

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed khider –Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie civil et
d'Hydraulique

Référence :/2022



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية و الري
المرجع/2022

Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème

**Effet des fibres de sisal sur les propriétés
mécaniques et hygroscopiques du mortier de terre**

Etudiant :

Mr. Assam Benmachiche

Encadrant :

Pr. Bachir Taallah

Promotion: Juin 2022

Dédicace

*Mes sincères remerciements et gratitude au Allah سبحانه و تعالی ;
son lui je n'en ferai rien,*

Je dédie mon travail ;

À ma chère mère,

*Quoi je fasse ou que je dise ; je ne serai point de te remercier comme
il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta
présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter
les différents obstacles.*

À ma petite et grande famille,

Elles ont toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager.

*Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection. Je spécifier
mes petits anges Amhmed et Rpeya qui font partie de ce mémoire et
ils ont donné un goût exceptionnel.*

Ainsi que mes sœurs et mes frères.

*Je dédie mon travail à l'âme de mon père qui vive dans mon cœur et
mon esprit*

Je dédie ce travail à moi-même Benmachiche Assam.

Remerciements

Au terme de ce travail je tiens à s'exprimer ma profonde gratitude à mon professeur et encadrant *Pr. TAALLAH Bachir* pour son suivi et pour son énorme soutien, qu'il n'a cessé de me diriger tout au long de la période du projet.

Je tiens à remercier le chef de département Ms Abde essallam Issam.

Je tiens à remercier également tous les professeurs et doctorants qui m'aident durant cette période de formation.

J'adresse aussi mes vifs remerciements aux membres des jurys pour avoir bien voulu examiner et juger ce travail.

Mes remerciements vont à tous le personnel que j'ai contacté durant cette formation.

Résumé

Au cours des dernières années, un regain d'intérêt des matériaux de construction en terre a eu lieu pour des raisons de restauration et de réparation des bâtiments historiques et culturels du patrimoine ainsi que pour leur faible impact environnemental. Dans une maçonnerie en terre crue, comme le cas des murs en adobes, les briques sont liées par un mortier. Ce dernier peut être utilisé aussi comme revêtement des murs, soit de l'intérieur soit de l'extérieur.

Ce travail a pour objectif principal l'amélioration des propriétés mécaniques et hygroscopiques du mortier en terre via la chaux vive et les fibres de sisal. Dans cette étude, le sol étudié est stabilisé avec une teneur optimale de 12% de chaux vive. Trois longueurs et cinq teneurs de fibres de sisal ont été utilisés dans cette étude à savoir 0,5cm, 1cm et 1,5cm, et 0%, 0,25%, 0, 5%, 0,75% 1% respectivement. Les résultats obtenus montrent que l'ajout de 0,5% de fibres d'une longueur de 1cm a donné la plus grande valeur de la résistance mécanique et a conduit à vitesse maximale de la propagation des sons pour les éprouvettes du mortier de terre à base des différentes teneurs en fibres de sisal. Pour l'insensibilité vis-à-vis de l'eau, l'ajout de fibres dans les mélanges a augmenté légèrement l'absorption totale d'eau et l'absorption capillaire.

Mots clé : mortier de terre ; fibres, sisal, résistance mécanique, absorption d'eau, gonflement.

المخلص

عرفت السنوات الاخيرة عودة للاهتمام بمواد البناء الترابية وهذا لأسباب تعود الى أعمال الترميم للبناءات التاريخية وكذلك لقلّة تأثيرها السلبى على البيئة. في البناء بالتربة الخامة كما هو الحال لجدران لبنات الطوب يتم ربط اللبنات بواسطة ملاط، كما ان هذا الاخير يمكن استخدامه كتليبس للجدران داخليا وخارجيا.

الهدف الرئيسى لهذا العمل هو تحسين الخصائص الميكانيكية و الهيدروسكوبية لملاط التربة و ذلك باستخدام الجير الحى و ألياف السيزال. في هذه الدراسة التربة المدروسة مثبتة بواسطة بـ 12% كنسبة مثلى للجير الحى. ثلاث اطوال و خمس نسب لألياف السيزال تم استخدامها في هذه الدراسة و يتعلق الامر بـ 0.5 سم و 1 سم و 1.5 سم و كذا 0%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1% على الترتيب . النتائج المتوصل اليها تبين ان اضافة 0.5% للألياف بطول 1 سم اعطت القيمة العظمى للمقاومة الميكانيكية كما أنها قادت إلى سرعة عظمى للإنتشار الصوتي على عينات من الملاط المكون من نسب مختلفة لألياف السيزال. بالنسبة لدرجة الحساسية للماء فإن إضافة الألياف في الخلطات قد أدى الى زيادة طفيفة لدرجة الامتصاص الكلى للماء وكذا الامتصاص وفق الخاصية الشعرية.

الكلمات المفتاحية: ملاط التربة, الالياف, السيزال, المقاومة الميكانيكية, امتصاص الماء, الانتفاخ .

Liste des figures

Figure 1-1 (a) Structure 1-1 (T O) de la Kaolinite (Senoussi, 2018), (b) Photographie au MEB d'une Kaolinite (Mitchell, 1993).....	viii
Figure 1-2 (a) Structure de l'illite (Bibi et al, 2016), (b) Photographie au MEB d'illite (Grimm, 1962).	7
Figure 1-3 (a) La structure de l'argile montmorillonite (Poppe et al, 2001),(b) Photographie au MEB de montmorillonite (Izemouren, 2016).	7
Figure 1-4 (a) Cristaux de chlorite vu au MEB (Tucker, 1981), (b) Structure atomique d'une vermiculite (https://www.permaculturedesign.fr/permaculture-construction-naturelle-la-terre-crue-de/).	8
Figure 1-5 (a) Cristaux de chlorite vu au microscope électronique à balayage (Tucker, 1981), (b) Esquisse schématique de la structure du chlorite (https://www.researchgate.net/figure/Diagrammatic-sketch-of-the-structure-of-chlorite).	8
Figure 1-6 «Roue" des techniques de construction en terre. anger et fortaine, (2009) p 26	10
Figure 1-7 (a) Construction en bauge, (b) Mise en œuvre, (c) Principe de la bauge (Delbecque, 2011).....	11
Figure 1-8 (a) Construction en torchis, (b) Mur en torchis en cours, (c) Principe de la réalisation de torchis (Delbecque, 2011 ; Bruno, 2005).	12
Figure 1-9 (a) Mosquée en pise édifiée en 1788, (b) Compactage d'un mur en pisé, (c) Principe de pisé (Delbecque, 2011 ; Bruno, 2005).	13
Figure 1-10 Brique de terre comprimée (https://www.lamaisonnature.ch/wp-content/uploads/2009/06/compressed-earth-block.jpg).	13
Figure 1-11 (a) Fabrication des adobes ; (b) Façonnage de l'adobe. (www.approche-ecohabitat.org).	14
Figure 1-12 Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du PH Little, (1987)..	20
Figure 1-13 Réaction pouzzolanique. Marrot, (2010).....	21
Figure 1-14 Fibre d'abaca (Mvenueat)	23
Figure 1-15 Fibre de sisal (Mvenueat).....	24
Figure 1-16 Reconstitution archéologique d'un mur. Briques de terre crue et mortier de terre fibré.(fr.wikipedia.org).....	25
Figure 2-1 le sol	27
Figure 2-2 Mesure de la masse volumique apparente.....	28
Figure 2-3 Mesure de la masse volumique absolue.....	28
Figure 2-4 Analyse granulométrique de sol.....	29
Figure 2-5 Essai de limite de liquidité.....	30

Figure 2-6 Classification du sol étudié sur l’abaque de Casagrande.....	31
Figure 2-7 La zone des limites d’Atterberg de l’Adobe adopté dans notre cas pour le mortier de terre.....	32
Figure 2-8 Essai de bleu méthylène.....	33
Figure 2-9 La chaux.....	33
Figure 2-10 L’eau utilisée dans l’étude expérimentale.	35
Figure 2-11 Filasse.....	35
Figure 2-12 Absorption de l'eau (%).....	36
Figure 2-13 Les moules utilisés pour les essais mécanique.....	36
Figure 2-14 Optimisation de la teneur en chaux.....	37
Figure 2-15 (a)Malaxeur à sec ;(b) Malaxeur (mélange avec l’eau).....	38
Figure 2-16 Cure à l’étuve des briques d’adobe.	39
Figure 2-17 Essai de compression.	39
Figure 2-18 Essai de traction par flexion.	40
Figure 2- 19 La mesure des dimensions de la brique à l’aide de pied à coulisse électronique.....	41
Figure 2-20 Mesure de la vitesse de propagation.	42
Figure 2-21 Essai d'absorption capillaire d'eau (norme XP 901-31).	43
Figure 2-22 Etapes de l'essai de gonflement : (a) préparation des plots, (b) immersion dans l'eau, (c) mesure du gonflement.....	44
Figure 2-23 (a) Blocs pour mesure du gonflement, (b) L'immersion des blocs pour mesure le gonflement (norme XP 13-901).....	44
Figure 3-1 La résistance la compression en fonction de la longueur et le pourcentage des fibres.....	48
Figure 3-2 La résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur et du pourcentage des fibres.....	49
Figure 3-3 l'évolution de la masse volumique en fonction de longueur et de pourcentage de fibres.....	50
Figure 3-4 L’effet de la longueur et la teneur en fibres sur la vitesse de propagation du mortier de terre.....	53
Figure 3-5 l'évolution de la valeur d'absorption totale en fonction de l'incorporation et longueur des fibres de sisal.	54
Figure 3-6 L'évolution de la valeur d'absorption capillaire en fonction de l'incorporation et longueur des fibres de sisal.	56

Liste des tableaux

Tableau 2-1 Les masses volumiques du sol.....	28
Tableau 2-2 Limites d'Atterberg de sol.....	31
Tableau 2-3 Valeur du bleu de méthylène.....	32
Tableau 2-4 Compositions chimiques et caractéristiques physiques de la chaux vive (Fiche technique de l'unité de chaux de Saida , Algérie).....	34
Tableau 2-5 Absorption de l'eau (%).....	36
Tableau 2-6 Composition des mélanges.....	37

Liste des notations et des abréviations

AFNOR : Association française de normalisation

ATE : Absorption totale à l'eau

BTC : Bloc de terre comprimée

MVS : Masse volumique sèche

RCH : Résistance à la compression humide

RCS : Résistance à la compression sèche

RTS : Résistance à la traction sèche

TEO : Teneur en eau optimale

ACE : l'Absorption capillaire d'Eau. .

Mvapp : masse volumique apparente

MVabs : Masse volumique absolue

Table des matières

Dédicaces	I
Remerciements	II
Résumé	III
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VII
Liste des notations et des abréviations	VIII
Introduction générale	1
Chapitre 01: Synthèse bibliographique	
1. Introduction.....	4
2. Constitution de la terre.....	4
Les argiles	5
3. Les familles d'argile	5
3.1. Kaolinite (1/1, d=7A°)	5
3.2. Illite (2/1, d=10A°).....	6
3.3. La montmorillonite ou les Smectites (2/1, d=14A°)	7
3.4. La Vermiculite (2/1, d=12A°).....	8
3.5. Les Chlorites (2/1, d=14 A°).....	8
4. Les avantages et les inconvénients de la construction en terre	9
4.1. Avantages	9
4.1.1. Avantages Constructifs :	9
4.1.2. Avantages économiques :	9
4.1.3. Avantages écologiques :	9
4.1.4. Avantages sociétaux :	10
4.2. Inconvénients	10
5. Techniques de construction en terre	10
5.1. La bauge	11
5.2. Le torchis.....	11
5.3. Le pisé	12
5.4. Brique de terre comprimée (BTC)	13

5.5. L'adobe.....	14
6. Stabilisation.....	15
6.1. Objectifs	15
6.2. Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre	15
6.3. Les propriétés de terre comme matériau de construction.....	16
6.4. Procédés de stabilisation	17
6.4.1. La stabilisation mécanique :	17
6.4.2. La stabilisation physique :	17
6.4.3. La stabilisation chimique :.....	18
6.5. Modes de stabilisations	18
6.5.1. Les sables et graviers :.....	18
6.5.2. Les fibres :	18
6.5.3. Le bitume :.....	18
6.5.4. Les résines :	19
6.5.5. le ciment	19
6.5.6. La chaux :	19
6.5.6.1. Mécanisme de stabilisation	19
6.5.6.1.1. Absorption d'eau :	19
6.5.6.1.2. Echange cationique :.....	20
6.5.6.1.3. Flocculation et agglomération :.....	20
6.5.6.1.4. Carbonatation :	20
6.5.6.1.5. Réaction pouzzolanique :.....	20
6.5.7. Stabilisation par les fibres.....	21
6.5.8. Les fibres végétales	22
6.5.8.1. Propriétés mécaniques des fibres végétales	22
6.5.8.2. Classification des Fibres Végétales	23
6.5.8.2.1. Les fibres de feuilles	23
6.5.8.2.2. L'abaca	23
6.5.9. Le sisal.....	23
6.6. Avantages Et Inconvénients Des Fibres Végétales	24
6.7. Mortier de Terre.....	24
7.Conclusion:.....	25

Chapitre 02 : Matériaux de l'étude et méthodes expérimentales

1. Introduction.....	27
2. Matériaux utilisés.....	27
2.1. Sol :	27
2.1.1. Origine du sol.....	27
2.1.2. Caractéristiques physiques du sol	27
2.1.3. Les masses volumiques du sol	28
2.1.4. Composition granulaire	29
2.1.5. Limites d'Atterberg.....	30
Caractéristiques chimiques du sol.....	32
2.1.6. Essai de bleu Méthylène.....	32
2.2. La chaux.....	33
2.3. L'eau	34
2.4. Fibres.....	35
3. Préparation des éprouvettes de mortier de terre.....	36
3.1. Matériels spécifiques	36
3.2. Optimisation de la chaux	37
3.3. Mélanges.....	37
3.4. Préparation des mélanges	38
4. Caractérisation mécanique.....	39
4.1. Résistance à la compression (NF P94-077).....	39
4.2. Essai de traction par flexion (NF EN12390-5).....	40
5. Caractérisation physique.....	41
5.1. Mesure de la masse volumique (NF P94-054)	41
5.2. Essai de propagation des impulsions des ultrasons (NF P 18-418).....	41
6. Essai de la durabilité.....	42
6.1. Absorption capillaire	42
6.2. L'absorption totale	43
6.3. Gonflement	43
7. Conclusion	45

Chapitre 03 : Présentation et discussion des résultats

1. Introduction.....	47
2. Effet de la longueur et la teneur en fibres de sisal sur la résistance mécanique du mortier de terre.....	47
2.1. Résistance à la compression.....	47
2.2. Résistance a la traction par flexion	49
2.3. La Masse volumique apparente	50
2.4. Vitesse des ondes ultrasonique	51
2.5. L'insensibilité du mortier de terre vis-à-vis de l'eau	53
2.5.1. Absorption totale	53
2.5.2. Absorption capillaire :.....	54
2.6. Gonflement	56
3. Conclusion	57
Conclusion générale.....	59
Références bibliographiques.....	61

Introduction générale

La terre crue a été et demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés par l'homme depuis des milliers d'années, vu son abondance et sa disponibilité près des lieux de construction. Au cours des dernières années, un regain d'intérêt des matériaux de construction en terre a eu lieu pour des raisons de restauration et de réparation des bâtiments historiques et culturels du patrimoine ainsi que pour une utilisation comme matériau à faible consommation d'énergie dans la construction durable et à faible impact environnemental, notamment celui lié aux émissions de CO₂.

Dans une maçonnerie en terre crue, comme le cas des murs en adobes, les briques sont liées par un mortier. Ce dernier peut être utilisé aussi comme revêtement des murs, soit de l'intérieur soit de l'extérieur.

Pour mieux s'adapter aux blocs et aussi pour ne pas changer le caractère écologique de cette technologie, le mortier est fabriqué avec la même terre utilisée pour la fabrication des blocs. Mais pour assurer une bonne maniabilité des mortiers on utilise des quantités importantes d'eau ce qui engendre ultérieurement une fissuration importante, une baisse des performances mécaniques, une faible insensibilité à l'eau et une durabilité atténuée.

Pour contourner ces problèmes qui affectent les mortiers en terre et par suite la stabilité et la durabilité des murs, on doit faire recours à certaines techniques de stabilisation, à savoir la stabilisation chimique via la chaux et le ciment et l'utilisation des fibres naturelles ou synthétiques comme armatures.

A travers une étude expérimentale et en se basant sur l'exploitation des matériaux locaux, ce travail a pour objectif principal l'amélioration des propriétés mécaniques et hygroscopiques du mortier en terre via la chaux vive et les fibres de sisal.

En plus d'une introduction générale, le mémoire est structuré en deux parties :

Une première partie composée d'un seul chapitre. Chapitre 1 consacré à la synthèse bibliographique, expose en premier lieu les techniques d'utilisation de la terre en

construction, rappel sur les types d'argile mode de stabilisation et propriétés du matériau terre à stabiliser. En deuxième lieu, présente les études antérieures réalisées sur l'effet des fibres végétales sur les propriétés mécaniques et thermo-physiques des produits en terre comme le cas des adobes.

La deuxième partie, composée de deux chapitres (chapitre 2 et chapitre 3), est consacrée à l'étude expérimentale.

Le chapitre 2 porte sur l'identification et la caractérisation des matériaux qui ont été utilisés dans cette étude (le sol, la chaux et fibres de sisal). Ce chapitre présente aussi les mélanges, le mode de conservation et les procédures d'essai expérimentales utilisés dans cette étude.

Les résultats obtenus de l'étude sont exposés et analysés dans le chapitre 3. Ces résultats montrent l'effet des fibres de sisal sur les caractéristiques mécaniques et physiques du mortier de terre stabilisé par la chaux. De plus, l'étude de l'insensibilité à l'eau des éprouvettes de mortier de terre travers l'absorption totale est capillaire et le gonflement.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus et propose des perspectives d'études complémentaires.

Chapitre 01 :

Synthèse bibliographique

1. Introduction

La Terre est un matériau disponible en quantité et utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l'habitat le plus répandu au monde. La terre est l'un des plus anciens matériaux de construction. Car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau le plus proche, celui que l'on a sous les pieds, disponible partout dans le monde, Paulus, (2015). La construction en terre assure le confort et la sécurité des habitants qui y vivent. On estime aujourd'hui que la moitié de population du globe habite dans des maisons en terre, Doat ,et al (1979) . Elle est non seulement durable du point de vue des techniques de construction, mais elle a aussi la capacité de contribuer à l'économie, à l'écologie et aux valeurs culturelles communes. Anger et Fontaine, (2010)

2. Constitution de la terre

La terre représente la couche superficielle, meuble, de la croûte terrestre résultant de la transformation de la roche mère, enrichie par des apports organiques. La terre est à la fois le support et le produit du vivant. L'altération de la roche mère peut être d'ordre mécanique et/ou chimique sous l'action des phénomènes climatiques et des organismes vivants (Delbecque, 2011).

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : (Houben, 2006).

Les graviers : Ce sont des particules de matériau grossier, de petite taille, résultant de la désagrégation de la roche mère et des cailloux. Leur taille se situe entre 20 mm et 2 mm. Les graviers constituent le squelette de la terre et limitent sa capillarité et son retrait.

Les sables : Roche sédimentaire meuble, constituée de petits fragments provenant de la désagrégation de roches de nature diverse (notamment silice). Leur taille se situe entre 2 mm et 0.06 mm.

Les limons : sont des formations sédimentaires dont les grains sont de taille intermédiaire entre les argiles et les sables c'est-à-dire entre 2 et 63 μm .

Les argiles : Ce sont des morceaux microscopiques de dimension inférieure à 2 μm .

Les argiles

D'une manière générale, l'argile est un mélange de minéraux argileux et d'impuretés cristallines sous forme de débris rocheux de composition infiniment diverse.

La définition couramment adoptée est que les argiles sont des minéraux de la famille des phyllo silicates, c'est-à-dire se présentant sous forme de lamelles par suite de l'empilement de feuillets élémentaires. Chaque feuillet résulte de l'arrangement d'un certain nombre de plans anioniques (O, OH), qui fait apparaître des cavités, soit de type tétraédrique « T », soit de type octaédrique « O » (Tessier, 1984 ; Daas, 2015).

Les particules d'argiles différentes de celles des autres fractions de la terre par leur constitution chimique et leurs propriétés physiques.

Chimiquement, à l'état normale l'argile est composée de nombreux minéraux associés comme les carbonates (dolomite, diobertite, calcite, argonite, ...), le cilice (cristobalite, tridymite), des oxydes et hydroxydes d'aluminium (corindon, diaspore), ou encore des minéraux ferri-fères. (Taallah, 2014).

Physiquement, l'argile est souvent plate et allongée, stratifiée. Sa surface spécifique est infiniment plus grande que la surface des particules sphériques ou angulaires. Les argiles sont notoirement sujettes au gonflement et au retrait (Houben, 2006).

3. Les familles d'argile

Il existe de nombreux types d'argile, mais les types principaux, ils sont les suivants (Houben, 2006) :

3.1.1.1.1. Kaolinite (1/1, $d=7\text{Å}$)

La distance interfoliaire est fixe, 7Å .

L'épaisseur des cristaux est de 0.005 à $2\mu\text{m}$.

La surface externe SE est de 10 à $30\text{m}^2/\text{g}$.

La surface interne SI=0.

Pas de substitution dans les couches. Le feuillet est neutre. La kaolinite se forme dans les sols bien drainés, par PH acide, surtout en climat subtropical et tropical. Ses cristaux sont souvent grands (jusqu'à 15 μm) (Figure 1.1).

Nous observons qu'il n'y a pas d'absorption d'eau entre les feuillets de ce minéral. Toute l'adsorption d'eau se fera uniquement par la surface spécifique externe du feuillet. Ce minéral ne présente pas de substitution d'atomes dans les couches (Morel, 1996).

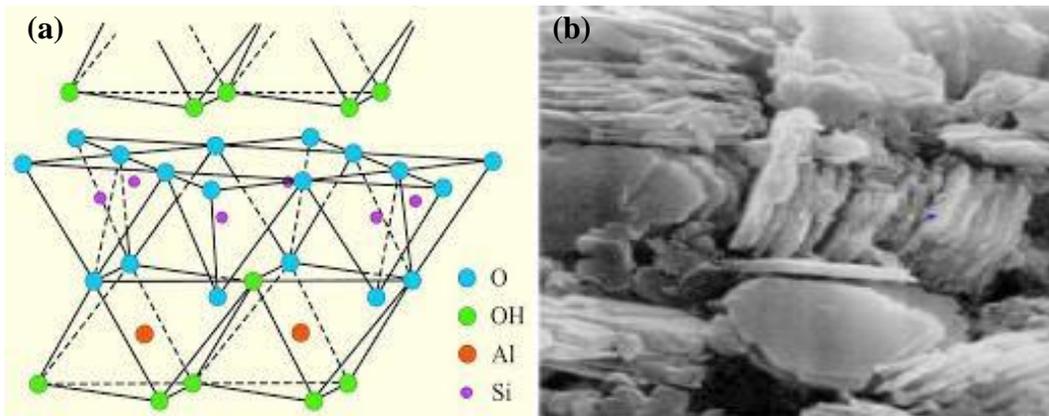


Figure 1-1 (a) Structure 1-1 (T O) de la Kaolinite (Senoussi, 2018), (b) Photographie au MEB d'une Kaolinite (Mitchell, 1993).

3.1.1.1.2. Illite (2/1, $d=10\text{\AA}$)

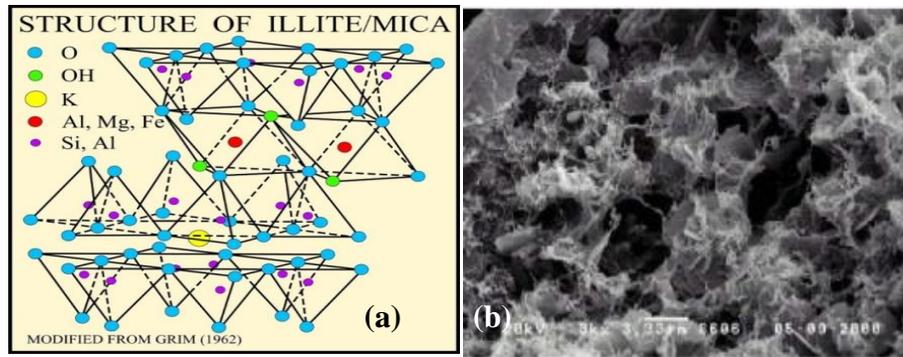
La distance interfolaire est 10 \AA .

L'épaisseur des cristaux est de 0.005 à 0.05 μm .

La surface externe SE est de 80 m^2/g .

La surface interne SI=800 m^2/g .

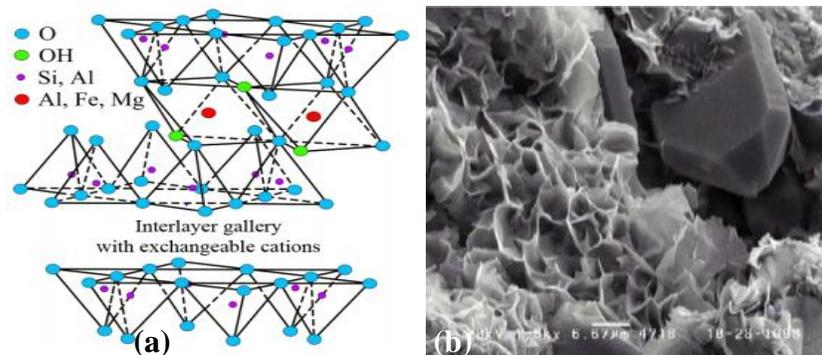
Association d'une CO (alumineuse) et deux CT (siliceuses) (Figure 1.2). Mais il peut y avoir des substitutions (remplacement de Si par Al). Des cations (K^+) sont adsorbés dans l'espace interfolaire afin de compenser le déséquilibre des charges. C'est le minéral ubiquiste par excellence. Sa structure est proche de la muscovite (plus d'eau, moins de K^+).



3.1.1.1.3. La montmorillonite ou les Smectites (2/1, d=14Å°)

Connue sous l'appellation de « terre de Sommières »

L'empilement des feuillets est désordonné; chaque feuillet est tourné dans son plan par rapport au précédent. Les substitutions d'atomes sont importantes. Ce désordre et la faible charge des feuillets facilitent leur écartement et l'adsorption des molécules variées (eau, cations, molécules organiques) au niveau de l'espace interfoliaire qui s'écarte ($d = 18 \text{ \AA}$). Les Smectites, ou montmorillonites, sont généralement calciques, plus rarement sodiques. Elles sont formées dans les sols mal drainés plutôt alcalins. Les feuillets de smectites peuvent s'intercalés régulièrement ou irrégulièrement avec d'autres feuillets argileux, souvent illitiques. L'ensemble forme des interstratifiés (Figure 1.3).



3.1.1.1.4. La Vermiculite (2/1, d=12Å°)

Fréquente dans les sols de la zone tempérée. La couche octaédrique contient du Fe et du Mg. La vermiculite est proche des illites et chlorite mais montre des propriétés gonflantes (Figure 1.4).

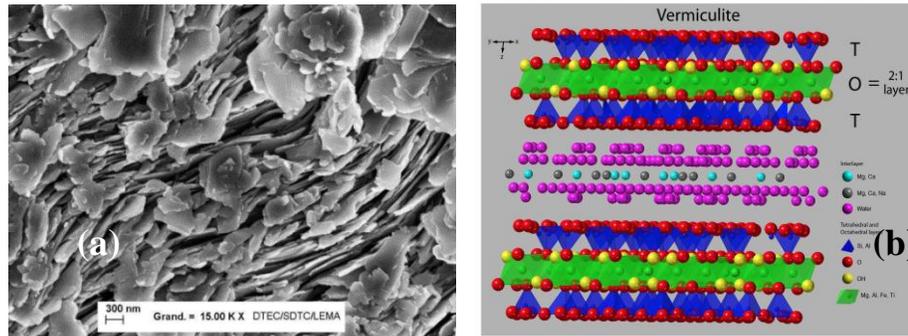


Figure 1-4 (a) Cristaux de chlorite vu au MEB (Tucker, 1981), (b) Structure atomique d'une vermiculite (<https://www.permaculturedesign.fr/permaculture-construction-naturelle-la-terre-crue-de/>).

3.1.1.1.5. Les Chlorites (2/1, d=14 Å°)

Les chlorites ont une structure de base formée de deux feuilletés alternés (minéral 2/1/1). Le premier est négatif, le second positif compense la charge négative du premier (Figure 1.5), ce qui conduit à un assemblage neutre (Cité par : Mango, 2019).

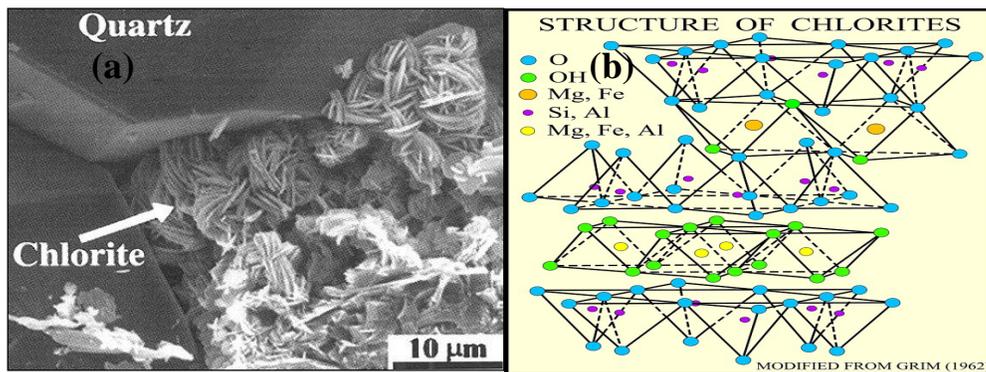


Figure 1-5 (a) Cristaux de chlorite vu au microscope électronique à balayage (Tucker, 1981), (b) Esquisse schématique de la structure du chlorite (<https://www.researchgate.net/figure/Diagrammatic-sketch-of-the-structure-of-chlorite>).

Au niveau de la composition de la terre les graviers et les sables jouent le rôle de squelette et les limons et les argiles jouent le rôle de liant (Houben et Guillaud, 1994).

Les propriétés des terres sont alors déterminées par les proportions de ces constituants, par exemple, lorsque ces constituants sont soumis à des variations d'humidité certains

changent de volume, d'autres non. Les sables et les graviers sont stables, les limons et les argiles sont instables. Cette notion de stabilité, c'est-à dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction (Doat et al, 1979) cité par (Laibi, 2017).

4. Les avantages et les inconvénients de la construction en terre

Aujourd'hui, la terre crue réapparaît de plus en plus dans les constructions non seulement à cause de ses qualités constructives indéniables, mais également car ses propriétés permettent de répondre aux enjeux environnementaux actuels. La terre contribue ainsi pleinement à une réelle démarche de développement durable .Grigoletto, (2015)

4.1.1.1. Avantages

4.1.2. Avantages Constructifs :

- C'est un bon régulateur de l'humidité ambiante grâce à sa perméabilité à la vapeur d'eau.
- Elle possède de bonnes qualités phoniques (absorption).
- La terre résiste fort bien dans le temps si elle est protégée de la pluie.
- Elle résiste bien au feu.

4.1.3. Avantages économiques :

- réduction de la fuite des devises par une substitution aux matériaux importés, (ciment, acier, bois).
- Production manuelle caractérisée par une Haute Intensité de Main d'œuvre.

4.1.4. Avantages écologiques :

La terre est une ressource locale abondante et disponible à proximité ;

Universelle et recyclable, matériau peu énergivore et durable dans de bonnes conditions ;

Réduction importante d'énergie consommée pour le transport et pour la production du matériau de construction ;

- Réduction d'émission de CO₂, par rapport la production de ciment.

4.1.5. Avantages sociétaux :

- Elle valorise le patrimoine et le savoir-faire ancestral.
- réponse à la demande d'habitat dans les pays du Sud et lutte contre la précarité des populations.

4.1.5.1.1. Inconvénients

Pas des règles professionnelles, ni de normalisation ;

Sensible à l'eau (soluble);

Main d'œuvre nombreuse et qualifiée, pouvant engendrer un surcoût ;

Mise en œuvre lente avec un temps de séchage, plus ou moins long.

5. Techniques de construction en terre

Il existe nombreux et différents modes de mise en œuvre de la terre. Houben et Guillaud, (1994) dénombre douze techniques et présentées dans la figure 1-6

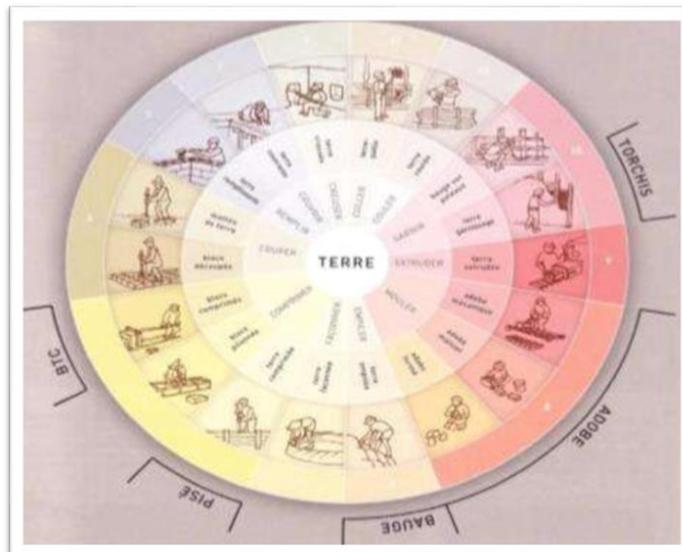


Figure 1-6 «Roue» des techniques de construction en terre. anger et fortaine, (2009) p 26

Chaque technique demande une terre précise parce que chaque une technique a une formulation différente.

Parmi les techniques utilisées dans les constructions en terre, on peut citer les principales :

5.1.1.1.1. La bauge

La bauge est une technique traditionnelle de construction en terre qui est utilisée depuis des milliers d'années dans le monde entier et par tous les climats (Hugo Houben et al, 2006; Röhlen et al, 2013).

La technique de construction en bauge consiste en l'édification de murs massifs, souvent porteurs et sans coffrage, avec un mélange de terre, d'eau et de fibres végétales (ou animales) mis en œuvre par empilement des boules en terre à l'état plastique, généralement sans l'aide de coffrage (Hamard, 2017; Houben et al, 2006; Röhlen et al, 2013) (Figure 1.7). L'ajout de fibres permet de maintenir la cohésion et de limiter le retrait du matériau lors du séchage.



Figure 1-7 (a) Construction en bauge, (b) Mise en œuvre, (c) Principe de la bauge (Delbecque, 2011).

5.1.1.1.2. Le torchis

Le torchis est un mélange de terre argileuse et d'adjuvants divers où dominent les fibres végétales (Figure 1.8). La terre utilisée est constitué d'éléments fins, argileux et collants et contenant peu de sable (Dewulf, 2015). L'ajout de fibres permet éviter la fissuration du mélange au séchage, et la stabilité de la structure et la résistance aux intempéries (Röhlen et al, 2013).

La technique est appliquée verticalement mais aussi horizontalement, pour un torchis d'isolation dans un plancher en bois. Le mur obtenu, léger, n'a que 8 à 15 cm d'épaisseur. Il est mis en place une fois la toiture achevée. Les nombreuses zones de contact et sa faible épaisseur, le rendent peu isolant (Sémon et Gauzin-Müller, 2016).

Caractéristiques :

Sol argilo-limoneux.



Figure 1-8 (a) Construction en torchis, (b) Mur en torchis en cours, (c) Principe de la réalisation de torchis (Delbecq, 2011 ; Bruno, 2005).

5.1.1.1.3. Le pisé

Cette technique est adaptée à la réalisation de murs massifs rectilignes (Figure 1-9).

Concernant l'aspect esthétique, les couches successives de terres compactées sont visibles sur le mur final (Houben et al, 2006).

La technique du pisé consiste à damer de la terre humide dans un coffrage. La terre est versée dans un coffrage par couche, avant compactage elles sont épaisses d'environ 20 cm et ramenées à moitié d'épaisseur après le compactage. Ainsi, pour un coffrage qui est traditionnellement haut de 90 cm, une dizaine de couches permettent de réaliser une « banchée » de pisé. Ces couches restent souvent visibles sur l'aspect du mur fini (As Terre, 2014).

Le compactage a été fait par une dame manuelle en bois ou en métal, un fouloir pneumatique, un marteau-piqueur ou par une plaque vibrante. Le mur est décoffré

directement après le damage de la terre. L'épaisseur du mur dépend de la hauteur du mur mais doit être supérieure ou égale à 50 cm afin d'assurer son intégrité.

Caractéristiques :

Sol à texture sableuse ou sablo-graveleuse ;

Un sol limoneux ou argilo-sableux convient aussi ;

Densité : 1,7 à 1,9 T/m³.



Figure 1-9 (a) Mosquée en pisé édifée en 1788, (b) Compactage d'un mur en pisé, (c) Principe de pisé (Delbecque, 2011 ; Bruno, 2005).

5.1.1.1.4. Brique de terre comprimée (BTC)

Les blocs de terre comprimés sont des petits éléments de maçonneries généralement de forme parallélépipédique (Figure 1.10). Ils sont fabriqués dans des presses manuelles ou mécanisées avec de la terre humide et pulvérulente, composée d'une proportion équilibrée d'argiles, limons, sables et petits graviers. C'est une évolution technique du bloc moulé d'adobe. L'addition de ciment ou de chaux est courante pour augmenter les caractéristiques mécaniques et la résistance à l'eau (Rigassi, 1995).



Figure 1-10 Brique de terre comprimée (<https://www.lamaisonnature.ch/wp-content/uploads/2009/06/compressed-earth-block.jpg>).

5.1.1.1.5. L'adobe

L'adobe est de l'argile qui, mélangée avec l'eau et une faible quantité de paille hachée ou d'un autre liant, peut être façonnée en briques séchées au soleil. Par extension, l'adobe (ou banco) est la brique de terre crue, moulée et séchée au soleil .figure 1-11 et utilisée comme matériau de construction. Il s'agit d'un des premiers matériaux de construction : Les premières villes connues étaient construites en briques de terre crue. Ce matériau est encore l'un des plus utilisés au monde. (Anger & Fontaine, 2009)



Figure 1-11 (a) Fabrication des adobes ; (b) Façonnage de l'adobe. (www.approche-ecohabitat.org).

Les sols qui conviennent le mieux à la fabrication de l'adobe sont ceux constitués de sable, de limon et d'argile, avec les proportions suivantes (Houben, 1979) :

Sable...55% à 75% ;

Limon...10% à 28% ;

Argile...15% à 18% ;

Matières organiques ...<3%.

Plusieurs cas peuvent se présenter :

Trop d'argile : des fissures se produiront dans les briques lors de séchage.

Trop de sable : les grains trop nombreuses ne pourront être tous suffisamment liés la cohésion sera trop faible et le brique se désagrégeront.

Trop de matière organique : l'effet de leur décomposition se traduit par une instabilité des caractères du matériau dans le temps, une porosité et une mauvaise durabilité en présence d'eau.

5.1.1.1.6. Stabilisation

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatible avec une application particulière (United Nations, 1992). Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître : les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé (Houben, 2006).

5.1.1.1.7. Objectifs

Les principaux objectifs de stabilisation des sols sont (Winterkorn, 1975 ; Nations Unies, 1992 ; Symons, 1999) :

L'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques de la terre (augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement) ;

La réduction de la porosité et les variations de volume (réduire le retrait et le gonflement à l'eau) ;

L'amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau).

Ces trois objectifs permettent d'améliorer la résistance mécanique, de diminuer la sensibilité à l'eau, de réduire le retrait et le gonflement et d'augmenter la résistance à l'usure.

5.1.1.1.8. Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre

D'une terre à l'autre, les propriétés sont changeantes et dépendent de la nature et du mélange complexe des tractions granulaires qui les composent. C'est souvent la fraction granulaire

dominante d'une terre qui caractérise ses propriétés fondamentales et régit son comportement.

On distingue d'une part des propriétés chimiques liées à la présence de sels, d'oxydes, de carbonates ou de sulfates et, d'autre part, des propriétés physiques nombreuses telles que la couleur, la stabilité structurale, l'adhérence, la masse volumique apparente, la teneur en eau, la porosité ou indice des vides, le pouvoir adsorbant, le potentiel et la diffusion capillaire, la perméabilité, le retrait linéaire, la résistance sèche et d'autres encore. La connaissance de ces propriétés chimiques et physiques permet de préciser la qualité et le comportement d'une terre pour la construction (Rigassi, 1995).

On observera cependant que la connaissance exhaustive des propriétés chimiques et physiques d'une terre n'est pas toujours nécessaire. Il convient en effet de bien connaître quatre propriétés fondamentales de la terre, qui sont (Houben, 2006):

5.1.1.1.9. Les propriétés de terre comme matériau de construction

Les propriétés de la terre changent d'un sol à l'autre en fonction de la nature des fractions de particules qui la compose. En général, c'est la fraction dominante d'un sol qui caractérise ses propriétés fondamentales et dicte son comportement. On peut distinguer d'une part les propriétés chimiques qui sont liées à la présence de sels, d'oxydes et de sulfates, et d'autre part entre les propriétés physiques, nombreuses et qui incluent la couleur, la stabilité structurale, l'adhérence, la densité apparente sèche, la teneur en humidité, la porosité, la capacité d'absorption, la perméabilité, le retrait linéaire, la résistance à la sécheresse etc. La compréhension de ses propriétés chimiques et physiques permet de définir la qualité et la performance d'un sol à des fins constructives. Parmi toutes ces caractéristiques, on distingue 3 caractéristiques fondamentales qui permettent à elles seules d'avoir une bonne compréhension du type de terre .RIGASSI, (1985) :

- La texture : la distribution granulométrique du sol, c'est-à-dire la quantité de gravier de sables, de limons et d'argiles proportion massique,
- La plasticité : la facilité avec laquelle il peut être façonné,
- La compressibilité : ou l'aptitude à réduire les vides, et donc sa porosité.

La répartition granulométrique est mesurée en deux temps en fonction de la taille des particules qui ont des rôles différents. Les graviers, sables et limons sont étudiés par granulométrie et les argiles par analyse de sédimentométrie.

La plasticité traduit l'aptitude d'une terre à se déformer sans qu'une réaction élastique significative ne se produise.

Les limites d'Atterberg définissent les limites entre différents états, de cohérence d'une terre. Celle-ci est évaluée en quantité d'eau sur la fraction fine du sol (moins de 0,4 mm) :

- Limite liquide (LL) : de l'état liquide à l'état plastique, la terre commence à manifester une résistance au cisaillement,

- Limite plastique (LP) : passage de l'état plastique à un état solide, la terre devient friable.

David, (2017).

5.1.1.1.10. Procédés de stabilisation

La terre stabilisée est l'une des évolutions dans l'utilisation de la terre comme matériau de construction. Stabiliser une terre consiste à lui donner des propriétés irréversibles face aux contraintes physiques. On distingue trois procédés de stabilisation, (Winterkorn, 1975 ; Nations Unies, 1992, Webb, 1994)

5.1.1.1.11. La stabilisation mécanique :

Consiste à modifier les caractéristiques de la terre en intervenant sur sa structure ; c'est le compactage de la terre qui modifie sa densité, sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité.

5.1.1.1.12. La stabilisation physique :

les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur sa texture : mélange contrôlé de fraction de grains différents.

5.1.1.1.13. La stabilisation chimique :

on ajoute à la terre d'autres matériaux ou des produits chimiques qui modifient ses propriétés. Le traitement du matériau terre par des produits chimiques se fait pratiquement de deux manières :

- Un traitement dans la masse (introduction dans la masse du sol d'une quantité minimale de stabilisant).
- Un traitement de surface (enduits, badigeons, hydrofuges), pour protéger la surface par imprégnation sur la partie exposée.

5.1.1.1.14. Modes de stabilisations

Moyens de stabilisation Dans la littérature, on peut trouver divers classifications, selon : la nature, la forme, etc. Selon Rigassi (1995) il y a six modes de stabilisations : Hydrofuger, imperméabiliser, liasonner, enchaîner, armer et densifier. Mango (2019), il existe plusieurs « stabilisants » de la terre à bâtir :

5.1.1.1.15. Les sables et graviers :

L'ajout de sable ou de gravier à la terre est un procédé de stabilisation physique qui modifie la granulométrie de la terre afin d'améliorer sa compacité Mukerji, K. (1994) Il permet également d'utiliser moins d'argile et ainsi d'épargner les gisements.

5.1.1.1.16. Les fibres :

Sont utilisées pour apporter une armature à la terre. Elles sont d'origine animale, végétale ou synthétique. La paille est la fibre la plus employée pour stabiliser la terre. Elle réduit la fissuration au séchage et augmente la résistance à la traction (Houben et Guillaud, 1989).

5.1.1.1.17. Le bitume :

Est un produit composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler. Il doit être mélangé à des solvants (gasoil, kérosène, naphta) ou à l'eau pour être utilisé comme stabilisant. L'emploi du bitume comme stabilisant reste limité (Houben et Guillaud, 1989).

5.1.1.1.18. Les résines :

dérivent souvent de substances végétales comme par exemple de résidus du traitement du bois au cours de la fabrication de la pâte à papier. La résine est un hydrophobant qui réduit la sensibilité de la terre à l'eau (Houben et Guillaud, 1989).

5.1.1.1.19. le ciment

Le ciment agit peu sur les particules fines d'argile, il convient donc mieux aux terres faiblement argileuses. Le dosage dépend de la terre utilisée, il varie entre 5 et 12 % pour obtenir des résultats satisfaisants. La stabilisation au ciment améliore les résistances et la durabilité de la terre. Les terres stabilisées au ciment ne sont pas réutilisables. Izemmouren, (2016)

Le ciment réagit également avec les argiles selon trois phases :

- premièrement, l'hydratation qui produit des gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile et la chaux libérée lors de ce processus d'hydratation du ciment qui réagit avec l'argile. Celle-ci est vite consommée par les argiles qui rentrent alors en dégradation.

-Deuxièmement, le développement de l'hydratation qui accélère la dégradation des argiles ; les gels de ciment pénètrent en profondeur.

- La troisième phase est l'interpénétration des gels de ciment et des agglomérats d'argile dégradés qui favorisent une nouvelle structuration du matériau avec formation d'une matrice inerte sableuse liée au ciment, d'une matrice d'argile stabilisée et d'une matrice de terre non stabilisée. Houben et Guillaud, (1989).

5.1.1.1.20. La chaux :

5.1.1.2. Mécanisme de stabilisation

Les théories de la stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de bases (H .Hauben et H.Guillaud, 1995) :

5.1.1.2.1. Absorption d'eau :

plus remarquable en cas d'utilisation de la chaux vive. La chaux subit une réaction d'hydratation qui abaisse la teneur en eau du mélange.

5.1.1.2.2. Echange cationique :

L'addition de la chaux à une terre humidifiée correspond à un apport important d'ions de calcium. Par un phénomène d'échange cationique, ces ions de calcium se substituent aux cations échangeables (magnésium, sodium, hydrogène...) de la terre.

La capacité d'échange cationique de la terre est déterminante dans ce phénomène.

5.1.1.2.3. Floculation et agglomération :

L'échange cationique et l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle conduisent à la floculation et agglomération des particules fines de la terre. Ainsi, il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine de la terre. La structure et la texture de la terre changent.

5.1.1.2.4. Carbonatation :

La chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde atmosphérique pour former du carbonate de calcium. Cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques.

5.1.1.2.5. Réaction pouzzolanique :

A une valeur de pH élevée due à l'hydratation de la chaux vive (Formule .1) et à l'ionisation de l'hydroxyde de calcium (Formule .2), les silicates et aluminates présents dans le sol sont susceptibles de subir une dissolution, d'après leur diagramme de solubilité (Figure 12). Little, (1987).

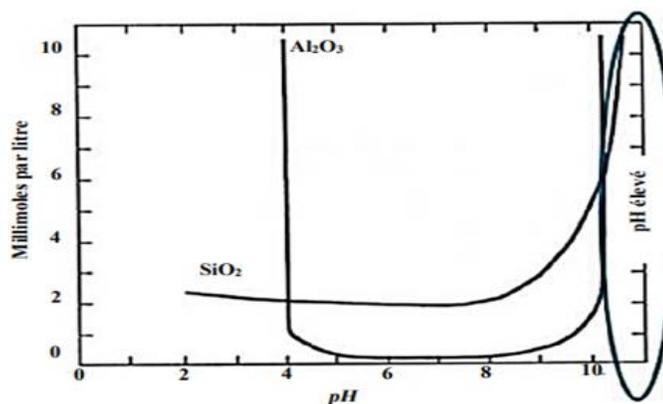


Figure 1-12 Solubilité des aluminates et des silicates en fonction du PH Little, (1987).

La dissolution de la chaux dans l'eau du sol (libération des cations Ca^{2+} et anions (OH^-)) permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH.

En milieu basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées et libèrent l'alumine et la silice qui réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des hydrates calciques similaires à ceux des ciments (CSH), hydrate d'aluminate calcique (CAH) (figure 1.13) et hydrate aluminosilicate calcique (CASH). ATTIMA et al, (2014).

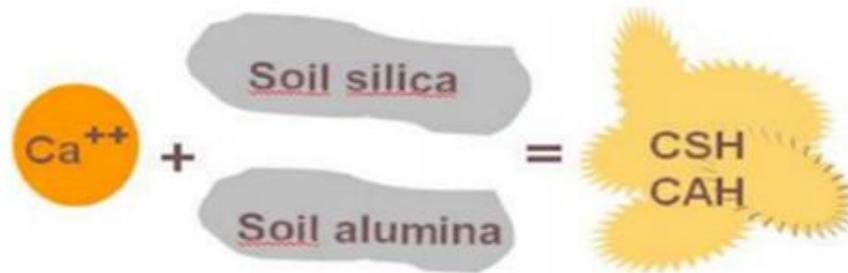


Figure 1-13 Réaction pouzzolanique. Marrot, (2010).

5.1.1.2.6. Stabilisation par les fibres

La stabilisation par les fibres a été longtemps utilisée notamment celle fait à base de paille. Cette méthode de stabilisation est intéressante car elle est adaptable à différents modes de mise en œuvre de la terre, à l'état liquide ou plastique et même par compression. Les fibres sont principalement employées pour la confection de blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Pour renforcer les briques de terre crue, il existe une autre technique faisant usage d'armatures fibreuses qui convient bien à la pratique de briques comprimées. La résistance apportée par des fibres permet de résoudre d'autres problèmes rencontrés sur les briques de terre crue, que la stabilisation avec addition ne peut pas forcément solutionner.

Elles agissent sur les résistances mécaniques, les performances thermiques et encore d'autres aspects :

- augmentation importante de la résistance en traction, et souvent des résistances en flexion et compression,

- réduction de la fissuration et réduction des variations dimensionnelles dues au séchage des argiles grâce à l'effort distribué dans tous les sens par les fibres,
- accélération du séchage, par l'effet drainant des canaux de fibres,
- Allègement des blocs, et amélioration de la conductivité thermique par l'introduction d'une plus grande quantité d'air grâce aux fibres.

On distingue plusieurs types de fibres :

- les fibres organiques
- les fibres minérales
- les fibres synthétiques

Le comportement des blocs renforcés par des fibres est différent. A la rupture, les blocs armés restent en un seul morceau. Ils peuvent absorber une énergie plus importante grâce à la capacité de déformation des renforts. On observe en général une augmentation de la résistance en compression de l'ordre de 15% avec l'ajout de fibres selon, houben et guillaud, 1989.

5.1.1.2.7. Les fibres végétales

5.1.1.2.8. Propriétés mécaniques des fibres végétales

De manière générale, les fibres naturelles sont convenables à renforcer des matrices thermodurcissables et thermoplastiques, grâce à leur résistance et leur rigidité relativement hautes et leur basse densité. Les propriétés mécaniques des fibres végétales en traction présentent de nombreux atouts pour renforcer les matériaux composites si on s'intéresse aux impacts environnements. Cependant, il y a relativement peu de données fiables disponibles dans la littérature pour leur sélection, dues aux limitations dans la méthodologie d'essai (M. DURIEZ, JARRAMBIDE).

5.1.1.2.9. Classification des Fibres Végétales

5.1.1.2.10. Les fibres de feuilles

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides. Les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont (R. Delebecque, Collection Mémento Technique) :

5.1.1.2.11. L'abaca

L'Abaca ou chanvre (Figure 1.14) de Manille est un bananier textile (Musacées) qui pousse aux Philippines : les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, et aussi de rabanes, nappes, stores, vêtements.

La fibre d'Abaca a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22 μm . Elle est utilisée principalement dans la composition des papiers filtres, des sachets de thé. Ce sont des papiers poreux demandant une bonne résistance, en particulier au déchirement (Collection Mémento Technique).



Figure 1-14 Fibre d'abaca (Mvenuto)

5.1.1.2.12. Le sisal

Le sisal est une espèce d'agave, ses fibres sont extraites des feuilles de la plante sisal (Figure 1-15) dont le nom scientifique est agave sisalana. Originnaire du Yucatan (près des Antilles), elle est essentiellement cultivée en Amérique du sud, en Afrique et en extrême orient.

Un plant de sisal produit jusqu'à 300 feuilles et chaque feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres. Ces dernières sont relativement rigides et flexibles et sont multicellulaires avec des cellules ayant différentes formes.

La longueur des fibres de sisal varie de 0,6 à 1,2 m avec un diamètre moyen de 200 μm leur couleur est crème (parfois jaunâtre).

Les méthodes de traitement pour l'extraction des fibres ressemblent étroitement à celles du lin ; les fibres sont ensuite lavées à grande eau afin d'enlever les déchets (Edition AFNOR).

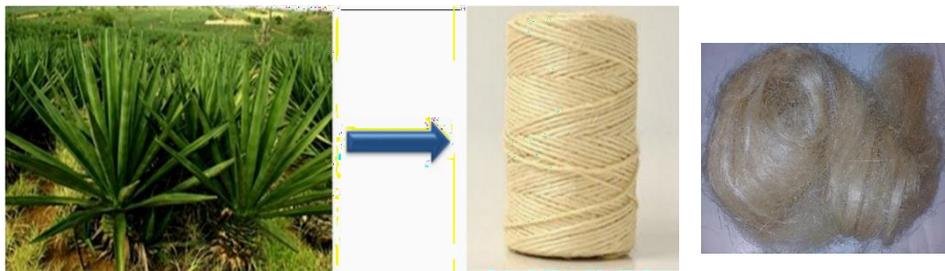


Figure 1-15 Fibre de sisal (Mvenueat).

5.1.1.2.13. Avantages Et Inconvénients Des Fibres Végétales

Le tableau II. 3 présente les avantages et les inconvénients des fibres végétales comme renfort dans la matrice polymère. La biodégradabilité des fibres peut être considérée comme un avantage ou un inconvénient. Pour la recyclabilité, les fibres sont considérées comme avantageuses. Par ailleurs, il n'existe pas de structure composite à durée de vie illimitée, tout matériau étant voué à devenir déchet. L'utilisation de ce type de matériau impose de placer la structure composite en dehors des conditions de biodégradabilité. Cette démarche est appliquée par exemple pour le bois.

5.1.1.2.14. Mortier de Terre

Les mortiers de terre, et de manière significative, la construction en pierre de mortier de terre ont été largement négligés dans les archives archéologiques et historiques des bâtiments au Royaume-Uni et en Irlande à ce jour. L'utilisation de la construction en pierre au mortier de terre est prouvée dans les principaux comptes de construction en Angleterre datant de la fin de la période médiévale. Des recherches plus larges à travers la Grande-Bretagne et l'Irlande ont montré qu'il représente une technique de construction vernaculaire

présente de la préhistoire à la période post-médiévale. Il est noté dans les bâtiments de statut élevé et inférieur et il est évident dans toutes les catégories de bâtiments tels que ecclésiastique, domestique, agricole, défensif, industriel, infrastructurel et public. Cependant, les termes descriptifs utilisés dans l'enregistrement du mortier de terre dans la littérature publiée et non publiée, datant du début du XIXe au XXIe siècle en Irlande et en Grande-Bretagne, décrivent négativement sa présence, indiquant sa faible acceptation, interprétation et reconnaissance. Ce facteur entrave constamment sa compréhension en tant que matériau de construction durable et masque sa reconnaissance plus large en tant que technique de construction historique dans les interprétations de construction qui en résultent. (Markley, S. (2018))



Figure 1-16 Reconstitution archéologique d'un mur. Briques de terre crue et mortier de terre fibré.(fr.wikipedia.org)

7. Conclusion:

Ce chapitre a mis en évidence le contexte général de l'utilisation de la terre dans la construction ainsi que les diverses techniques de construction en terre, ensuite il a mis l'accent sur la minéralogie et la chimie des sols et les processus physico-chimiques générés par l'ajout de la chaux aux sols argileux. L'emploi des fibres et agrégats végétales comme renfort ou comme charges dans le matériau terre en tant que matériau de construction a été aussi passé en revue. Les effets de ces fibres ou agrégats végétaux sur les propriétés thermo-physiques et mécaniques des matériaux à base de terre crue ont été bien analysés dans les études antérieures.

Chapitre 02 :
Matériaux de l'étude et méthodes expérimentales

1. Introduction

Dans ce chapitre on va présenter les caractéristiques des matériaux étudié dans notre travail (fabrication des éprouvettes du mortier de terre stabilisée par la chaux et le sisal, suivi d'une présentation de l'ensemble des formulations et à la fin nous décrivons les méthodes expérimentales utilisées dans cette étude, à savoir la méthode de fabrication, la cure et les essais de caractérisation des éprouvettes du mortier de terre.

2. Matériaux utilisés

Dans ce travail, nous avons cherché à valoriser les fibres de sisal dans la fabrication du mortier de terre. Les matériaux utilisés sont : sol, chaux et sisal.

2.1. Sol :

2.1.1. Origine du sol

La terre utilisée dans notre recherche trouve son appartenance dans la région de Biskra (d'Al-Alia) (Figure 2.1). Le critère de choix des lieux de prélèvement son : la disponibilité et l'abondance dans la région.



Figure 2-1 le sol.

2.1.2. Caractéristiques physiques du sol

Avant de soumettre les essais sur ce sol, il est écrêté à 2 mm. (Houben, 1994).

Pour interpréter nos résultats expérimentaux, une caractérisation du sol étudié est nécessaire pour évaluer les propriétés physiques et mécaniques du mortier de terre. Pour cela, on s'est intéressé aux essais suivants :

2.1.3. Les masses volumiques du sol

La masse volumique de l'éprouvette traduit dans une large mesure ses propriétés techniques. Elle est évaluée à partir de l'essai au pycnomètre selon la norme NF P94-054.



Figure 2-2 Mesure de la masse volumique apparente



Figure 2-3 Mesure de la masse volumique absolue.

Le Tableau 2.1 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié.

Tableau 2-1 Les masses volumiques du sol.

	Masse volumique apparente ρ (g/cm ³)	Masse volumique absolue γ_s (g/cm ³)
Sol de Biskra	1.301	2.332

2.1.4. Composition granulaire

La granulométrie du sol est déterminée à travers deux essais : l'analyse granulométrique NF P94-056 et la sédimentométrie NF P94-01.

Le tamisage par voie humide permet, à l'aide de différents tamis, de déterminer précisément la composition d'un matériau afin d'en déduire ses caractéristiques mécaniques. Il est important de caractériser un sol mais aussi de le classer. C'est-à-dire les mettre dans un groupe ayant les comportements similaires, les tamis sont emboîtés dans un ordre tel que la progression des ouvertures soit croissante du bas de la colonne vers le haut. L'essai a été effectué sur un sol imbibé dans l'eau pendant une journée avant la réalisation de l'essai.

La méthode par sédimentométrie complète celle par tamisage. Elle est réalisée sur de fraction de passant du tamis 0.08 mm a pour objet de déterminer la distribution.

Les résultats sont exprimés sous forme d'une courbe granulométrique dans la Figure 2.4 :

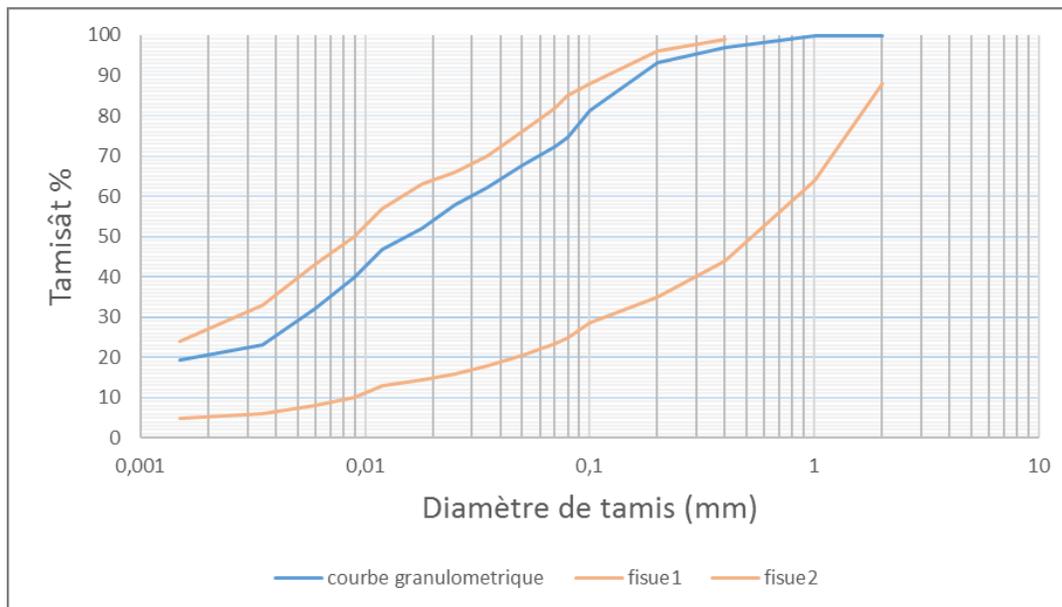


Figure 2-4 Analyse granulométrique de sol.

2.1.5. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg de ce sol étudié sont déterminées selon la procédure de la norme NF P 94 051. Ont été réalisées sur une fraction d'argile passant à travers le tamis de 400 μ m.

Les limites d'Atterberg sont des constantes physiques conventionnelles (teneur en eau pondérale) qui marque les seuils entre :



Figure 2-5 Essai de limite de liquidité.

Limite de liquidité (WL) : Le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (Figure 2.5) ;

Limite de plasticité (WP) : Le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide.

Ces deux limites sont utilisées afin de déterminer la classification des sols. Les résultats des essais sont présentés sur le Tableau 2.2

Tableau 2-2 Limites d'Atterberg de sol.

Limites d'Atterberg (%)			
Sol	Limite de liquidité (WL%)	Limite de plasticité (WP %)	Indice de plasticité (IP %)
	37.8	18	19.8

La Figure 2.6 présente les couples indice de plasticité (IP) et limite de liquidité (WL) du sol sur le diagramme de Casagrande.

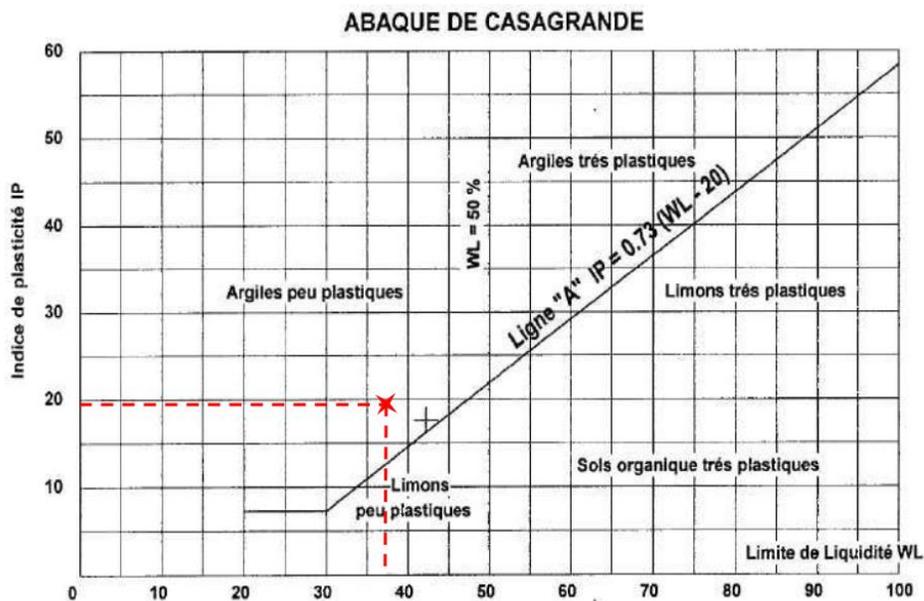


Figure 2-6 Classification du sol étudié sur l'abaque de Casagrande.

Suivant l'abaque de Casagrande on peut dire que le sol est une argile peu plastique.

Les résultats de la limite d'Atterberg se représente sous forme d'un point sur la Figure 2.7, ce point se trouve dans le fuseau adapté à la production d'adobe, qu'on va considérer similaire à celui utilisé pour la préparation du mortier de terre.

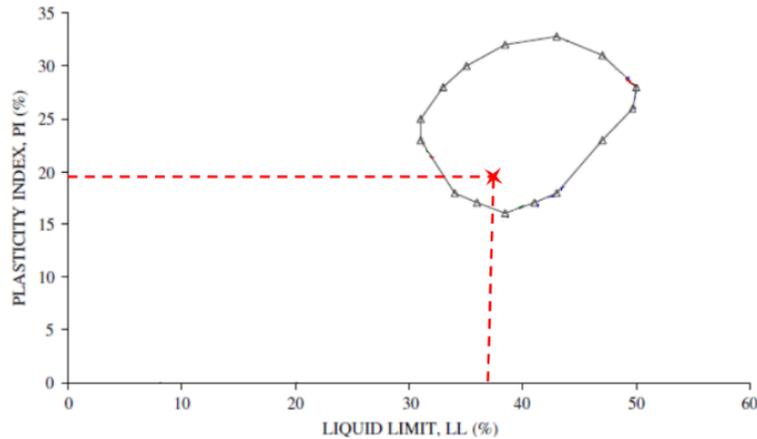


Figure 2-7 La zone des limites d'Atterberg de l'Adobe adopté dans notre cas pour le mortier de terre.

Caractéristiques chimiques du sol

2.1.6. Essai de bleu Méthylène

L'essai au bleu de méthylène, est un essai utilisé pour déterminer la propreté d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient (Figure 2.8). Le bleu de méthylène est en effet absorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques. Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu méthylène.

Cet essai a été conduit selon la norme française NF P18-592, la valeur au bleu de méthylène de VBS a été présentée dans le Tableau 2.3.

Tableau 2-3 Valeur du bleu de méthylène.

Echantillon	Valeur du Bleu V_{BS} (g/ml)	Classification du sol
Sol d'Al-Alia Biskra	3.14	Sol limoneux de plasticité moyenne.



Figure 2-8 Essai de bleu méthylène.

2.2. La chaux

Tous les types de la chaux peuvent être utilisés, pour la stabilisation du sol. Dans cette étude, la chaux vive (Figure 2.9), produite par l'unité de chaux de Saida (Algérie), a été utilisé.



Figure 2-9 La chaux.

Ses propriétés physiques et chimiques sont présentées dans le Tableau 2.4

Tableau 2-4 Compositions chimiques et caractéristiques physiques de la chaux vive (Fiche technique de l'unité de chaux de Saida, Algérie).

Analyses chimiques		
Oxydes	Pourcentage massique	
CaO	82.77	
Al ₂ O ₃	10.63	
Fe ₂ O ₃	3.27	
SiO ₂	1.35	
MgO	1.88	
SO ₃	0.11	
K ₂ O	0.15	
Na ₂ O	0.06	
Caractéristiques physiques		
Masse volumique absolu (g/cm³)	Masse volumique apparente (g/cm³)	Surface spécifique (Kg /m²)
2230g/m ³	1490g/m ³	300/Kg/ m ²

2.3. L'eau

L'eau utilisée dans le mélange provient du réseau public (Figure 2.10) et à une température de (20 ± 1 C). La qualité de cette eau répond aux exigences de la norme NFP 18-404.



Figure 2-10 L'eau utilisée dans l'étude expérimentale.

2.4. Fibres

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres végétales, il s'agit des fibres de sisal, connues par un nom commun Filasse.



Figure 2-11 Filasse

Absorption de l'eau (%)



Figure 2-12 Absorption de l'eau (%)

Tableau 2-5 Absorption de l'eau (%)

	Sec	Humide
Absorption de l'eau (%)	6	12

3. Préparation des éprouvettes de mortier de terre

3.1. Matériels spécifiques

Les moules prismatiques 4×4×16 cm³ (Figure 2.13) utilisées pour la détermination des différents essais fixés par notre programme (essai mécanique), le démoulage de moule prismatique est effectué par ouverture du moule (dévisser des boulons).



Figure 2-13 Les moules utilisés pour les essais mécanique

3.2. Optimisation de la chaux

La teneur en chaux optimale pour la brique peut être déterminée par essai de compression simple. Les pourcentages utilisés pour faire cette opération sont : 8%, 10%, 12%, 14%.

Les résultats de l'optimisation sont présentés dans la figure 2.14.

Donc la teneur en chaux optimale est 12%.

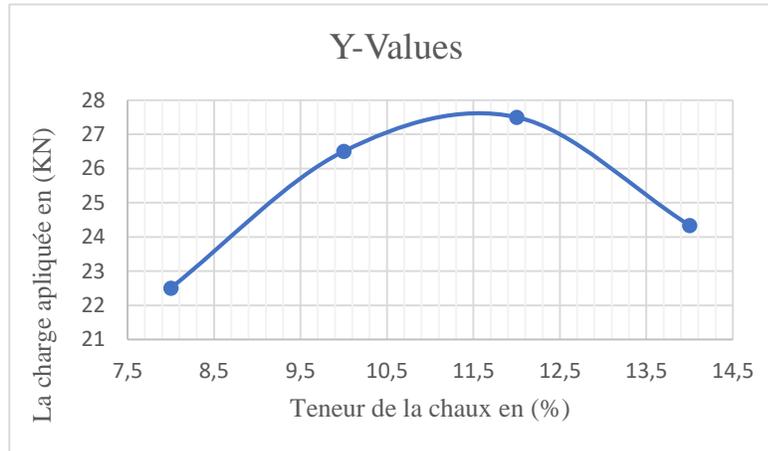


Figure 2-14 Optimisation de la teneur en chaux

3.3. Mélanges

Le poids du mélange global sec pour chaque bloc est maintenu constant durant toutes les étapes de cette étude, il est pris égale à 1,785 Kg.

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur le Tableau 2.6

Tableau 2-6 Composition des mélanges.

Sisal (%)	Chaux (%)	Sol (%)
0	12	88
0.25	12	87.75
0.5	12	87.5
0.75	12	87.25
1	12	87

3.4. Préparation des mélanges

Les matériaux (sol + chaux + sisal) sont d'abord malaxés à sec dans un malaxeur, (figure 2.15) avec une vitesse de 139tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant trois minutes. Puis on mélange ces compositions par un autre malaxeur (figure 2.15) avec un pourcentage d'eau. La préparation d'une proportion fixe d'eau pour la chaux, estimée à 12% du poids total de l'échantillon.



Figure 2-15 (a)Malaxeur à sec ;(b) Malaxeur (mélange avec l'eau).

La cure des éprouvettes de mortier de terre

La teneur en eau est déterminée par les limites d'Atterberg. (CRA terre, 1979) dans le cas d'un moulage manuel et pour vérifier si la teneur en eau est correcte, il existe un moyen assez simple, qui consiste à tracer un sillon en (V) de 8 cm de profondeur dans le mélange, à l'aide d'un bâton taillé en coin. Celui-ci doit laisser une trace nette. Les parois du sillon se gonflent et tendent l'une vers l'autre sans se toucher.

Notre préparation des éprouvettes est comme suit :

Les éprouvettes sont placés dans les moules immédiatement après la fin du malaxage. Nous avons ensuite en couvert les moules avec un film plastique tout en les gardant à l'endroit de la coulée pour faciliter le processus de démoulage et maintenir leur humidité et leur forme, après 48 heures, les éprouvettes sont prises manuellement avec précaution, en

évitant de toucher les arêtes à cause de leurs fragilité, puis elles sont à nouveau recouvertes d'un film en plastique pour assurer leurs étanchéité et ils sont ensuite stockées dans l'étuve à $T = 65 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 7 jours (Figure 2.16) , puis séchées sans le plastique dans l'étuve jusqu'à un poids constant.



Figure 2-17 Cure à l'étuve des briques d'adobe.

4. Caractérisation mécanique

4.1. Résistance à la compression (NF P94-077)

L'essai de compression est l'essai le plus couramment pratiqué. Pour nous essais la mesure de la résistance à la compression a été effectuée sur des éprouvettes cubiques (4x4x16) cm³, à l'aide d'une presse (Figure 2.17).



Figure 2-18 Essai de compression.

La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$R_c = 10 \times \frac{F}{S}$$

Où : R_c : Résistance à la compression des blocs en (MPa).

F : Charge maximale supportée par les blocs (KN).

S : Surface moyenne des faces d'essai (cm²).

4.2. Essai de traction par flexion (NF EN12390-5)

Pour mesurer la résistance en traction par flexion on utilisera la méthode de trois points (Figure 2.18).



Figure 2-19 Essai de traction par flexion.

La résistance en flexion (N/mm²) est calculée au moyen de la formule :

$$F_t = \frac{3 \times F \times L}{2 \times d_1 \times d_2^2}$$

F_t : est la résistance en flexion, en newtons par millimètre carré ou en MPa.

d_1 et d_2 : sont les dimensions de la section transversale de l'éprouvette, en millimètre.

F : est la charge appliquée au milieu du prisme à la rupture, en newtons.

L : est la distance entre les appuis, en millimètres.

5. Caractérisation physique

5.1. Mesure de la masse volumique (NF P94-054)

La masse volumique d'un sol (ρ) est le quotient de la masse (m) du sol par le volume (v) qu'il occupe (l'équation 3.3).

$$\rho = m / v \quad (3.3)$$

Dans notre travail, le volume a été obtenu en mesurant les dimensions des éprouvettes de différents côtés avec le pied à coulisse électronique (Figure 2.19).



Figure 2- 20 La mesure des dimensions de la brique à l'aide de pied à coulisse électronique.

5.2. Essai de propagation des impulsions des ultrasons (NF P 18-418)

Le principe de la méthode consiste à mesurer le temps mis par une onde, d'où le nom de la méthode (essai de vitesse de propagation d'ondes sonores) à parcourir une distance connue. L'auscultation sonore, basée sur la mesure de temps parcourus et d'énergie transmise, est une méthode particulièrement bien adaptée à ce type d'investigation. L'équipement utilisé pour la mesure de la vitesse de l'ultrason est le PUNDIT (Figure 2.20).

La vitesse des ondes, v , est calculée par la formule :

$$V = L/t$$

Où :

L : est la distance entre les transducteurs (m)

T : est le temps de propagation (s).

« La longueur de parcours de l'onde doit être supérieure ou égale à 10 cm ».



Figure 2-21 Mesure de la vitesse de propagation.

6. Essai de la durabilité

6.1. Absorption capillaire

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaire des éprouvettes non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. L'essai de Sportivité détermine le taux ou la vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette de 4x 4 x 16 cm³ place dans un bac contenant de l'eau, de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur presque de 5 mm de la profondeur du bac.

La mesure de l'absorption capillaire se fait selon la procédure de la norme XP 13 -901) . On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps la formule suivante :

$$C_b = \frac{100 \times P}{S\sqrt{t}}$$

Où : P : (Mh-Md) Poids d'eau absorbée en (g).

t : Le temps en heures (t = 10 min).

S : Surface de la face sciée (100 cm²).

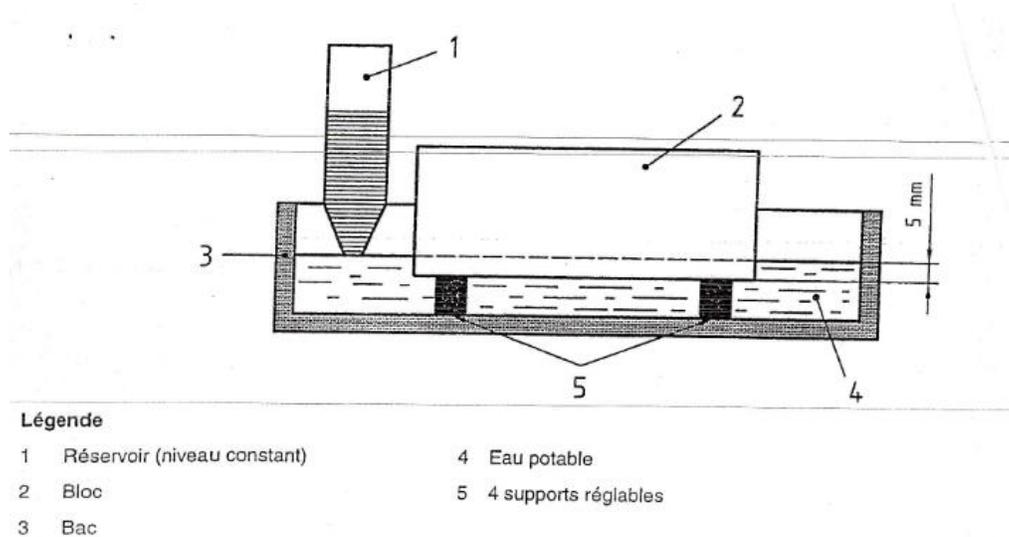


Figure 2-241 Essai d'absorption capillaire d'eau (norme XP 901-31).

6.2. L'absorption totale

D'après (Bungeyet Millard, 1996 ; cité par Izemmouren, 2016), l'essai consiste à poser des échantillons dans un bac à eau pendant 24 h et on mesure l'augmentation de la masse des échantillons (P_h). L'indice A de l'absorption totale de l'eau de chaque éprouvette est conventionnellement exprimé par la formule :

$$A\% = \frac{P_h - P_s}{P_s}$$

Où : P_h : poids de l'échantillon à l'état humide.

P_s : poids de l'échantillon à l'état sec.

6.3. Gonflement

La mesure du gonflement se fait selon la procédure suivante (norme XP 13 -901) :

Sceller sur chaque bloc à l'aide d'une résine époxyde deux plots de mesure selon la figure 2.22.

Mesurer la distance entre plots : 10.

Placer les blocs dans un bac d'eau selon la figure 2.23.

Après 96 heures (4 jours) d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 min, puis mesurer la distance entre plots : 11.

L'amplitude du gonflement de chaque bloc est donnée par la formule suivante :

$$\Delta L_g \text{ (mm/m)} = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0}$$

10 : la distance avant immersion

11 : la distance après immersion



Figure 2-272 Etapes de l'essai de gonflement : (a) préparation des plots, (b) immersion dans l'eau, (c) mesure du gonflement.

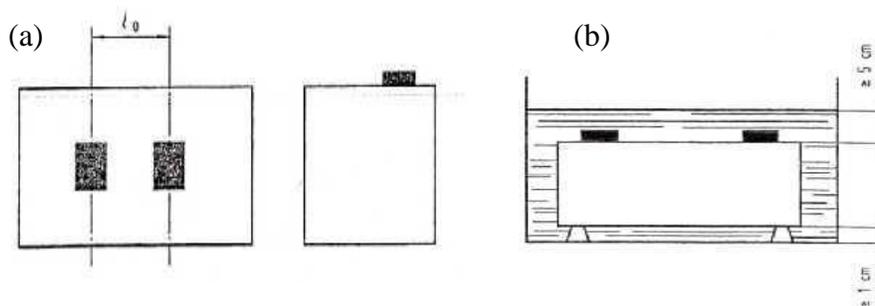


Figure 2-303 (a) Blocs pour mesure du gonflement, (b) L'immersion des blocs pour mesure le gonflement (norme XP 13-901).

7. Conclusion

Dans ce chapitre, on a réalisé des essais qui nous permettent de déterminer les propriétés de différentes matières premières et de donner une idée générale des principales propriétés qui entrent dans la formulation des éprouvettes de mortier de terre, composées de : sol et de stabilisants : fibres de sisal et la chaux.

Les données présentées dans ce chapitre proviennent de la bibliographie ou des essais de caractérisation réalisés au cours de notre étude.

La connaissance de ces caractéristiques nous aide d'une façon significative à commenter les résultats des essais expérimentaux et à mieux comprendre l'effet des différents paramètres étudiés sur les propriétés de l'adobe ajoutée.

Chapitre 03 :

Présentation et discussion des résultats

3.1 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats des différents essais effectués sur les éprouvettes de mortier de terre renforcée par des fibres de sisal.

Le choix des proportions optimales de fibre dans notre étude est réalisé sur des mélanges de mortier de terre à base d'un sol de la région de Biskra et stabilisé chimiquement avec 12% de chaux vive.

Le renforcement du mortier de terre par les fibres de sisal est réalisé par l'incorporation de divers teneurs (0.25%,0.5%,0.75% et 1%), ce dernier est répétées avec trois longueurs des fibres, à savoir : 0.5cm, 1cm et 1.5cm.

Les résultats obtenus à partir des essais effectués sont analysés en vue d'identifier des tendances générales en comparant le cas échantillons de mortier de terre sans fibres et avec ceux renforcés par des fibres de sisal.

Le programme expérimental a comme but, l'étude de l'effet de la présence des fibres de sisal sur :

- La résistance mécanique du mortier de terre : la résistance à la compression R_c et la résistance à la traction par flexion R_{tf} ; la masse volumique apparente du mortier de terre ;
- La vitesse des ondes ultrasonique du mortier de terre ;
- L'insensibilité du mortier de terre vis-à-vis de l'eau, à savoir l'absorption totale l'absorption capillaire à l'eau ATE et le gonflement.

3.2 Effet de la longueur et la teneur en fibres de sisal sur la résistance mécanique du mortier de terre

3.2.1 Résistance à la compression

L'effet de la variation de la longueur et la teneur en fibres sur la résistance à la compression R_c sèche des éprouvettes du mortier de terre est présenté sur la figure 3.1. Á travers ces résultats, on remarque que lors de l'ajout de 0,25% de fibres, la résistance à la compression augmente d'environ 4%, 10% et 15% pour les fibres de longueur 0,5cm, 1cm et 1,5cm

respectivement par rapport à la valeur de témoin. Puis lors de l'ajout de 0,5% des fibres RC augmente de 14%, 56% et 15% également, dans le même ordre. reprenant les efforts de traction et à la bonne liaison entre la terre et les fibres. Ensuite l'incorporation de 0,75% de fibres, on remarque qu'il y a un net écart dans les valeurs de résistance, où la valeur de RC diminue d'environ 6% comparativement au cas de l'ajout de fibres d'une longueur de 0,5 cm par rapport à la valeur de témoin, alors qu'elle augmente d'environ 30% lorsque les fibres d'une longueur de 1 cm. Quant aux fibres d'une longueur de 1,5 cm, RC ne change pas.

Enfin, lors de l'ajout de 1% de fibres, la résistance diminue de 24% et 2% pour les fibres de 0,5 cm et 1,5 cm, respectivement, tandis que les fibres de 1 cm ne modifient pas la résistance à la compression. Cette diminution est due à l'adhérence entre les fibres et la pâte de terre qui devient faible (augmentation de la quantité des fibres).

En d'autres termes, et en général, que peut-on observer que la plus grande valeur de la résistance à la compression peut être obtenue en ajoutant 0,5% des fibres d'une longueur de 1cm, tandis que la valeur la plus basse de la résistance est en ajoutant 0,25% de les fibres d'une longueur de 1,5 cm.

Quand on parle de pourcentage d'ajout, l'ajout de 0,5% de fibres est le rapport optimal par rapport aux différents rapports, grâce auquel on a obtenu une augmentation de la résistance à la pression à toutes les longueurs de fibres, tandis que le 1% a fait perdre la résistance en toutes les longueurs des fibres.

Si on parle de la longueur des fibres, ce sont les fibres d'une longueur de 1 cm qui donnent toujours la meilleure valeur pour la résistance, quel que soit le pourcentage de fibres différent, au contraire avec les fibres d'une longueur de 0,5 cm , qui donne toujours les valeurs les plus basses.

Ces résultats sont en concordance avec ceux de (KAZI-TANI WASSILA, 2016) dans son étude sur comportement thermique et mécanique des adobes avec fibres végétales. L'auteur a conclu que l'inclusion de fibres de sisal jusqu'à 0,5% a eu un effet mutable sur les résistances mécaniques. Dans le même contexte, (Ghavami et al. 1999) a montré que l'ajout

de 4% de fibre de sisal confère au sol une ductilité et augmente lentement la résistance à la compression.

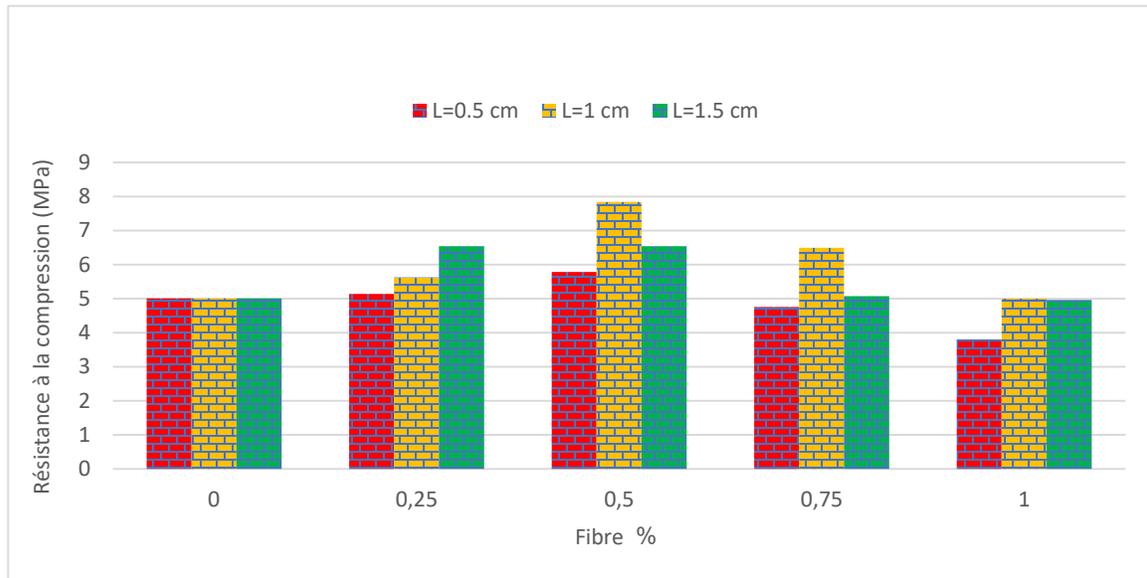


Figure 3-1 La résistance la compression en fonction de la longueur et le pourcentage des fibres.

3.2.2 Résistance à la traction par flexion

La figure 3.2 montre la variation de la résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur des fibres et du pourcentage de leur addition,

On peut voir que la valeur de témoin pour toutes les longueurs est environ 3,6 MPa. En ajoutant 0,25 % des fibres d'une longueur de 0,5 cm et 1 cm, la résistance à la traction augmente de 30,55 % pour chacune, alors qu'elle n'augmente que de 18,06 % pour les fibres d'une longueur de 1,5 cm. Dans le cas de 0,5 % de fibres, toutes les longueurs donnent le même gain de résistance à la traction, qui est estimé à environ 30,55 % par rapport au témoin. Pour le cas de l'ajout de 0,75% de fibres d'une longueur de 0,5 cm et 1,5 cm, la résistance augmente de la même valeur, qui est estimée à 29%, alors qu'elle augmente d'environ 27,77% lors de l'ajout de fibres d'une longueur de 1 cm.

Enfin, lors de l'ajout de 1 % des fibres de 0,5 cm et 1,5 cm, la résistance à la traction augmente d'environ 15,27 % et 22,22 %, respectivement, alors qu'elle reste égale à la valeur de témoin lors de l'ajout des fibres de 1 cm.

Ainsi, on peut observer que le taux d'ajout de 0,5% pour chaque longueur donne les plus grandes valeurs de résistance à la traction, contrairement à l'ajout de 1% des fibres d'une longueur de 1 cm, qui donne la valeur la plus faible.

Ces résultats sont en concordance avec ceux de (Mekhermeche, 2012) dans son étude sur l'étude des propriétés mécaniques et thermiques des briques en terre en vue de leur utilisation dans la restauration des Ksours sahariennes, L'auteur a conclu que l'augmentation de la teneur en fibres de palmier dattier permet d'améliorer les performances mécaniques. En effet, les fibres contribue à augmenter la résistance au fissuration et a la propagation de celles-ci se qui augmente la résistance mécanique.

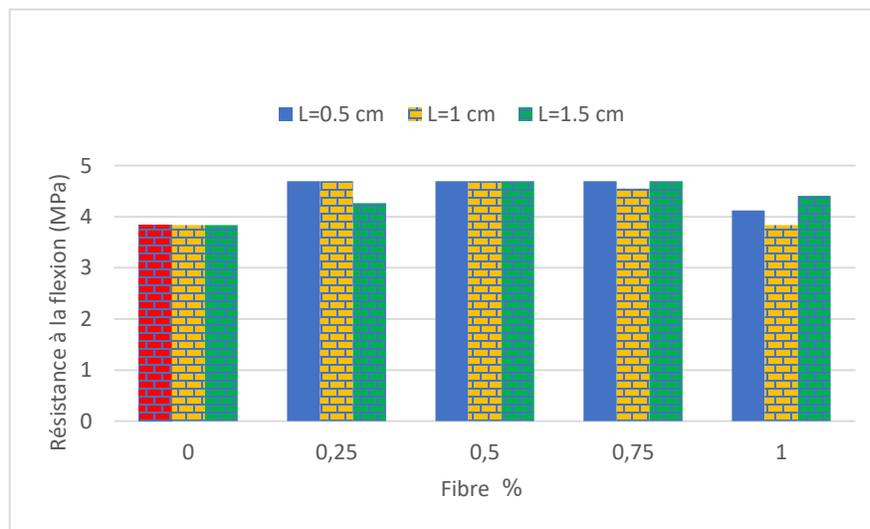


Figure 3-2 La résistance à la traction par flexion en fonction de la longueur et du pourcentage des fibres.

3.3 La Masse volumique apparente

À travers les graphiques dans la figure 3.3 de l'évolution de la masse volumique en fonction de longueur et de pourcentage de fibres, on peut observer une augmentation de la masse volumique entre 0,63% et 1,26% lors de l'ajout de 0,25% de fibres de toutes longueurs. Pour un ajout de 0,5% de fibres la masse volumique apparente reste à cette limite pour les fibres de longueur 0,5 cm et 1 cm, mais elle augmente d'environ 1,89 % pour les fibres de longueur 1,5 cm. Dans le cas 0,75%, on constate une augmentation de la masse volumique apparent d'environ 1,89% et 2,21% pour les fibres de longueur 0,5 cm et 1,5 cm

respectivement, alors qu'il y a une nette diminution pour les fibres de longueur 1 cm d'environ 3,16% par rapport à la valeur de témoin.

Au final, en ajoutant 1% des fibres, on constate qu'il y a une augmentation de la masse volumique avec l'augmentation de la longueur des fibres, mais par rapport au témoin, les fibres de longueur 0,5 cm et 1 cm enregistrent une diminution de la masse volumique d'environ 6,23 % et 5,06 %, respectivement, alors que la masse volumique des échantillons avec des fibres d'une longueur de 1,5 cm n'enregistre aucune différence par rapport à la valeur du témoin.

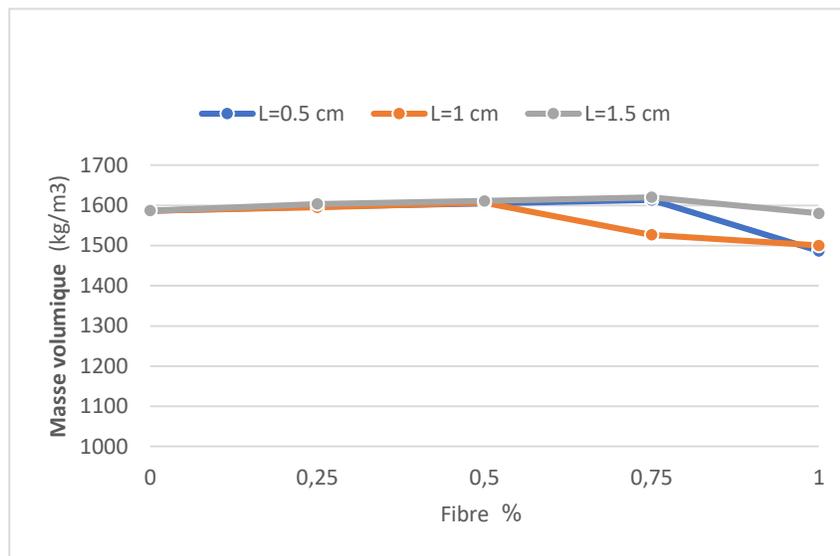


Figure 3-3 l'évolution de la masse volumique en fonction de longueur et de pourcentage de fibres.

3.4 Vitesse des ondes ultrasonique

Les vitesses des propagations des sons pour des éprouvettes du mortier de terre à base des différentes teneurs en fibres de sisal sont présentées dans la Figure 3.4 :

Sur la Figure 3.4, On remarque que l'ajout des fibres de sisal augmente la vitesse de propagation du mortier de terr, par rapport à la valeur de témoin. On remarque que les échantillons avec des fibres de 0.5% de dosage et 1cm de longueur et ont la plus grande vitesse, tandis que le mélange de 0.25% avec des fibres de 0.5cm de longueur a enregistré la vitesse la plus basse.

À travers les histogrammes, nous remarquons que lors de l'ajout de 0.25% de fibres, la vitesse de propagation des éprouvettes du mortier de terre augmente environ 4%, 7.8% et 9.1% pour les fibres de longueurs 0.5cm, 1cm et 1.5cm respectivement. Dans le même contexte, lors de l'ajout de 0.5% de fibres, la vitesse de propagation augmente d'environ 5.2%, 20.8% et 13% dans le même ordre.

Pour le cas d'ajout de 0.75% de fibres, la vitesse de propagation des éprouvettes de mortier de terre augmente environ 10.5%, 15.6% et 14.3% pour les fibres de longueurs 0.5cm, 1cm et 1.5cm respectivement. Enfin avec l'incorporation de 1% de fibres, la vitesse de propagation augmente d'environ 2.6%, 10.4% et 7.8% pour les longueurs de 0.5cm, 1cm et 1.5cm respectivement, et ceci par rapport à la valeur du témoin.

L'ajout de 0.5% de fibres est le dosage optimal par rapport aux différents dosages des fibres. Si on parle de la longueur des fibres, on constate que le cas de 1cm donne la plus grande vitesse de propagation quel que soit le teneur en fibres.

Djiragbou et al. (2017) déclarent que la vitesse est liée à la densité apparente de la brique, les zones d'homogénéité, les pores et éventuellement de fissures et les épaisseurs des différentes zones, et comme nous l'avons mentionné précédemment que la masse volumique a augmenté avec l'incorporation des fibres et la valeur optimal obtenue est de 0.5% de pourcentage et 1cm de longueur.

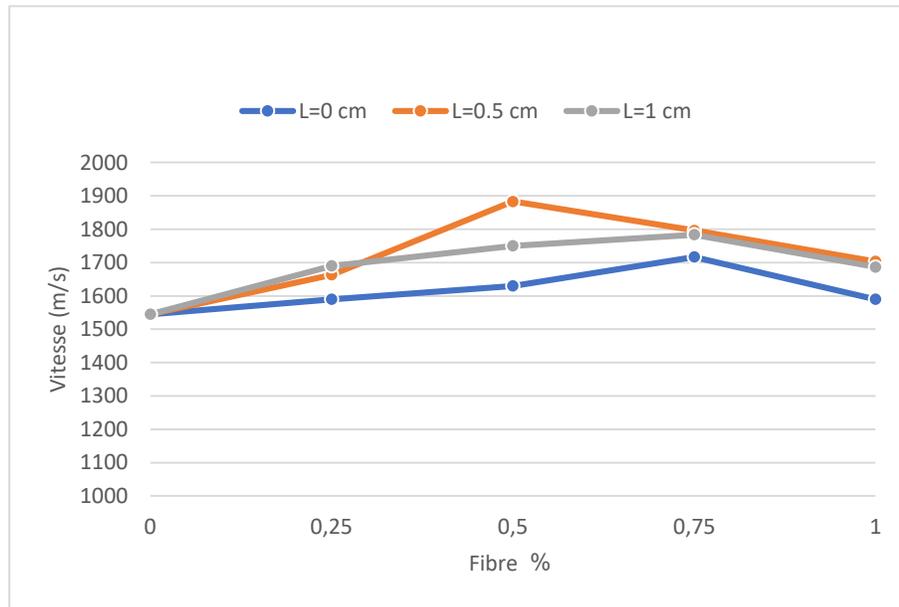


Figure 31 L'effet de la longueur et la teneur en fibres sur la vitesse de propagation du mortier de terre.

3.5 L'insensibilité du mortier de terre vis-à-vis de l'eau

3.5.1 Absorption totale

À travers le figure 3.5, qui montre l'évolution de la valeur d'absorption totale en fonction de la teneur et la longueur des fibres de sisal.

Nous notons qu'il existe une augmentation de la valeur de l'absorption totale et le pourcentage de fibres et leur longueurs, où plus la longueur des fibres est grande, plus la quantité d'absorption est grande, ainsi aussi plus le pourcentage de fibres est élevé, plus la quantité d'absorption est grande.

Aussi nous constatons que la plus grande valeur d'absorption totale concerne les éprouvettes avec des fibres de 1,5 cm, qui atteignent 24,8 % lorsque on ajoute 1 % des fibres, contrairement aux fibres d'une longueur de 0,5 cm, qui donne la valeur la plus faible.

Pour les fibres d'une longueur de 1,5 cm, l'augmentation de l'absorption est comme suit : 12,19 %, 14,63 %, 17,56 % et 20,97 % pour chacun des pourcentages 0,25 %, 0,5 %, 0,75 % et 1 % dans le même ordre,

Pour les fibres d'une longueur de 1 cm, l'augmentation de la quantité d'absorption est la suivante : 6,34 %, 13,17 %, 15,12 % et 20 % pour le pourcentage ajouté de 0,25 %, 0,5 %, 0,75 % et 1 %, respectivement.

Enfin, pour des fibres d'une longueur de 0,5 cm, l'augmentation de l'absorption est comme suit : 3,41 %, 4,87 %, 11,21 % et 19,02 %.

Les résultats montrent que l'ajout de fibres dans les mélanges augmente légèrement l'absorption totale d'eau, cela signifie qu'il y a plus d'infiltrations d'eau dans les échantillons. Ceci est attribué à la capacité d'absorption d'eau des fibres et l'effet néfaste de la présence des matières étrangères, dans ce cas il s'agit des fibres de sisal, que les fibres, sur la capacité de liaison du mélange (Weng, 2003), Cette absorption est expliquée aussi par l'effet de la nature des fibres. Les fibres cellulosiques sont plus hydrophiles, parce qu'elles contiennent la plus grande quantité de groupes OH dans sa composition chimique, et tout matériau renforcé avec ces fibres à l'état brut a tendance à avoir un caractère plus absorbant à l'eau (Taallah, 2014).

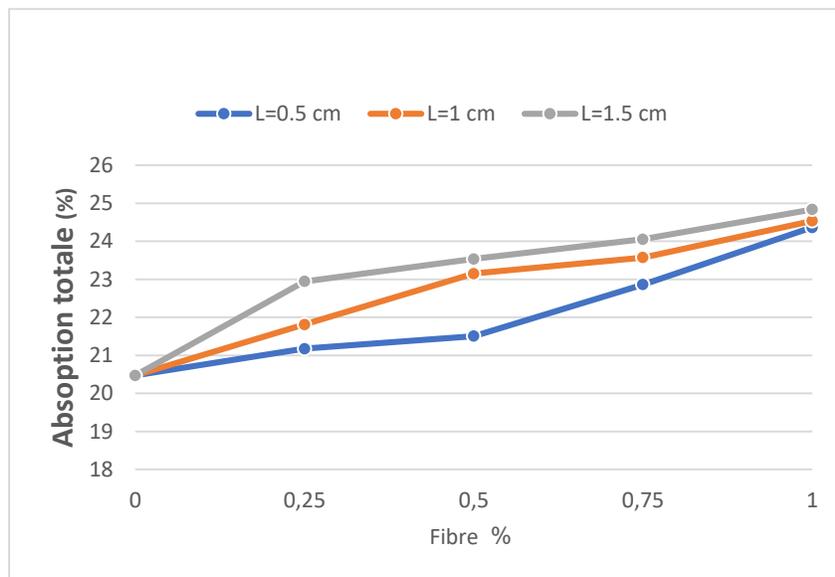


Figure 32 l'évolution de la valeur d'absorption totale en fonction de l'incorporation et longueur des fibres de sisal.

3.5.2 Absorption capillaire :

La figure 3.6 illustre la variation de l'absorption capillaire à l'eau du mortier de terre en fonction de la teneur et longueur des fibres après 1 jours d'immersion dans l'eau. Les

résultats obtenus montrent que la plus grande valeur de l'absorption capillaire d'eau est enregistrée pour 1 % en fibres et 1,5 cm de longueur avec une valeur de 57.35 %.

Nous constatons que le coefficient d'absorption d'eau par capillarité augmente environ 7.84%, 18.63% et 7.84% avec l'incorporation de 0.25% pour les fibres de longueur de 0.5cm, 1cm et 1.5cm respectivement. Pour le cas de l'ajout de 0.5% de fibres, l'absorption d'eau des éprouvettes du mortier de terre augmente d'environ 18.63%, 34.34% et 29.41% pour les fibres de longueurs 0.5cm, 1cm et 1.5cm dans le même ordre.

Avec l'ajout de 0.75% de fibres, l'absorption capillaire augmente d'environ 47.06%, 45.09% et 47.06% pour les fibres de longueurs 0.5cm, 1cm et 1.5cm respectivement. Enfin avec l'incorporation de 1% de fibres, l'absorption capillaire du mortier de terre augmente d'environ 57.05%, 45.098 et 57.35% pour les longueurs de 0.5cm, 1cm et 1.5cm par rapport à la valeur de témoin.

Les valeurs les plus élevées dans cette propriété sont dues à la nature hydrophile des fibres.

(Armel, 2017), indiqué que les fibres végétales ont un caractère hydrophile favorisant l'adsorption d'eau. Cette forte sensibilité à l'eau des fibres végétales constitue un point faible dans leur utilisation pour la fabrication des produits en terre crue.

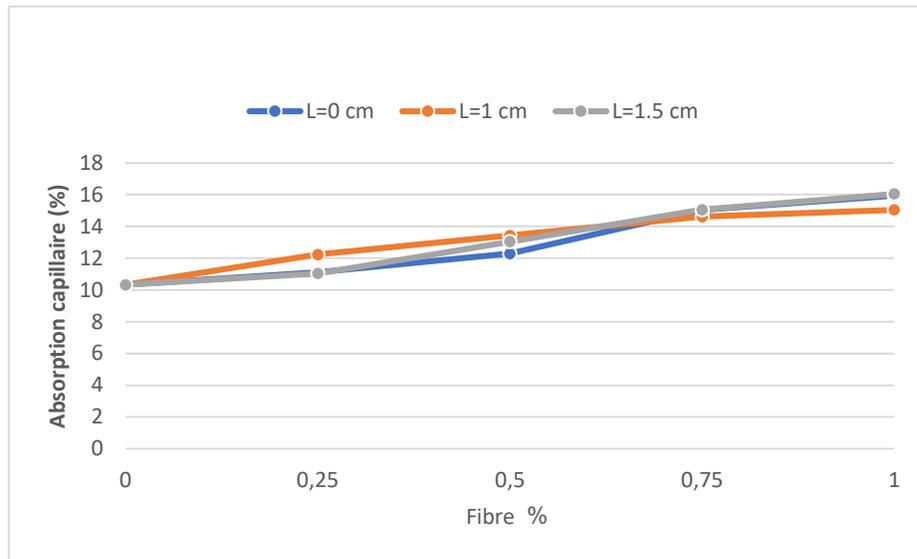


Figure 35 L'évolution de la valeur d'absorption capillaire en fonction de l'incorporation et

3.6 Gonflement

Les courbes représentées sur la figure 3.7 illustrent la variation du gonflement par immersion des éprouvettes de mortier de terre en fonction de la teneur et la longueur des fibres de sisal.

A travers cette figure, on voit que le gonflement des éprouvettes de mortier de terre augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres et augmente aussi avec l'augmentation de la longueur. Toutes les valeurs du gonflement sont variées entre 3.2mm/m et 4.4mm/m, représentant la plus faible et la plus grande valeur de gonflement respectivement. Alors que les valeurs les plus élevées correspondent aux mélanges à base de fibres de 1.5 cm. Les valeurs du gonflement du mortier en terre sont de 12.5%, 18.75 %, 18.75 % 28.12 % et 50% pour une teneur en fibre respectivement de : 0.25%, 0,5 %, 0,75 % et 1% respectivement.

Pour le cas des mélanges à base de fibres de 1 cm, les valeurs du gonflement sont de 3.125%, 12.5 %, 25 % et 25.125% pour une teneur en fibre respectivement de : 0.25%, 0,5 %, 0,75 % et 1%, Pour les éprouvettes à base de fibres de 0.5 cm les valeurs du

gonflement du mortier en terre sont de 3.125%, 12.5 % , 25 % et 31.25% pour une teneur en fibre respectivement de : 0.25%, 0,5 % , 0,75 % et 1% . Pour les éprouvettes à base de fibres de 1 cm les valeurs du gonflement de l'adobe sont de 1.56%, 3.125 % ,18.75 % et 28.125% pour une teneur en fibre respectivement de : 0.25%, 0,5 % , 0,75 % et 1%.

Ces résultats sont en concordance avec ceux de (Ferhat, 2020) dans son étude sur l'effet du type de fibres sur les propriétés de l'adobe .L'auteur a conclu que le gonflement des briques augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre.

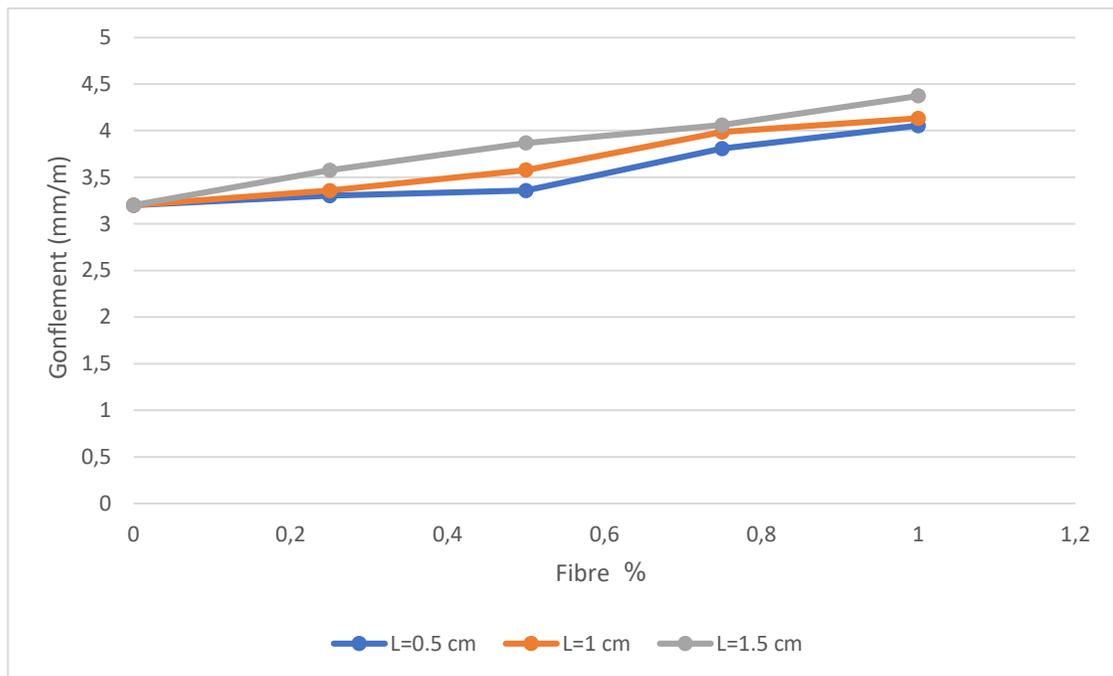


Figure 3-7 l'évolution de gonflement en fonction de l'incorporation et longueur des fibres de sisal.

4 Conclusion

Cette partie de recherche a été consacrée en premier lieu à étudier expérimentalement un matériau biosourcé à base de terre crue stabilisée à la chaux et aux fibres de sisal. Les principales

Propriétés physiques, mécaniques ont été mesurées en faisant varier la longueur et la teneur en fibres. L'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux nous a permis de conclure principalement à ce qui suit :

- pour obtenir les meilleures caractéristiques mécaniques, il a été constaté que la terre

Utilisée dans cette étude nécessite une teneur optimale en chaux de 12% en poids ;

- la plus grande valeur de la résistance à la compression peut être obtenue en ajoutant 0,5% des fibres d'une longueur de 1cm, tandis que la valeur la plus basse de la résistance est en ajoutant 0,25% des fibres d'une longueur de 1,5 cm ;

- le taux d'ajout de 0,5% pour chaque longueur donne les plus grandes valeurs de résistance à la traction, contrairement à l'ajout de 1% des fibres d'une longueur de 1 cm, qui donne la valeur la plus faible ;

- Dans le cas 0,75%, on constate une augmentation de la masse volumique apparent d'environ 1,89% et 2,21% pour les fibres de longueur 0,5 cm et 1,5 cm respectivement, alors qu'il y a une nette diminution pour les fibres de longueur 1 cm d'environ 3,16% par rapport à la valeur de témoin ;

- la masse volumique augmente avec l'incorporation des fibres et la valeur optimal obtenue est de 0.5% de pourcentage et 1cm de longueur.

- L'ajout de 0.5% de fibres est le dosage optimal qui donne la vitesse maximale des propagation des sons pour des éprouvettes du mortier de terre à base des différentes teneurs en fibres de sisal ;

- l'ajout de fibres dans les mélanges augmente légèrement l'absorption totale d'eau et l'absorption capillaire.

Conclusion générale

Depuis que l'homme bâtit, la terre crue a été et demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés de par le monde. La terre est le matériau le plus simple que nous ayons à notre disposition, pour des raisons de proximité et d'abondance.

Il existe de nombreuses techniques d'utilisation du sol en construction : l'adobe, le pisé, le torchis, la terre paille, la bauge, la terre façonnée, la terre extrudée, la terre comprimée...etc.

Pour construire des murs en adobes ou en briques de terre comprimée on utilise du mortier en terre stabilisée dans les joints pour assurer la liaison des briques, il est utilisé aussi dans le revêtement des murs en adobes pour assurer leur durabilité.

Nous nous sommes intéressés dans cette étude à l'amélioration des propriétés mécaniques et hygroscopiques du mortier en terre stabilisée avec des fibres de sisal, de manière à posséder une bonne maniabilité, une bonne résistance mécanique et une meilleure insensibilité à l'eau. Dans cette étude, le sol étudié est stabilisé avec une teneur optimale de 12% de chaux vive. Trois longueurs et cinq teneurs de fibres de sisal ont été utilisées dans cette étude à savoir 0,5cm, 1cm et 1,5cm, et 0%, 0,25%, 0,5%, 0,75% 1% respectivement.

Pour atteindre notre but, l'étude est divisée en deux parties structurée en trois chapitres.

Le premier chapitre est réservé à une synthèse bibliographique, alors que les deux autres sont dédiés à l'étude expérimentale.

L'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux nous a permis de conclure que la plus grande valeur de la résistance mécanique est obtenue avec l'ajout de 0,5% de fibres d'une longueur de 1cm. On a constaté aussi que la masse volumique augmente avec l'incorporation des fibres et la valeur optimale obtenue est de 0.5% de pourcentage et 1cm de longueur. L'ajout de 0.5% de fibres a conduit à la vitesse maximale de la propagation des sons pour les éprouvettes du mortier de terre à base des différentes teneurs en fibres de

Conclusion générale

sisal. Pour l'insensibilité vis-à-vis de l'eau, l'ajout de fibres dans les mélanges a augmenté légèrement l'absorption totale d'eau et l'absorption capillaire

Références bibliographiques

Anger, R., & Fontaine, L. (2009). Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture. Paris, Belin/Cité des sciences et de l'industrie. '(La technique de construction) p 26-42.

Armel Babatoundé LAIBI "comportement hygro-thermo-mecanique de matériaux structuraux pour 'a construction associant des fibres de kénaf à des terres argileuses" thèse de doctorat de l'université de Caen Normandie En partenariat international avec l'Université d'Abomey-Calavi BENIN ,2017.

ATTIMA, Z., DEKAYIR, A., BENNANI, M. A. D., & ELHAMMOUTI, K., (2014). Stabilisation des sols argielux par la chaux. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014, 10.

Collection Mémento Technique, Tuiles et Briques de Terre Cuite, Edition Moniteur paris 1998

CRAterre (Centre international de la construction en terre), l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble, 1979. P43

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

Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). Construire en terre, par le CRAterre, Collection And Architecture. 272p. Novembre. ISBN 2-862227-009-1, France. P09

Ferhat I.E, , mémoire master, université Mouhamed Khider, Biskra, 2020.

Ghavami, K., R. D.Toledo Filho, et N. P. Barbosa.(1999). Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers.

Houben H, et al, (1979). Construction en terre. Équipements de production. Le CRAterre, France, N°; 183, 265 p.

Références bibliographiques

Houben H, Guillaud H. Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, , 355 p, 2006.

Houben, H., & Guillaud, H. (1989). Traité de construction en terre. Marseille: Parenthèses. (2^{ème} éd. 1995 ; 3^{ème} éd. 2006).

Houben, Hugo, H. Guillaud, M. Dayre, et I. Centre de recherche et d'application pour la construction en terre (Grenoble : Villefontaine). (2006). Traité de construction en terre. Marseille: Éd. Parenthèses.p39

https://fr.wikipedia.org/wiki/Mortier_de_terre?fbclid=IwAR1bKCcekb_8v6Bem_d5LMFBoFPIq7ErPZjv0bchl0Q7yiWPXcEX1p-h8w

IZEMMOUREN, O. (2016). Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra). P 20-21

KAZI-TANI WASSILA, comportement thermique et mécanique des adobes traités aux fibres végétales, Mémoire master, Université Ahmed Draia, Adrar, 2016.

Little, D. N. (1987). Fundamentals of the stabilization of soil with lime. Bulletin of National Lime Association, 1987, 322, 17. 20p

Mango-Itulamya, L. A. (2019). La construction en terre crue.p42

Markley, S. (2018). The “Unseen Seen”–Earth Mortared Stone Construction, A Reilluminated Historic Construction Technique in Britain. Construction History, 33(2), 23-42.

Marrot, L. (2010). Contribution à l'étude de la résistance des sols traités à la chaux face au gel pour une application en couche de forme. Nivelles: Lhoist RetD, Nivelles, Belgique.

Mukerji, K. (1994). Stabilizers and Mortars (for compressed earth blocks). GATE German Appropriate Technology Exchange.

MVENUAT ,Produits Silico –calcaire "Techniques de l'Ingénieur"1994.

NF P 18-418, Mesure du temps de propagation d'ondes soniques dans le béton. AFNOR, 12p. December 1989.

Références bibliographiques

NF P 94-054 Sols reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau. Octobre 1991NF P 94 -056. Analysegranulométrique des sols tamisage àsec après lavage. AFNOR; p 15, 1996.

NF P 94-054 Sols reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau. Octobre 1991NF P 94 -056. Analysegranulométrique des sols tamisage àsec après lavage. AFNOR; p 15, 1996.

NF P 94-077 Sols:reconnaissance et essais - Essais de compression uniaxiale. Décembre 1997

NF P18-592. Essai au bleu de méthylène. AFNOR ; p 5. 1996. NF P 94-077 Sols:reconnaissance et essais - Essais de compression uniaxiale. Décembre 1997

NF P94-051. Détermination des limites d'Atterberg –Limite de liquidité à la coupelle Limite de plasticitéau rouleau. AFNOR ; 15 pages, 1993.

NF XP P13-901.Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications -Méthodes d'essais - Conditions de réception. AFNOR ; p. 35. 2001.

Paulus, J. (2015). Construction en terre crue: dispositions qualitatives, constructives et architecturales–Application à un cas pratique: Ouagadougou, p 31

R. Delebecque, Éléments de Construction "Bâtiment", Edition Delagrave 1990.

RIGASSI, V. (1985). Compressed Earth Blocks: Manual of Production, Volume I. Manual of production. CRATerre-EAG. p26

Röhlen, U., C. Ziegert, et A. Mochel. (2013). Construire en terre crue: construction, rénovation, finitions. Paris: Éd. "Le Moniteur (Röhlen, U., & Ziegert, C. (2013). Construire en terre crue. Groupe Moniteur, Éditions du moniteur, Paris, France. p19

Taallah. (2014). Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. Thèse de doctorat, Université de Biskra.

Tessier, D. (1984) . Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Diss. Université, 1984.

Références bibliographiques

Weng CH, Lin DF, Chiang PC. Utilization of sludge as brick materials. *Adv Environ Res*;7(3):679–85, 2003.

William Garat, Nicolas Le Moigne, Stéphane Corn, Johnny J. Beaugrand, Anne Bergeret. Processus de Gonflement des Fibres Végétales en Conditions Hygro/Hydrothermiques : Détermination des Coefficients d'Hygro/Hydroexpansion. *Revue des composites et des matériaux avancés*, Lavoisier, 2019, 29 (4), pp.225-232. ff10.18280/rcma.290406ff.

Winterkorn HF. (1975). Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook", Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y., Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp.