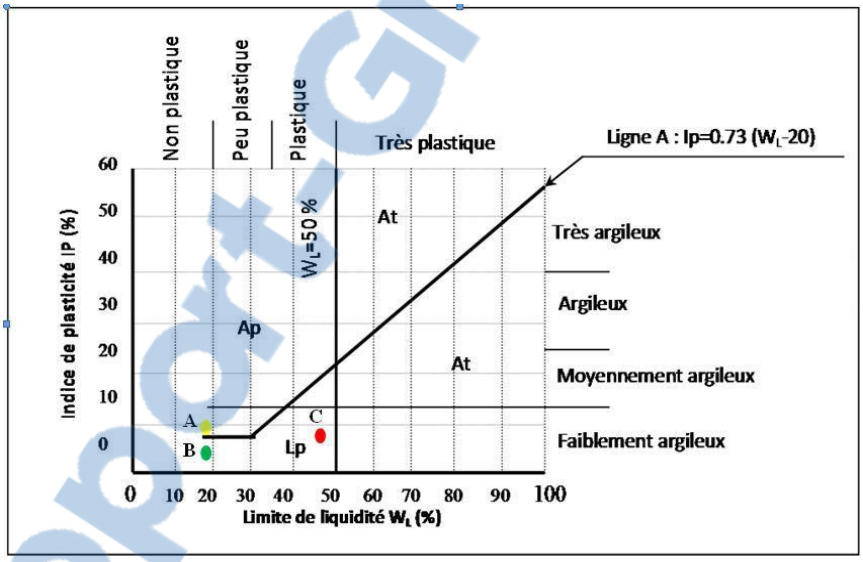

Figure 3-6 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande**.**

Rapport-Gratuit.com

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

Tableau 3-7 : Résistance à la compression en fonction du pourcentage de paille pour toutes les terres. (Taleb Boulerabah, 2019).

Échantillon	F en N.	S (mm²)	σ= F/S. (MPa)	σ= F/S Moy (MPa)	fc	Résis, réelles (MPa)
« A »	6240	2500	2,50	2,03	0,85	17,27
	4230	2500	1,69			
	4770	2500	1,91			
« B »	5470	2500	2,19	2,25	0,85	19,11
	5410	2500	2,16			
	5980	2500	2,39			
« C »	4630	2500	1,85	2,46	0,85	20,91
	8440	2500	3,38			
	5380	2500	2,15			

Nous constatons que l'adobe « C » donne une résistance à la compression plus élevée par rapport aux autres briques d'adobe « A » et « B ».

3.7Confection 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).

Ouverture de tamis mm	Refus cumulé en %	Tamisât en %
5	0	100
2,5	0	100
1,25	0	100
0,63	0,08	99,92
0,315	32,42	67,58
0,16	90,45	9,55
0,08	97 ,9	2,10

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

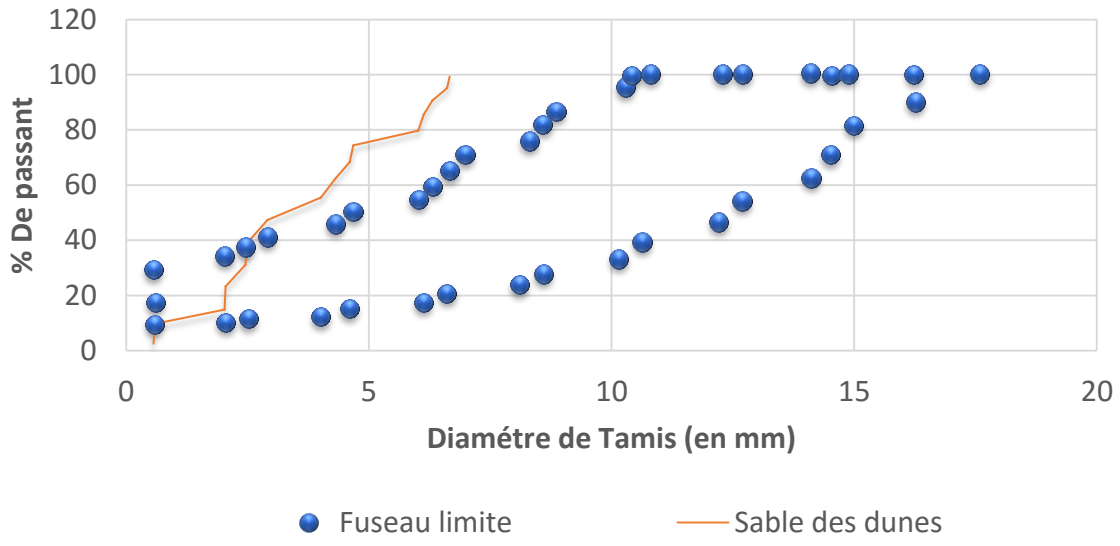

Figure 3-7 : Courbe granulométrique du sable des dunes. (Mekhermeche Abdessalme, 2012).

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).

Pourcentage de sable		**R_f en MPa**	**R_c en MPa (à 28jours)**
0%	**S**	0.318±0.04	1,500±0.10
10%	**S**	0.438±0.03	1,675±0.15
20%	**S**	0.882±0.12	2,500±0.17
30%	**S**	0.6±0.07	2,312±0.13
40%	**S**	0.558±0.06	1,900±0.18

3.7.3 Analyse granulométrique par sédimentation pour l'argile (normeNFP94-056/ NF P 94-057)

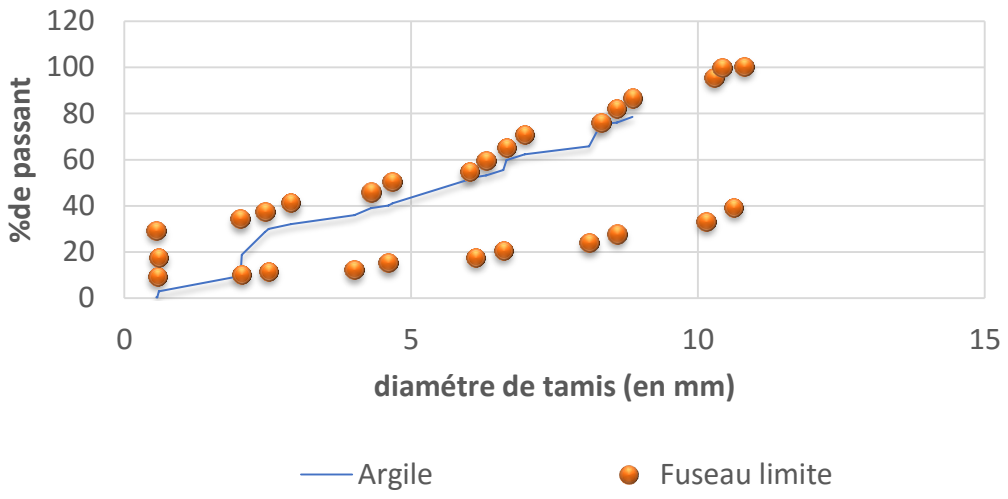

Figure 3-8 : Courbe granulométrique de l'argile (Mekhermeche Abdessalme, 2012).

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) classifie 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).

IP (%)	< 7	7 à 17	> 17
Plasticité	Faible	Moyenne	Elevée

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).

Brique	Rf en MPa	Rc en MPa
0% **F**	0.318±0.04	1,500±0.10
1% **F**	0.789±0.01	2,883±0.1
2% **F**	0.815±0.04	3,233±0.15
3% **F**	1.186±0.06	3,550±0.13

3.8Caractérisation 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).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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).

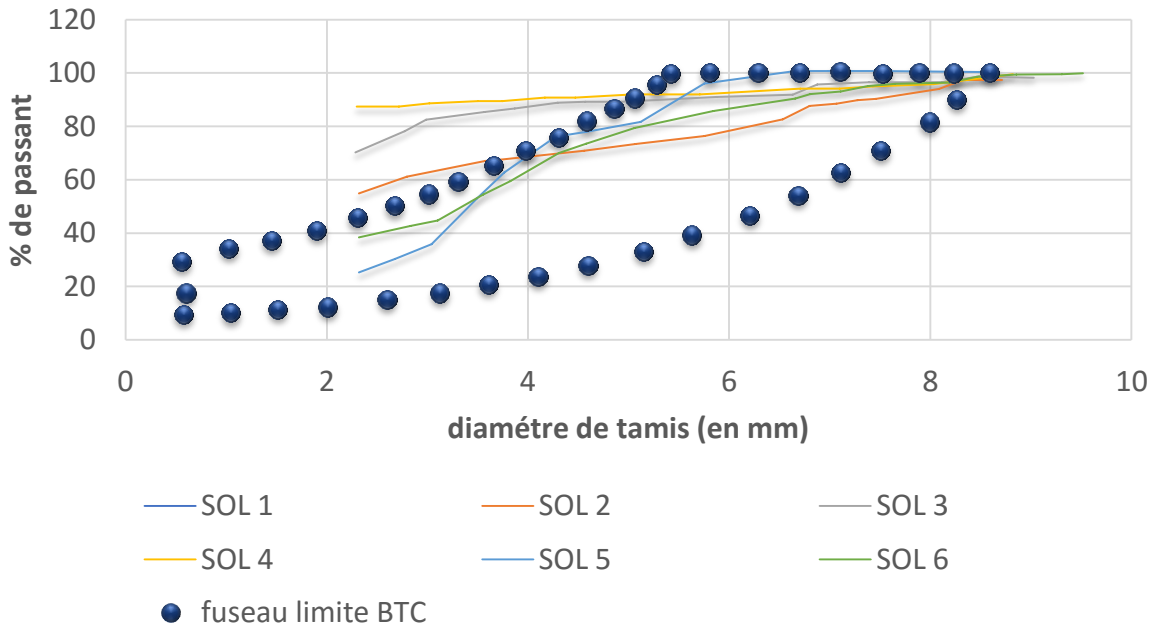

Figure 3-10 : Courbes granulométriques des 6 sols (Tuan Anh Phung, 2018).

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

	Sol 1	**Sol 2**	**Sol 3**	**Sol 4**	**Sol 5**	**Sol 6**
D_{max} (mm)	31,5	20	31,5	31,5	5	20
Pourcentage passantà 2 mm	63,45	79,81	93,02	95,15	96,70	87,16
Teneur en fines (TF) < 80µm (%)	12,98	57,25	72,65	89,51	25,61	38,80

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.

Tableau 3-13 : Valeur au bleu de méthylène, limites d'Atterberg des 6 sols. (Tuan Anh Phung, 2018).

Sol	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
VBs (g/100g)	0,30	0,73	0,91	0,55	0,47	0,15
Limite de liquidité W_L (%)	48,9	49,4	53,3	34,1	34,8	31,3
Limite de Plasticité W_P (%)	28,5	35,7	24,5	20,4	23,4	23
I_P (%)	20,4	13,7	28,8	13,7	11,4	8,3

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.

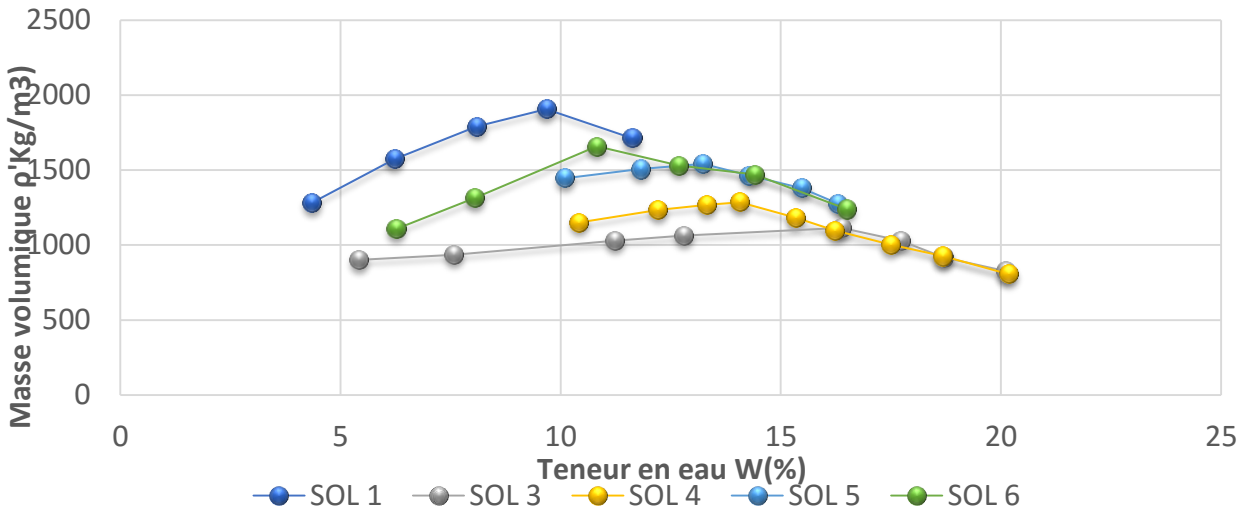

Figure 3-11 : Courbes Proctor des 6 sols. (Tuan Anh Phung, 2018).

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

Sol	Sol 1	Sol 3	Sol 4	Sol 5	Sol 6
W_{OPN} (%)	9,7	15,8	14,0	13,3	10,9
ρ_{dOPN} (kg.m^{-3})	2034	1771	1827	1905	1951

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 granulométries 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.

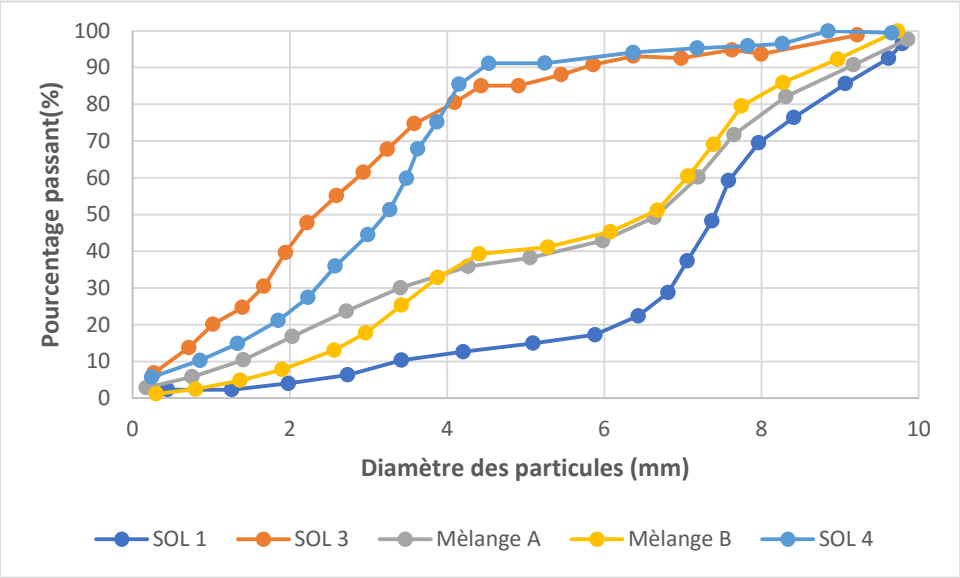

Figure 3-12 : Courbe granulométrique des trois sols et deux mélanges (Tuan Anh Phung, 2018).

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) :

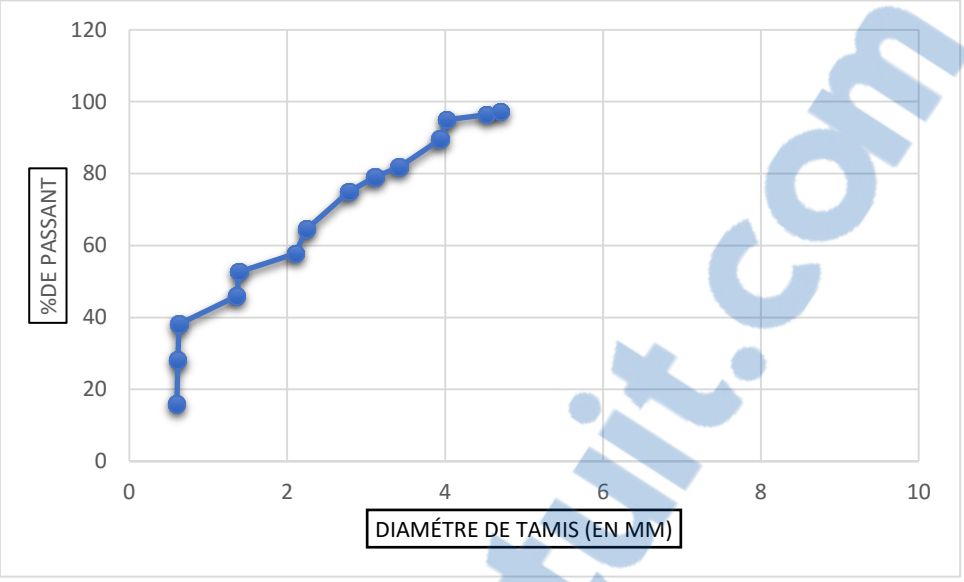

Figure 3-13 : Courbe granulométrique obtenue par tamisage et sédimentométrie(Jehanne Paulus,2015).

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 :

Wl=41,37% ; **Wp**=26,26% et **Ip**=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 :

Rapport-Gratuit.com

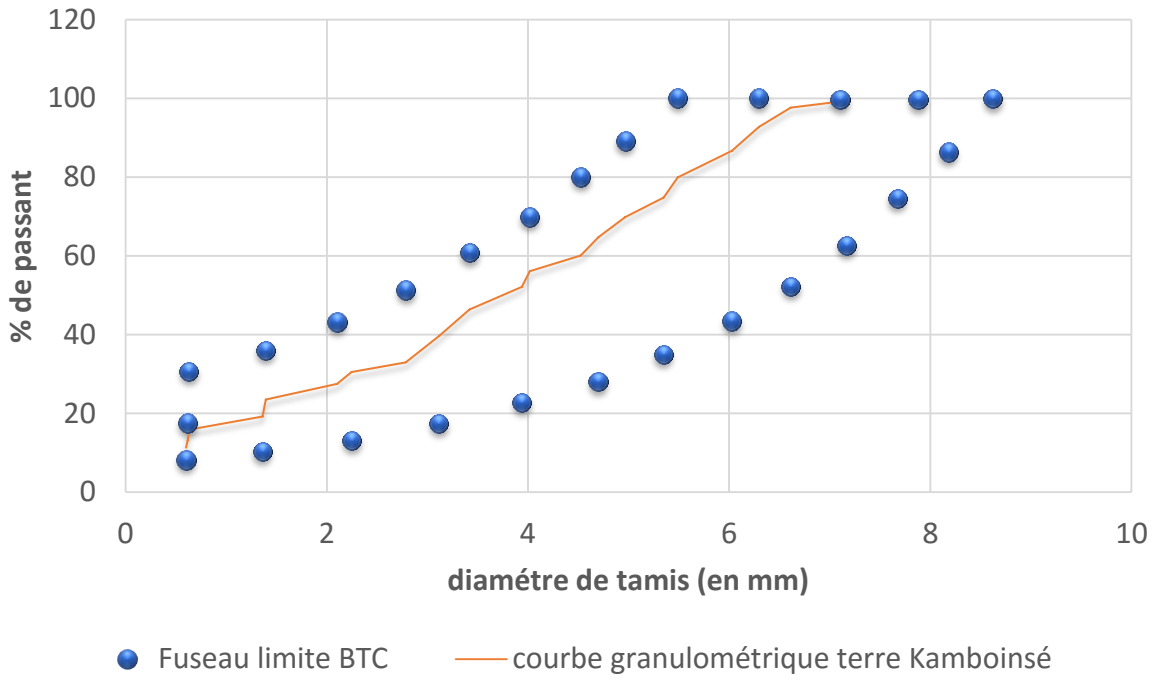

Figure 3-14 : Granularité tout à fait adaptée à la production des BTC (Jehanne Paulus, 2015).

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.

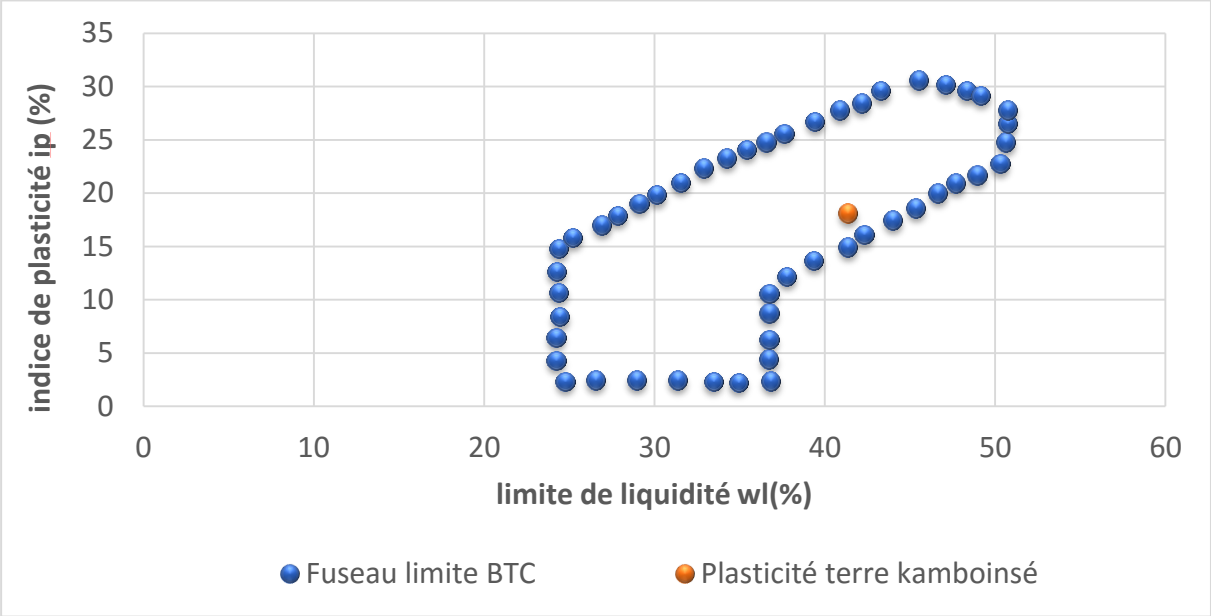

Figure 3-15 : Fuseau limite du diagramme de plasticité (Jehanne Paulus, 2015).

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).

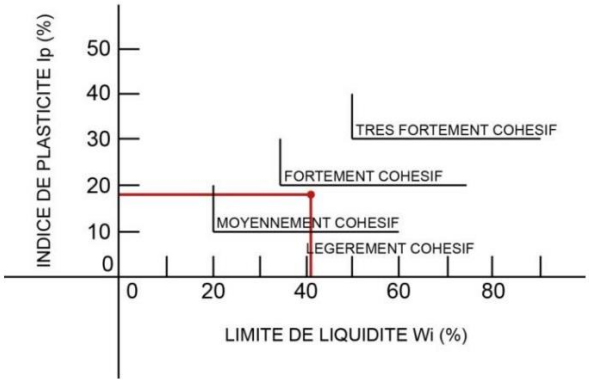

Figure 3-16 : Etat cohésif de la terre. (Jehanne Paulus, 2015).

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

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 :

$$Ca = \frac{Ip}{\%argiles(\emptyset < 2\mu)}$$

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 :

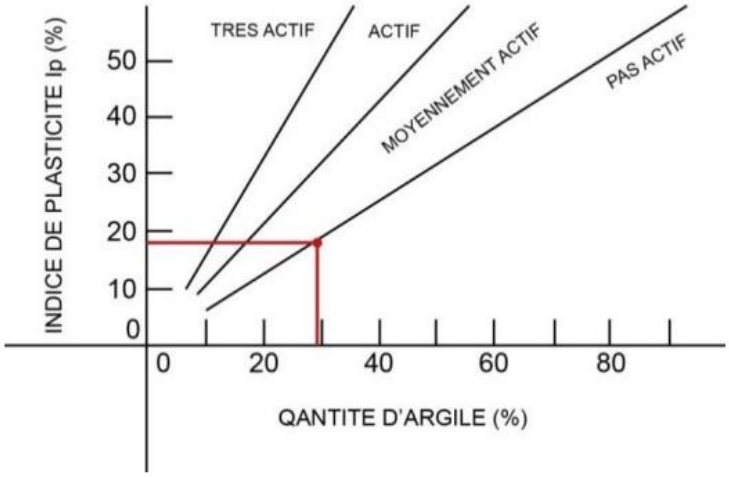

Figure 3-17 : Coefficient d'activité de la terre (Jehanne Paulus, 2015).

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 :

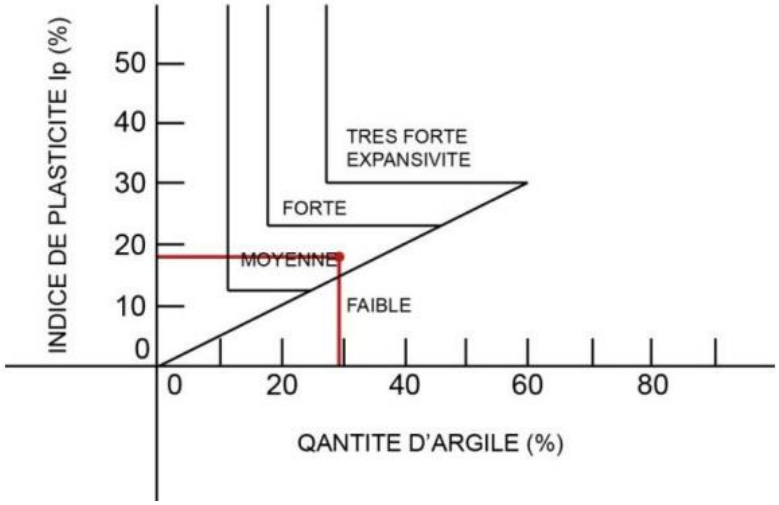

Figure 3-18 : Expansivité de la terre (Jehanne Paulus, 2015).

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.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

BIBLIOGRAPHIE

(ARSO), A. R. (1996). Compressed Earth Blocks. . Bruxelles: CDI.

A.W. Bruno, D. G. (2015). Consulté le 12, 05,2020 : ,https://www.researchgate.net/publication/280680194_Briques_de_terre_crue_procedure_de_compactage_haute_pression_et_influence_sur_les_proprietes_mecaniques.

Abdessalam MEKHERMECHE. (2012). Contribution à l'étude des propriétés mécaniques Et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksour Sahariennes. Mémoire d'ingénieur. Département Hydraulique et génie civil Université Kasdi Merbah, Ouargla.

AENOR. (2008). Compressed earth blocks for walls and partitations. Definitions, specifications and test methods. Madrid (Spain): Spanish Association for Standardisation and Certification.

AFNOR Association française de normalisation. (2001). XP P13-901 : Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons.

Ali Mesbah, M. O. (2016). Construction en BTC. Cayenne,Guyane.

Bernard A., B. J. (2004). Composition de la terre crue. Récupéré sur Techno-Science.net.

Boulerbah, T. (2019). L'amélioration du confort thermique de l'habitat traditionnel par l'adaptation d'un matériau de haute performance et le traitement. Mémoire de master. Département Architecture Université Mohamed Khider – Biskra.

C. Delbecque. (2011). Approche contemporaine de la construction en terre. Histoire de la construction en terre.

Casagrande. (1958). Notes on the design of the liquid limit device. Cambridge: Division Engineering and Applied Physics.

Chazelles, C.-A. (2003). Témoignages croisés sur les constructions antiques en terre crue : Techniques & Culture.

Cid-Falceto Jaime., M. P., & Cañas, I. (2007). Approximation to earth material from International normative.

CNERIB. (2000). Conception de logements économiques à base de produits localement Disponibles. Alger : CNERIB.

CRAterre. (1995). Traité de construction en terre. Marseille.

CRATerre-EAG, C. (1998). Compressed earth blocks: Standards - Technology, series No.11. Brussels : CDI.

Delgado, M. C. (2005). *Le choix des sols pour le bâtiment non stabilisé de la terre Une.* Département de construction Université Madrid.

DICH Zakarya. A. O. (2017). MATERIAU TERRE : ETUDE DE LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT ET RETRAIT. Mémoire de Master. Département génie civil université Abou Bakr Belkaid, Tlemcen.

Doat, P. H. (1979). Construire en terre. Paris : Alternatives et Parallèles.

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

HALLEUX. (2012). Valorisation des cendres de balles de riz pour la production de matériaux pouzzolaniques à Madagascar. Mémoire de Master. Université de Liège, Liège.

Houben, H. &. (1989). Traité de construction en terre. Marseille : Eid. Parenthèses. (2èmé éd. 1995 ; 3ème éd. 2006).

Houben, H. G. (1994). Earth construction: A comprehensive guide. London: Intermediate Technology Publications.

Jean-Emmanuel Aubert, A. M. (2014). Chequered earth construction in south-wester France. Toulouse.

Jiménez, D. M. (2007). The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review Construction and Building Materials.

Krami., R. (2011). Étude des briques de terre gypso-calcaire stabilisée
Par le Ciment ou par la chaux. Mémoire de master. Université Kasdi Merbah, Ouargla.

Lamouri-Hannani, H. (2014). Etude comparative de la durabilité des adobes des Constructions en terre anciennes et contemporaines. Mémoire de Master. DÉPARTEMENT DES SCIENCES ET TECHNIQUES UNIVERSITE COLONEL AHMED DRAÏA, D'ADRAR.

Lubumbashi Caritas. (**2012).** Inauguration de la nouvelle école en BTC du village Kuvumbi. Consulté le 13 04 2020 : - https://www.bddlubumbashi.fr/inauguration-de-la-nouvelle-ecole-en-btc-du-village-kuvumbi/..

Mango-Itulamya., L. A. (2019). Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des Blocs de terre comprimée. Thèse de Doctorat. Université de Liège, Liège.

MAYOTTE, A. A. (2018). OUVRAGES EN MAÇONNERIE DE BTC BLOCS DE TERRE COMPRIMÉE.

Mesbah A., M. J. (1999). Comportement des sols fins argileux pendant un essai de Compactage statique : détermination des paramètres pertinents. Matériaux et constructions, Ecole Nationale De travaux publics Velin, France.

Moles O., G. A. (2009). Sensibilisation aux systèmes constructifs adaptés à la région de Kabalo, République Démocratique du Congo. Villefontaine : CRATerre éditions.

MOPT. (1992). Bases Para el Diseno y Construccio'n con Tapial. Madrid, Spain : Centro de Publicaciones, Secretarý'a General Te'cnica, Ministerio de Obras Pu'blicas y Transportes.

Mwilarhe, C. (2008). Habitat périurbain auto construit en République Démocratique du Congo. Perspectives d'amélioration des logements de terre crue en climat Tropical. Thèse de Doctorat. Université Libre de Bruxelles, Bruxelles.

OLIVA, COURGEY, (2006). La conception bioclimatique, Editions Terre Vivante.consultè le 19-09-2020 sur : https://www.atelier-alp.bzh/actualites/linertie-de-murs-en-terre-crue/.

Paulus.j. (2015). Construction en terre crue : disposition qualitative, constructive et architecturales-Application à un cas pratique. Mémoire fin d'étude. Université de liège.

PHUNG, T. A. (2018). Formulation et caractérisation d'un composite Terre- Fibres Végétales : la bauge. Thèse de Doctorat. Département génie civil l'Université de Caen, Normandie.

P'KLA, A. (2002). Caractérisation en compression simple des blocs de Terre Comprimée (BTC) : application aux maçonneries 'BTC-mortier de terre'. Thèse de Doctorat. Institut National des Sciences appliquées, Lyon.

Prix-construction. (2019). Consulté le 04 13, 2020, sur Générateur de prix de la construction http://generateur-de-prix.cype.fr/.

SABAH, C. (2018). Etude Des Propriétés Thermomécanique Des Briques En Terre Gypse Traditionnel (Temchemt) Stabilisée Par Le Ciment Ou Par La Chaux (Cas De La Ville D'Ouargla). Mémoire de Master. Département De Génie Civil Et Hydraulique UNIVERSITÉ KASDI MERBAH, OUARGLA.

Soumia, H. (2015). Etude des caractéristiques thermiques et Mécaniques Des Briques en terre Cuite traditionnelles dans les régions de la wilaya d'Ouargla. Mémoire de Master.

Département De génie Civil et Hydraulique, Ouargla.

Urbaplan, C. e. (2010). Projet d'appui au redressement du secteur de l'éducation (PARSE). Stratégie nationale pour la réhabilitation et la construction des écoles de qualité au moindre Coût. Villefontaine, République Démocratique du Congo : CRATerre éditions.

TotalBoox, &. T. (2012). Modern Earth Buildings. Elsevier Science.

Van-Damme H., H. (2017). Earth concrete. Stabilization revisited. Cement and Concrete Research.

XP13-901, N. (2001). Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions – Spécifications - méthodes d'essais - conditions de réception.

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

Consulté le 21, 03, 2020, sur :
https://www.espazium.ch/fr/actualites/ricola-ouvre-une-maison-des-plantes-laufon.

Consulté le 30,03, 2020, sur :
http://www.a4perspectives.com/wp-content/uploads/2020/01/ecole-primaire-gando-burkina-faso-cabinet-kere-architecture.jpg.

Consulté le 01, 04, 2020, sur :
https://www.architectes.org/sites/default/files/fichiers/actualites/Prix%20architecture%20terre%20-%20Presse2.pdf.

Consulté le 02,04, 2020, sur :
https://www.saphirnews.com/Mali-la-remarquable-mosquee-de-Djenne-alimentee-a-l-energie-solaire_a26277.html.

Consulté le 15, 06, 2020, sur :
https://www.amc-archi.com/photos/brenas-doucerain-realise-une-ecole-maternelle-aux-roches-de-condrieu,9037/l-ecole-maternelle-des-roch.6.

Consulté le 10 ,05, 2020, sur :
http://briquedeterre.over-blog.com/pages/Conseils_de_mise_en_oeuvre_Formation-2023370.html.

Consulté le 01, 06, 2020, sur :

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

Rapport-Gratuit.com