

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث 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 :/2020



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المدنية والري
المرجع/2020

Mémoire de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : matériaux en génie civil

Thème

Effet du type de fibres sur les propriétés de l'adobe

Nom et Prénom de l'étudiant :

FERHAT IMED EDDINE

Encadreur :

Dr. TAALLAH Bachir

Année universitaire : 2019 - 2020

REMERCIEMENTS

Louange à Dieu, par lequel les bonnes actions sont accomplies, nous remercions Dieu de nous avoir accordé la santé et le bien-être pour terminer cette étude.

Tout d'abord, je remercie mon professeur, TAALLAH Bachir, qui a supervisé mon l'encadrement du début à la fin, et pour sa grande patience, et je prie Dieu qu'il soit couvert par la santé et le bien-être.

Mes vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté en acceptant d'examiner mon travail et de l'enrichir par leurs propositions.

J'adresse également mes sincères remerciements à ma famille et à tous mes collègues et amis.

Enfin, Je tiens également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

الملخص

من أجل تـثمين المواد المحلية والمساهمة في تقليل تكاليف البناء، يتم استخدام ألياف مختلفة لتثبيت اللبـنات الطينية.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير نوع الألياف (النباتية (ألياف النخيل) والألياف الصناعية (ألياف البوليبروبيلين)) على خواص اللبـنات الطينية. كما ركزت الدراسة على حساسيتها للماء من خلال درجة امتصاصها للماء وانتفاخها. وقد تم استخدام ثلاث نسب من الألياف (0.2% و 0.4% و 0.6%). تشير النتائج إلى وجود انخفاض طفيف في مقاومة الضغط في الحالة الجافة مع زيادة في نسبة الألياف، في حين هناك زيادة طفيفة في مقاومة الانحناء. كما أظهرت النتائج أيضاً زيادة عامة في درجة امتصاص الماء الكلي وكذلك الشأن بالنسبة للانتفاخ مع زيادة نسبة الألياف من نخيل التمر. تزداد مقاومة الانضغاط الجاف للبنات الطينية المثبتة بالجير مع زيادة زمن المعالجة في الفرن.

RESUME

Afin de valoriser les matériaux locaux et de contribuer à réduire les coûts de construction, différentes fibres sont utilisées pour stabiliser les adobes.

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'effet du type de fibres (fibres végétales (les fibres de palmiers dattier), et fibres synthétiques (les fibres polypropylène)) sur les propriétés de l'adobe. L'étude s'est focalisée aussi sur sa sensibilité à l'eau, à travers son absorption totale et son gonflement. Trois teneurs en fibres sont utilisés (0.2% ,0.4% et 0.6%) du poids du mélange sec. Les résultats indiquent, qu'il y a une légère diminution de la résistance à la compression sèche avec l'augmentation des teneurs en fibres, tan disque il y a une légère augmentation de la résistance à la flexion. Les résultats montrent aussi une augmentation générale de l'absorption totale d'eau et du gonflement des blocs avec l'augmentation la teneur en fibres de palmier dattier. La résistance à la compression sèche de l'adobe à base de chaux augmente avec le temps de cure à l'étuve.

Mots Clés : l'adobe ; fibres de palmier dattier ; fibres polypropylène ; résistance ; absorption totale d'eau ; gonflement.

Table des matières

Remerciements	I
المخلص	II
Résumé	III
Table des matières	IV
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIV
Liste des abréviations	XV
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PREMIÈRE PARTIE :	
CHAPITRE 1 : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE.....	4
1.1 Introduction.....	5
1.2. Histoire de la construction en terre crue	5
1.3 Techniques de construction en terre	6
1.4. Avantages du matériau terre	8
1.4.1 Avantage économique dans les régions pauvres	8
1.4.2 Avantage environnemental dans les pays industrialisés	9
1.4.3 Avantage socio-économique	10
1.5 Brique terre crue (l'adobe).....	10
1.5.1 Définition	10
1.5.2 La composition des briques de terre crue.....	11
1.5.3. La production :	12
1.5.4 Modes de production de l'adobe.....	12
1.5.4.1 Le mode de production manuel.....	12
1.5.4.2 Le mode de production mécanisé.....	13

1.6 La terre	14
1.6.1 Définition	14
1.6.2 Identification du matériau terre	14
1.6.3 Composition	15
1.7. L'argile.....	15
1.7.1 Définition	15
1.7.2 Formation des argiles	15
1.7.3 Classification des argiles	16
1.7.4 Structure élémentaire des minéraux argileux	18
1.7.5 Principaux types d'argiles	19
A.Kaolinites.....	19
B. Montmorillonite :.....	21
C.L'illite	22
1.8 Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre	23
1.9 Stabilisation de la terre crue pour la construction.....	24
1.9.1 Objectifs	24
1.9.2 Stabilisation mécanique :	25
1.9.3 Stabilisation physique :	25
1.9.4 Stabilisation chimique :	26
A. Les effets à court terme	26
B. Modification de l'état hydrique du sol	26
C. Flocculation – agglomération des particules du sol	27
D. La liaison des particules argileuses.	27
1.9.5 Modifier la texture et la structure	27
1.9.6 Les moyens de stabilisation.....	28

A.	Densification	28
B.	Armature.....	28
C.	Liaison	29
D.	Imperméabilisation.....	29
E.	Hydrofugation	29
1.10	Les fibres.....	29
1.10.1	Classification des fibres	30
1.10.2	Les fibres naturelles	30
1.10.3	Fibres synthétiques.....	31
1.10.4	Fibres artificielles.....	32
1.11	Fibres végétales.....	32
1.11.1	Définition de la fibre végétale.....	32
1.11.2	Classification des fibres végétales.....	33
1.11.3	Composition chimique des fibres végétales	33
1.12	Le palmier dattier	35
1.13	Les fibres de polypropylène.....	38
1.14	MATÉRIAUX COMPOSITES.....	43
1.14.1	LE QUOI-QU'EST-CE QU'UN MATÉRIAU COMPOSITE ?.....	43
1.14.2	L'effet de la stabilisation sur les propriétés de composite fibre et sol	44
1.15	L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des adobes	45
1.15.1	Effet des fibres sur les propriétés physiques :	45
1.15.2	Effet des fibres sur les propriétés mécaniques :	46
1.15.3	Effet des fibres sur l'absorption d'eau	49
1.16	Conclusion	49

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE.....	51
CHAPITRE 2 : MATERIAUX DE L'ETUDE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	52
2.1 Introduction.....	53
2.2 Matériaux utilisés.....	53
2.2.1 Sol.....	53
2.2.2.1 Origine du sol.....	53
2.2.2.2 Caractéristiques physiques du sol.....	53
A-Analyse granulométrique par sédimentation.....	53
B-Les masses volumiques.....	56
C-Limites d'Atterberg.....	56
2.2.2.3 Analyse physico-chimique (Essai au bleu de méthylène dit essai à la tache (ANFP18592)).....	58
2.2.2 Sable concassé.....	58
2.2.3 La chaux.....	59
2.2.4 L'eau.....	60
2.2.5 Fibres.....	60
2.2.2.4 Fibres de palmier dattier.....	60
2.2.2.5 Caractéristiques des Fibres de Palmier Dattier.....	62
2.2.2.6 Compositions minéralogique des Fibres de Palmier Dattier.....	63
2.2.6 Les fibres de polypropylène.....	63
2.3 Formulation des blocs.....	64
2.3.1 Matériels spécifiques.....	64
2.3.2 Mélanges.....	65
2.3.3 Optimisation à la tenue en chaux.....	68
2.3.4 Optimisation à la tenue en eau des mélanges.....	69

2.3.5	Codification des mélanges.....	70
2.3.6	La cure des blocs	70
2.4	Propriétés mécaniques	71
2.4.1	Essai de compression simple.....	71
2.4.1.1	Résistance à la compression sèche.....	71
2.4.1.2	Résistance en compression à l'état humide.....	72
2.4.2	Essai de traction.....	73
2.5	Propriétés physique	74
2.5.1	Gonflement.....	74
2.5.2	Absorption totale.....	75
2.6	Conclusion	76

CHAPITRE 3 : PRÉSENTATION ET DISCUSSION DES RÉSULTATS77

3.1.	Introduction.....	78
3.2.	Effet de la teneur en chaux sur la résistance à la compression sèche	79
3.3.	Influence du temps de cure sur la résistance mécanique du l'adobe :	80
3.4.	Effet de la teneur en fibres sur la masse volumique du l'adobe :	81
3.5.	Effet de la teneur en fibres de palmier dattier sur les propriétés mécaniques du l'adobe :	82
3.5.1	La résistance à la compression sèche :	82
3.5.2	La résistance à la compression humide à base de chaux.....	83
3.5.3	La résistance à la flexion sèche.....	85

3.6 L'absorption totale de l'eau du l'adobe à base de chaux et de fibres de palmiers dattiers.....	86
3.7 Le gonflement du l'adobe à base de chaux.....	87
3.8 Effet des fibres de palmiers dattiers sur les propriétés rhéologiques.....	87
3.8.1 La maniabilité à la table à secousse.....	87
3.9 Conclusion	89
Conclusion générale.....	91
Perspectives.....	94
Références bibliographiques.....	96

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Mauvaises conditions d’habitation en Amérique latine, d’après(Barbosa, 2007)	8
Figure I.2: Emission du gaz de CO ₂ (à gauche) et des déchets des usines fabriquant des briques en terre cuite (à droite) en Amérique latine (Quoc-Bao, 2008).	9
Figure I.3: Composition des briques de terre crue (Pierre Delot, 2015).	11
FigureI.4: moule de l’adobe (https://www.permaculturedesign.fr/permaculture-construction-naturelle-la-terre-crue).....	13
Figure I.5: Structure Élémentaire Tétraédrique (Freeah 2006).	18
Figure I.6: Structure cristalline de la kaolinite. Bish and Von Dreele (1989) cité par (El Ouahebi, 2013).....	19
Figure I.7: Photographie au MEB d’une Kaolinite. (Mitchel, 1993)	20
Figure I.8: Structure Particulaire de L’Illite , (Mouroux et al., 1987) (Freeah 2006).....	21
Figure I.9: Photographie au microscope à balayage électronique d’une illite.....	22
Figure I.10: Représentation schématique de la structure (a) d’une argile TO de type kaolinite et (b) d’une argile T-O-T de type montmorillonite (Drouin, 2007).....	23
Figure I.11: Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)	30
FigurI.12: Structure d’une fibre végétale http://mpronovost.ep.profweb.qc.ca/BIONP1/tech_stof_cellulose_01.gif	34
Figure I.13: Photo des palmiers dattiers	35
Figure I.14: les constituant principales du palmiers dattiers	36
Figure I.15: Proportion de variétés des palmiers dattiers à Biskra. (Caractérisation Physico-mécanique des Matériaux Bio-Composites Epoxy/Fibres de Palmier Dattier (Material & Processes))	38
Figure I.16: Effet de la teneur en fibres sur le coefficient de retrait des échantillons de sol traités fibre – chaux après 7 jours de cure (Cai, 2006)	39
Figure I.17: Courbes contrainte -déformation d’un chargement axial de six échantillons après 7 jours de cure (Cai, 2006)	39

Figure I.18: Résistance à la compression sèche du BCPP à base de 8 % en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) (Taallah, 2014)	41
Figure I.19: Résistance à la traction sèche du BCPP à base de 8 % en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) (Taallah, 2014)	41
Figure I.20: Résistance à la compression moyenne des CEB par rapport à la teneur en fibres des blocs (Donkor, 2015).....	42
Figure I.21: les fibres de polypropylène formant des ponts sur une fissure apparue pendant l'essai de flexion à trois points (Donkor, 2015)	43
Figure I.22: Interaction de la fibre de renfort naturelle et du sol en train de sécher.	45
Figure I.23: Les courbes de la résistance à la compression en	46
Figure I.24: Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo,2014).....	47
Figure I.25: Courbe contrainte-déformation du mélange A sans et avec 1 % de fibre à la WOPN.....	49
Figure II. 1: Nomogrammes de granularité indiquant les zones recommandées pour la distribution granulométrique des sols pour les blocs d'adobe, de pisé et de terre comprimée suivante	55
Figure II. 2: Courbe granulométrique d'argile.....	55
Figure II. 3: Nomogrammes de compactibilité montrant les zones recommandées de densité sèche /teneur en eau des sols pour l'adobe, la terre battue et les blocs terre comprimée selon Houben et Gullaud.....	56
Figure II. 4: Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901)	57
Figure II. 5: La courbe granulométrique du sable concassé.....	59
Figure II. 6: Le life après son arrachement du palmier dattier	61
Figure II. 7: Les fibres résultant de la décomposition du life.....	61
Figure II. 8: Les fibres découpées en morceaux.....	62
Figure II. 9: Les fibres de polypropylène	64

Figure II. 10: Moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes prismatiques (10x10x10) cm ³	64
Figure II. 11: Moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes prismatiques (5x10x20) cm ³	65
Figure II. 12: mélangés à sec.....	65
Figure II. 13: un malaxeur.....	66
Figure II. 14: Combinaison des mélanges des blocs.....	66
Figure II. 15: Optimisation à la tenue en chaux des mélanges.....	68
Figure II. 16: Présentation des limites d'Atterberg.....	69
Figure II. 17: Le bloc après écrasement.....	72
Figure II. 18: Immersion du l'adobe dans l'eau.....	73
Figure II. 19: La position de l'éprouvette selon la norme NF EN 12390-5.....	73
Figure II. 20: Blocs pour mesure du gonflement (norme XP 13-901).....	75
Figure II. 21: L'immersion des blocs pour mesurer le gonflement.....	75
Figure II. 22: l'immersion de l'éprouvette.....	76

Figure III.1: la variation de la résistance à la compression sèche en fonction de la teneur en chaux.....	79
Figure III.2: La résistance à la compression sèche du BXSF à base de.....	80
Figure III.3: La masse volumique du l'adobe à base de 13% de chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres BXPD.....	81
Figure III.4: La masse volumique du l'adobe à base de 13% de chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres BXPP.....	82
Figure III.5: la variation de la teneur en fibres sur la résistance à la compression sèche du BXPD et BXPP.....	83
Figure III.6: la variation de la teneur en fibres sur la résistance à la compression humide du BXPD et BXPP.....	84
Figure III.7: Rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance humide (RCS/RCH) du BXPD et BXPP en fonction de la teneur en fibres.....	84

Figure III.8: Résistance à la flexion sèche du BXPB et BXPL curé 07 jours au l'étuve en fonction de la teneur en fibres.....	85
Figure III.9: La variation de l'absorption totale du BXPB en fonction de la teneur de fibres après un jour d'immersion dans l'eau	86
Figure III.10: Le gonflement par immersion à l'eau du BXPB en fonction de la teneur en fibres	87
FigureIII.11: La variation de la maniabilité en fonction la variation des fibres dans BXPB	88
Figure III.12: Table à secousses et la mesure d'étalement.....	88

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1: Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé et BTC) (lptr l'ESTAQUE Marseille. 2010)	7
Tableau I. 2: Classification des phyllosilicates , d'après (Caillère, 1959), complété par (Mitchell, 1993)	17
Tableau I. 3: Propriétés cristallines et variétés cristallographiques des kaolins	20
Tableau I. 4: Composition chimique de kaolinite.(Chichouche , 2006).....	21
Tableau I.5: Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales. (Negoudi ,A .Khinech ,S .2015)	33
Tableau I.6: Composition chimique de quelques fibres végétales [36-38] (V. K. Thakur,2014).....	34
Tableau II. 1: Analyse granulométrique.....	54
Tableau II. 2: Les masses volumiques du sol.....	56
Tableau II. 3: Les limites d'Atterberg du sol	57
Tableau II. 4: Valeur du bleu de méthylène.....	58
Tableau II. 5: caractéristiques physiques du sable déterminées selon les normes AFNOR.....	59
Tableau II. 6: La composition chimique de la chaux vive (Selon la fiche technique élaborée par l'unité de production de chaux de Saida, Algérie).....	60
Tableau II. 7: Les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées.....	62
Tableau II. 8: Analyse minéralogique de la poudre des fibres de dokar calcinées à 400 °C	63
Tableau II. 9: Les caractéristiques générales des fibres de polypropylène (d'après la fiche technique de GANITEX).....	63
Tableau II. 10: Composition des différents mélanges employés dans cette étude.....	67
Tableau II. 11: Codification des mélanges.....	70

LISTE DES ABRÉVIATIONS

A.S.T.M : American Society for Testing and Materials

AFNOR : Association française de normalisation

ATE : Absorption totale à l'eau

BXPD : Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de palmier dattier

BXPP : Bloc de terre comprimée à base de chaux avec fibres de polypropylène

BXSF : Bloc de terre comprimée à base de chaux sans fibres

CRATERRE : Centre international de la construction en terre

FSPDM : Fibres de surface de palmier dattier mâle

MVS : Masse volumique sèche

RCH : Résistance à la compression humide

RCS : Résistance à la compression sèche

RTS : Résistance à la flexion sèche

TEO : Teneur en eau optimale

USACE : US Army Corps of Engineers

Introduction générale

Introduction générale

L'extraction des matériaux de construction et ces conséquences sur le coût élevé de la forte augmentation de la facture énergétique, a poussé les responsables et les chercheurs de tous les pays à chercher, à travers les ressources locales, des matériaux plus économiques, durables et respectueux de l'environnement.

Le développement technologique des derniers siècles a fourni plusieurs matériaux modernes, mais nous marquons un retour dans l'utilisation des briques de terre dans les pays développés. Une des raisons les plus importantes qui nous font utiliser la terre est sa disponibilité sur le chantier, sa capacité d'isolation thermique, son faible coût de point de vue de consommation énergétique et son avantage sur le plan environnemental. Mais malgré ses avantages, les constructions en terre souffrent de certaines insuffisances comparativement aux structures en béton armé, à savoir : les performances mécaniques et leur durabilité vis-à-vis de l'effet de.

La stabilisation de la terre est utilisée pour pallier à ces problèmes, à travers différentes méthodes : physique, chimique et mécanique, ce qui a donné naissance à plusieurs produits en terre à savoir : l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimé, etc.

L'adobe ou brique de terre crue est une des techniques de construction en terres les plus anciennes, souvent mélangé avec de la paille. Pour faciliter la mise du mélange de terre dans des moules, on a recouru à l'emploi d'une grande quantité d'eau, ce qui engendre un retrait de séchage important favorisant l'apparition des fissures, et ainsi qu'une faible résistance aux efforts de traction. Ceci se traduit par une grande porosité et par l'apparition de fissures. En plus l'adobe est très vulnérable à l'action de l'eau, ce qui influe défavorablement sur sa durabilité. Pour contourner ces problèmes, on fait introduire des fibres dans le mélange de terre comme renfort pour équilibrer les efforts de traction qui dépasse les capacités du matériau terre, comme on fait appel à l'utilisation des stabilisants chimiques, comme le cas du ciment ou de chaux. Le renfort peut être formé de fibres naturelles (pailles, noix de coco, sisal, fibres de palmiers dattiers) ou de fibres synthétique (fibres polypropylène, fibres de verre).

L'Algérie est un pays important en termes de culture des dattes, car il y a plus de 17 millions de palmiers et 800 variétés (Benzouche, 2012). La grande quantité de cette culture produit annuellement une grande quantité de résidus résultant de l'entretien des palmiers, qui sont principalement composés de fibres de palme et de surface.

L'objectif principal de ce travail est l'étude de l'effet de deux types de fibres, à savoir : des fibres végétales, représentées par les fibres de palmiers dattiers et des fibres synthétiques représentées par les fibres polypropylène, sur les propriétés rhéologiques et mécaniques des briques de terre crue (adobes).

Outre l'introduction générale, ce mémoire comporte deux parties :

- La première partie est consacrée à la recherche bibliographique, composée d'un seul chapitre, il s'agit du chapitre 1.

Le chapitre 1 est consacré à un aperçu général sur L'adobe, les critères de choix des sols à stabiliser et les différents modes de stabilisation, ainsi que l'effet des fibres sur les propriétés rhéologiques et mécaniques de l'adobe.

- La deuxième partie est consacrée à l'étude expérimentale, composée de deux chapitres, à savoir les chapitres 2 et 3.

Le chapitre 2 fait le point sur les caractéristiques physiques, chimiques, mécaniques, physico-chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés (le sol, le sable concassé, la chaux et les fibres). Ce chapitre présente aussi les mélanges, les procédures de confection des blocs, et finalement les essais effectués le long de l'étude expérimentale.

Le chapitre 3 présente les résultats et les discussions de l'étude expérimentale.

Enfin, une conclusion générale propose une synthèse des principaux résultats obtenus aux chapitres précédents.

PREMIÈRE PARTIE :

CHAPITRE 1 :

Synthèse bibliographique

CHAPITRE 1

Synthèse bibliographique

1.1 Introduction

La terre, matière première naturelle, est utilisée par l'homme dans la construction depuis des milliers d'années. Souvenez-vous de la grande muraille de Chine, des pyramides aztèques ou encore des ksoures Algériennes. Sa transformation en matériau pour l'habitat ne nécessite que peu d'énergie et sa disponibilité quasi immédiate, lui confèrent encore aujourd'hui un succès incontestable. La terre a toujours été utilisée pour bâtir sur notre planète, car elle est présente partout et directement sur le lieu de construction. On estime que 30% des habitations du monde sont construites à base de terre. (Meukam P. 2004)

1.2. Histoire de la construction en terre crue

L'histoire de la construction en terre est mal connue. L'intérêt pour ce matériau jugé antique et médiocre était éclipsé par celui accordé à la pierre ou au bois, matériaux plus "nobles".

C'est pourtant bien la terre qui fut associée aux époques décisives de la révolution urbaine et qui servait la quotidienneté autant que le prestige des civilisations les plus glorieuses de l'Antiquité.

Les trouvailles archéologiques de maintes contrées en témoignent. Les strates du temps n'ont pas pu effacer les preuves accumulées, tout juste dissimulées. L'époque actuelle soigne ses vestiges : les ruines sont révélées et relevées, classées, protégées et restaurées. Plus l'on remonte le cours de l'histoire et plus la terre semble être le matériau privilégié de l'homme bâtisseur, des âges les plus lointains jusqu'à nos jours.

La construction en terre fut indépendamment développée dans les principaux foyers connus de la civilisation dans les vallées inférieures du Tigre et de l'Euphrate, le long du Nil, sur les rives de l'Indus et du Huanghe. Ces régions fertiles furent propices à l'installation des communautés de chasseurs-collecteurs puis au développement de la révolution agricole (Nguyen, 2009 ; Coopérative des Ouvriers du Bâtiment, 2010).

1.3 Techniques de construction en terre

A travers le patrimoine mondial des traditions de la construction en terre crue, on dénombre de très nombreuses techniques de construction avec une infinité de variantes adaptées à la qualité de la terre et au degré d'élaboration du savoir-faire, traduisant l'identité des lieux et des cultures. Il existe douze techniques d'utilisation de terre pour la construction, parmi celle-ci huit sont d'un usage courant et constituent les techniques principales (CRATerre, 1991) :

- **Adobe** : la terre a l'état de pâte plastique souvent amendée de paille ou autres fibres, moulée sous forme de briques séchées au soleil.
- **Pisé** : la terre est compactée en masse dans des coffrages, couche par couche et banchée par banchée, avec une dame.
- **Terre-paille** : la terre est dispersée dans de l'eau jusqu'à l'obtention d'un liquide épais homogène que l'on mélange à la paille afin de former un film sur chaque brin. Le matériau ainsi obtenu conserve l'aspect de la paille et est banché pour ériger un mur monolithique qui nécessite une structure porteuse.
- **Torchis** : la terre argileuse, amendée de paille ou autres fibres, recouvre en une ou plusieurs couches des claies qui hourdent une structure en colombages.
- **Terre façonnée** : la terre, souvent amendée de paille ou autres fibres, est façonnée sous forme de murs de la même façon que pour la technique de poterie, sans outil.
- **Terre extrudée** : la terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à être cuits.
- **Bauge** : la terre, généralement amendée de paille ou autres fibres, est mise sous forme de boules grossières, qui sont empilées les unes sur les autres et entassées légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à ériger des murs monolithiques façonnés. Dans d'autres cas, la bauge est incorporée dans une structure en bois.
- **Terre comprimée** : la terre est comprimée sous forme de bloc dans un moule. Auparavant, on compactait la terre dans un moule à l'aide d'un petit pilon, ou en rabattant avec force un couvercle très lourd dans le moule. Aujourd'hui, on utilise des presses dont il existe une grande variété.

On présente dans le tableau I.1 quelques caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé et briques de terre comprimée BTC) (lptr l'ESTAQUE Marseille, 2010).

Tableau I. 1 Les caractéristiques des briques de terre crue (adobe, pisé et BTC) (Iptr l'ESTAQUE Marseille. 2010)

Caractéristiques	Types de briques de terre crue		
	Adobe	Pisé	BTC
Massse volumique (kg/m ³)	1200 – 1700	1700 – 2200	1700 – 2200
Résistance à la compression (MPa)	2 -5	< 2,4	< 2,4
Résistance à la traction (MPa)	-	0.5-1	-
Conductivité thermique λ (W/m°C)	0,46 – 0,81	0,81 – 0,93	0,81 – 1,04
Chaleur spécifique (J/Kg°C)	900	850	-
Capacité thermique (KJ/m ³ °C)	1350	510	-
Absorption d'eau (%)	5	10-20	10-20
Isolation acoustique (dB)	-	50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm	50 dB pour 40cm 40 dB pour 20cm
Retrait au séchage (mm/m)	1	1 – 2	0,2 – 1

1.4. Avantages du matériau terre

1.4.1 Avantage économique dans les régions pauvres

Etant un matériau local et naturel, le matériau terre est moins cher que les matériaux conventionnels, notamment dans les pays en développement où l'emploi manuel n'est pas coûteux. La fiabilité de la construction en terre a été démontrée non seulement dans les pays pauvres où la plupart des peuples n'avaient pas assez de moyens pour construire des maisons modernes (MacLeod, D.2002), mais elle a aussi une énorme potentialité dans les régions pauvres des pays riches (Barbosa, 2007) où la situation de logements des pauvres est encore très mauvaise.



Figure I. 1 : Mauvaises conditions d'habitation en Amérique latine, d'après (Barbosa, 2007)

1.4.2 Avantage environnemental dans les pays industrialisés

Dans les pays industrialisés, bien que l'avantage économique du matériau terre soit aussi un point fort, il n'est pas un point favorable à rechercher. Pourtant, c'est l'avantage environnemental qui met le matériau terre dans la position d'un matériau "du futur" dans ces pays. Le premier avantage environnemental réside dans la très faible énergie grise consommée et la très faible pollution pendant la fabrication par rapport aux matériaux conventionnels. Pour un matériau conventionnel, avant d'être mis en œuvre sur chantier, il doit passer par les phases suivantes : l'extraction du matériau premier ; le transport à l'usine ; la transformation en usine ; le transport de l'usine au point de vente, du point de vente au chantier ; la mise en œuvre sur chantier. A l'inverse, avec un matériau local et fabriqué manuellement (essentiellement) comme la terre, premièrement, les transports du matériau premier du chantier d'extraction à l'usine et des produits fabriqués de l'usine au chantier sont supprimés ou bien limités. Deuxièmement, la fabrication principalement manuelle du matériau terre diminue la consommation d'énergie et la pollution par rapport aux matériaux conventionnels fabriqués en usine (Figure 1.2).

Le deuxième avantage environnemental réside dans la phase de démolition des bâtiments. Avec un recyclage aisé, le matériau terre traditionnel (non-stabilisé) ne pose pas de problème de déchets comme dans le cas des matériaux conventionnels (Figure 2.5 à droite comme exemple). (Quoc-Bao, B.2008)



Figure I. 2:Emission du gaz de CO₂ (à gauche) et des déchets des usines fabriquant des briques en terre cuite (à droite) en Amérique latine (Quoc-Bao, 2008).

1.4.3 Avantage socio-économique

En utilisant principalement le travail manuel, la construction en terre a aussi l'avantage socio-économique de créer des emplois localement (Quoc-Bao, 2008).

1.5 Brique terre crue (l'adobe)

1.5.1 Définition

L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sol, d'eau et de chaume. Le sol utilisé doit contenir une proportion déterminée d'argile et de sable. Chaque élément du mélange joue son rôle. Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et le chaume de blé, quant à lui, donne un certain grade de flexibilité à l'ensemble (Richard-Philippe, 2010).

L'adobe présente des désavantages certains lorsqu'on le compare aux matériaux industriels d'usage commun. Il ne peut être standardisé, puisque sa composition varie en fonction des minéraux présents dans le sol, et le mélange doit être ajusté pour équilibrer ses différents composants. L'adobe se contracte lorsqu'il sèche, en raison de l'évaporation de l'eau utilisée dans la préparation du mélange, et, de plus, il n'est pas résistant à l'eau. Il doit donc être protégé par des toits à longue portée et par un revêtement approprié (Minke, 2006).

Par contre, l'adobe possède plusieurs avantages par rapport aux matériaux industriels. Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air, d'emmagasinier la chaleur, de réduire la consommation d'énergie, de ne produire virtuellement aucune pollution, d'être réutilisable à 100 %, de préserver le bois et les autres matériaux organiques, en plus d'absorber les polluants atmosphériques présents à l'intérieur des maisons (Minke, 2006).

C'est un matériau de construction peu coûteux, toujours disponible, local et pouvant être utilisé directement par les petites communautés. Cette technologie n'entraîne pas la production de gaz à effet de serre et convient parfaitement pour diminuer les émissions à la fois du secteur des transports et de la construction. Les spécialistes hautement qualifiés, comme les architectes et les ingénieurs, ne participent

généralement pas à ce genre de constructions. Apparemment, la terre serait donc le matériau idéal. (Richard-Philippe , 2010).

1.5.2 La composition des briques de terre crue

La composition est de terre, de fibre (en général de la paille) et d'eau. La proportion d'argile et de sable dans la terre est à peu près identique. Si les briques sont trop argileuses, elles auront tendance à fissurer lors du séchage, trop sableuses, elles se décomposeront, trop riches en matières organiques, elles seront poreuses. (Pierre Delot, 2015). Avec un peu de pratique, vous trouverez vite le bon dosage



Figure I. 3:Composition des briques de terre crue (Pierre Delot, 2015).

1.5.3. La production :

La production des blocs d'adobe doit prendre en compte des étapes successives depuis l'extraction de la terre jusqu'au stockage final du matériau prêt à être utilisé en construction (Djoughri, 2007).

1.5.4 Modes de production de l'adobe

On distingue deux principaux modes de production des adobes, l'un manuel et l'autre mécanisé traduisant un mode de production traditionnel et un mode de production modernisé.

1.5.4.1 Le mode de production manuel**• Moules simples**

Il correspond à un moulage traditionnel soit par façonnage manuel ou à l'aide d'un moule Façonnée à la main, la terre est généralement utilisée à l'état de pâte plastique mi- ferme.

La terre peut être employée à deux états hydriques différents, soit sous forme de pâte mi- molle et selon une méthode dite du "coup d'eau" (moule préalablement nettoyé et mouillé pour faciliter le démoulage), soit sous forme de pâte mi- ferme et selon une méthode dite du "coup de sable" (le moule préalablement nettoyé et mouillé est sou- poudré de sable pour faciliter le démoulage). Dans ces deux techniques de moulage manuelles rendements moyens de production se situent de 400 à 600 blocs par jour pour deux ouvriers.

• Moules multiples

Il associe l'utilisation de grands moules à compartiments multiples, généralement en forme d'échelles ou de forme carrée subdivisée en petits compartiments et la livraison de la terre, à l'état assez liquide par brouettes, dumpers ou bulldozers à godet. Parfois la terre est directement déversée depuis le malaxeur qui est alors mobile et tracté par ou sur un camion. Les moules doivent être manipulés facilement par deux ouvriers (pas trop lourds) et doivent être propres et mouillés avant d'y déverser la terre. Compte tenu de l'état hydrique plus liquide de la terre, les adobes produits de cette façon présentent un risque de retrait et donc de fissuration plus importante.

Il convient donc de compenser ce risque en utilisant une terre dont la texture est riche en gros sables et petits graviers. L'organisation de la production mécanisée se fait autour de deux principaux postes qui sont le malaxage et le moulage et mobilise 5 à 6 ouvriers selon la taille des unités, La production moyenne pour ce type d'organisation est de l'ordre de 8000 à 10 000 blocs par jour (Hachem, 2017).



Figure I. 4: moule de l'adobe (<https://www.permaculturedesign.fr/permaculture-construction-naturelle-la-terre-crue>)

1.5.4.2 Le mode de production mécanisé

La production mécanisée de blocs d'adobe a été développée dès la fin du XIX siècle, aux Etats Unis d'Amérique, notamment par un fabricant californien, Hans Sumpf. Celui-ci mettait au point une machine tractée par un animal domestique dans un premier temps puis motorisée et munie de pneus, dotée d'un système de trémie mobile au-dessus d'un moule à compartiments multiples (25 moules) recevant directement la terre et déposant au sol les 25 blocs successivement moulés. Ce type de machine permet une production pouvant aller de 20 à 30 000 blocs par jour (**Attia, 2019**).

1.6 La terre

1.6.1 Définition

Le matériau terre, que l'on trouve selon des épaisseurs variables, résulte d'un processus de transformation complexe : la pédogenèse. Sa nature est conditionnée par de nombreux facteurs de nature physique, chimique et biologique, par des conditions climatiques et la vie végétale et animale. La nature d'une terre repose sur la structure de la roche mère (calcaire, granite), hydrologie, le degré de transformation du sol par les humains (agriculture, travaux publics).

Dans la construction en terre, la terre à bâtir est toujours prélevée sous la couche de terre arable, en éliminant la couche végétale et les matières organiques qui ont une activité biologique trop importante pour être employées. On trouve ainsi les composants stables tels que les graviers, les sables, le limon et les argiles.

Le matériau terre rassemble différents constituants (eau, air, matières organiques et les matières solides) dont les proportions respectives caractérisent la structure et la texture de la terre. Il est formé d'un mélange d'agrégats aux éléments, natures, et proportions variables (graviers, sables, limons, argiles)

1.6.2 Identification du matériau terre

La qualité des produits (de la construction) dépend en grande partie de la texture de la terre ainsi que de la qualité de ses composants. Cette qualité est directement liée à la proportion de chaque élément et à la nature des argiles présentes.

La terre est principalement caractérisée par :

- sa granulométrie : la quantité et les dimensions des agrégats
- sa plasticité : la propriété d'absorption c'est-à-dire son pouvoir d'absorber et retenir l'eau. Ce qui peut se traduire par le gonflement, retrait et donnant lieu à des fissures de retrait.
- sa compressibilité : sa capacité de densification et de réduction de volume et de porosité, variable selon le taux d'humidité, et l'énergie ou la force de compactage utilisée.
- sa cohésion : capacité des particules à se maintenir lorsqu'on exerce une force de traction. La reconnaissance de ces propriétés peut se faire en laboratoire suivant les processus et normes existant. Il peut faire appel à des matériels simples ou sophistiqués. Cette reconnaissance peut également se réaliser de manière simple et

empirique sur le terrain. Dans ce cas elle se fait de façon sensoriel et est basée sur l'expérience de la personne (le maçon). (DEAL Guyane 2016)

1.6.3 Composition

La terre contient quatre composants de base : les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2 μm -0.08 mm), et les argiles (< 2 μm). Comme nous l'avons constaté, la terre est composée de matériaux inertes (graviers, sables) et de matériaux actifs (silts, argiles). Les premiers jouent un rôle de squelette et les seconds celui de liant, tel un ciment. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent (Houben,1996).

1.7. L'argile

1.7.1 Définition

Le terme argile trouve son origine dans le mot grec argilos dérivé de argos qui signifie blanc, puis sa traduction en latin : argilla. Cette nomination par les anciens est semblable-t-elle due à la couleur du matériau utilisé en céramique

L'argile brute contient généralement des particules élémentaires dont le diamètre des grains est inférieur à 2 micromètre (<2 μm) qui représente les individus cristallins (phase minérale pure) appelés minéraux argileux responsable de ses propriétés tel que le gonflement, la plasticité et les propriétés d'adsorption. Mais dans les sols, ces particules élémentaires sont en général liées entre elles par des ciments de nature très diverse (carbonates, composés organiques, composés minéraux amorphes ou oxydes et hydroxyde de fer et d'aluminium, quartz feldspaths) au sein d'agrégat de tailles beaucoup plus grandes (chaufa, N. 2012).

1.7.2 Formation des argiles

Les argiles proviennent de l'altération et de la dégradation des roches : altération physique sous l'effet des variations de température, et surtout altération chimique au contact de l'eau qui permet la dégradation en particules très fine. Les conditions dans

lesquelles cette dégradation a eu lieu, ainsi que l'état d'avancement de cette dégradation peuvent expliquer la grande diversité des argiles (Gaombalet, 2004).

1.7.3 Classification des argiles

Les travaux de l'AIPEA (Association Internationale Pour l'Etude des Argiles, 1966-1972) et plus tard, ceux de (Pédro, 1994), ont permis d'aboutir à une classification (tableau 1.2) qui repose sur l'utilisation des critères suivants :

- Type de feuillets 2:1 ou 1:1;
- Charge globale du feuillet ;
- Nature des cations interfoliaires

Il existe différentes classifications des argiles, la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet, on distingue ainsi 4 groupes :

- **Minéraux à 7 Å**: Le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et d'une couche

octaédrique. Il est qualifié de T:O ou de type 1:1;

- **Minéraux à 10 Å**: Le feuillet est constitué de deux couches tétraédriques et d'une couche octaédrique. Il est qualifié de T:O:T ou de type 2:1 ;
- **Minéraux à 14 Å**: Le feuillet est constitué de l'alternance de feuillets T:O:T et de couches octaédriques interfoliaires ;
- **Minéraux interstratifiés**: L'épaisseur du feuillet est variable. Ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus. La valeur de la charge permanente du feuillet a servi de critère pour
- Établir une classification des phyllosilicates 2:1 (Tableau 1.2). Cette classification est déduite des travaux de (McKenzie ,1975) et (Brindley ,1966).

Tableau I. 2 Classification des phyllosilicates , d’après (Caillère, 1959), complété par (Mitchell, 1993)

Nature du feuillet	Nature des cations Interfoliaires	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1 :1	Pas de cations ou seulement de l’eau	Kaolinite	Dioctaédrique	Kaolinite, halloysite, nacrite, dickite
2 :1	Pas de cations	Pyrophyllites	Dioctaédrique	Talc
	Cations hydratés et échangeables	Smectites	Dioctaédrique	Montmorillonite, nontronite, beidellite, saponite
		Vermiculites	Dioctaédrique	Vermiculite dioctaédrique à trioctaédrique
	Cations monovalents nonhydratés	Micas	Dioctaédrique	Muscovite, Illite, Paragonite, biotite
	Cations divalents non-hydratés	Micas durs	Dioctaédrique	Margarite, clintonite
	Hydroxyles	Chlorites	Dioctaédrique	Donbassite, sudoite, Clinochore
2:1 fibré	/	Palygorskites, Sépiolites	Dioctaédrique	Sépiolite, Palygorskite

1.7.4 Structure élémentaire des minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, en réseau cristallin, d'eau (H_2O), de silice, sous forme de silicates (SiO_3) et d'aluminium, sous forme d'alumine (Al_2O_3). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets (Tarek Kormi 2003).

Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types :

1- Le tétraèdre de silice SiO_4 (Te): 4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques (Freeah 2006).

2- L'octaèdre d'alumine $Al_2(OH)_6$ et éventuellement de magnésium $Mg_3(OH)_6$ (Oc) : 6 ions hydroxydes enserrant un atome d'aluminium ou de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques.

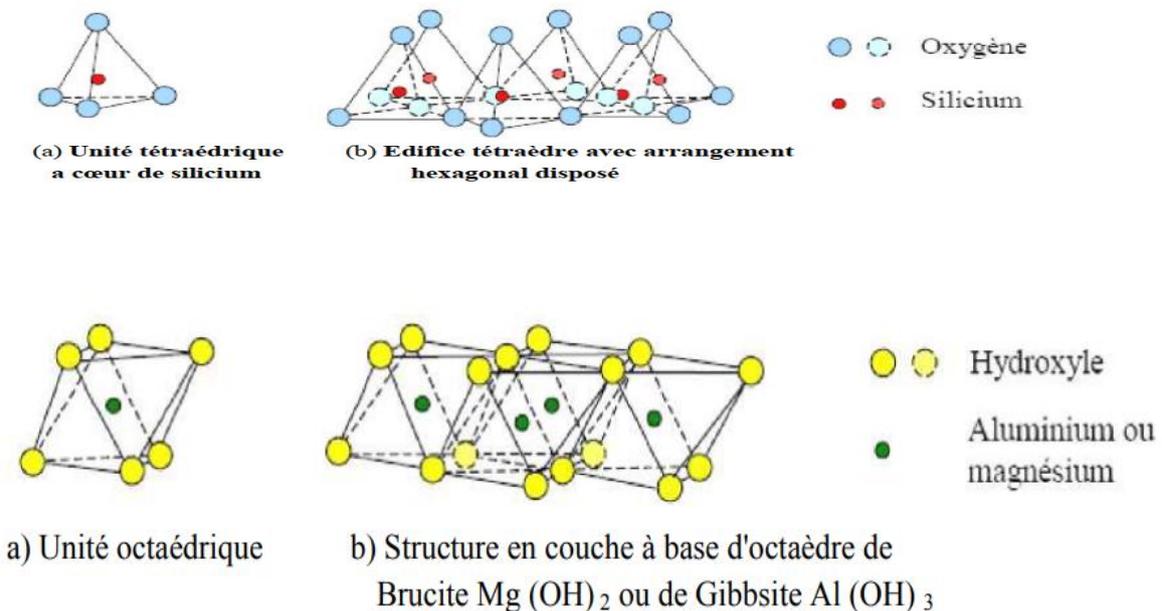


Figure I. 5:Structure Élémentaire Tétraédrique (Freeah 2006).

1.7.5 Principaux types d'argiles

Comme il a été présenté dans le tableau 1.2, il existe plusieurs familles d'argiles qui rassemblent des dizaines d'espèces. Mais ceux sont trois grands types d'argiles dont la présence dans le sol est la plus fréquente : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite.

A. Kaolinites

Minéral à deux couches T-O. Le feuillet est neutre et l'espace inter foliaire est vide. L'unité structurale a une épaisseur de 7,2 Å. Les feuillets sont liés par des liaisons hydrogène entre les atomes d'oxygène de la base de la couche T et les atomes d'hydrogène du groupement hydroxyle de la couche O du feuillet suivante (Figure 1.5 et Figure 1.6). La structure est stable : l'eau ne peut s'adsorber qu'autour des particules et cette argile n'est pas gonflante (Izemouren,2016).

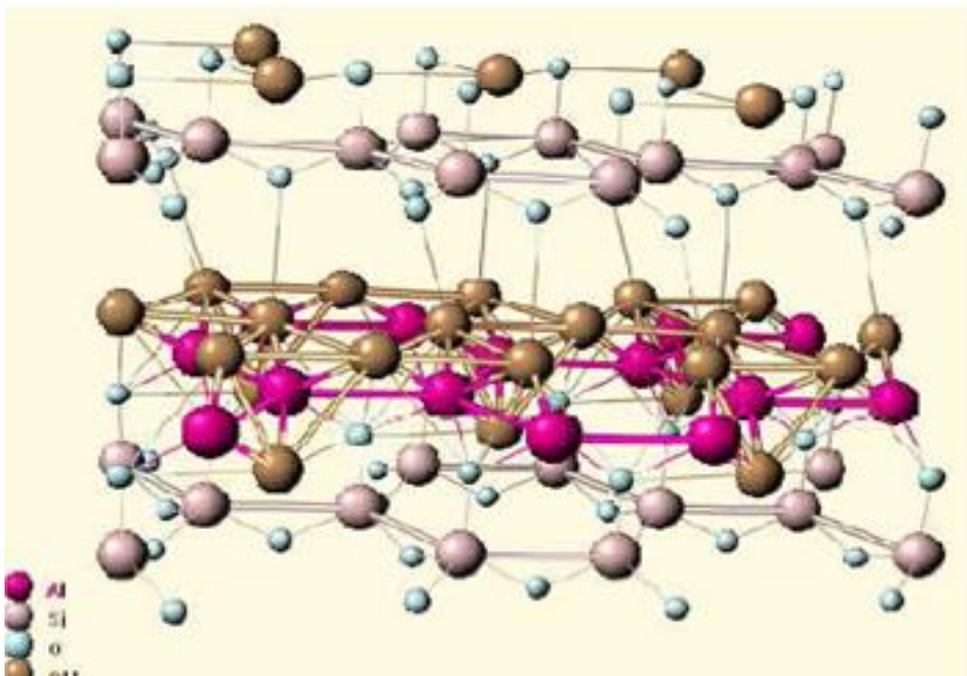


Figure I. 6: Structure cristalline de la kaolinite. Bish and Von Dreele (1989)
cité par (El Ouahebi, 2013)

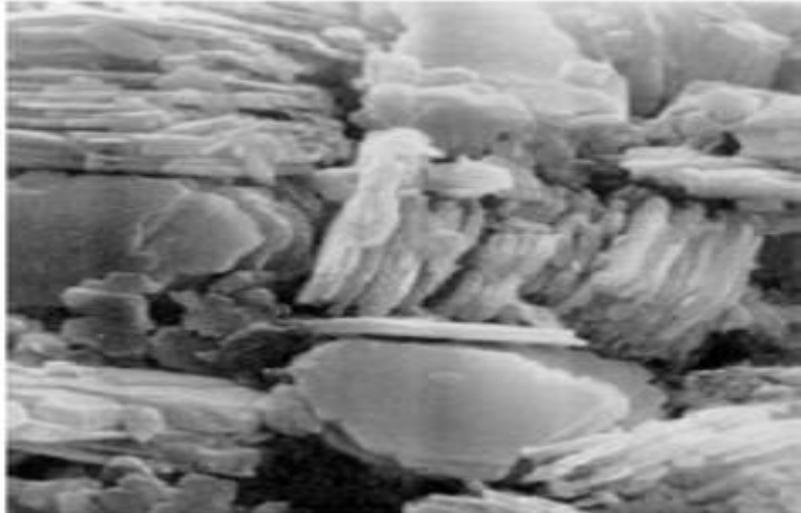


Figure I. 7: Photographie au MEB d'une Kaolinite. (Mitchel, 1993)

A.1 Propriétés cristallines :

Le tableau 1.3 rassemble les propriétés cristallines et les variétés cristallographiques de la famille de kaolins :

Tableau I. 3 Propriétés cristallines et variétés cristallographiques des kaolins (Boudchicha, 2010)

variété cristallographiques des kaolins	a (Å)	b (Å)	c (Å)	α(°)	B(°)	γ(°)
Kaolinite triclinique	5.16	8.94	7.38	91° 8	104° 5	90°
Dickite moniclinique	5.15	8.96	14.45	96 °	-	-
Nacrite moniclinique	5.15	8.96	43	90° 20	-	-

A.2 Composition chimique de kaolinite

La composition chimique de kaolinite est regroupée dans le tableau 1.4.

Tableau I. 4 Composition chimique de kaolinite.(Chichouche , 2006)

Groupe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	MnO	PAF
Kaolinite	45.48	37.3 -	37.3 -	Trace	Trace	Trace	13-
	- 46.8	40.46	40.46	0.17	0.42	0.05	14.16

B. Montmorillonite :

La montmorillonite, appelée aussi smectite, est un minéral argileux de type TOT dont le feuillet élémentaire est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Une substitution partielle de l'aluminium Al par le magnésium Mg est fréquente (Drouin, 2007) . Les forces de Van der Waals sont faibles par rapport aux autres forces de liaison. Cela se traduit par une déficience en charge négative nette dans les feuillets en octaédre. Pour cette raison les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. La montmorillonite est donc caractérisée par une structure instable qui est affectée par la présence d'eau. Les plaquettes de montmorillonite ont une forme quelconque est de taille très petite (Mekki, 2006).

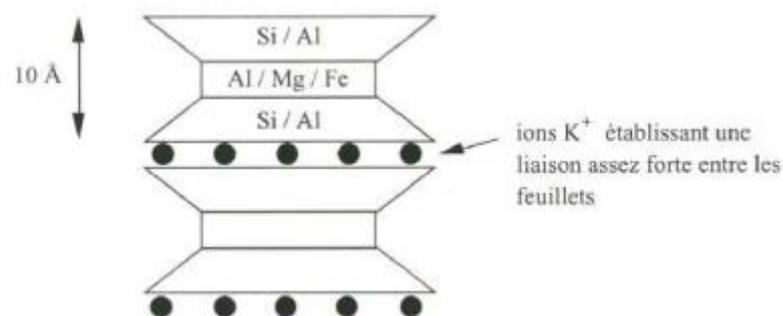


Figure I. 8: Structure Particulière de L'illite , (Mouroux et al., 1987)
(Freeah 2006).

C.L'illite

L'illite (nom qui vient de "l'Illinois") est une argile assez commune notamment dans les sols. C'est une argile à trois couches. Dérivant des micas blancs, elle est potassique et alumineuse. Son pouvoir d'adsorption est moyen car sa surface développée est "moyenne". Sa couleur varie du gris blanc au brun clair selon la teneur en impuretés métalliques. Elle est composée essentiellement de silice (36,5 %), faiblement dosée en alumine (environ 9 %), à tendance calcique (près de 14 %) et riche en fer (près de 9 %). Elle est de toutes les argiles celle dont le pouvoir d'adsorption est le plus faible. Elle doit donc être distinguée de la Montmorillonite, argile verte également. La chlorite est proche de l'illite dont elle est issue. (L'argile : la respiration de la Terre) .

La figure. 1.9 présente une photographie au microscope à balayage électronique d'une illite de Fithian, Illinois. La longueur du trait de lumière est de 5 μm . (Holtz, 1991).

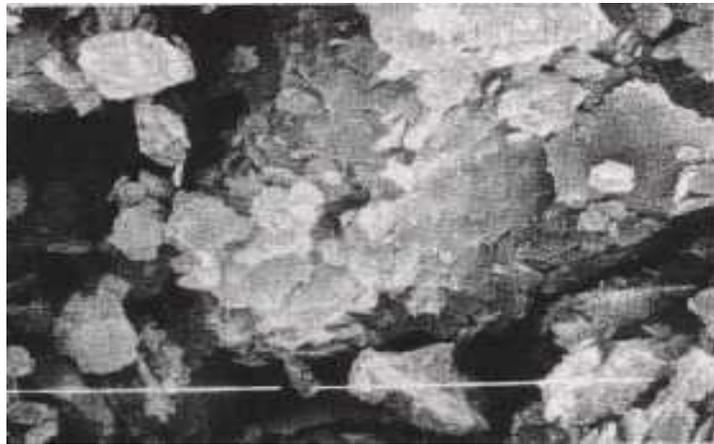


Figure I. 9: Photographie au microscope à balayage électronique d'une illite (Freeah 2006).

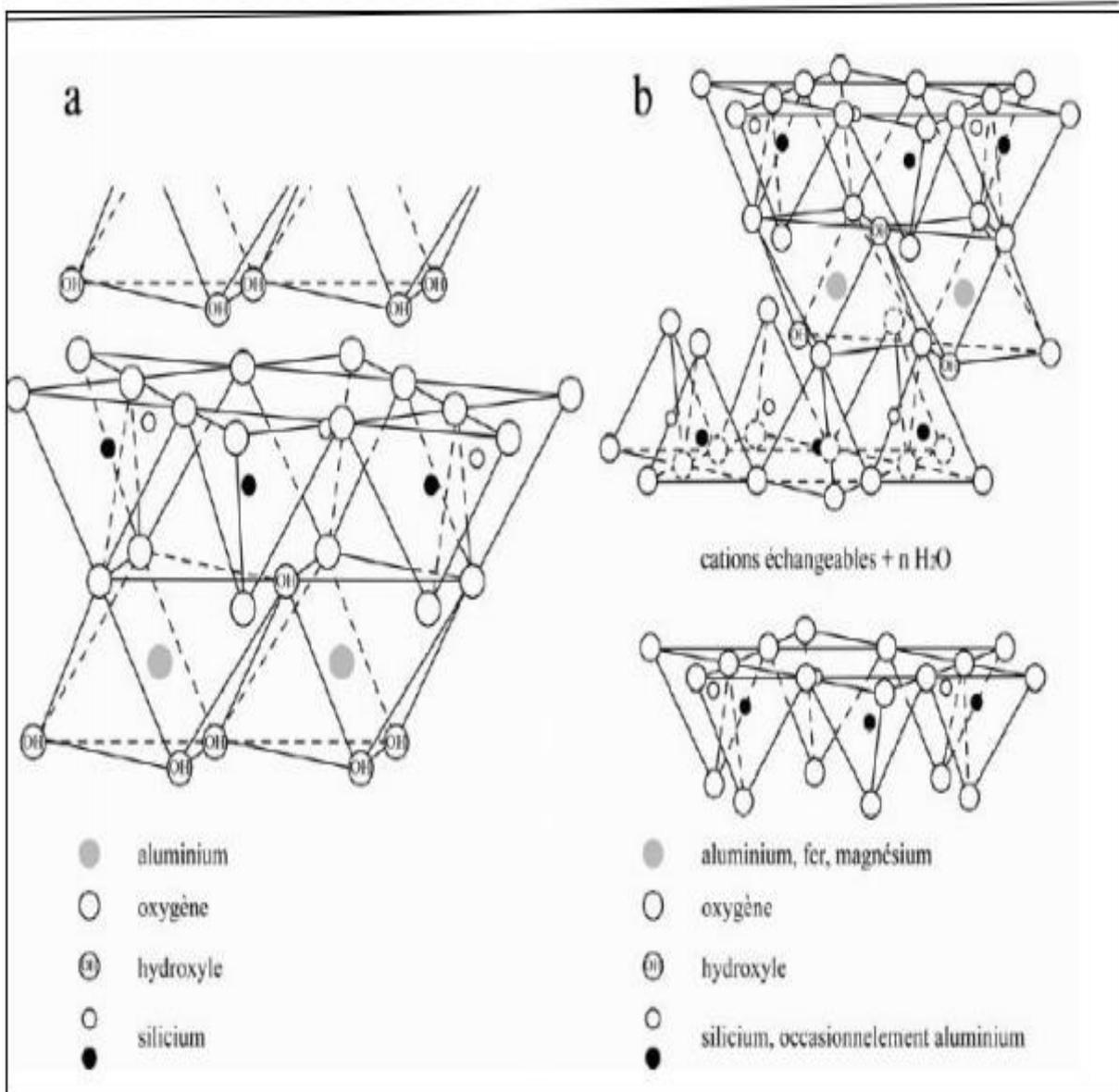


Figure I. 10:Structure Élémentaire Tétraédrique (Freeah 2006).

1.8 Les propriétés fondamentales pour la stabilisation de la terre

Chaque terre a ses propriétés selon la nature et les composants du mélange. L'élément qui contrôle les propriétés du sol est la fraction granulaire .

On distingue d'une part des propriétés chimiques liées à la présences 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) :

- la texture ou granularité ;
- la plasticité ;
- la compressibilité ;
- la cohésion ;

1.9 Stabilisation de la terre crue pour la construction

D'après (Gernot, Minke. 2009), la stabilisation de la terre crue vise à améliorer ses propriétés mécaniques et de durabilité pour une meilleure résistance aux sollicitations mécaniques et climatiques. Les procédés de stabilisation ont une connotation variée dans la littérature. (Danso et al., 2015) distinguent trois groupes de méthodes de stabilisation : le renforcement à base de fibres, de liants ou par combinaison des deux. Ils considèrent en outre, le compactage et la modification de texture comme respectivement des stabilisations mécanique et physique.

1.9.1 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).

1.9.2 Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique est pratiquée lorsqu'on procède à la densification d'un sol par compactage. Elle a pour effet la diminution de la porosité de la terre. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mis au contact avec l'eau, les matériaux redeviennent plastiques et ne résistent plus du tout à la compression. C'est pourquoi le compactage est un moyen de stabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation chimique. Il est le plus souvent influencé par trois caractéristiques : le mode, l'énergie et la granularité de la terre.

1.9.3 Stabilisation physique :

On distingue deux manières de procéder à une stabilisation physique :

- Modification des propriétés des sols pour une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas on intervient directement sur la granularité du sol, le mélange obtenu conduit selon le cas, à la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines.
- Ajout de fibres végétales à des terres argileuses. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lors du séchage.

1.9.4 Stabilisation chimique :

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre à l'aide de certains ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les sols traités moins hydrophiles. De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent diverses améliorations à la terre selon leur propriété.

1.9.4.1 Stabilisation à la chaux

La stabilisation d'un sol aux liants hydrauliques conduit généralement à l'amélioration des caractéristiques mécaniques du sol traité. Dans le cas du traitement à la chaux, la réaction pouzzolanique permet l'obtention de caractéristiques mécaniques intéressantes. Abdo (Abdo, J.1982), Perret (Perret, P.1977) et Locat (Locat et all.1990) ont montré que ces caractéristiques augmentent graduellement sur la durée de l'étude (un an). City par (Armel Babatoundé LAIBI ,2017)

L'ajout de la chaux entraîne en quelques minutes la floculation des argiles, ce qui améliore la consistance et se traduit par une augmentation de la limite de plasticité accompagnée ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. Ces modifications du comportement rhéologique des sols entraînent l'amélioration des propriétés d'usage des argiles traitées.

A. Les effets à court terme

Les effets à court terme peuvent se résumer à une modification texturale du sol, suite à un changement de l'état hydrique du sol et à un processus de floculation/agglomération des particules.

B. Modification de l'état hydrique du sol

Lorsque de la chaux vive (CaO) est ajoutée à un sol humide, une réaction exothermique se produit. Il s'agit de l'hydratation de la chaux vive qui conduit à la formation d'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂). (Equation I.1).



C. Floculation – agglomération des particules du sol

Les charges négatives portées en surface des particules d'argile sont à l'origine de l'établissement d'un champ électrostatique autour d'elles. Ce champ permet le développement de la double couche d'eau entourant les argiles (eau libre et eau liée). L'ajout de chaux modifie la charge superficielle des argiles et donc la structure de la double couche dont l'extension diminue. De plus, il y a formation de ponts de calcium entre les particules d'argiles. Les floccs ainsi formés sont insensibles au lavage. La floculation améliore la consistance des argiles (limite de plasticité). (Armel Babatoundé LAIBI ,2017)

D. La liaison des particules argileuses.

En milieu basique et saturé en ion calcium, les argiles sont attaquées. Elles libèrent de l'alumine et de la silice qui réagissent avec le calcium pour former des hydrates

calciques similaires à ceux des ciments. Ces hydrates tapissent la surface des particules du sol. (Armel Babatoundé LAIBI ,2017)

Kaolinite + Chaux \rightarrow C-S-H + C-A-H Equation 1. 2

1.9.5 Modifier la texture et la structure

Il est en fait possible d'intervenir sur deux des principales caractéristiques d'une terre que sont la texture et la structure. Ces interventions visent notamment à agir sur trois propriétés principales qui sont la porosité, la perméabilité et la résistance mécanique.

Les principaux objectifs que l'on poursuit en intervenant sur ces caractéristiques et ces propriétés sont :

- La réduction de la porosité.
- La diminution du gonflement.
- Le retrait de la terre.
- L'obtention d'une meilleure cohésion.
- L'amélioration de la résistance à l'érosion et l'imperméabilisation de surface.
- L'obtention de meilleures résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement.

On remarquera que la stabilisation est un problème complexe qui fait intervenir de nombreux paramètres exigea :

- La connaissance des propriétés de la terre ; la définition précise des améliorations envisagées ;
- L'économie du projet (coûts et délais) ;
- Les techniques de production et de construction employées ;
- Le parti architectural et notamment la relation entre la structure et la forme du bâtiment (Attia , 2019).

1.9.6 Les moyens de stabilisation

Les principaux moyens de stabilisation : densifier, armer, liaisonner, imperméabiliser, hydrofuger (Guilaud, 1997 ; Houben, 1989 ; Volhard, 1991).

A. Densification

On peut densifier la terre par pétrissage ou compactage. Ce moyen évacue l'air en réduisant les pores et canaux capillaires, il contribue à réduire la porosité du matériau et à augmenter sa densité.

B. Armature

Il s'agit d'introduire une armature dans la terre généralement constituée de fibres d'origine végétale (paille), animales (poils), minérale ou synthétique. Ce moyen crée un réseau de fibres omnidirectionnel qui améliore notamment les résistances à la traction et au cisaillement, contribue à réduire le retrait.

C. Liaison

Dans ce cas, la matrice inerte est aussi introduite dans les argiles et forme des liaisons chimiques stables entre les cristaux d'argile. Ce moyen induit la formation d'autres matériaux par réaction physico-chimique (le cas de la réaction pouzzolanique argile-chaux). Ce moyen améliore la résistance mécanique et à l'érosion

D. Imperméabilisation

Une matière insensible à l'eau (bitume, bentonite, etc.) est introduite dans la terre qui va remplir les vides, pores et fissures et imperméabiliser la terre. Ce moyen contribue à améliorer la résistance à l'érosion et à stabiliser le gonflement et le retrait.

E. Hydrofugation

Dans ce cas, on modifie l'état de l'eau interstitielle et l'on réduit la sensibilité des plaquettes d'argile à l'eau. Ce moyen qui fait intervenir des produits chimiques (chlorure de calcium, acides, aminés quaternaires ou résines).

1.10 Les fibres

Une fibre est un filament fin et long de matière avec un diamètre généralement de l'ordre de quelques microns (7-30 μ m) et avec un rapport longueur/diamètre entre cent et virtuellement infini pour les fibres continues (J. M. H. RAMIREZ.2004).

Les fibres sont l'une des formes les plus extraordinaires de la matière. Elles sont souvent beaucoup plus résistantes et plus rigides que le même matériau sous forme massive. Elles ont des propriétés spécifiques remarquables, par exemple pour une résistance mécanique donnée, un fil d'acier sera trois ou quatre fois plus lourd que la plupart des fibres depolymère. La finesse des fibres leur permet d'être tissées et drapées dans des formes complexes (M. ROKBI.2001)

1.10.1 Classification des fibres

Les fibres peuvent être classées en trois catégories :

Les fibres naturelles les fibres régénérées et les fibres synthétiques (tableau) On peut également distinguer entre fibre organique et les fibres minérales. Les fibres minérales d'origine naturelle telles que l'amiante ou synthétique comme les fibres céramiques sont utilisées essentiellement pour leurs propriétés mécaniques comme fibre renfort dans les matériaux composites pour leur propriétés réfracteurs (isolement thermique), pour l'obtention des fibres optique et de filament incandescent, pour la filtration de gaz ou de liquide, etc (ROUAG, H .2014)

1.10.2 Les fibres naturelles

On peut classer les fibres naturelles en trois groupes principaux selon leur origine (Figure 1.11) (Bali, 2013):

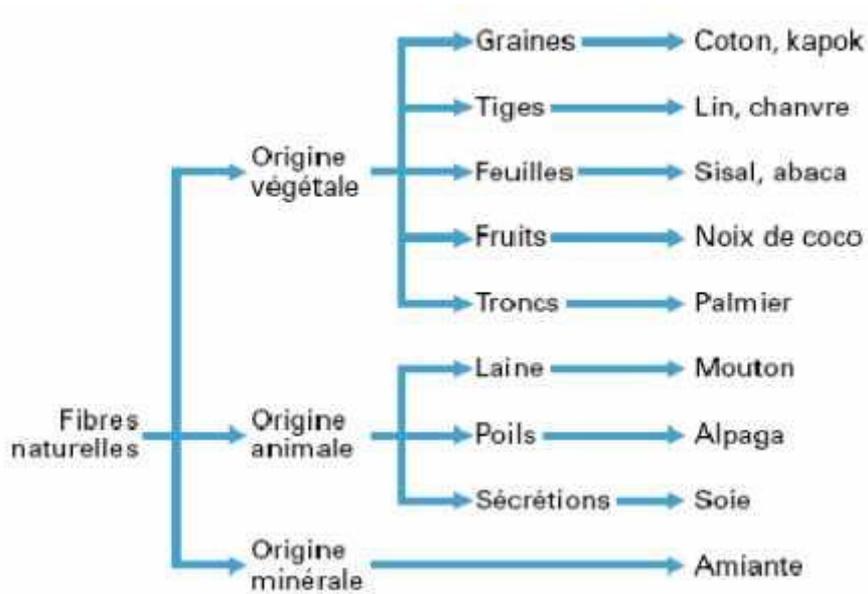


Figure I. 11: Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine (Baley, 2013)

A. Fibres végétales

Les fibres végétales : elles se subdivisent elles-mêmes selon leur provenance. On peut donc citer les fibres libériennes qui sont extraites de tiges de plantes (chanvre, lin, ramie, jute), les fibres dures qui sont extraites de feuilles, de troncs ou d'écorces de fruits (sisal, chanvre de manille, noix de coco), et les fibres qui proviennent des poils séminaux de graines (coton, kapok).

B. Fibre animale

La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%) . Les fibres animales sont classées selon leur provenance, on note essentiellement :

- Poils : la laine (obtenue par la tonte de moutons), alpaga, angora, chameau, cachemire, ...
- Sécrétions : soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée ;

C. Les fibres minérales :

L'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Elle a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir absorbant. Elle a été utilisée dans diverses installations industrielles et même en construction avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérogènes qu'elle présente (Taalah, B.2014)

1.10.3 Fibres synthétiques

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composés fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20ème siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point; elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l'intérêt de beaucoup d'industriels pour leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et modifier leurs propriétés, par contre, elles sont très critiquées quant à leur comportement vis-à-vis de l'environnement que ce soit pendant le processus de fabrication ou après leur utilisation et les difficultés de leur recyclage.

Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont :

- Les polyamides (Nylons) ;
- Les polyesters ;
- Les dérivés polyvinyliques ;
- Les polyoléfines : les polyéthylènes et les polypropylènes : sont d'une importance croissante et leur production s'élève maintenant à environ 8% de toutes les fibres synthétiques (Taalah, B.2014)

1.10.4 Fibres artificielles

Les fibres textiles artificielles sont fabriquées à partir de matières existantes dans la nature qui sont transformées chimiquement afin d'obtenir une "pâte" filable au travers d'une filière. Dans l'habillement, les fibres artificielles sont principalement d'origine cellulosique (viscose, lyocell, modal, cupro...) et parfois d'origine protéinique (issues du soja, de la caséine de lait...) (Karine, S.2019).

1.11Fibres végétales

1.11.1 Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante (F. Michaud .2003)

1.11.2 Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

✓ suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (Kénaf, jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abace, paille de graminée) (A. Y. Nenonene.2009)

✓ Suivant leur teneur en holocelullose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) (F. Michaud .2003)

✓ Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libérienne, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine. et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues (A. Y. Nenonene.2009)

1.11.3 Composition chimique des fibres végétales

La composition chimique des fibres végétales varie selon la nature des fibres, et comporte principalement la cellulose, l'hémicellulose et de la lignine (Tableau I.1). Les propriétés de chaque constituant contribuent à la propriété globale de la fibre. L'hémicellulose est responsable de la biodégradation, l'absorption d'humidité, et la dégradation thermique de la fibre. La lignine, thermiquement plus stable, est le responsable de la dégradation par les ultraviolets (UV) (D. Nabi Saheb et J. P. Jog .1999)

Tableau I. 5 Propriétés morphologiques de quelques fibres végétales. (Negoudi ,A .Khinech ,S .2015)

Fibres	Longueur de la fibre (mm)	Diamètre de la fibre (μm)	Angle micro fibrillaire ($^{\circ}$)	Référence
Cotton	35	10-45	-	SAT 09
Lin	4-77	5-76	10	CHA 06
Chanvre	5-55	10-51	6.2	NEN 09
Kénaf	2.5-4.5	14-33	-	MIC 03
Jute	2.5	5-25	8	MIC 03
Sisal	900	8-50	20	SAT 09
Rami	900-1200	20-80	7.5	SAT 09
Noix de coco	03-1	12-24	45	CHA 06

Tableau I. 6 Composition chimique de quelques fibres végétales (V. K. Thakur,2014)

Fibres	Cellulose (%)	Hémicellulose (%)	Pectine (%)	Lignine (%)
Genêt d'Espagne	44.5	16.3	13.3	18.5
Jute	70	14	2	18
Cotton	93	3	3	1
Lin	71	19	1	2
Ramie	75	15	2	1
Sisal	73	13	1	7
Alfa	45	24	-	24

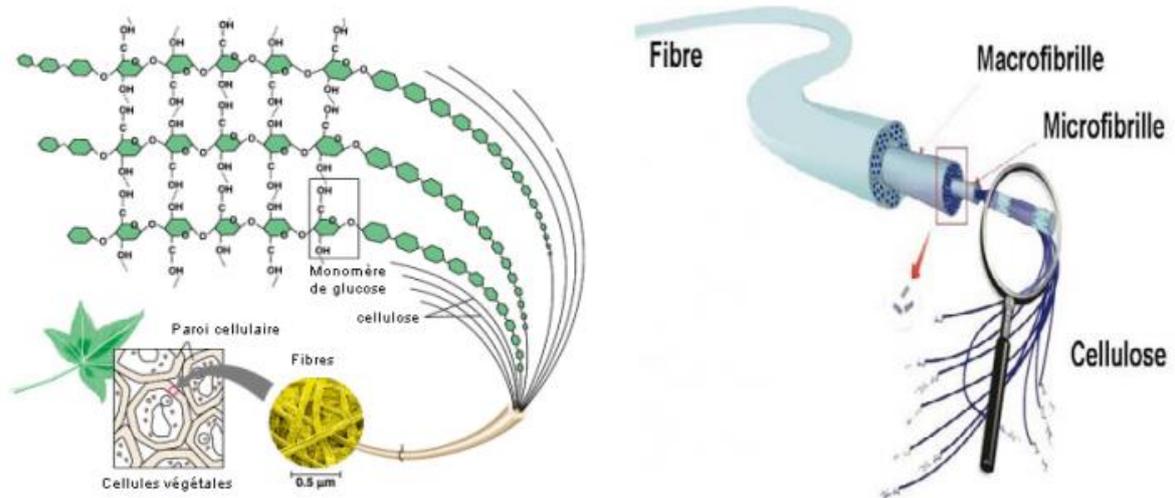


Figure I. 12: Structure d'une fibre végétale

http://mpronovost.ep.profweb.qc.ca/BIONP1/tech_stof_cellulose_01.gif

1.12 Le palmier dattier

Le palmier dattier est typiquement cultivé dans les oasis sahariennes. Celui originaire d'Afrique du Nord, est amplement cultivé de l'Arabie jusqu'au Golf Persique, où il forme la végétation caractéristique des oasis. Il est cultivé en outre aux Canaries, dans la Méditerranée septentrionale et dans la partie méridionale des Etats-Unis. C'est une plante sensible au froid, qui pousse sur des terrains de n'importe quelle nature, pourvu qu'ils soient fertiles et bien drainés. Dans les régions à climat doux, il est cultivé en plein air, en position ensoleillée, utilisé surtout comme plante ornementale pour son allure élancée et son feuillage (Sbiai,2011).

Il existe plus de 2600 espèces de palmiers. On pourrait croire que c'est un arbre qui possède un tronc alors que c'est un monocotylédone qui ne contient pas de bois ni de tronc mais possède un stipe. De plus, c'est une plante dioïque contenant donc des palmiers mâles et des palmiers femelles. Le palmier est très élancé, généralement il a hauteur entre 15 et 25 mètres et peut atteindre parfois 30 mètres, couvert de manière visible par les gaines des feuilles tombées. Les feuilles, réunies en un nombre de 20 à 30 maximum, forment une couronne apicale clairsemée (figure 1.13). Elles sont pennées, longues jusqu'à 6m; les feuilles supérieures sont ascendantes, les basales recourbées vers le bas, avec des segments coriaces, linéaires, rigides et piquants, de couleur verte



Figure I. 13: Photo des palmiers dattiers

Le palmier dattier se constitue principalement de 10 illustrer dans la figure 1.13 parties à savoir

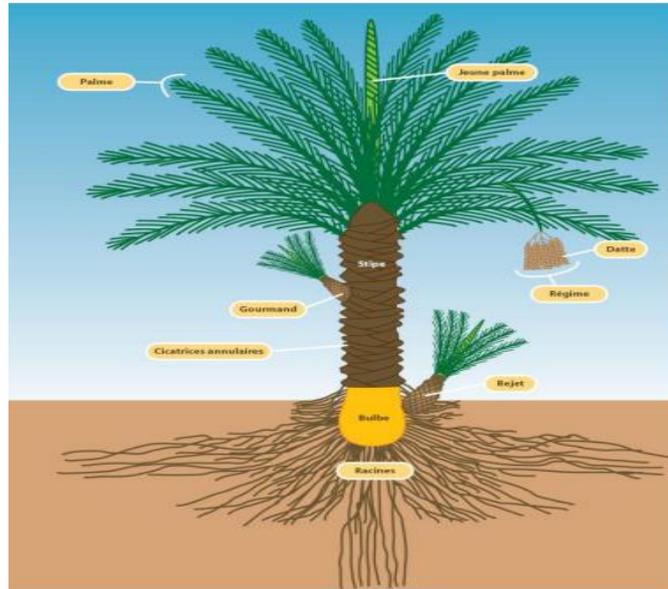


Figure I. 14: les constituent principales du palmiers dattiers

1. Palmes

Les palmes sont les feuilles du palmier. Elles sont finement découpées et longues de 4 à 7 mètres. Les feuilles âgées peuvent rester contre le stipe quelques mois voire plusieurs années avant de tomber. L'ensemble des feuilles au sommet du stipe est appelé couronne ; elle peut faire de 6 à 10 mètres d'envergure.

2. Jeune palme

La jeune palme est enroulée pendant toute sa croissance comme les brins d'herbe ou les feuilles de bambous.

3. Régime de dattes

Un régime de dattes est la partie qui supporte les fruits du palmier. On parle aussi de régime pour les bananes. Il est accroché au palmier par la hampe, qui est d'ailleurs tellement résistante qu'elle doit être sciée pour être décrochée. Il peut contenir plus de 1000 fruits.

4. Dattes

Ces fruits sont des baies de forme ovale de 3 cm de long. La chair très sucrée entoure la graine. Récoltées en automne, leur couleur varie du rouge lumineux au jaune lumineux selon les variétés ; elles seront ensuite séchées au soleil. Un palmier dattier peut produire de 10 jusqu'à 100 kg par an.

5. Gourmand

Un gourmand est une branche secondaire qui se développe sur une branche principale d'une plante. Il faut généralement les supprimer car comme leur nom l'indique, ils sont gourmands et épuisent inutilement la plante

6. Stipe

Le stipe rappelle le tronc des arbres, mais il est en fait composé de fibres végétales des anciennes feuilles. Son diamètre peut varier légèrement selon les conditions climatiques.

7. Cicatrices annulaires

On a l'impression que le palmier a un «tronc recouvert d'écailles». Ces cicatrices annulaires correspondent au point d'attache de la feuille ancienne une fois le pétiole (support de la feuille) tombé. Elles permettent au grimpeur de s'y accrocher pour atteindre les dattes.

9. Bulbe

Se situant à la base du stipe, le bulbe constitue la réserve du palmier. De là part le système racinaire d'où émergent les racines primaires courtes de moins d'un mètre, et longues de plus de 20 mètres.

10. Racines

Elles sont nombreuses et profondes jusqu'à 20 mètres ; elles sont capables d'aspirer 500 litres d'eau par jour

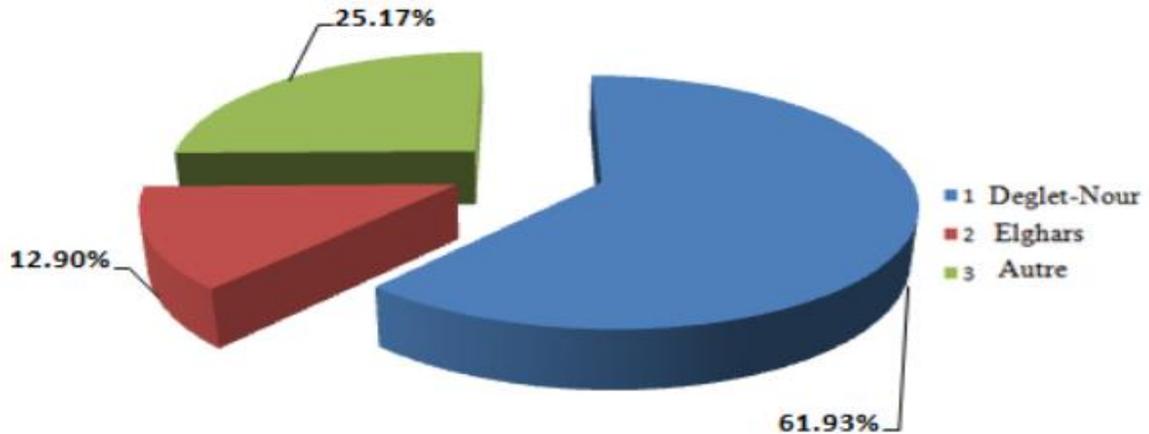


Figure I. 15: Proportion de variétés des palmiers dattiers à Biskra. (Caractérisation Physico-mécanique des Matériaux Bio-Composites Epoxy/Fibres de Palmier Dattier (Material & Processes))

1.13 Les fibres de polypropylène

En vue d'améliorer les propriétés et le comportement des sols, plusieurs études ont renforcé les sols par des fibres synthétiques, notamment les fibres de polypropylènes (Kaufmann, 2004 ; Cai, 2006). D'autres études ont s'intéressé à la compréhension de l'effet de la présence des fibres de polypropylène sur les propriétés des briques de terre stabilisée, comme le cas des blocs de terre comprimé (Taallah, 2014 ; Donkor, 2015).

On commence par l'utilisation des fibres de polypropylènes dans sols, notamment le cas des argiles gonflantes. Li et coll. (1995) (cité par Cai et al. 2006)) ont signalé des augmentations notables dans la résistance au cisaillement, la ténacité et la plasticité d'un sol cohérent après renforcement avec des fibres de polypropylène. De plus, certains chercheurs (Péra et Ambrois, 1998 ; Savastano et al., 2003 ; Kaufmann et al., 2004) ont constaté que l'utilisation de la fibre augmente considérablement la ténacité et conduit à amélioration supplémentaire du comportement de résistance du ciment.

Cai et al. (Cai, 2006) ont réalisé une étude qui s'intéresse à la compréhension de l'effet de la teneur en fibres de polypropylène, la teneur en chaux et le temps de cure sur le comportement du sol argileux. Les résultats obtenus montrent que, pour toute teneur en chaux utilisée, une augmentation la teneur en fibres de 0,05% à 0,25% induit une amélioration progressive de la résistance à la compression (Figure 1.15). Les auteurs

ont constaté aussi une augmentation du retrait (Figure 1.16) et la ductilité du sol , alors que le gonflement a diminué.

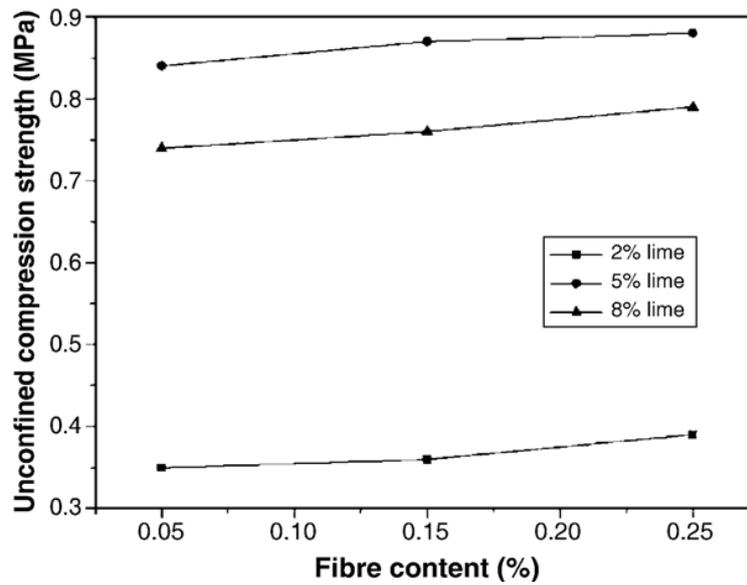


Figure I. 16: Effet de la teneur en fibres sur le coefficient de retrait des échantillons de sol traités fibre – chaux après 7 jours de cure (Cai, 2006)

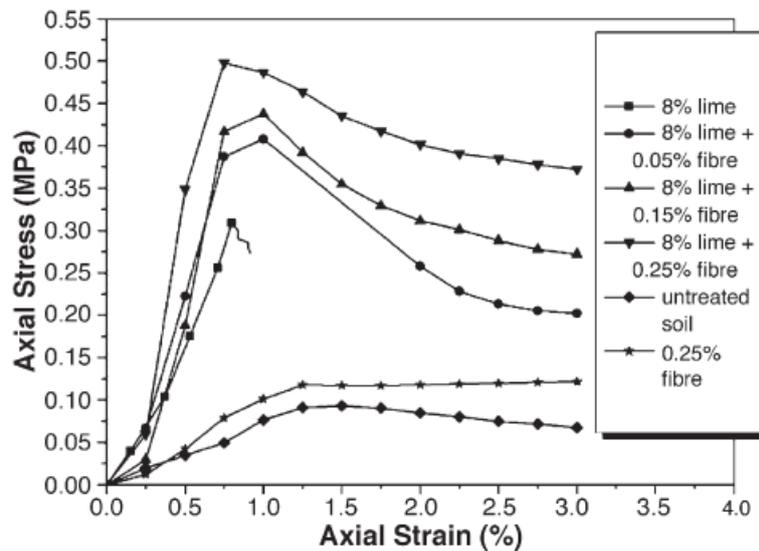


Figure I. 17: Courbes contrainte -déformation d'un chargement axial de six échantillons après 7 jours de cure (Cai, 2006) .

D'autres chercheurs ont effectué un test triaxial drainé sur sols artificiellement cimentés et renforcés avec des fibres de polypropylène (Consoli, 2009) . Leurs résultats ont montré une augmentation de 5% de la résistance ultime et maximale à la compression par rapport à l'échantillon témoin. Les résultats ont également montré un meilleur comportement pour le matériau avec les fibres même lorsque il y a moins de ciment dans le mélange.

Dans une autre recherche, ils ont ajouté trois types de fibres, à savoir polypropylène (PP), polyéthylène téréphtalate (PET) et des fibres de verre sur des sols artificiellement cimentés et

les ont soumis à des tests triaxiaux. Ils ont conclu que la présence des fibres de polypropylène PP a engendré une diminution du *déviateur de contraintes* dans l'échantillon tandis que les deux autres fibres l'ont augmenté (Consoli, 2004). Ils ont également déduit que le PP entraînait une meilleure ductilité dans l'échantillon par rapport aux deux autres types de fibres.

Pour l'utilisation des fibres de polypropylène dans le domaine des constructions en terre, l'idée est inspirée des activités de l'homme depuis l'antiquité. Cela veut dire qu'historiquement, les fibres ont été utilisées comme renforcement dans les techniques de construction en terre, briques séchés au soleil, mortier pour la maçonnerie et l'enduit de terre. A titre d'exemple la paille et le crin (ACI, 1996).

L'utilisation de fibres comme renfort dans la maçonnerie traditionnelle en terre s'est étalée aussi sur la production des blocs de terre comprimée BTC. À la fois naturel (obtenu à partir de plantes et d'animaux) et les fibres synthétiques, sont utilisés pour renforcer les blocs de BTC (Rigassi,1996). Les fibres de polypropylène en tant que fibres synthétiques sont utilisées par un certain nombre de chercheurs.

Dans son étude consacrée à la fabrication de blocs de terre comprimée à base de 8 % en ciment et une contrainte de compactage de 10 MPa, Taallah (Taallah, 2014) a étudié l'effet de la variation de la teneur en polypropylène sur les résistances sèches à la compression RCS et à la traction RTS. Il a conclu que l'augmentation de la teneur en fibres dans les mélanges engendre une augmentation de la RCS et de la RTS (Fig 1.17. et Fig 1.18.) .

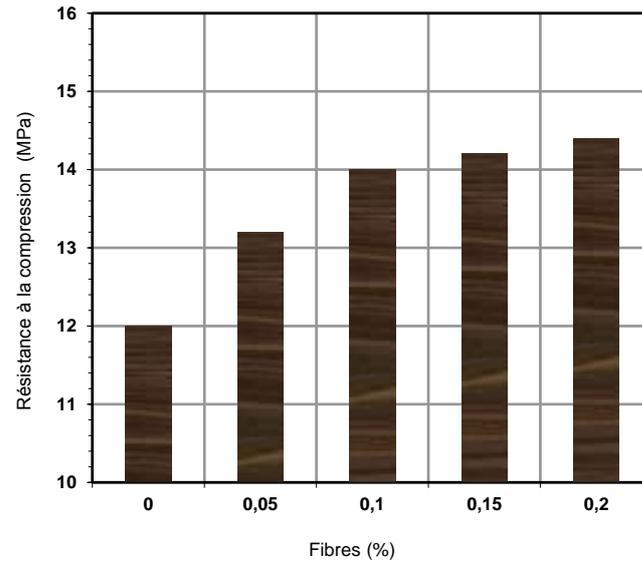


Figure I. 18: Résistance à la compression sèche du BCPP à base de 8 % en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) (Taallah, 2014)

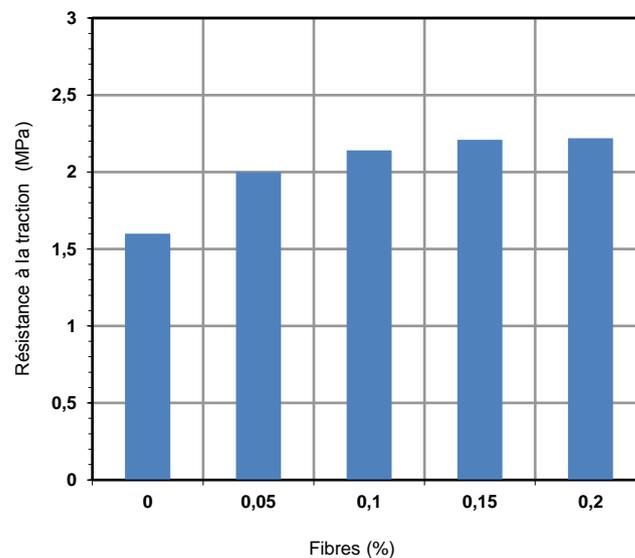


Figure I. 19: Résistance à la traction sèche du BCPP à base de 8 % en ciment en fonction de la teneur en fibres de polypropylène (pour une contrainte de compactage de 10 MPa) (Taallah, 2014)

Une autre étude expérimentale menée par Donkor and Obonyo (Donkor, 2015) s'est intéressée à l'introduction des fibres de polypropylène dans la composition des blocs

de terre comprimée. L'objectif de l'étude est d'examiner le potentiel de remédier à certaines insuffisances des matériaux utilisés en construction en terre en évaluant l'influence des fibres de polypropylène sur la résistance, la ductilité et la déformabilité des blocs de terre comprimée stabilisée au ciment. Les résultats obtenus ont révélé que pour la résistance à la compression une amélioration de la résistance moyenne avec l'augmentation de la teneur en fibres jusqu'à une valeur optimale de 0,4% a été enregistrée. À 0,6% de teneur en fibres, la résistance à la compression moyenne était encore supérieure à la moyenne des blocs témoin (sans fibres). Mais au-delà de 0,6% de teneur en fibres, une diminution de la résistance à la compression a été constatée (Fig 1.19.). Le même constat a été fait pour le cas de la résistance à la flexion à trois points. Une évaluation visuelle des zones de fissures des blocs a révélé que la majorité des fibres restaient intactes maintenant les blocs ensemble après la première fissure. Cela indiquait que les fibres utilisées avaient une capacité et une résistance à l'arrachement élevées.

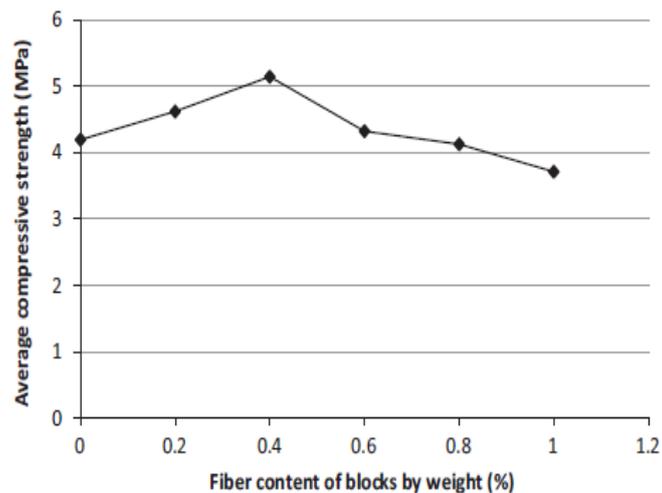


Figure I. 20: Résistance à la compression moyenne des CEB par rapport à la teneur en fibres des blocs (Donkor, 2015)



Figure I. 21: les fibres de polypropylène formant des ponts sur une fissure apparue pendant l'essai de flexion à trois points (Donkor, 2015)

1.14 MATÉRIAUX COMPOSITES

1.14.1 LE QUOI-QU'EST-CE QU'UN MATÉRIAU COMPOSITE ?

Le mot composite dans le terme matériau composite signifie que deux ou plusieurs matériaux sont combinés à une échelle macroscopique pour former un troisième matériel utile. La clé est l'examen macroscopique d'un matériau dans lequel les composants peuvent être identifiés à l'œil nu. Différents matériaux peuvent être combinés à une échelle microscopique, comme dans l'alliage de métaux, mais le matériau résultant est, à toutes fins pratiques, macroscopiquement homogène, c'est-à-dire que les composants ne peuvent pas être distingués à l'œil nu et agissent essentiellement ensemble. L'avantage des matériaux composites est que, s'ils sont bien conçus, ils présentent généralement les meilleures qualités de leurs composants ou constituants et souvent certaines qualités qu'aucun des composants ne possède. Certaines des propriétés qui peuvent être améliorées en formant un matériau composite sont :

- Résistance ;
- Résistance à la corrosion ;
- Poids ;
- Le comportement dépendant de la température ;
- Isolation thermique (Jones M. 1999) ;

1.14.2 L'effet de la stabilisation sur les propriétés de composite fibre et sol

Le renforcement en fibres était auparavant utilisé pour améliorer la structure de la route. La fondation renforcée de fibres avait influence notable sur la résistance à la compression non confinée du sable limoneux. Des recherches antérieures ont montré que le renforcement des fibres pouvait augmenter la résistance au cisaillement maximale et limiter les réductions post-pic de la résistance au cisaillement et diminué la rigidité du sol. La plupart des études expérimentales ont été menées sur des sols granulaires. le mécanismes de renforcement de fibres sur sable sec renforcé avec différents types de fibres par cisaillement direct des tests ont été étudiés. Les fibres ont été placées à différentes orientations spécifiques par rapport au plan de cisaillement. le la teneur en fibres, l'orientation des fibres et le module des fibres ont influencé la contribution des fibres à le développement de la résistance au cisaillement. Le comportement du sable renforcé avec des inclusions discrètes orientées aléatoirement entre autres facteurs sur la forme des particules et la taille du sable a été étudié. L'effet du renforcement des fibres s'est avéré plus significatif dans le sable fin avec des particules sub-arrondies que dans le sable moyen. sable avec des particules sous-angulaires (R.Sridhar.2017).

Henri Vidal, celui qui a proposé le principe de la terre armée (Vidal, 1969), a décrit la terre armée comme «un matériau formé en combinant terre et armature». Selon sa définition, la «terre» recouvre tous les types de sols trouvés dans la nature, ou produits par des moyens physiques ou chimiques, y compris à la fois les sols granulaires et les terres qui présentent une légère cohésion. Il a défini le «renforcement» comme étant tous les composants linéaires qui peuvent résister à des contraintes de traction majeures.

Depuis l'introduction du principe de la terre armée, la construction a progressé beaucoup plus rapidement que la recherche et le développement théorique. Ingold (1982) a résumé le développement précoce du renforcement des sols. Les théories les plus courantes proposées pour les sols renforcés et certaines des principales études expérimentales sont décrites ci-dessous. Le sol renforcé sans cohésion est décrit en premier, puis sol cohésif renforcé. City par (Ling I, Leshchinsky D, Tatsuoka F.2003)

1.15 L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des adobes

1.15.1 Effet des fibres sur les propriétés physiques :

Dans un travail de recherche publié en 1998 (Khosrow, G.1998), Khosrow, G et al. Se sont intéressés à Comportement d'un sol composite renforcé de fibres naturelles, Ces études montrent que l'ajout de fibres naturelles présente plusieurs avantages :

- Les propriétés cohésives du sol.
- Les forces de friction de compression apparaissant à la surface des fibres de renfort en raison du retrait du sol.
- La résistance au cisaillement du sol due à la forme de surface et à la rugosité des fibres.

Les changements dimensionnels des fibres naturelles dus à l'humidité et aux variations de température influencent les trois caractéristiques d'adhérence. Lors du mélange et du séchage du sol, les fibres absorbent l'eau et se dilatent. Le gonflement des fibres repousse le sol, au moins au niveau micro. Puis, à la fin du processus de séchage, les fibres perdent leur humidité et se rétractent presque à leurs dimensions d'origine, laissant des vides très fins autour d'elles. Le gonflement et le rétrécissement d'une fibre naturelle lors du séchage du sol, comme le montre la figure 1, crée des limites dans l'utilisation de fibres naturelles avec des matrices de sol.

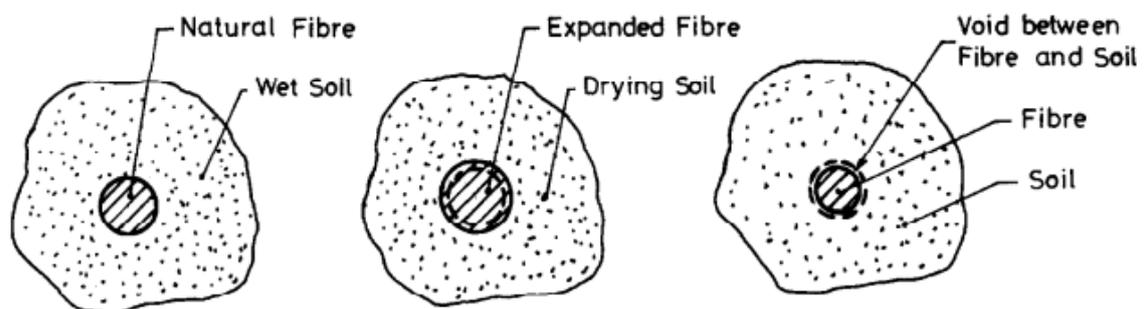


Figure I. 22: Interaction de la fibre de renfort naturelle et du sol en train de sécher.

La résistance au cisaillement, les propriétés cohésives et les forces de frottement de compression apparaissant à la surface de la fibre de renforcement en raison du retrait du sol sont les trois principaux facteurs qui affectent l'adhérence entre les fibres de renforcement et le sol. Comme les fibres de la paume subissent des changements dimensionnels (rétrécissement et gonflement) en raison des changements de teneur en humidité, cela influence les facteurs d'adhérence. Au niveau micro, le gonflement des fibres repousse le sol. Un séchage ultérieur ramène les fibres presque à leurs dimensions d'origine, laissant de petits vides (au niveau micro) entre la fibre et le sol environnant.

Pour améliorer l'adhérence entre les fibres et le sol, un traitement hydrofuge efficace, tel que les matériaux bitumineux. (S.M. Marandi.2008).

1.15.2 Effet des fibres sur les propriétés mécaniques :

Millogo et al. (Millogo,2014), ont étudié la stabilisation d'un sol latéritique par des fibres de kénaf produites au Burkina-Faso dans le cadre de la formulation des blocs d'adobes compressés. Ces blocs ont été renforcés avec des teneurs en fibres de 0,2 à 0,8 % en poids dans deux longueurs (30 mm et 60 mm). Les résultats indiquent que la présence des fibres de kénaf améliore les caractéristiques physiques et mécaniques des blocs. Le meilleur résultat a été obtenu avec l'utilisation de 30 mm de longueur de fibre (Figure 1.22), (Figure1.23).

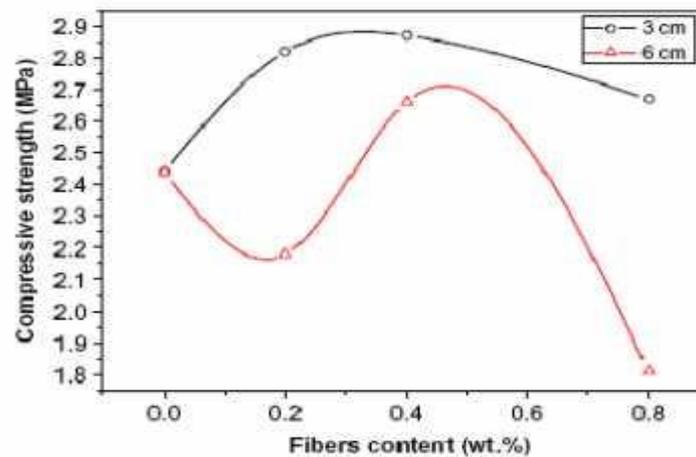


Figure I. 23: Les courbes de la résistance à la compression en

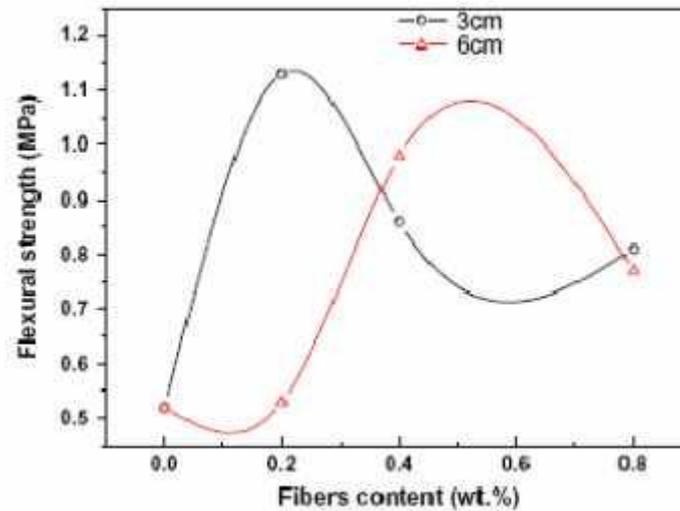


Figure I. 24: Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres (Millogo,2014).

Ils ont justifié l'augmentation des propriétés mécaniques par la non propagation de fissures, due à la présence des fibres dans la matrice d'argile. D'après ces auteurs, l'impact de ces fibres sur la résistance à la flexion est positif en raison de leur résistance à la traction élevée et de leur adhérence à la matrice d'argile. Vergas et al. (Vergas,1986). Ont constaté dans leur étude sur la résistance sismique de la maçonnerie, une augmentation de la résistance à la compression du BTC avec l'utilisation de 0,5-8,0% en poids de paille de longueur 100 mm Ils ont justifié ce résultat par l'action de pontage des fissures créées dans le BTC par les fibres, ce qui limite la formation des microfissures produites par le retrait de séchage, et entrave leur propagation (la rupture brutale du BTC est ainsi évitée). City par (Armel, B, L.2017).

D'après (Enrico, Q.2010) on note que la force d'écrasement en compression la plus élevée appartient au mélange(sole). La paille est faiblement attachée à la matrice moulue, par conséquent, au début du chargement, elle peut glisser et ne pas avoir d'effet positif sur la résistance à la compression.

Dans un travail de recherche publié en 2006 (Sukru ,Y.2006), (Sukru ,Y et al. Se sont intéressés à Les effets de la teneur en fibres sur les propriétés mécaniques des adobes, Ces études montrent que l'ajout de fibres présente plusieurs résultats :

1. La résistance à la compression diminue en augmentant la teneur en fibres ; cependant, la force verte augmente.
2. Les fibres à section circulaire et à structure creuse (paille) présentent un comportement flexible sous les charges et sont facilement dénudées.
3. On pense qu'un mélange d'adobe qui a des propriétés normales a une teneur en argile de 13 à 17% en poids.
4. Pour les mélanges d'adobe normaux, la teneur en fibres doit être limitée à environ 0,5% en poids.
5. Le taux de retrait augmente en augmentant l'argile et la teneur en eau.
6. Lorsque la teneur en fibres augmente, le taux de rétrécissement diminue.
7. La résistance à la traction diminue en augmentant la teneur en fibres à mesure que la résistance à la compression et la longueur unitaire augmentent.
8. Dans les essais de traction, les graphiques résistance-déformation suivent une ligne parabolique lisse. Par contre, cette relation dans les tests de compression suit initialement une ligne plus inclinée.

Preuve d'une étude menée par Tuan (Tuan, A, P.2018) sur l'importance de la fibre sur la déformation. Ses résultats sont les suivants :

La Figure III-4 présente les courbes (σ - ϵ) du mélange A avec 1 % de paille et sans paille à la WOPN (formulation A-1 et A-5). Ces courbes montrent que l'incorporation des fibres confère au matériau une ductilité plus grande que celui non fibré. Cela peut être dû aux liens entre les fibres et le sol qui nécessite une quantité d'énergie plus grande pour la rupture.

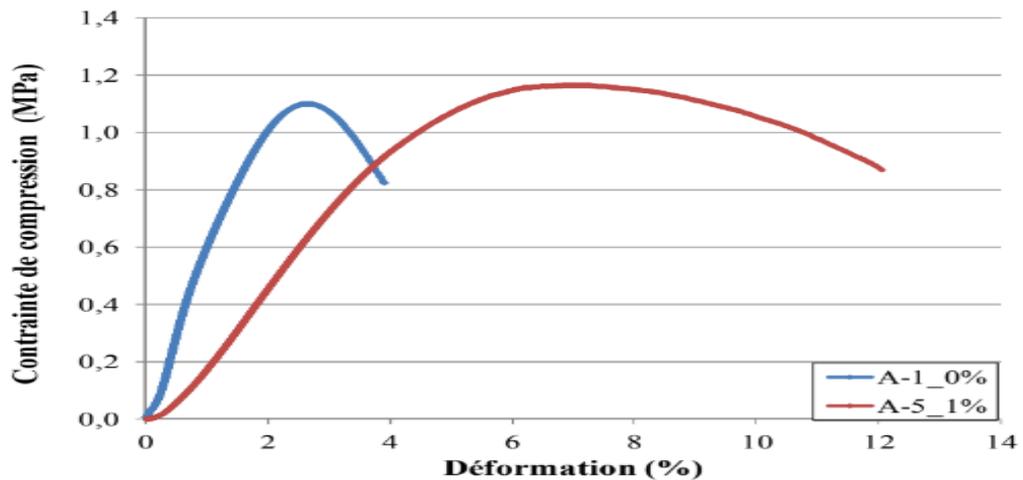


Figure I. 25: Courbe contrainte-déformation du mélange A sans et avec 1 % de fibre à la WOPN (Tuan, A, P.2018)

1.15.3 Effet des fibres sur l'absorption d'eau

Les fibres végétales ont un caractère hydrophile favorisant ainsi l'adsorption d'eau, alors que d'autres types de fibres ont un caractère hydrophobe comme le cas des fibres de polypropylène. Cette forte sensibilité à l'eau des fibres végétales constitue un point faible dans leur utilisation pour la fabrication des produits en terre crue, chose qui a poussé les chercheurs à essayer d'étudier ce problème et d'évaluer son ampleur. (Armel, B, L.2017)

Sallehan et Yaacob, (Sallehan, 2011) ont effectué des tests d'absorption d'eau sur des BTC enrichis de fibres de palme brutes et ont conclu qu'il existait une relation positive entre l'augmentation des fibres et l'augmentation de l'absorption d'eau.

1.16 Conclusion

Dans ce premier chapitre, il a exposé le contexte général de la construction en terre. La construction d'habitations en terre souffre aujourd'hui de préjugés car la terre est méconnue ou mal connue des gens qui ignorent ses propriétés intéressantes. Elle est associée dans les esprits, à un matériau fragile et peu évolué technologiquement.

Certes, la maison de terre n'est pas la meilleure et la seule solution à nos problèmes de développement durable mais mérite d'être étudiée avec beaucoup d'intérêt par de nombreuses personnes.

Dans ce chapitre, nous nous sommes concentrés sur l'utilisation des fibres en général et des fibres naturelles en particulier comme renfort dans les matériaux en terre, soit comme base, soit comme matériau de construction. Dans cette étude, l'attention se concentre sur la stabilisation de l'adobe avec des fibres.

A travers cette recherche bibliographique, on a remarqué que plusieurs travaux de recherches ont confirmé que l'emploi des liants minéraux (chaux) comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des bloques de terre (l'adobe).

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

Chapitre 2 :

Matériaux de l'étude et techniques expérimentales

2.1 Introduction

Grâce à une synthèse bibliographique, nous avons conclu que les phénomènes physico-chimiques jouent un rôle spécifique dans le comportement mécanique et la durabilité de l'adobe. Alors recherchez les articles et procédures à Améliorer la qualité du l'dobe

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu, les caractéristiques des matériaux utilisés, suivies d'une présentation d'ensemble des formulations. En deuxième lieu nous décrivons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour les expériences des résistances mécaniques et durabilité de l'adobe.

2.2 Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés dans cette étude sont : le sol, le sable concassé, la chaux vive, les fibres de surface des palmiers dattiers mâles et les fibres de polypropylène.

2.2.1 Sol

2.2.2.1 Origine du sol

Le sol utilisé provient de la région de Biskra (Algérie), le sol a été choisi en fonction de la région et est disponible sur place.

2.2.2.2 Caractéristiques physiques du sol

Avant de soumettre le sol aux essais, il est écrêté à 2 mm. Houben (Houben, 1994) a indiqué que les éléments les plus fins ne doivent pas être autorisés à former des nodules de taille supérieure à 10 mm ; la présence de 50% des nodules ayant une taille supérieure à 5 mm pourrait réduire de moitié la résistance à la compression. (Taallah,B.2014)

A. Analyse granulométrique par sédimentation

La composition granulaire du sol est déterminée à travers deux essais : l'analyse granulométrique et la sédimentométrie selon les normes NF P 18-560 et NF P 94-057 successivement. Les résultats des essais sont présentés sur la tableau 2.1 et figure2.2

On constate selon la courbe granulométrique du sol, qu'elle se situe bien dans le fuseau limite recommandé par la norme de l'adobe (XP P 13-901). Cette norme recommande pour un sol destiné à la fabrication de l'adobe. Qu'il ne doit pas être trop argileux au risque d'entraîner des fissurations de retrait fragilisant les blocs ($\% 2\mu\text{m} < 30\%$) (figure 2.2).

Tableau 2. 1 Analyse granulométrie d'argile

Analyse par	Diamètre de tamis (mm)	Tamisât %
tamisage	2	99,97
	1	99,805
	0,4	97
	0,2	93,137
	0,1	81,22
	0,08	74,63
sédimentation	0,07	72,192
	0,05	67,8
	0,035	62,3
	0,025	58
	0,018	52
	0,012	47
	0,009	40
	0,006	32
	0,0035	23
	0,0015	19,44

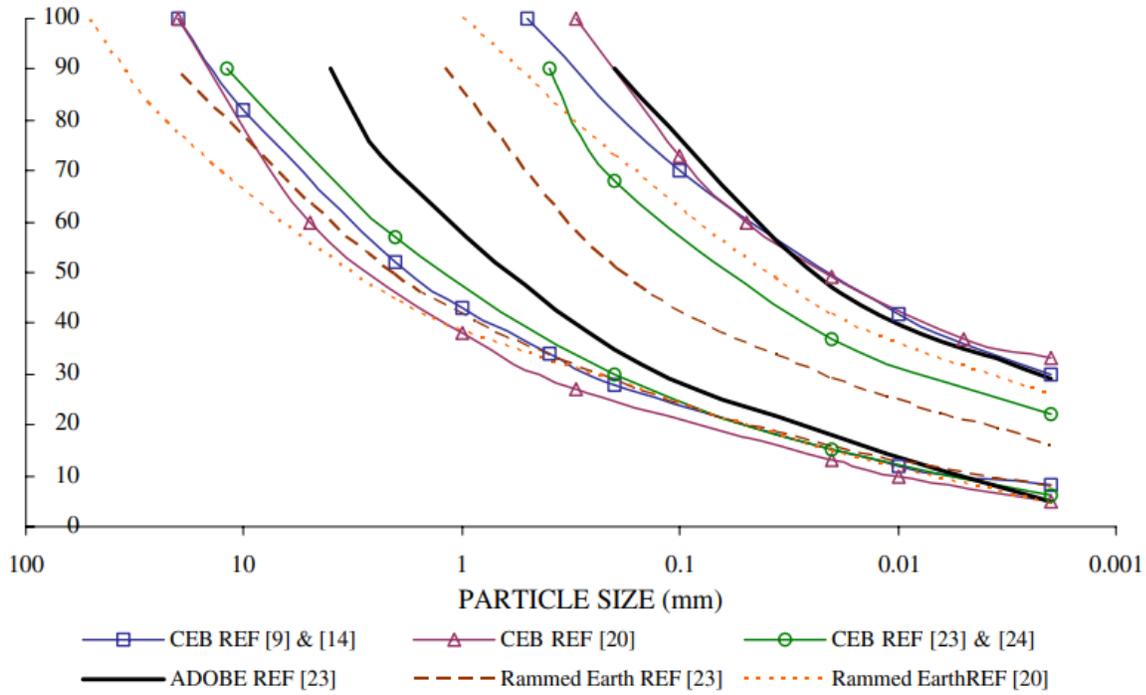


Figure 2. 1 Nomogrammes de granularité indiquant les zones recommandées pour la distribution granulométrique des sols pour les blocs d'adobe, de pisé et de terre comprimée suivante

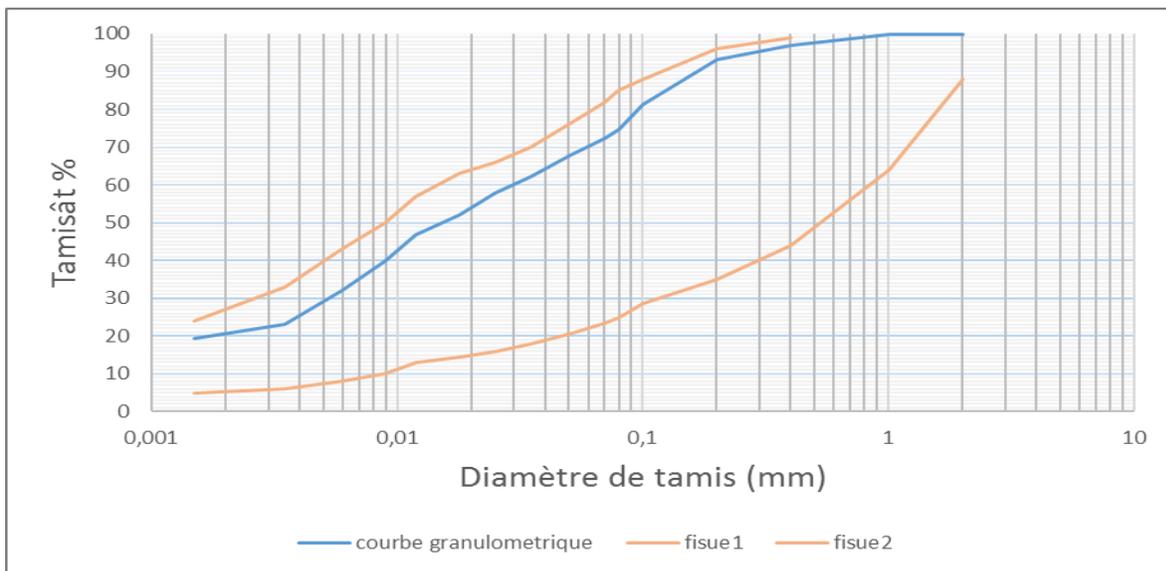


Figure 2. 2 Courbe granulométrique de sol (Fuseau limite à refaire)

B. Les masses volumiques

Le tableau 2.2 montre les masses volumiques apparente et absolue du sol étudié

Tableau 2. 2 Les masses volumiques du sol

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)
1290	2550

La valeur de la masse volumique apparente à l'état sec du sol se situe dans la zone recommandée par (Houben,1994) cité par (Jiménez, 2007) (figure 2.3)

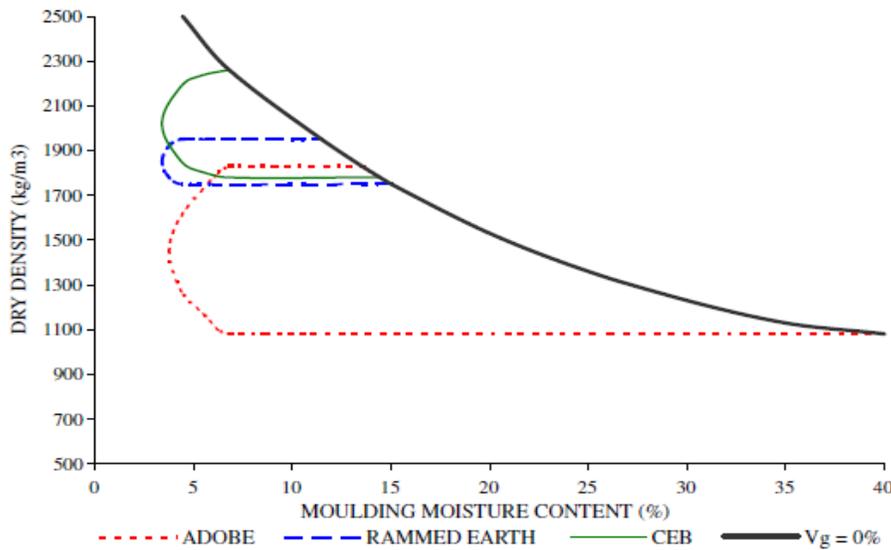


Figure 2. 3 Nomogrammes de compactibilité montrant les zones recommandées de densité sèche /teneur en eau des sols pour l'adobe, la terre battue et les blocs terre comprimée selon Houben et Gullaud

C. Limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg permettent d'analyser les variations de consistance des sols fins en fonction de la teneur en eau. Comme pour la granularité, des études statistiques ont été faites afin de définir les limites d'Atterberg les mieux adaptées pour les blocs de terre et de prévoir rapidement les possibilités constructives d'un sol (Doat, 1979). Les essais définis par

Casagrande s'effectuent sur le mortier de sol ($d < 0,4 \text{ mm}$) selon la procédure de la norme NF P 94 051. Les résultats des essais sont présentés sur le tableau 2.3

Tableau 2. 3 Les limites d'Atterberg du sol

Limite de liquidité LL (%)	Limite de plasticité LP (%)	L'indice de plasticité IP (%)
40	19	21

Les résultats obtenus pour notre sol montrent que les limites de plasticité du sol ne sont pas proportionnelles aux limites relatives des masses de terre argileuse (norme XP P 13-901) (Figure 2.4). Il est recommandé que le sol ait un niveau minimum de plasticité qui assure la cohérence entre les granulés du matériau lors de la compression ($\% 2\mu\text{m} > 5\%$).

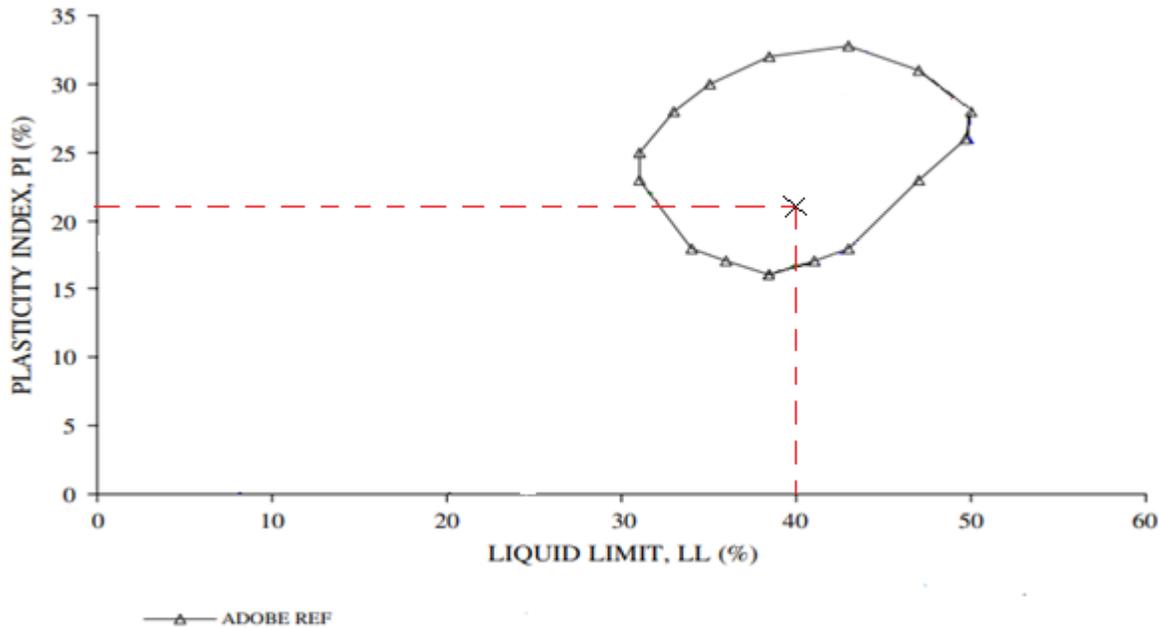


Figure 2. 4 Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901)

2.2.2.3 Analyse physico-chimique (Essai au bleu de méthylène dit essai à la tache (ANF P 18-592)) :

L'essai au bleu de méthylène permet d'apprécier globalement l'activité de la fraction argileuse d'un sol en mesurant la surface interne et externe des grains argileux. Pour ce faire, on fixe sur les grains d'argile des molécules de bleu de méthylène et par test simple, on évalue la quantité de bleu fixé. On en déduit la valeur au bleu du sol, ou VBS, qui est un indicateur essentiel dans la classification des sols concernés par les travaux de terrassement.

Les résultats de l'essai de bleu de méthylène sont résumés dans le tableau 2.6

On distingue la valeur suivante : (Classification du sol)

$VBS \leq 0,2$: sols sableux (sol insensible à l'eau).

$0,2 \leq VBS \leq 2,5$: sols limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau).

$0,25 \leq VBS \leq 6$: sols limono-argileux, (sol de plasticité moyenne).

$0,6 \leq VBS \leq 0,8$: sols argileux.

$0,8 \leq VBS$: sols très argileux

Tableau 2. 4 Valeur du bleu de méthylène

Echantillon	Valeur du Bleu VBS	Classification du sol
Sol de Biskra	6,5	sols argileux

2.2.2 Sable concassé

Le sable utilisé dans tous les mélanges des blocs est un sable concassé (0/3) provenant des carrières de la région de Biskra (Algérie). Il a été utilisé essentiellement pour la correction granulaire du sol. Les caractéristiques physiques du sable déterminées selon les normes AFNOR, sont présentées sur le tableau 2.7. La composition granulaire du sable est représentée sur la figure 2.3.

Tableau 2. 5 caractéristiques physiques du sable déterminées selon les normes AFNOR

M _{Vapp} (kg/m ³)	M _{Vabs} (kg/m ³)	Distribution de la taille des grains (%)			M _f
		0.01-0.08 mm	0.08-1.25 mm	1.25-5 mm	
1445	2600	3.25	62.83	33.92	3.08

M_{Vapp} : Masse volumique apparente ;

M_{Vabs} : Masse volumique absolue ;

M_f : Module de finesse

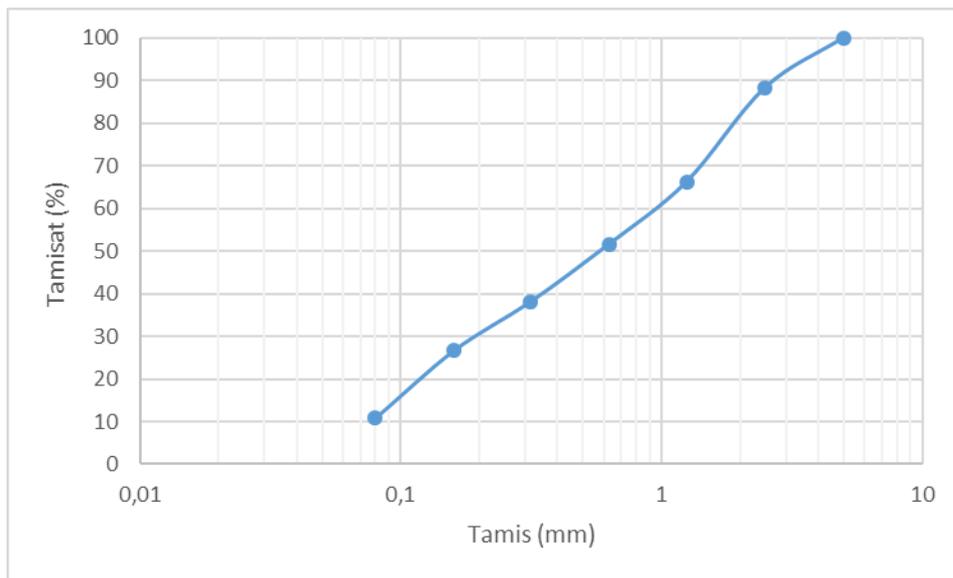


Figure 2. 5 La courbe granulométrique du sable concassé

2.2.3 La chaux

Tous les types de chaux sont à employer en principe dans la stabilisation du matériau terre destiné à la construction, la préférence est néanmoins donnée aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques. La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de moins 20 % (Doat, 1979).

Dans cette étude on a utilisé la chaux vive produite par l'unité de chaux de Saida (Algérie). La composition chimique de la chaux vive, selon la fiche technique élaborée par l'unité de production, est présentée dans le tableau 2.11.

Tableau 2. 6 La composition chimique de la chaux vive (Selon la fiche technique élaborée par l'unité de production de chaux de Saida, Algérie)

Oxides	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Teneurs (%)	1.35	82.77	10.63	1.83	3.27	0.11	0.151	0.064

2.2.4 L'eau

L'eau utilisée dans les mélanges est une eau qui contient peu de sulfate et ayant une température de 20 ± 1 ° C. Sa qualité est conforme aux exigences de la norme NFP 18-404.

2.2.5 Fibres

2.2.2.4 Fibres de palmier dattier

Dans cette étude, les fibres de surface du palmier dattier mâle (FSPDM) ont été utilisées, et ce type de fibre émergera du tronc du palmier mâle sous forme de tissu à partir des fibres qui peuvent être séparées avec de l'eau et généralement d'un diamètre de 0,1 à 0,8 et découpées en 1,4 mm, la longueur des fibres est contrôlée selon l'étude Dans cette étude, nous avons pris la même longueur de fibres de polypropylène afin de fixer la longueur et d'étudier les variables.



Figure 2. 6 Le life après son arrachement du palmier dattier



Figure 2. 7 Les fibres résultant de la décomposition du life



Figure 2. 8 Les fibres découpées en morceaux

2.2.2.5 Caractéristiques des Fibres de Palmier Dattier

Les essais effectués sur les fibres par Mr KRIKER et Mr ABBANI ont permis de caractériser les fibres de palmier dattier de Ouargla comme suite dans le tableau 2.9 (KRIKER A ,2005), (ABANI S. 2003)

Tableau 2. 7 Les caractéristiques physiques et mécaniques des fibres utilisées.

Masse volumique apparente	$\rho_a = 512.21 - 1088.81 \text{ Kg/m}^3$		
Masse volumique absolue	$\rho_s = 1300 - 1450 \text{ Kg/m}^3$		
Résistance à la traction [MPa]	L=100mm	L=60 mm	L=20 mm
	170 ±40	240 ±30	290±20
Déformation à la rupture	$\epsilon = 0.232$ (fibre de diamètre 0. 8 mm)		
Taux d'humidité	w = 9.5 - 10.5 %		
Taux d'absorption en eau (après 24H)	TA = 96.83 - 202.64 %		
Diamètre (des fibres utilisées)	d = varié entre 0.1 - 1 mm		

2.2.2.6 Compositions minéralogique des Fibres de Palmier Dattier

Les résultats de la spectroscopie chimique de la poudre de fibre après calcification à 400 ° C par M. KRIKER montrent ce qui suit : (KRIKER A ,2005)

Tableau 2. 8 Analyse minéralogique de la poudre des fibres de dokar calcinées à 400 °C

Elément	SiO2	Al2O3	Fe2O3	MnO	MgO	CaO	Na2O	K2O	TiO2	P2O5	PF
%0	48.04	6.12	2.51	0.05	4.88	14.2	1.81	2.8	0.42	0.45	18.08

Avec PF : Perte au Feu.

Nous constatons que les fibres utilisées contiennent un taux remarquable de la SiO2 et de CaO.

2.2.6 Les fibres de polypropylène

Les fibres utilisées sont des fibres de polypropylène (figure 2.8) commercialisées par la société algérienne « GRANITEX ». Les caractéristiques générales des fibres sont données sur le tableau 2.11.

Tableau 2. 9 Les caractéristiques générales des fibres de polypropylène (d’après la fiche technique de GANITEX).

Longueur de la fibre (mm)	24
Densité	0.9
Point de fusion (°C)	150
Allongement à la rupture (%)	50
Section de la fibre (microns ²)	30



Figure 2. 9 Les fibres de polypropylène

2.3 Formulation des blocs

2.3.1 Matériels spécifiques

Les éprouvettes prismatiques (10x10x10) cm³ ont été réalisées pour les essais de compression, gonflement, Absorption les éprouvettes de (5x10x20) cm³ pour les essais de flexion, dans des moules en acier (Figure 2.9),(Figure 2.10).



Figure 2. 10 Moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes prismatiques (10x10x10) cm³



Figure 2. 11 Moule utilisé pour la fabrication des éprouvettes prismatiques (5x10x20) cm³

2.3.2 Mélanges

D'après Michel (Michel, 1976), les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Cela nécessite un séchage préalable du sol. Alors, après avoir séché le sol et le sable dans l'étuve pendant 24 h à 65 °C, les matériaux (sol + sable + liant) sont d'abord mélangés à sec puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur à ciment de 5 litres avec une vitesse de 139 tr/min.

Finalement on procède à l'ajout des fibres en faisant le malaxage manuellement. Le matériau est mis en place dans le moule juste après le malaxage.



Figure 2. 12 mélangés à sec



Figure 2. 13 un malaxeur

Pour la préparation des mélanges, on s'est basé aussi sur l'étude réalisée par Guettala et al. (Guettala, 1997), qui a montré que la concentration du sable dans le bloc de terre a peu d'influence sur la résistance mécanique, mais des dosages entre 25 % 40 % ont données les meilleurs résultats. Par suite, on a introduit 30 % de sable concassé dans tous les mélanges utilisés dans cette étude.

Le poids du mélange global sec pour chaque bloc est maintenu constant durant toutes la composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur la (figure 2.13).

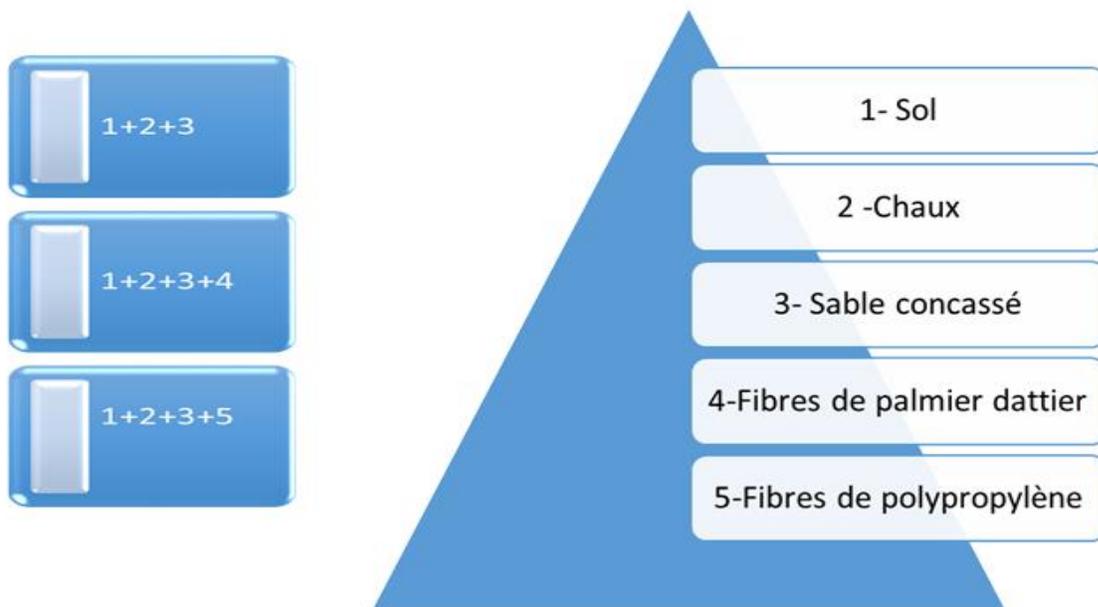


Figure 2. 14 Combinaison des mélanges des blocs

Tableau 2. 10 Composition des différents mélanges employés dans cette étude

Numéro du mélange	Sol (%)	Sable concassé (%)	Fibres (%)		Chaux (%)
			Fibres de palmier dattier	Fibre de polypropylène	
	par rapport au mélange sec (sol-sable)		par rapport au mélange sec global		
01	70	30	0	0	13
02	70	30	0	0	13
03			0.2		
04			0.4		
05			0.6		
06	70	30	0	0	13
07				0.2	
08				0.4	
09				0.6	

2.3.3 Optimisation à la tenue en chaux

On va discuter de l'effet de la chaux à travers les résultats de la variation de la résistance à la compression sèche en fonction de la teneur en chaux qui sont présentés sur la figure 2.14.

D'après cette figure, on constate que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux de 1 jusqu'à 13 mais après de 13% on constate une réduction de la résistance

Pour l'interprétation des ces résultats, on s'est basé sur l'étude de Millogo. (MILLOGO, Y.2008) réalisée sur les briques d'adobe stabilisées à la chaux. D'après les auteurs, l'augmentation de la résistance est due à la formation d'une importante quantité de CSH devant une faible quantité de calcite et de pentlandite, alors que la réduction de la résistance est due la quantité de calcite et de pentlandite plus importante que celle de CSH. City par (ATTIA, G.2019)

Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en général des dosages de 6 à 12 %. On notera qu'une proportion optimale de chaux existe pour chaque type de terre (Houben, 2006). City par (ATTIA, G.2019)

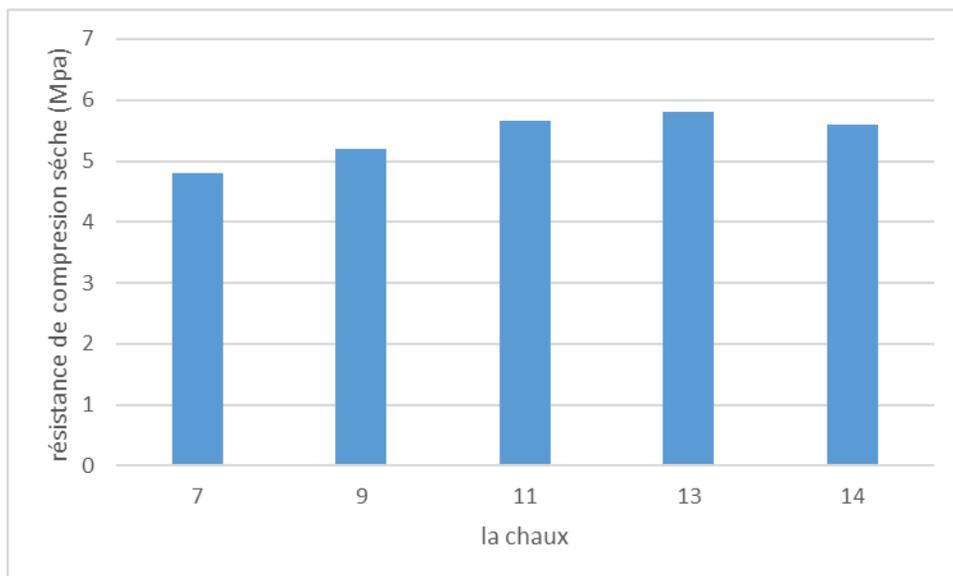


Figure 2. 15 Optimisation à la tenue en chaux des mélanges

2.3.4 Optimisation à la tenue en eau des mélanges

L'objectif de ce travail est de confectionner une brique de terre crue facile à mouler, mais avec le moins d'eau possible dans le mélange, en vue de limiter la fissuration et réduire la porosité ce qui va se répercuter sur la résistance mécanique. Ceci exige que les mélanges doivent être préparés à l'état plastique, avec ou sans déchets, en prenant en considération la présence de la chaux vive et le sable concassé.

La teneur eau initiale est déterminée à travers les limites d'Atterberg issues des résultats de caractérisation du sol (Figure 2.15) :

Les résultats obtenus sont comme suit :

- $W_L=40$: limite de liquidité : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique.
- $W_P=19$: limite de plasticité : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide.

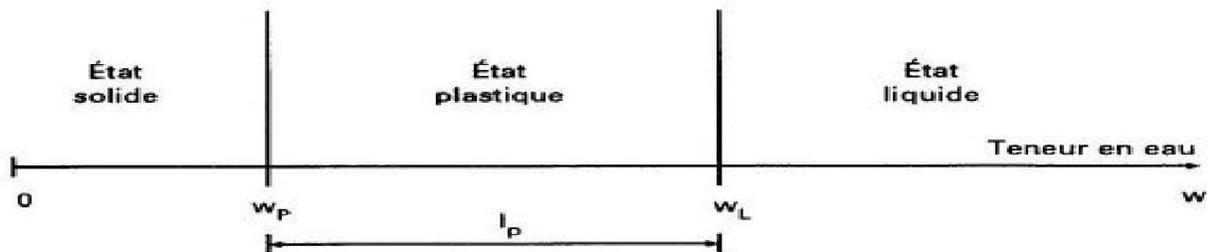


Figure 2. 16 Présentation des limites d'Atterberg

- L'appréciation de l'état du mélange de sol a permis de prendre $W_L+W_P/2=29.5$ comme teneur en eau initiale.

-L'ajout d'un liant au sein du sol provoque une modification de sa teneur en eau. Cet effet est plus sensible avec la chaux qu'avec les liants hydrauliques.

- après l'essai de la maniabilité montre $w = 32$ idéal, dans le mélange plastique.

2.3.5 Codification des mélanges

Les mélanges utilisés lors de cette étude sont codifiés dans cette thèse afin de faciliter la lecture. Le système de codification retenu est composé d'un groupe de lettres majuscules, à titre d'exemple, BXSF désigne un Bloc de terre à base de chaux sans fibres. La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le tableau 2.13

Tableau 2. 11 Codification des mélanges.

Code	Désignation
BXSF	Bloc de terre à base de chaux sans fibres
BXPD	Bloc de terre à base de chaux avec fibres de palmier dattier
BXPP	Bloc de terre à base de chaux avec fibres de polypropylène

2.3.6 La cure des blocs

La résistance d'un sol-liant croît avec l'âge, tout comme le béton. Cependant tous les types de sols n'ont pas le même comportement, mais une période de traitement de 7 jours est nécessaire.

Pendant cette période, on maintiendra le matériau en atmosphère humide, à l'abri du soleil, en prenant garde au vent, ceci afin d'éviter un dessèchement trop rapide. Dans les conditions de conservation réelles, les blocs doivent être protégés avec du plastique durant les premiers jours avant leur utilisation.

Après le démoulage, le bloc est pris manuellement avec précaution, en évitant de toucher les arêtes à cause de la fragilité du bloc, il est ensuite couvert d'un film en plastique de manière à

assurer son étanchéité. Pour favoriser au maximum l'hydratation du liant, le bloc est conservé au laboratoire à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 24 heures avant d'être curer à l'étuve pendant :

- 4, 6,jours, pour étudier l'effet de temps de cure sur la résistance à la compression des blocs de terre crue stabilisée à chaux vive, en se basant sur les études de Bell (Bell,1996), Al-Mukhtar et al. (Al-Mukhtar,2010) et Millogo et al. (Millogo,2012). Qui ont constaté qu'un sol stabilisé à la chaux soumis à une cure à température élevée accélère la réaction pouzzolanique, et cause par suite un développement rapide de la résistance mécanique.

- 7 jours à $65 \pm 2^\circ\text{C}$, toujours couvert par un film en plastique (pour l'ensemble de l'étude.

Enfin, une fois la période de la cure terminée et avant que l'adobe ne soient soumis aux tests, ils doivent être séchés au four jusqu'à obtenir une masse stable.

2.4 Propriétés mécaniques

On s'intéresse dans cette étude à déterminer les caractéristiques mécaniques suivantes : la résistance en compression du l'adobe à l'état sec et à l'état humide par le biais de l'essai de compression simple, et la résistance à la traction sèche en réalisant l'essai de traction par fendage. Pour chaque essai, trois blocs ont été testés.

En raison de la disponibilité limitée des normes du l'adobe, nous avons utilisé les normes de BTC.

2.4.1 Essai de compression simple

2.4.1.1 Résistance à la compression sèche

Cet essai permet de déterminer la résistance nominale en compression simple des blocs de terre crue (l'adobe) selon la norme XP P 13-901.

La résistance à la compression est donnée par la formule :

$$\mathbf{R_c = 10*(F/S)}$$

Où :

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

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

S : Surface moyenne des faces d'essai en cm²

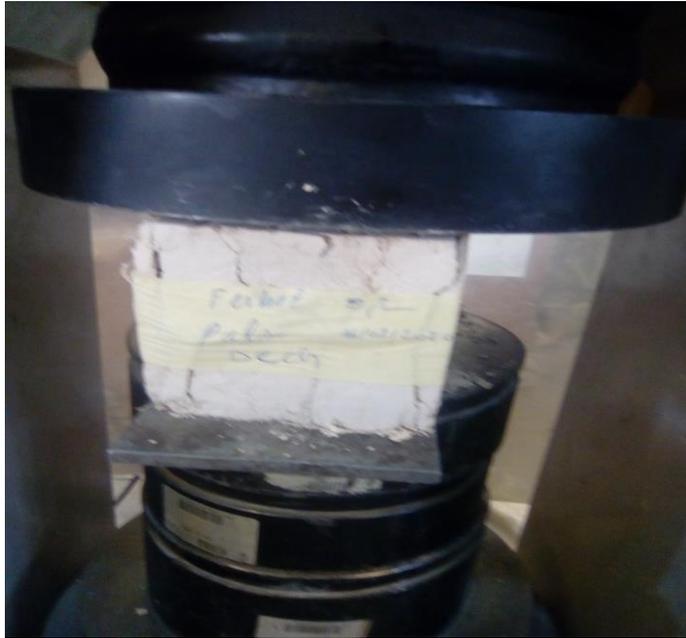


Figure 2. 17 Le bloc après écrasement

2.4.1.2 Résistance en compression à l'état humide

Les blocs humides ont des caractéristiques mécaniques (résistance à la traction et à la compression) plus faibles qu'à l'état sec. Il est donc utile de les tester à l'état humide afin de connaître leurs caractéristiques minimales dans le cas le plus défavorable.

Cet essai est identique à l'essai de résistance à la compression sèche, excepté le fait que le bloc sont immergés complètement dans l'eau durant deux heures (XP P 13-901).



Figure 2. 18 Immersion du l'adobe dans l'eau

2.4.2 Essai de traction

Cet essai permet de déterminer la résistance la résistance en flexion des blocs de terre crue (l'adobe) selon la norme NF EN 12390-5, La position de l'éprouvette est comme la figure2.19

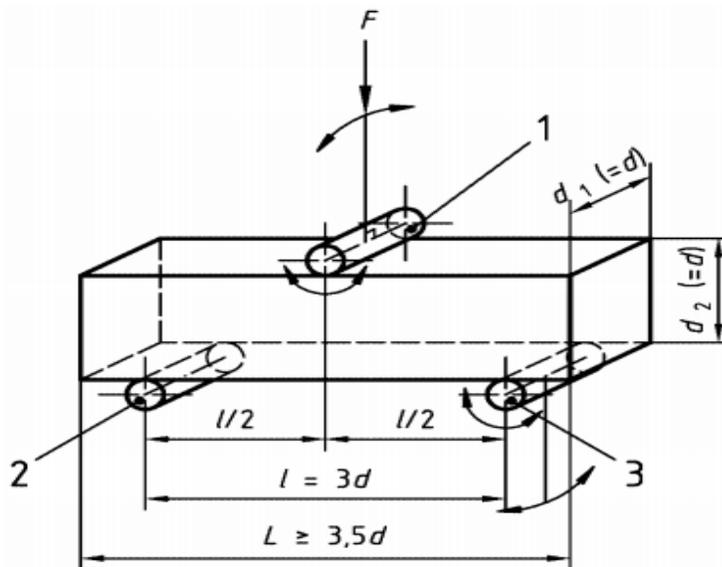


Figure 2. 19 La position de l'éprouvette selon la norme NF EN 12390-5

La résistance à la flexion est calculée par la relation suivante :

$$F_{cf} = (3.F.l) / (2. d_1.d_2^2)$$

F_{cf} : est la résistance en flexion, en mégapascals (newtons par millimètre carré) ;

F : est la charge maximale, en newtons ;

l : est l'écartement entre les deux rouleaux d'appui, en millimètres ;

d1 et d2 : sont les dimensions de la section transversale de l'éprouvette ;

2.5 Propriétés physique

2.5.1 Gonflement

La mesure du gonflement de l'adobe 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 2.20.
- mesurer la distance entre plots : l_0 .
- Placer les blocs dans un bac d'eau selon la figure 2.20.
- Après 96 heures d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 min, puis mesurer la distance entre plots : l_1 .
- L'amplitude du gonflement de chaque bloc est donnée par la formule suivante :

$$\Delta l_g \text{ (mm/m)} = (l_1 - l_0) / l_0 \quad (2.4)$$

l₀: la distance avant immersion

l₁: la distance après immersion

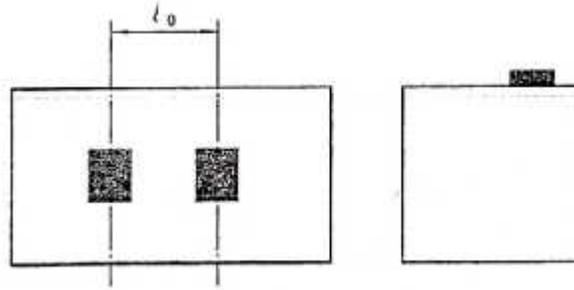


Figure 2. 20 Blocs pour mesure du gonflement (norme XP 13-901)

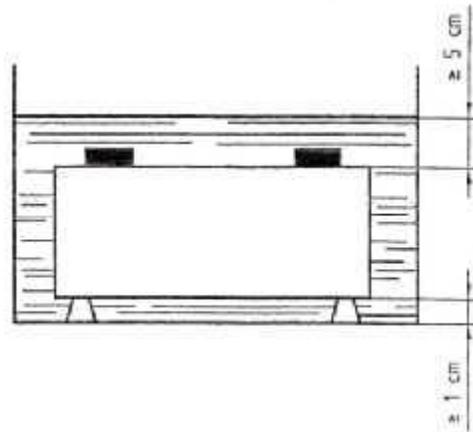


Figure 2. 21 L'immersion des blocs pour mesurer le gonflement (norme XP 13-901)

2.5.2 Absorption totale

Cet essai consiste à immerger le bloc dans un bac à eau pendant des durées différentes :

1, 2, 3 et 4 jours, et mesurer l'augmentation du poids Ph par rapport au poids du bloc à l'état sec Ps.

L'absorption totale est déterminée par la formule suivante

$$A \% = (Ph - Ps) \cdot 100 / Ps$$



Figure 2. 22: l'immersion de l'éprouvette

2.6 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques des différentes matières premières qui entrent dans la composition du l'adobe fibrés développés dans cette étude. Il s'agit de la terre et de stabilisants : le sable concassé, la chaux et les fibres. Les fibres utilisées dans cette étude sont d'origine végétales (fibres de palmier dattier mâle) et synthétiques (fibres de polypropylène).

Les données de ce chapitre ont été présentées à partir de la bibliographie ou des essais de caractérisation menés au cours de notre étude.

Les résultats des différents essais réalisés seront présentés et discutés dans le chapitre suivant (chapitre 3)

CHAPITRE 3 :
PRÉSENTATION ET
DISCUSSION DES RÉSULTATS

CHAPITRE 3

Présentation et discussion des résultats

3.1. Introduction

La synthèse bibliographique a mis en évidence les besoins d'expérimentation pour étudier l'effet du type de fibres sur les propriétés de l'adobe. Dans ce cadre, ce chapitre est e but, l'étude de l'effet de la présence des fibres sur :

❖ **L'effet sur les propriétés rhéologiques :**

- La maniabilité à la table à secousse.

❖ **Les propriétés mécaniques :**

- La résistance à la compression sèche RCS.

- La résistance à la flexion 3 points RFS.

❖ **Les propriétés physiques :**

-La masse volumique apparente.

-L'absorption totale à l'eau.

-Le gonflement.

Il faut signaler que l'étude de l'influence de la cure sur les propriétés mécaniques de l'adobe à base de chaux a été réalisée, en vue de faire un bon choix de temps de cure pour le reste de l'étude.

Dans cette étude expérimentale, outre le matériau terre et le sable concassé, une teneur en chaux vive de 13 % (déterminée par optimisation) et deux types de fibres (les fibres de palmier dattier mâle, les fibres de polypropylène) en trois teneurs (0,2,0,4,0,6 %) du poids du mélange sec, sont utilisés.

Mais il faut signaler que le manque de temps pour finaliser le programme expérimental élaboré, vu les circonstances de la pandémie du COVID19, on n'a pas pu faire l'ensemble des essais pour l'adobe à base de fibres de polypropylène, comme ceux qu'on a fait pour le cas des fibres de palmier dattier.

3.2. Effet de la teneur en chaux sur la résistance à la compression sèche

La figure 3.1 présente la variation de la résistance à la compression sèche en fonction de la teneur en chaux.

D'après cette figure, l'augmentation de la teneur en chaux de 7 % à 13 % a conduit à une augmentation de la résistance de l'ordre de 17,24%, alors qu'avec une augmentation de la teneur en chaux de 13 % à 14 % on observe une réduction de la résistance de 3,44 %.

Dans la première étape à 7% à 13% de chaux, l'augmentation de la résistance à une teneur en chaux <13% est due à la formation d'une grande quantité de CSH devant une petite quantité de calcite et de portlandite (Millogo,2008).

Dans la deuxième étape à 13 à 14% de chaux, la diminution de la résistance lorsque la teneur en chaux dépasse 13% est due à la formation d'une plus grande quantité de calcite et de portlandite que celle trouvée dans le CSH, ce qui entraîne la diminution de la résistance (Millogo,2008).

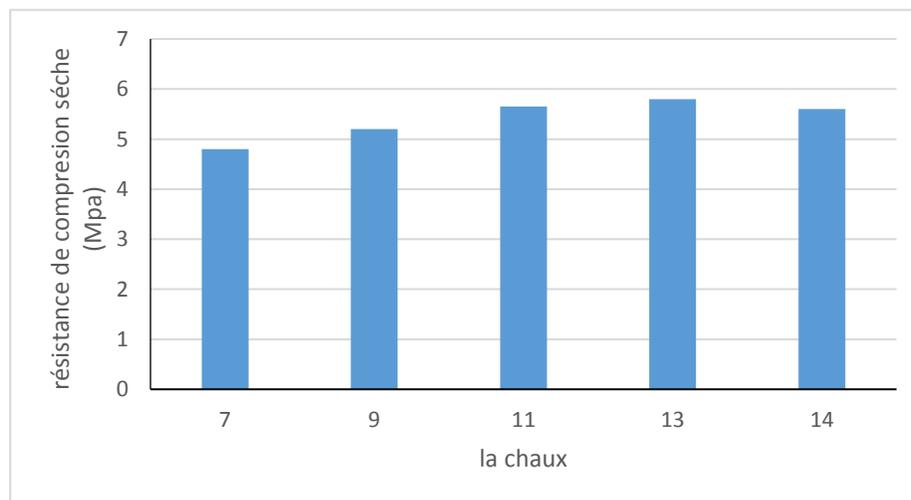


Figure III. 1: la variation de la résistance à la compression sèche en fonction de la teneur en chaux

3.3. Influence du temps de cure sur la résistance mécanique de l'adobe :

La figure 3.2 présente les valeurs de la résistance à la compression sèche du BXSf à base de 13% de pour chaque durée de cure à l'étuve.

L'analyse des résultats présentés sur cette figure montre que la plus faible et la plus grande valeur de la résistance est obtenue pour 1 jour et 7 jours de cure successivement.

D'après la figure 3.2 on voit bien que la RCS augmente avec l'augmentation du temps de cure. On remarque aussi qu'après 5 jours de cure l'évolution de la résistance est atténuée comparativement à la phase précédente. La résistance des blocs après 7 jours de cure dépasse celle des blocs curés à 1.3 et 5 jours de 60,34 %, 34,48 % et 10,34 % successivement.

Cette augmentation de la résistance mécanique en fonction de la durée de cure est attribuée à la formation d'une nouvelle minéralogie, à savoir l'apparition de C-S-H (silicates de calcium hydratés) en quantités évoluant dans le temps surtout sous une température élevée.

Ces résultats confirment les conclusions de Bell (Bell, 1996) et Milogo et al. (Milogo, 2012). Bell a constaté que la résistance à la compression confinée augmentait avec l'augmentation du temps de cure. Aussi, Milogo et al. (Milogo, 2012) ont montré que la résistance à la compression et à la traction augmente avec la durée de la cure, prouvant, selon eux, que la réaction pouzzolanique est étroitement liée à la durée de cure.

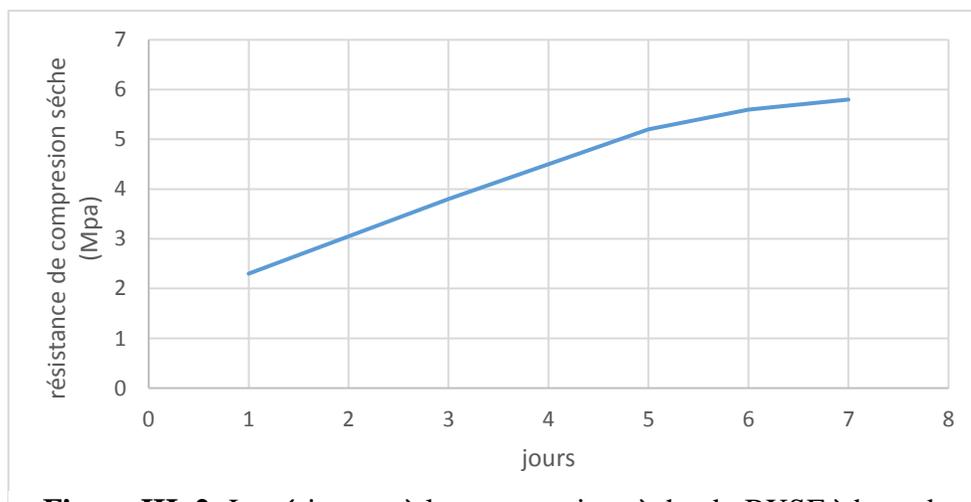


Figure III. 2: La résistance à la compression sèche du BXSf à base de

3.4. Effet de la teneur en fibres sur la masse volumique de l'adobe :

La composition, le mélange, le durcissement, etc. sont parmi les critères les plus importants pour la masse volumique. Les mesures de la masse volumique des adobes à base de 13 % de chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibre sont montrées sur la figure 3.3 et 3.4, On voit bien d'après la figure 3.3 et 3.4 qu'il y a une réduction de la masse volumique sèche avec l'augmentation de la teneur en fibres pour les deux types de fibres BXPD et BXPP.

Comparativement à au bloc de référence (sans fibres), la masse volumique des blocs à base de fibres de palmier dattier diminue avec les taux 1,83%, 2,94%, 3,62% et 4,10% pour les teneurs en fibres de 0,2%, 0,4%, 0,6% et 0,8% respectivement. Même constat pour les fibres de polypropylène, la masse volumique des blocs à base de fibres de polypropylène diminue avec les taux 1,23%, 2,39%, 3,06% et 3,86% pour les teneurs en fibres de 0,2%, 0,4%, 0,6% et 0,8% respectivement.

Mais malgré cette observation, il faut noter que la diminution de la sévérité du BXPD par rapport au BXSf est insignifiante ; Par rapport à la baisse de densité la plus faible, elle correspond à 0,8% dans les fibres, soit 4,10%, Ces résultats sont cohérents avec les études menées par Taalah bachir (Taalah, B.2014).

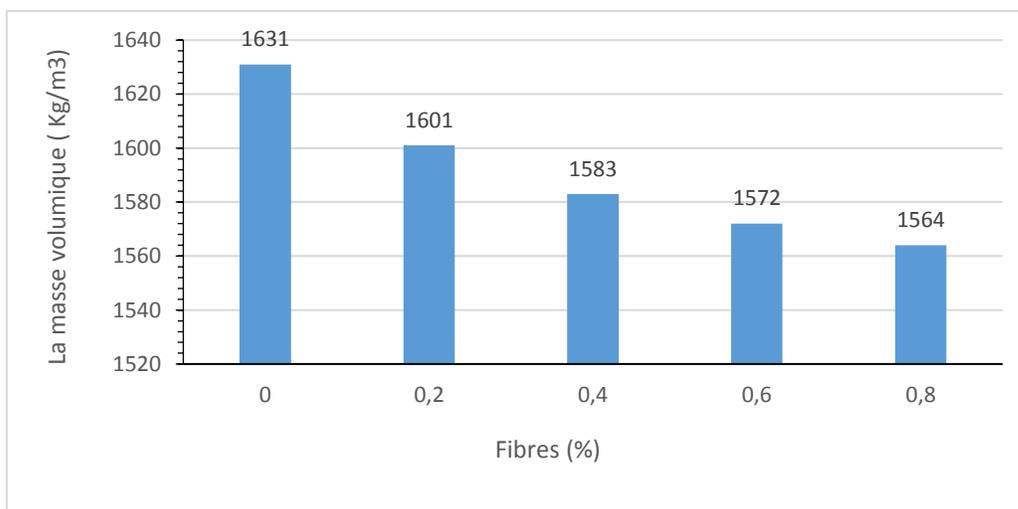


Figure III. 3: La masse volumique de l'adobe à base de 13% de chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres BXPP

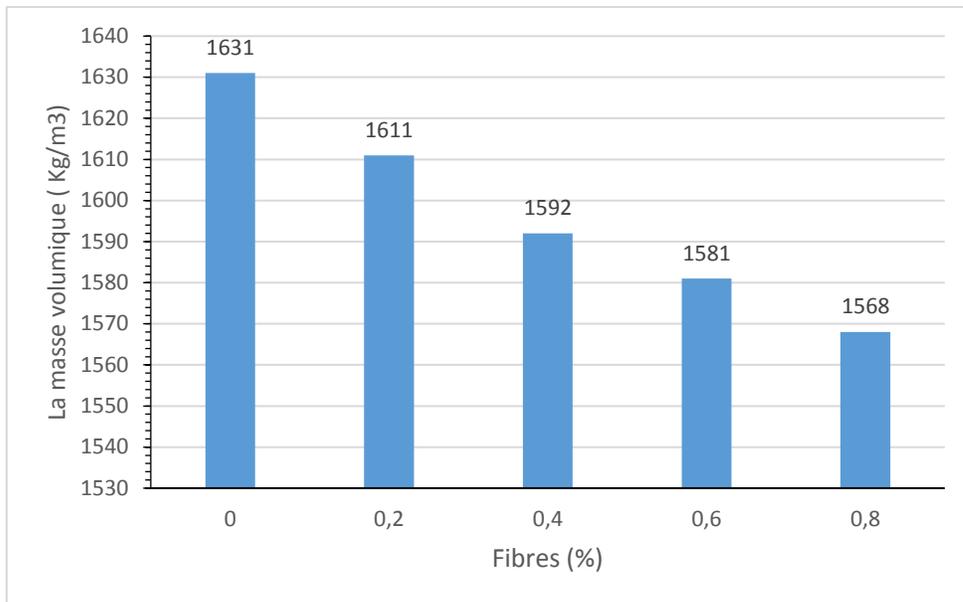


Figure III. 4: La masse volumique de l'adobe à base de 13% de chaux curé 7 jours à l'étuve en fonction de la teneur en fibres BXPD

3.5. Effet de la teneur en fibres de palmier dattier sur les propriétés mécaniques de l'adobe :

Dans cette partie l'étude s'est focalisée sur le bloc de terre à base de chaux et deux types de fibres.

3.5.1 La résistance à la compression sèche :

L'effet de la variation de la teneur en fibres sur la résistance à la compression sèche du BXPD et BXPL est présenté sur la figure 3.5.

Nous avons fait varier la teneur en fibres de 0,2 % jusqu'à 0,6 % du poids du mélange sec.

On remarque une diminution de la résistance de compression sèche en fonction de l'augmentation la teneur des fibres de 24,15% dans le BXPD et 20,55% dans le BXPP.

On constate aussi que les valeurs de la résistance pour les deux types de fibres sans très proche, malgré que les fibres de polypropylène sans plus résistante en traction que les fibres de palmier, ceci peut s'expliquer par la quantité d'eau en excès pour les blocs BXPP puisque les fibres de polypropylène sont hydrophobes, ce qui augmente la porosité dans les BXPP comparativement au BXPD.

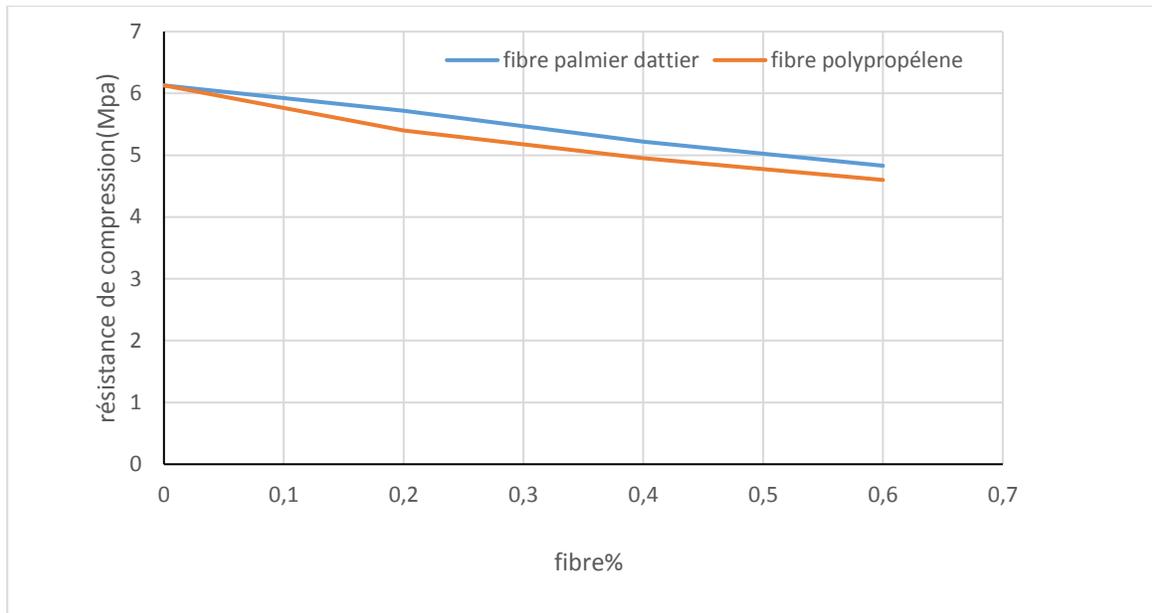


Figure III. 5: la variation de la teneur en fibres sur la résistance à la compression sèche du BXPD et BXPP

3.5.2 La résistance à la compression humide à base de chaux

La détermination de la résistance à la compression humide contribue à l'étude du degré d'insensibilité de l'adobe à l'eau en présence des fibres et en utilisant des stabilisants chimiques (chaux). On présente sur la figure 3.6 les résultats de la variation de la résistance à la compression humide du BXPD et BXPP en fonction de la teneur en fibres.

La figure 3.6 présente les valeurs de la résistance à la compression humide du BXPD et BXPP à base de 13% de pour chaque pourcentage des fibres.

Nous avons fait varier la teneur en fibres de 0 % jusqu'à 0,6 % du poids du mélange sec. On remarque une diminution de la résistance de compression humide en fonction de l'augmentation de la teneur des fibres avec les taux 32,07% et 28,30% pour le BXPD et le BXPP successivement.

La figure 3.7 illustre la variation du rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance à la compression humide (RCS / RCH) du BXPD et BXPP en fonction de la teneur en fibres. On voit bien que le rapport RCS / RCH augmente avec la teneur en fibres.

De manière générale, le rapport RCS / RCH est inférieur à 2, qui est la valeur limite à ne pas dépasser.

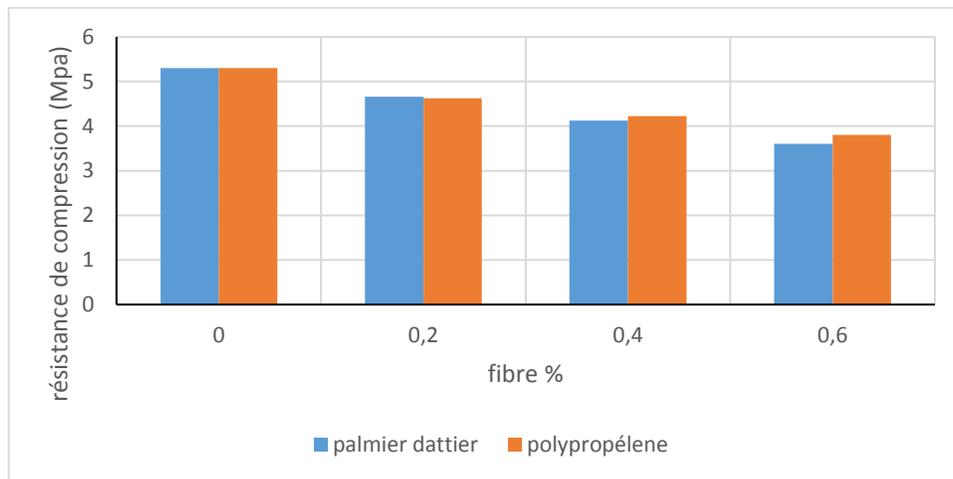


Figure III. 6: la variation de la teneur en fibres sur la résistance à la compression humide du BXPD et BXPP

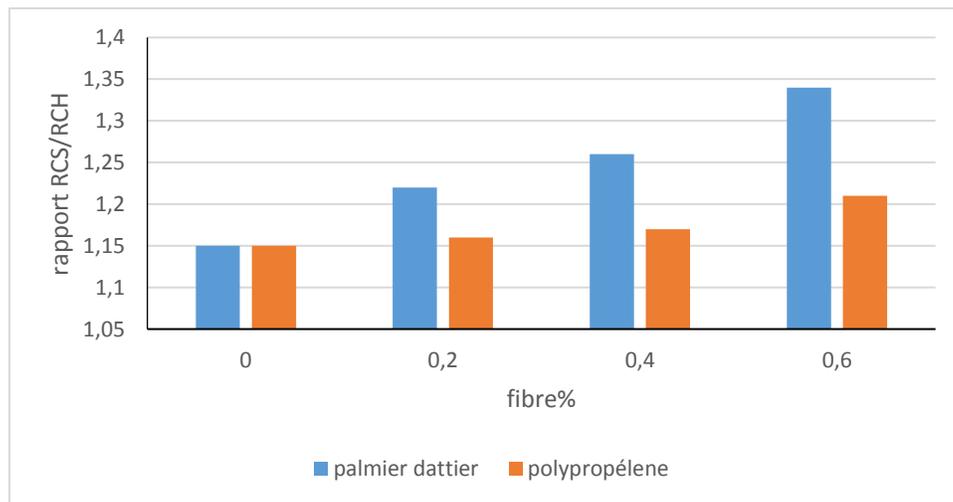


Figure III. 7: Rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance humide (RCS/RCH) du BXPD et BXPP en fonction de la teneur en fibres

3.5.3 La résistance à la flexion sèche

Dans la figure 3.8 on observe, en variant la teneur en fibres de palmier dattier et polypropylène, que la résistance à la flexion sèche du BXPD et BXPP, on remarque une faible augmentation de résistance à la flexion pour les deux types de fibre (BXPD, BXPP) et augmentation de résistance de flexion avec l'augmentation de fibre.

On note que l'ajout de fibres de polypropylène a donné de meilleurs résultats que les fibres de palme, car il a donné un résultat supérieur de 6,89% aux fibres de palme dans une teneur de 0,6%, Cela est dû aux propriétés des fibres en termes de résistance à la traction, car les fibres de polypropylène ont une plus grande résistance de traction que les fibres de palmier dattier.

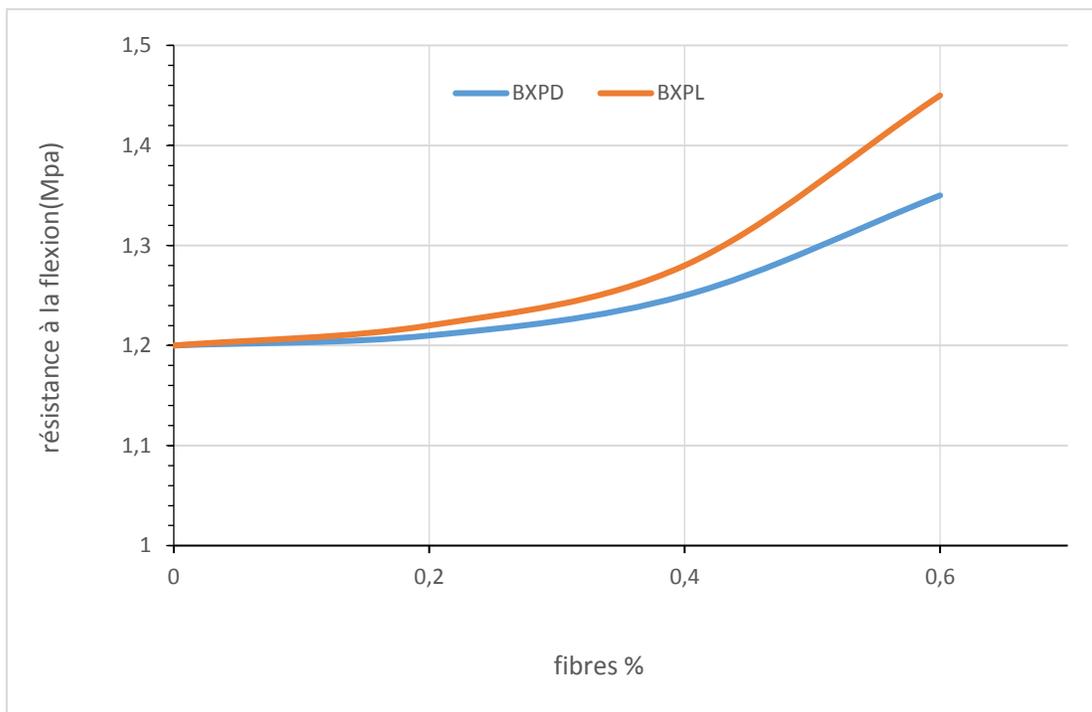


Figure III. 8: Résistance à la flexion sèche du BXPD et BXPL curé 07 jours au l'étuve en fonction de la teneur en fibres

3.6 L'absorption totale de l'eau du l'adobe à base de chaux et de fibres de palmiers dattiers

L'absorption totale de l'eau est une propriété importante qu'on peut utiliser pour le contrôle du volume total des vides (Kerali, 2001). L'absorption totale est obtenue après l'immersion de la brique dans un bac à eau pendant 24 heures.

La figure 3.9 illustre la variation de l'absorption totale à l'eau du BXPB (ATE) en fonction la teneur en fibres après un jour d'immersion dans l'eau, Les résultats obtenus montrent que les valeurs de l'ATE s'étalent entre 12,2 % et 13,3 %, et que la plus grande valeur de l'ATE est enregistrée pour 0,6 % en fibres .Les valeurs les plus élevées de cette expérience étaient dues à la nature hydrophile des fibres de palmier, ce qui entraînait des vides plus élevés. Les valeurs de l'ATE avec la stabilisation à la chaux elles n'ont pas dépassées la valeur maximale permise par l'organisation suisse « International Labour Organisation », qui est 15 % (ILO, 1987).

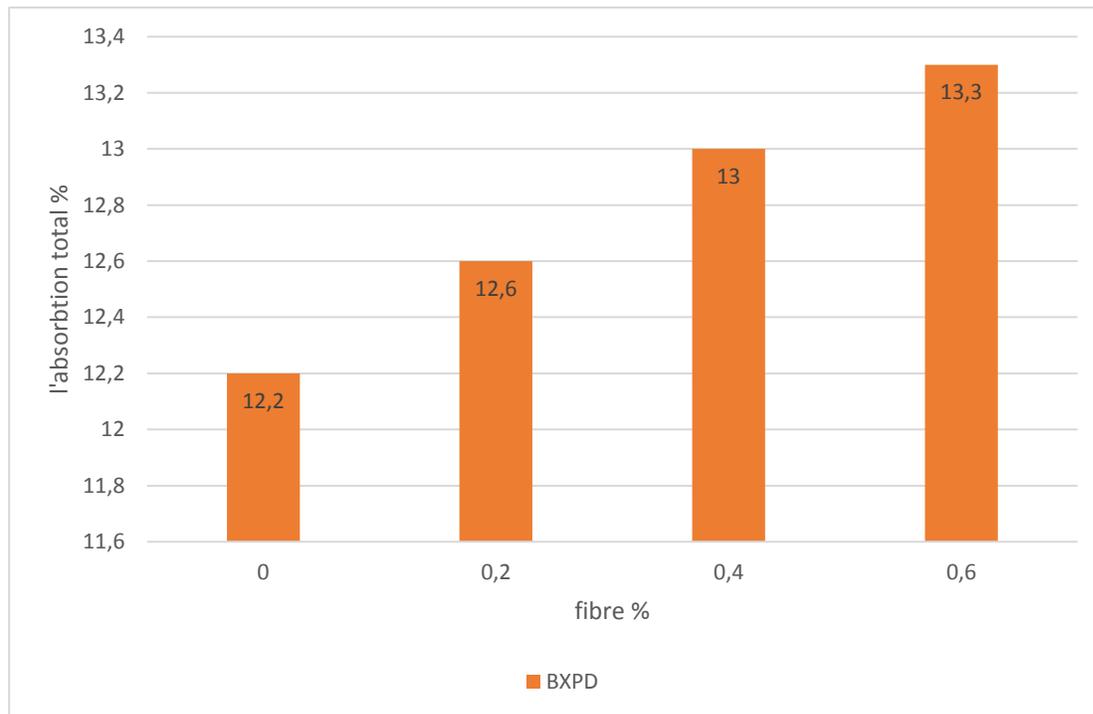


Figure III. 9 :La variation de l'absorption totale du BXPB en fonction de la teneur de fibres après un jour d'immersion dans l'eau

3.7 Le gonflement du l'adobe à base de chaux

Le gonflement dû à l'humidité dans les produits de sol à base de chaux est l'une des caractéristiques les plus importantes pour évaluer la durabilité des constructions en terre.

La figure 3.10 illustre la variation de gonflement du BXPB en fonction de la teneur en fibres. Les résultats obtenus montrent que les valeurs de gonflement pour 0 % est de 0.4 %, et que la plus grande valeur de gonflement est enregistrée pour 0.6 % en fibres avec une valeur de 1.4 %. Ceci est à cause de l'augmentation du volume des fibres engendrées par l'importante augmentation de l'absorption d'eau.

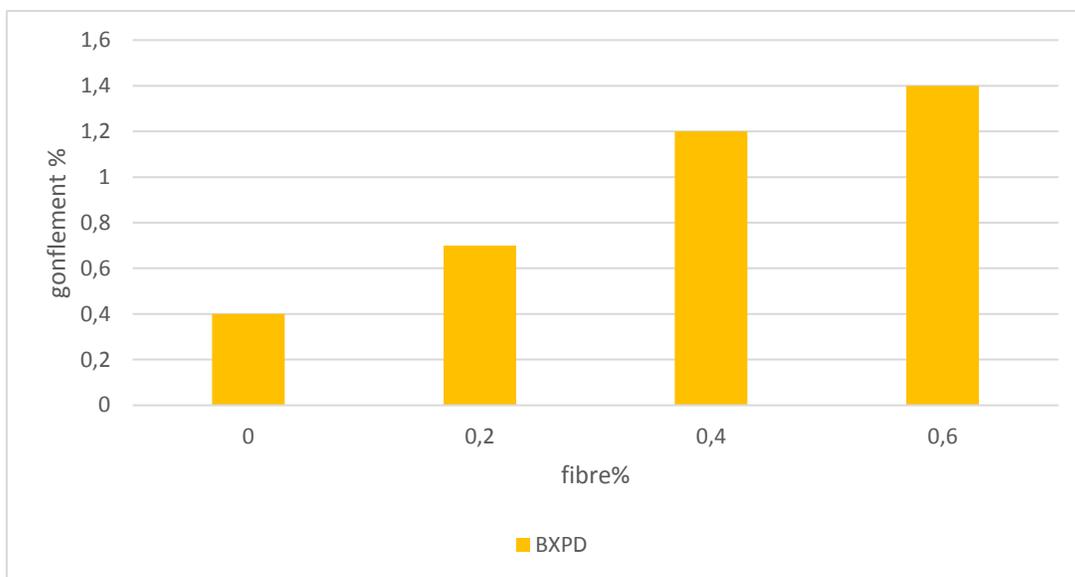


Figure III. 10 :Le gonflement par immersion à l'eau du BXPB en fonction de la teneur en fibres

3.8 Effet des fibres de palmiers dattiers sur les propriétés rhéologiques

3.8.1 La maniabilité à la table à secousse

Selon la norme EN 12-358, cet essai d'étalement est une mesure testant plus particulièrement l'aptitude du l'adobe à s'étaler par écoulement, L'essai est exécuté sur une table à laquelle on peut imprimer des secousses verticales à l'aide d'une manivelle e (Figure

3.12). On démoule sur la table un tronc de cône et on le soumit à une série de 30 secousses, en suite on mesure le diamètre d'étalement $E = (D^2 + D2) / 2$

Avec : D^2 et $D2$ = Diamètre final dans deux axes.

La figure 3.11 illustre la variation d'étalement du BXPD en fonction la teneur en fibres, Les résultats obtenus montrent que les valeurs d'étalement s'étalent entre 11.2cm et 12cm, et que la plus grande valeur d'étalement est enregistrée pour 0 % en fibres. La diminution de l'étalement dans le cas de la présence des fibres est due leur caractère hydrophile et l'enchevêtrement des fibres.

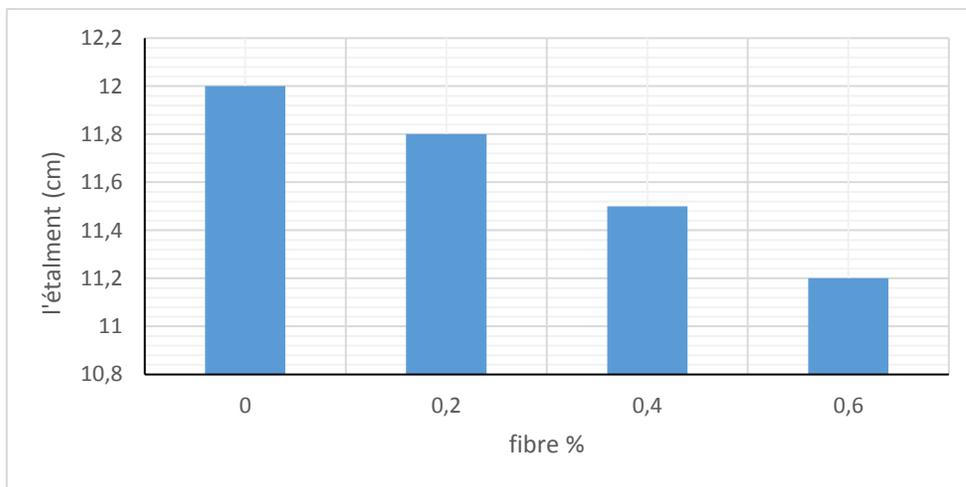


Figure III. 12 :La variation de la maniabilité en fonction la variation des fibres dans BXPD

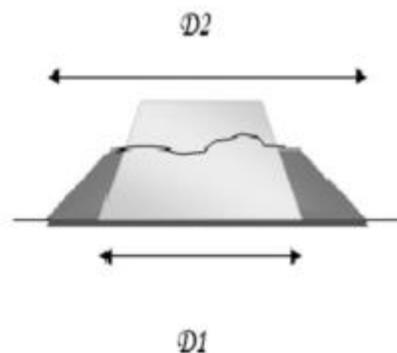


Figure III. 11:Table à secousses et la mesure d'étalement.

3.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'étudier la possibilité d'améliorer les propriétés mécaniques et le degré d'insensibilité à l'eau de l'adobe en incorporant différents types de fibres (naturelles et synthétiques), l'étude a comparé les deux types de fibres

Pour une meilleure stabilisation de l'adobe, on a utilisé de stabilisants chimiques à savoir la chaux, sachant qu'elle est caractérisée par une réaction pouzzollanique lente. Une étude de temps de cure à l'étuve a été élaborée, en vue de réduire le temps de conservation des adobes à base de chaux en attendant qu'ils atteignent une résistance acceptable pour la construction des murs en terre.

Les résultats de cette étude expérimentale nous ont permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- La résistance mécanique de l'adobe fibré à base de chaux augmente avec l'augmentation du temps de cure, et le meilleur résultat a été enregistré après 7 jours de cure à l'étuve;
- Une réduction de la masse volumique apparente de l'adobe avec l'augmentation de la teneur en fibres a été observée.
- L'ajout de fibres a entraîné une légère diminution de la résistance à la compression à sec RCS ;
- L'augmentation de la teneur en chaux de 7% à 13 % a conduit à une augmentation de la RCS de l'ordre de 20 %, alors qu'avec une augmentation de la teneur en chaux de 13 % à 14 % on assiste à une baisse de la résistance de 3.44 %;
- Une baisse générale de la résistance à la compression humide RCH avec l'augmentation de la teneur en fibres pour tous les adobes testés comparativement aux blocs sans fibres ;
- Le rapport de la résistance à la compression sèche sur la résistance à la compression humide pour tous les adobes étudiés n'a pas dépassé 2, qui est la limite recommandée par certains auteurs (Houben,2006);
- la résistance à la flexion augmente avec l'augmentation de fibre ;

- dans l'effet de fibre sur la résistance de compression les fibres de palmier dattier plus favorable par apport les fibre polypropylène ;
- dans l'effet de fibre sur la résistance à la flexion, les fibres de polypropylène plus favorable par apport les fibres de palmier dattier ;
- L'absorption totale d'eau ATE du l'adobe à base de chaux augmente avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier dattier;
- Le gonflement de l'adobe augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre palmier dattier ;
- la maniabilité diminue avec l'augmentation de la teneur en fibre palmier dattier.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

Construire avec la terre brute est l'une des méthodes les plus anciennes de l'antiquité, et cette technologie a été utilisée et développée pour réduire le coût de la construction pionnière dans le domaine du génie civil.

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.

Nous nous sommes intéressés dans cette étude à l'amélioration des propriétés de l'adobe, en exploitant la terre, les fibres végétales, notamment les fibres de palmier dattier et les fibres synthétiques, notamment les fibres de polypropylène. Pour améliorer l'insensibilité à l'eau de l'adobe on a fait appel aux liants, à savoir la chaux. Pour évaluer cette propriété, on s'est focalisé sur l'absorption totale à l'eau et son gonflement après immersion dans l'eau.

Pour atteindre notre but, l'étude est scindée en trois chapitres :

Le premier chapitre est réservé à une synthèse bibliographique, à travers laquelle nous avons réalisé, un état de l'art approfondi sur l'utilisation de l'adobe, et les moyens de stabilisation, en se focalisant sur son renforcement par les fibres d'une manière générale, notamment les fibres végétales, tout en donnant plus d'importance aux fibres de palmier dattier.

Les résultats obtenus par d'autres chercheurs concernant la caractérisation et la sélection des sols pour la production de l'adobe ont également été discutés dans le premier chapitre.

Le deuxième et le troisième chapitre constituent la partie expérimentale de l'étude.

Le deuxième chapitre a été consacré à la caractérisation des nombreuses matières premières utilisées dans ces travaux. Il s'agit de : sol local (région de Biskra), sable concassé (0/3), pour la correction granulométrique, chaux vive, fibres de palmier dattier mâle et fibres de polypropylène.

Le troisième chapitre englobe l'ensemble des résultats obtenus et les discussions. Dans ce chapitre on a étudié l'effet du type de fibre sur les propriétés de l'adobe, à savoir la maniabilité et la masse volumique apparente, la résistance à la compression sèche RCS et humide RCH, la résistance à la flexion sèche, l'absorption totale à l'eau ATE et le gonflement.

Les résultats de l'étude expérimentale nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- la teneur en chaux optimale pour la stabilisation du sol étudié est 13%.
- la résistance mécanique augmente avec l'augmentation du temps de cure, et que le meilleur résultat a été enregistré après 7 jours de cure.
- En analysant les résultats de l'effet de l'incorporation des fibres de palmier dattier mâle et les fibres de polypropylène sur la résistance à la compression sèche de l'adobe à base de la chaux, On a constaté une diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la teneur en fibres. Mais on a enregistré une légère augmentation de la résistance en faveur des mélanges à base de fibres palmier dattier comparativement à ceux des fibres de polypropylène.
- Pour le cas de la résistance à flexion sèche, une augmentation de la résistance avec l'augmentation de la teneur en fibres a été enregistrée, et ce pour les deux types de fibres. Mais cette fois les briques à base de fibres de polypropylène ont présenté des résultats meilleurs que ceux des briques à base de fibres palmier dattier.
- Pour évaluer le degré d'insensibilité à l'eau, Il a été constaté que l'absorption totale d'eau du l'adobe à base de 13% de chaux augmentait avec l'augmentation de la teneur en fibres, L'ATE pour tous les adobes étudiés ne dépassait pas 15%, ce qui est la limite recommandée par certaines normes.
- Le gonflement de l'adobe augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre de palmier dattier mâle.

Enfin, il a été conclu que la présence de fibres dans la fabrication de l'adobe est bénéfique pour le cas de la résistance à la flexion, ce qui se traduit par la réduction du retrait et la limitation de la fissuration.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

A.Y. Nenonene, ''Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage'', thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.

ABANI S. ; « Caractérisation et durabilité des bétons renforcés de fibres végétales de palmier dattier Béton de Fibre de palmier datte. » Mémoire de Magister, Université de Ouargla ; 2003.

Abdo, J. Etude expérimentale de la stabilisation des arènes granitiques à la chaux, chez Thèse, Rennes, CGI, ENSMP, INSA, 1982.

Akpokodje EG. The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. Quarterly Journal of Engineering Geology London, Vol. 18, 1985.

Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C. Applied Clay Science 50, 2010.

American Concrete Institute (ACI), State-of-the-art Report on Fiber Reinforced Concrete, ACI Committee, 544.1R, Detroit Michigan, USA, 1996.

Armel Babatoundé LAIBI '' Comportement hygro-thermo-mécanique de matériaux structuraux pour la 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.

ATTIA Ghania(2019). Mémoire de Master Effet des adjuvants fluidifiants sur les propriétés physiques et mécaniques de la brique de terre stabilisée à la chaux et aux déchets de palmiers dattiers. pp 24. 2019.

Barbosa, N. P., Swamy, N., and Mattone, R. Potentialities of earth construction in latin - america. In International Symposium on Earthen Structures (Bangalore, India, 2007), Interline Publishing, pp. 29–37.

Bell FG. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering Geology* 42, 1996.

Benziouche S. Structure et contraintes de la filière dattes en Algérie. *New Medit*, vol. 11, n° 4, 2012.

BOUDCHICHA Mohamed Réda. Etude de la cristallisation et des propriétés mécaniques et diélectriques de céramiques préparés à partir de kaolin-dolomite. Université El-Hadj Lakhder – BATNA, 2010.

Cai Y, Shi B, Ng CWW, Tang CS. Effect of polypropylene fiber and lime admixture on engineering properties of clayey soil. *Engineering Geology* 87, 2006.

CHICHOUCHE Hamina Makhloufi. Influence de l'ajout pouzzolanique (argile cuite) sur les caractéristiques physico-chimique des ciments. Université de Mohamed Boudiaf de M'SILA. P. 14 -16-17-18, 2006.

Consoli C, Montardo P, Donato M (2004) Effect of material properties on the behavior of sand–cement–fibre composites. *Ground Improv* 8:.

Consoli C, Vendruscolo A, Fonini A, Rosa D (2009) Fibre reinforcement effects on sand considering a wide cementation range. *Geotext Geomembr* 27.

Coopérative des Ouvriers du Bâtiment (C. O. B) « portrait des connaissances sur l' utilisation de la terre stabilisée dans le secteur du bâtiment au Sénégal » 2010.

CRATerre Centre International pour la Construction en Terre, H. GUILAUD, Ecole d'Architecte de Grenoble, *Encyclopédie de Bâtiment Tome 2 Edition Wake* 1997.

CRATerre, H. HOUBEN et H. GUILLAUD, Traité de Construction en Terre, Edition Parenthèses, Marseille, 1989.

CRATerre. GATE. Bloc de terre comprimée. Eléments de base, Eschborn, Allemagne, 28 p, 1991.

D. Nabi Saheb et J. P. Jog, « Natural fibre polymère composites: A review ». Advances in Polymer Technology, (1999), Vol. 18, pp.

Danso, H., Martinson, B., Ali, M., Mant, C., 2015. Performance characteristics of enhanced soil blocks: a quantitative review. Build. Res. Inf. 43, 253–262. <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.933293>.

DEAL Guyane, Document préparatoire au séminaire-formation " Construire en terre crue de Guyane" Organisé par la DEAL Guyane - Ministère de l'Environnement - 11-15 avril 2016 au Lycée professionnel de Balata à Matouri. <file:///D:/les%20thse%20et%20m%C3%A9moire8/Etudes%20des%20propri%C3%A9t%C3%A9s%20des%20g%C3%A9opolym%C3%A8res%20%C3%A9labor%C3%A9s%20%C3%A0%20partir%20des%20kaolins%20de%20TAMAZERT.pdf> .

DJOUHRI M. « Confection d ‘une brique à base de sable de dune » mémoire magister, Université de Ouargla, 2007.

Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, 1979.

Donkor, P., & Obonyo, E. (2015). Earthen construction materials: Assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks using polypropylene fibers. Materials & Design, 83, 813–819.

DROUIN Sylvain. Rôle des argiles dans la préservation et la fossilisation de la matière Organique pétrologène. Université D’ORLEANS. P .24-25-26, 2007.

Enrico Quagliarini *, Stefano Lenci” The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks” *Journal of Cultural Heritage* 11 (2010) 309–314.2010.

F. Michaud, ”Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage” thèse Phd, univ Laval, 2003.

Gaombalet, J. (2004). Modélisation du gonflement des argiles et de ses effets sur les ouvrages de stockage souterrain. Ecole polytechnique. P.30, 2004.

Gernot Minke, 2009. *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhauser.

Ghoumari F. Matériau en Terre Crue Compactée : Amélioration de sa Durabilité à l'Eau.

Guettala A, Guenfoud M. Béton de Terre Stabilisée Propriétés Physico-Mécaniques et Influence des Types d'argiles. *La technique moderne*, 1–2 :21–26, 1997.

Hachem, C. (2017). Contribution à l'Etude des Propriétés Thermo-Mécaniques des Briques en Terre Confectionnée par des Fibres Végétale Locale. (Cas de la ville de Ouargla). UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA.

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

In Mango-Itulamya, L. A. (2019). Valorisation des gisements argileux pour la fabrication des blocs de terre comprimée. Thèse de Doctorat. Université de Liège, Liège. <http://hdl.handle.net/2268/234994>.

Ingold. *Mechanics and concept. Reinforced Earth*, Chapter 2. London: Thomas Telford, 1982, pp 4– 32.

J. M. H. RAMIREZ., “Les mécanismes de fatigue dans les fibres thermoplastiques,” doctorat option : Sciences et Génie des Matériaux, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2004.

Jones M. Mechanics of composite materials. 2nd ed. Taylor and Francis; 1999.

Kaniraj R, Gayathri V. Geotechnical behavior of fly ash mixed with randomly oriented fiber inclusions. Geotext Geomembr; 21:123–149, 2003.

Karine SFAR « T H E FIBER LAB Episode 1 : Les Fibres Chimiques » La Fédération de la Maille, de la Lingerie & du Balnéaire, 2019.

Kerali AG. Durability of compressed and cement-stabilized building blocks. Ph.D Thesis. UK: University of Warwick, school of Engineering, September 2001.

Khosrow Ghavami, “s. Romildo D. Toledo Filho, Normando P. Barbosac. Behaviour of composite soil reinforced with natural fibres 1998.

KRIKER A. ; « Caractérisation des fibres de palmier dattier et propriétés des bétons et Mortiers renforcés par ces fibres en climat chaud sec », Thèse de Doctorat d’Etat, ENP ; 2005.

Lahouari, M. (2016). Synthèses et Caractérisations de Poly (oxyde de propylène) et Polystyrène / Montmorillonite Nanocomposites.

Le Roux A. Contribution à l’étude du traitement à la chaux des matériaux argileux. Thèse de doctorat Université des Sciences d’Orsay ; 106 p, 1969.

Li, G.X., Chen, L., Zheng, J.Q., Jie, Y.X. Experimental study on fiber-reinforced cohesive soil. Shuili Xuebao/Journal of Hydraulic Engineering 6, 31–36 (in Chinese), 1995.

Ling I, Leshchinsky D, Tatsuoka F. Reinforced soil engineering: advances in research and practice. Marcel Dekker Inc.; 2003.

Locat, J., M.A. Bérubé, Choquette, «Laboratory investigations on the lime stabilization of sensitive clays: shear strength development. » Canadian Geotechnical journal, n° 127, pp. 294 - 304, 1990.

Iptra l' ESTAQUE Marseille « fiche technique mur en brique de terre crue » Collegiul Tecnic Buzau mai,2010.

M. ROKBI, "Comportement a la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibres de verre," Mémoire de magistère, Centre universitaire mohamed boudiaf de m'sila, 2001.

MacLeod, D. The case for improving the performance of indigenous earth dwellings in rural south africa. Tech. rep., Agrément South Africa, 2002.

Mckenzie RC. The classification of soil silicates and oxydes. In: Soil components vol. 2 ; Inorganic components. Gieseking J. E. eds. Spring-Verlag, New York, Berlin, Heidelberg, pp.1-25,1975.

MEKKI Lakhdar. Méthodologie d'essai et techniques d'identification des paramètres de comportement des sols fins soumis à des cycles de sécheresse prolongée (application aux argiles expansives de m'sila). Université Mohamed Boudiaf M'SILA. P .6-7-10 ,2006.

Meukam P. ; Thèse de doctorat « Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments » université de Yaoundé 2004.

MEUKAM, P. (2004). CARACTERISATION DE MATERIAUX LOCAUX EN VUE DE L'ISOLATION THERMIQUE DE BATIMENTS. UNIVERSITE DE YAOUNDE I.

Millogo Y, Morel JC, Ouedraogo R. Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction. Construction and Building Materials 26, 663–669, 2012.

MILLOGO,Y.Thèse de doctorat «Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques :

application au génie civil (bâtiment et route) » UNIVERSITE DE OUAGADOUGOU, Burkina Faso ; 2008.

Minke, G. (2006). Building with Earth Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser - Publishers for Architecture, Berlin. 198 p.

MITCHELL JK. Fundamentals of soil behavior, 2ème edition, John Wiley and sons, New York, 437 pp, 1993.

Nassima, M. CMemoire de Magister Epuration des eaux usées : l'élimination des micropolluants dans les eaux usées par un matériau argileux. In Thèse. Université Mohammed Chérif Messaadia Souk Ahras ;2012.

Negoudi Abdelhakim, Khinech Sayah. Etude de comportement mécanique des composites biosourcés , 2015.

Nguyen T. ; Thèse de doctorat « Etude du comportement au Feu des Maçonneries de Briques en Terre-Cuite : Approche expérimentale et Modélisation du risque d'écaillage » ;2009.

Ouarda, I. Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des briques de terre comprimée. Thèse de Doctorat. Université Mohamed khayder biskra ;2016.

Pedro G. Les minéraux argileux, 47-64, dans pédologie. 2-Constituants et propriétés du sol. Eds. Duchaufour Ph. et Southier B. Masson, Paris, France, 665p, 1994.

Perret P. «Contribution à l'étude de la stabilisation des sols fins par la chaux : étude globale du phénomène et applications,» chez Thèse, Rennes, INSA, 1977.

Pierre D. « Les adobes » 2015.

Puppala J, Musenda C. Effects of fiber reinforcement on strength and volume change behavior of expansive soils. trans res boa. In : 79th Annual meeting, Washington, USA ; 2000.

Quoc-Bao, B. Stabilité des structures en pisé : durabilité, caractéristiques mécaniques. Institut National des Sciences Appliquées De Lyon, 2008.

R. Sridhar et al. A Review on performance of coir fiber reinforced sand. Article in International Journal of Engineering and Technology · February 2017.

Richard-Philippe Wafer. Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.) (Issue 2005). UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, 2010.

Rigassi V. Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995.

ROUAG HICHEM. Fabrication de fibre technique nanocomposite à base de polymère Thermoplastique (PET), UNIVERSITE SETIF-1-, 08p, 2014

S.M. Marandi, M.H. Bagheripour, R. Rahgozar, and H. Zare. "Strength and Ductility of Randomly Distributed Palm Fibers Reinforced Silty-Sand Soils" American Journal of Applied Sciences 5 (3): 209-220, 2008 ISSN 1546-9239, 2008.

Sabry, M.M.A. and Parcher, J.V., 1979. Engineering properties of soil-lime mixes. Proc. ASCE J. Trans. Eng. Div., 197, TE1, 25-35.

Salehan I, Yaacob Z. Properties of laterite brick reinforced with oil palm empty fruit bunch fibers. Pertanika J Sci Technol; 19(1), 2011.

SBIAI A. Matériaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier ; effet de l'oxydation au tempo. thèse de doctorat, INSA de Lyon, 2011.

Structure d'une fibre végétale. Disponible sur :

«http://mpronovost.ep.profweb.qc.ca/BIONP1/tech_stof_cellulose_01.gif . consulté le : 05/04/2014.

Sukru Yetgin , Ozlem C, AVDAR, Ahmet C, avdar” The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes”,2006.

Taallah, B. (2014). Etude du comportement physico-mécanique du bloc de terre comprimée avec fibres. http://thesis.univ-biskra.dz/1173/1/Geni_civil_d4_2014.pdf

Thèse de Doctorat, INSA de Lyon,France, 1989.

Tuan Anh PHUNG "Formulation et caractérisation d'un composite terre-fibres végétales : la bauge " THÈSE Pour obtenir le diplôme de doctorat. Université de Caen Normandie,2018.

United Nations. « Earth Construction Technology». United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p,1992.

V. K. Thakur, « Green composites from natural resources ». CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business,2014.

V. Rigassi, Compressed Earth Blocks. Manual of Production, vol. 1, Vieweg, Eschborn, Germany, 1995.

Vidal. The principle of reinforced earth. Highway Res. Record No. 282 : 1– 16, 1969.

VOLHARD, F, La Construction en Terre–Paille, Ancien Matériau Nouvelle Technique, Edition CRATerre, Grenoble, 1991.

PERSPECTIVES

Perspectives

1. Amélioration de l'adhérence entre les fibres et une matrice en terre stabilisée.
2. Etude des propriétés thermiques du bloc de terre avec les fibres.
3. Etude de la durabilité du bloc de terre avec les fibres.