



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



UNIVERSITE AMAR THLIJI-LAGHOUAT

Faculté de Génie civil et D'architecture

DEPARTEMENT de Génie Civil



Présenté pour l'obtention du diplôme de Master

En : Génie Civil

Spécialité : Matériaux en Génie Civil

Thème

**Caractérisation physico-mécanique
d'un béton écologique à base de terre
et de fibres végétales de sisal**

Présenté par

Hadouara Azzeddine

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Azzouz Lakhdar	Pr.	Président
Gueddouda Mohamed Kamel	Pr.	Examineur
Djoudi Amina	MCA.	Encadreur
Nouioua Tahar	MAA.	Co-Encadreur

Promotion : Septembre 2023

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

*A celle qu'elle a veillée sur moi pendant toujours,
ma chère mère,*

A mon très cher père,

A toute ma famille, mes frères, mes sœurs,

A tous mes amis

*A tous les enseignants du département de Génie
Civil.*

H.AZZEDDINE

Remerciement

A la lumière de la fin de ma promotion, et comme les coutumes l'exigent et le devoir l'impose et D'abord, volontiers je dévoue mes sincères remerciements à ceux qui ont consacré et procurer leur temps précieux, leur énergie et leurs moyens pour que je sois ici présent aujourd'hui et en ce moment.

Il ne sera jamais suffisant d'exprimer mes reconnaissances et remerciements via ces mots simplistes, alors que ça serait une empreinte morale aggravé dans ma mémoire qui composera une partie de ma personnalité.

Il s'agit du soutien de tout genre de mes parents et mes frères, de mes amis,

Mon immense gratitude à Mlle Dr Djoudi Amina et Mr Dr Nouioua Tahar, mes directeurs de mémoire et pour m'avoir confié ce travail, dont j'apprécie la qualité de ses orientations et ses comportements dignes d'es encadreur, ses bonnes attentions et ses sérénités.

A joindre mes cordiales salutations et remerciements aux membres du jury qui m'ont honoré de bien vouloir juger ce travail :

- *Pr. Azouz Lakhdar : président*
- *Pr. Guedouda Mohamed.k: examinateur*

Conscient, aussi, de l'effort et de l'intérêt et encouragements qui m'ont été réservé pour la réussite de cette thèse de la part de tous les professeurs du département de Génie Civil.

En addition, mes vives et parfaites convictions sont allouées aux personnels du laboratoire de Génie Civil de l'assistance et l'accompagnement sans hésitation qui m'ont porté, pendant la durée de la réalisation de mon travail de laboratoire.

Pour Achever mes grâces, permettez-moi messieurs d'attirer votre attention que la réussite d'un travail est une culture de sincérité de confiance et de collaboration.

Tables des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I : Etude bibliographique

1. Introduction.....	4
2. Historique.....	4
3. La terre, un matériau de construction.....	6
3.1. Définition.....	6
3.2. Composition.....	6
4. Les argiles.....	7
4.1. Définition.....	7
4.2. Structure.....	7
4.3. Principaux types d'argile.....	9
5. Techniques de construction en terre.....	9
5.1. La bauge.....	10
5.2. Le Pisé.....	10
5.3. Béton de terre comprimée (BTC).....	11
5.3.1. Caractéristiques de quelque type de brique de terre crue.....	11
6. Stabilisation.....	12
6.1. Définition.....	12
6.1.1. Stabilisation physico-chimique.....	13
6.1.2. Stabilisation physico-mécanique.....	13
6.2. Moyens de la stabilisation.....	13
6.2.1. Méthodes de compression.....	14
6.3. Stabilisation à la chaux.....	14
6.3.1. Généralités.....	14
6.3.2. Dosage.....	15
6.4. Renforcement par les fibres.....	15

7. Les fibres.....	16
7.1.Les fibres végétales.....	16
7.1.1. Les fibres de Feuilles.....	17
a). L'abaca.....	17
b). Les fibres de sisal.....	18
c). Fibre de palmier	19
d). Les caractéristiques physiques et mécaniques des quelque fibres végétales.....	20
7.1.2. Propriétés écologiques des fibres végétales.....	20
8.L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des bétons de terre comprimée....	21
8.1. Effet des fibres sur les propriétés mécaniques.....	21
8.2. Effet des fibres sur l'absorption d'eau.....	23
8.3. Effet des fibres sur les propriétés thermiques.....	23
9.Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites renforcés par des fibres végétales.....	24
9.1 Traitement des fibres	25
9.2 Modification de la matrice.....	25
10.Conclusion.....	26

Chapitre II : Techniques expérimentales et caractéristiques des matériaux utilisés

1. Introduction	27
2. Essais d'identification physique.....	27
2.1. Masse volumique	27
2.1.1. Masse volumique apparente.....	28
2.1.2. Masse volumique absolue.....	28
2.2. Analyse granulométrique.....	29
2.3. Equivalent de sable (NF P 18-598).....	30
2.4. Limite d'Atterberg (NF P 94-051).....	31
2.4.1.Principe de détermination des limites de consistance.....	31
2.5.Essai de Proctor	34
2.5.3. Essai de Proctor Normal.....	35
2.5.4. Essai de Proctor Modifié.....	35

2.6. L'absorption d'eau.....	36
3.Essais chimiques.....	36
3.1.EssaisBleuMéthylène.....	36
4.Essais Mécaniques.....	37
4.3. Résistance à la compression simple (NF P 98-232-1).....	38
4.4. Résistance à la traction (NF P 98-232-3).....	39
4.5. Propriétés mécaniques des fibres.....	40
5. Observation au microscope électronique à balayage "MEB".....	41
6. Caractéristiques des Matériaux Utilisées.....	42
6.1. Argile.....	42
6.2. Sable de dune.....	48
6.3. Fibres de sisal.....	51
6.4. La Chaux.....	57
6.5. Eau de gâchage	58
7. Formulation et préparation des éprouvettes de mortier de terre.....	59
8. L'essai d'absorption d'eau pour BTCF.....	61
9. Conclusion.....	61

Chapitre III : Résultats et interprétations

1. Introduction	63
2. Effet de la longueur et la teneur en fibres de sisal sur les propriétés mécaniques du BTCF	65
2.1. La résistance à la compression.....	65
2.2. La résistance à la traction par fendage.....	67
3. Effet de la longueur et la teneur en fibres de sisal sur les propriétés physiques du BTCF	69
3.1. La Masse volumique	69
3.2. L'absorption d'eau.....	70

4. Etude la microstructure équipée d'une microanalyse des matrices de fibres de sisal étudiés".....	71
5. Conclusion.....	74

CONCLUSION GENERALE	75
----------------------------------	-----------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	77
---	-----------

ملخص

يلعب التصميم الهيكلي الأخضر والتنمية المستدامة دورا مهما في صناعة البناء والتشييد، تعتبر مواد البناء البيئية مثل خرسانة التربة، التي تحتوي على نسبة من المكونات البيئية المختلفة، ذات أهمية كبيرة اليوم.

الهدف من إنتاج هذه الخرسانة هو تقليل استهلاك الإسمنت وبالتالي تقليل إنتاج CO2

، لتوفير حلول لتجنب استنزاف الموارد الطبيعية مثل الركام وتقليل استهلاك الطاقة في عملية

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير دمج ألياف نبات السيزال على الخواص الفيزيائية والميكانيكية للقوالب المضغوطة المتكونة من الطين، الجير ورمل الكثبان.

تم استخدام ألياف السيزال بطولين (30 مم، 40 مم) بنسب مختلفة (0.5%، 1%، 1.5% و 2%) في هذه الدراسة.

أظهر تحليل النتائج أن هناك زيادة طفيفة في مقاومة الانضغاط للمركبات المدروسة لنسبة 1.5% من الألياف، وتزداد مقاومة الانحناء بشكل كبير مقارنة بالخرسانة الضابطة بدون ألياف، وتقل الكثافة مع النسبة المئوية وطول الألياف بينما يزداد امتصاص الماء للمركب قليلا مع كمية وطول الألياف المستخدمة.

أثبتت الرابطة البنينة فعاليتها وذلك راجع لطريقة انكسار الألياف التي صادفناها

أخيرا، تم العثور على توافق كيميائي جيد بين خرسانة التربة وألياف السيزال وفقا للملاحظات بواسطة المجهر الإلكتروني الماسح.

الكلمات المفتاحية: التربة، رمل الكثبان الرملية، الرابط الهيدروليكي، قوالب التربة المضغوطة، السلوك (BTC) الميكانيكي، ألياف السيزال، الجير.

ABSTRACT

Green structural design and sustainable development play an important role in the construction industry. Ecological construction materials such as earth concrete, containing a proportion of various ecological components, are of great importance today.

The objective of the production of this concrete is to reduce the consumption of cement and therefore the production of CO₂, to provide solutions to avoid the depletion of natural resources such as aggregates and to reduce energy consumption in the process of production.

The main objective of this work is to study the effect of the incorporation of sisal plant fibers on the physico-mechanical properties of compressed blocks based on earth, lime and dune sand.

Sisal fibers of two lengths (30 mm, 40 mm) with different percentages (0.5%, 1%, 1.5% and 2%) were used in this study.

The analysis of the results shows that there is a slight increase in the compressive strength of the composites studied for the percentage 1.5% of fibers, the flexural strength increases considerably compared to that of the control concrete without fibers, the density decreases with the percentage and the length of fibers while the water absorption of the composite increases slightly with the dosage and the length of fibers used.

The interfacial bond proved to be effective due to fibre breakdown mode encountered.

Finally, a good chemical compatibility was found between the matrix and the sisal fibers according to the observations by scanning electron microscope.

Keywords: Earth, dune sand, hydraulic binder, compressed earth block (BTC), mechanical behavior, sisal fiber, lime.

Résumé

La conception écologique des structures et le développement durable jouent un rôle important dans l'industrie de la construction. Les matériaux écologiques de construction tels que le bloc de terre, contenant une proportion de divers composants écologiques, sont de grande importance aujourd'hui. L'objectif de la production de ce bloc est de réduire la consommation de ciment et donc réduire la production de CO₂, de fournir des solutions pour éviter l'épuisement des ressources naturelles comme les granulats et de réduire la consommation d'énergie dans le processus de production.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'incorporation des fibres végétales de sisal sur les propriétés physico-mécaniques de bloc de terre comprimée stabilisé par la chaux.

Des fibres de sisal de deux longueurs (30 mm, 40 mm) avec différents pourcentages (0.5%, 1%, 1.5% et 2%) ont été utilisées dans cette étude.

L'analyse des résultats montre qu'il y a une légère augmentation de la résistance à la compression des composites étudiés pour 1,5 % de fibres, la résistance à la flexion croît considérablement par rapport à celle du bloc de terre témoin sans fibres, la masse volumique décroît avec le pourcentage et longueur de fibres tandis que l'absorption d'eau du composite augmente sensiblement avec le dosage et la longueur de fibres utilisées.

La liaison interfaciale s'est révélée efficace et cela par le mode de rupture des fibres rencontré.

En fin une bonne compatibilité chimique entre la matrice et les fibres de sisal d'après les observations par microscope électronique à balayage.

Mots-clés : Terre, sable de dune, Fibre, bloc de terre comprimée (BTC), comportement mécanique, Laghouat.

Liste des Figures

Figure I.1. Carte cratère montrant la présence de construction en terre dans le monde.....	5
Figure I.2. Ksar Aïn Madhi Laghouat-Algérie.....	5
Figure I.3. Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate	8
Figure I.4. «Roue" des techniques de construction en terre [2].....	9
Figure I.5. (a) Construction en bauge, (b) Mise en œuvre, (c) Principe de la bauge... ..	10
Figure I.6. (a) Mosquée en pise édifiée en 1788, (b) Compactage d'un mur en pisé, (c) Principe de pisé	10
Figure.1.7. Brique de terre comprimée.....	11
Figure I.8. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine	17
Figure I.9. Fibre d'abaca (Mvenuat).....	18
Figure I.10. Fibres de sisal.....	19
Figure I.11. Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres	22
Figure I.12. Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres	23
Figure I.13. L'influence de la teneur en fibres de coco sur la conductivité thermique	24
Figure I.14. L'influence de la teneur et la longueur des fibres d'hibiscus cannabinus sur la conductivité thermique du béton de terre comprimée.....	24
 Figure.II.1 : finition des limites d'Atterberg et les'indices.....	31
Figure.II.2 : Essai de limite de liquidité.....	31
Figure II.3 : présente l'état de sol, la limite de plasticité et de liquidité en fonction de la teneur en eau.....	32
Figure II.4 : l'abaque de Casagrande pour la classification des sols fins.....	33
Figure II.5 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande	34
Figure.II.6 : Moule utilisé dans le compactage.....	38

Figure.II.7 : Presse hydraulique.....	38
Figure II.8 : Schéma du mode d'application de l'effort de compression.....	38
Figure II.9 : Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction.....	39
Figure II.10 : Schéma du mode d'application de l'effort de Traction par fendage (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale.....	39
Figure II.11 : Essai de traction par fendage (essai brésilien).....	40
Figure II.12 : Machine universelle de type MTS pilotée par ordinateur.....	40
Figure II-13. Dispositif de l'essai de traction de fibre végétale de sisal.....	41
Figure II.14. Microscope électronique à balayage.....	41
Figure II.15 : Localisation de la zone étudiée.....	43
Figure II.16. L'argile de la région de Mraigha-laghout.....	43
Figure.II.17 : Courbe granulométrique d'argile	45
Figure II.18 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande	46
Figure II.19 : Courbe Proctor d'argile utilisé.....	47
Figure II.20 : Courbe granulométrique du sable de dune.....	49
Figure II.21: Fibres de Sisal	51
Figure II.22 : Absorption de l'eau par les fibres (%).....	51
Figure II.23: Section transversale de la fibre de sisal.....	54
Figure II.24 : Vue longitudinale de la fibre de sisal par MEB.....	55
Figure II.25 Observation des pores dans la fibre de sisal.....	55
Figure II.26: Surface alvéolaires de la fibre de sisal.....	56
Figure II.27: Microanalyse de la fibre de sisal par MEB	56
Figure.II.28 : La chaux de Saida.....	57
Figure.II.29 : Moule cylindrique.....	59
Figure.II.30 : Le démoulage du moule cylindrique.....	59
Figure II.31: La teneur en chaux.....	60

Figure II.32: Mélange de chaux sec.....	60
Figure II.33: L'essai d'absorption d'eau par différents échantillons.....	61
Figure.III.1 : Les échantillons (argile + sable de dune)	64
Figure.III.2 : Les échantillons traités (argile + sable de dune + chaux)	64
Figure.III.3 : La résistance la compression en fonction de la longueur et le pourcentage des fibres de sisal à 28 j.....	65
Figure.III.4 : La résistance à la traction par fendage en fonction de la longueur et le pourcentage des fibres de sisal à 28 j.....	67
Figure.III.5 : Variation de la valeur d'absorption d'eau en fonction de l'incorporation et longueur des fibres de sisal.....	70
Figure.III.6 : Mode de rupture des fibres de 20 mm de longueur.....	71
Figure.III.7 : Mode de rupture des fibres de 30 mm de longueur.....	71
Figure III.8. Compatibilité chimique entre le mortier de terre et la fibre de sisal (pas d'attaque chimique).....	72
Figure III.9. Microanalyse de l'interface mortier de terre –fibre de sisal.....	72
Figure III.10. L'interface mortier de terre – fibre de sisal.....	73
Figure III.11: liaison interfaciale entre la fibre de sisal et le mortier de terre.....	73

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 : Classification des phyllosilicates	8
Tableau I.2 : Caractéristiques des bétons de terre crue.....	12
Tableau I.3 : Les caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales.....	20
Tableau II.1 : Masses volumique de diverses substances.....	29
Tableau II.2 : Nature et qualité du sable selon E_s ou E_{sp} ,	30
Tableau II.3 : Classification de Casagrande pour les sols fins	32
Tableau II.4 : Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité.....	33
Tableau II.5 : .les caractéristiques du moule proctor	35
Tableau II.6 : Classification des argiles selon la surface spécifique.....	37
Tableau II.7 : Essai masse volumique apparente.....	44
Tableau II.8 : Essai masse volumique absolue.....	44
Tableau II.9 : Les limites d'Atterberg d'argile.....	45
Tableau II.10 : Analyse chimique d'argile Mrigha.....	47
Tableau II.11 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène.....	48
Tableau II.12 : Analyse chimique du sable de dune.....	48
Tableau II.13 : Paramètres d'identifications de sable de dune.....	49
Tableau II.14 : Résultats de l'essai équivalent de sable.....	50
Tableau II.15 : Paramètres d'identifications de sable de dune.....	50
Tableau II. 16 : Résultats d'absorption d'eau par les fibres (%).....	52
Tableau II.17 : Résultat d'analyse chimique de Sisal.....	52
Tableau II.18 : Montre les résultats à la traction de fibre de sisal non saturé (l'état naturel).....	53
Tableau II.19 : Propriétés mécaniques des fibres l'état saturé.....	53

Tableau II.20 : Composition chimique de la chaux de Saida.....	58
Tableau II.21 : Propriétés physiques de la chaux utilisées.....	58
Tableau. II.22 : La composition des mélanges.....	60
Tableau.III.1 : Variation de la résistance à la compression du BTC en fonction du pourcentage et de la longueur de fibres de sisal dans le temps	66
Tableau.III.2 : Variation de la résistance à la traction par fendage du BTC en fonction du pourcentage et de la longueur de fibres de sisal dans le temps.....	68
Tableau.III.3 : Les résultats de l'essai de masse volumique en fonction de la longueur de fibre de sisal et de son pourcentage	69

Liste des notations et des abréviations

BTC : Béton de terre comprimée

BTCF : Béton de terre comprimée avec fibres

MEB : Microscopie Electronique à Balayage

Cu : Coefficient d'uniformité

D60 : Diamètre des particules à 60% passant

D10 : Diamètre des particules à 10% passant

Esv : Equivalent de sable Visuel

Esp : Equivalent de sable à Piston

h1 : Sable propre + éléments fins

h2 : Sable propre seulement (piston)

h'2 : Sable propre seulement (visuel)

Ip : Est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité.

A_t : Argiles très plastiques

A_p : Argiles peu plastiques.

γ_{dmax} : Une valeur maximale de la densité sèche du matériau

Wopt : La teneur en eau optimale valeur qui sont appelée caractéristique optimale de compactage Proctor normal ou modifié

Ph : Poids de l'échantillon à l'état humide.

Ps : Poids de l'échantillon à l'état sec

A : L'absorption totale de l'eau

Sst : La surface spécifique totale

V_B : La valeur de bleu méthylène de la phase argileuse

R_t : Résistance à la traction

R_{tb} : Résistance à la traction par fendage

Introduction Générale

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

Actuellement, les études sur le changement climatique a conduit à réfléchir à l'élaboration de matériaux constructifs moins émetteurs de CO₂, moins consommateurs de ressources non renouvelables et aussi largement recyclables que possible.

Le renforcement par fibres végétales, dans un contexte de matrice à liant hydraulique, a déjà donné lieu à de nombreuses avancées pour obtenir un composite peu onéreux, moins émetteur de CO₂, aux propriétés thermiques et sonores intéressante et au comportement mécanique acceptable : bétons de chanvre, d'Alfa, de lin, de sisal, etc...

Les composites fibres végétales / matrice de bloc de terre ont été beaucoup étudiés depuis ces dernières années car les fibres végétales possèdent beaucoup d'avantages comparés aux fibres d'amiante : le faible coût, des propriétés d'élaboration plus saines pour la production des composites de différentes formes, le renouvellement et le recyclage, alors que l'utilisation d'amiante a été mise en cause par la législation sur la santé.

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

Introduction Générale

Pour mieux s'adapter aux blocs et aussi pour ne pas changer le caractère écologique de cette technologie, le mortier est fabriqué avec la même terre utilisée pour la fabrication des blocs. Mais pour assurer une bonne maniabilité des mortiers on utilise des quantités importantes d'eau ce qui engendre ultérieurement une fissuration importante, une baisse des performances mécaniques, une faible insensibilité à l'eau et une durabilité atténuée. Pour contourner ces problèmes qui affectent les mortiers en terre et par suite la stabilité et la durabilité des murs, on doit faire recours à certaines techniques de stabilisation, à savoir la stabilisation chimique via la chaux et l'utilisation des fibres naturelles ou synthétiques comme armatures.

L'objectif principal est l'élaboration et la caractérisation d'un mortier de (Argile + Sable) stabilisé par la chaux et renforcé par les fibres de sisal.

La caractérisation de ce nouveau matériau composite nécessite alors, la multiplication des recherches et des essais, ainsi que le développement de nouveaux procédés d'expérimentation.

Actuellement, la fabrication d'éléments de construction en béton de fibre de sisal demeure artisanale. Cependant, les procédés modernes de fabrication et l'amélioration des connaissances de leurs comportements mécaniques et physiques doivent pouvoir contribuer à l'amélioration de leurs performances.

En plus d'une introduction générale présente le mémoire est divisé en quatre chapitres :

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

Le deuxième chapitre, est consacrée à l'étude expérimentale. Le chapitre 2 fait le point sur les caractéristiques physico- mécaniques, chimiques et minéralogiques des matériaux utilisés (le sol, le sable de dune, la chaux et les fibres de sisal).

Ce chapitre présente aussi les procédures de confection des blocs, les techniques de conservation.

Introduction Générale

Le troisième chapitre présenté les résultats et discussions des différents essais physico-mécanique de mortier de terre renforcé avec les fibres de sisal.

Enfin une conclusion générale sur l'étude élaborée et des recommandations et perspectives à les prendre en considération dans les futures recherches.

Chapitre I : Etude bibliographique

1.Introduction

La Terre est un matériau disponible en quantité et utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l'habitat le plus répandu au monde.

La construction en terre assure le confort et la sécurité des habitants qui vivent. On estime aujourd'hui que la moitié de population du globe habite dans maisons en terre [1]. Elle est non seulement durable du point de vue des techniques de construction, mais elle a aussi la capacité de contribuer à l'économie, à l'écologie et aux valeurs culturelles communes [2].

La plupart des structures des bâtiments sont soutenues, d'une manière ou d'une autre, au sol. Dans ce De cette manière, les ingénieurs géotechniques doivent connaître leurs propriétés physiques et mécaniques afin de garantir la stabilité structurelle des ouvrages à construire [3].

Les choix technologiques liés aux matériaux de construction jouent un rôle important dans La recherche des solutions aux problèmes d'habitat économique. Dans ce chapitre, on présente les différents aspects des constructions en terre à savoir ; l'historiques des constructions en terre dans le monde, leurs avantages et inconvénients, les types de construction en terre, les facteurs de dégradation et les critères de stabilité.

2. Historique

Le matériau terre reste comme même le premier matériau utilisé par l'homme pour construire des habitations ou des ouvrages de génie- civil. Dans la majeure partie de l'Afrique, dans de nombreux pays de l'Asie et de l'Amérique et même en Europe, la terre a été de tout le temps le matériau le plus employé et dans certains cas le seul matériau utilisé et l'on peut considérer que les constructions en terre abritent encore une partie importante de la population mondiale. La figure I.1 montre la présence de construction en terre dans le monde.

Parmi les célèbres constructions historiques en terre dans le monde, on peut citer par exemple Ksar Aïn Madhi Laghouat-Algérie. (Voir figure.I.2)

ARCHITECTURE DE TERRE DANS LE MONDE



Figure I.1. Carte cratère montrant la présence de construction en terre dans le monde, [4]



Figure I.2. Ksar Aïn Madhi Laghouat-Algérie, [5]

De nombreuses constructions en bétons de terre crue ont été construites par des différentes civilisations.

Partout dans le monde, on trouve d'autres vestiges de l'utilisation de la terre dans les constructions d'ouvrages divers témoignant d'une présence continue de ce matériau. Si nos ancêtres construisaient en terre, c'est parce que les techniques et les matériaux actuels n'étaient pas disponibles.

A travers l'expérience de générations successives, nous sommes arrivés au développement actuel du matériau de construction qui a été délaissé suite à une action de phénomène tant scientifique que technologique tels que :

- Efforts minimes et dispersés déployés en matière de recherche pour améliorer la construction en terre ;
- Frein psychologique chez la majorité des gens pour lesquels la terre est symbole de pauvreté.

Depuis quelques années, on assiste à un ressaut intéressant de la recherche sur les matériaux dits traditionnels.

3. La terre, un matériau de construction

3.1. Définition

Le sol est la fraction solide de la sphère terrestre. A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. La terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terres avec une variation illimitée de leurs caractéristiques. La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre [6].

3.2. Composition

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : 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 des 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 chaux. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent [6]. Les proportions des éléments constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non. Les premiers sont instables et les autres stables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction [1]. Vu l'importance des argiles comme liant dans la fabrication des BTC, et pour pouvoir analyser les mécanismes responsables des modifications qui apparaissent dans le sol traité, il est utile de rappeler certaines propriétés physico-chimiques des argiles.

4. Les Argiles

4.1. Définition

Le terme argile désigne donc un mélange de minéraux argileux associés à d'autres minéraux (feldspaths, quartz etc.) ainsi que des impuretés (oxyde de fer, titane etc.). Par ailleurs, ce mélange est caractérisé par une certaine plasticité et des grains ayant une taille inférieure à 2 μm [7].

4.2. Structure

Les phyllosilicates sont des silicates dans lesquels les tétraèdres de SiO_4 forment des feuillets infinis bi-dimensionnels. Ces feuillets tétraédriques sont condensés avec des octaèdres d'oxydes métalliques dans un rapport 2:1 ou 1:1. Les phyllosilicates sont également appelés plus simplement silicates lamellaires [8]. Les différents groupes de minéraux argileux se différencient par l'arrangement de leurs couches tétraédriques et octaédriques représentés sur la figure.I.3. L'organisation structurale des phyllosilicates est basée sur une charpente d'ions O^{2-} et OH^- , ces anions occupent les sommets d'assemblages octaédriques (O^{2-} et OH^-) et tétraédriques O^{2-} . Dans les cavités de ces unités structurales élémentaires viennent se loger des cations de tailles variables (Si^{+4} , Al^{+3} , Fe^{+3} , Mg^{+2}) en position tétraédrique ou octaédrique. Ces éléments s'organisent suivant un plan pour constituer des couches octaédriques et tétraédriques dont le nombre détermine l'épaisseur du feuillet. L'espace entre deux feuillets parallèles s'appelle espace interfoliaire. Lorsque deux cavités sur trois de la couche octaédrique sont occupées par Al^{+3} (ou un autre ion métallique trivalent), la structure est dénommée dioctaédrique. Quand la totalité des cavités octaédriques est occupée par des ions métalliques bivalents, la structure s'appelle trioctaédrique. Par ailleurs, il peut exister des substitutions isomorphiques dans les couches tétraédriques (Si^{+4} , Al^{+3} , Fe^{+3}) et /ou octaédrique (Al^{+3} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , ou Mg^{+2} , Li^+). Ces substitutions entraînent un déficit de charge qui est compensé, à l'extérieur du feuillet, par des cations compensateurs [7], (voir la figure.I.3).

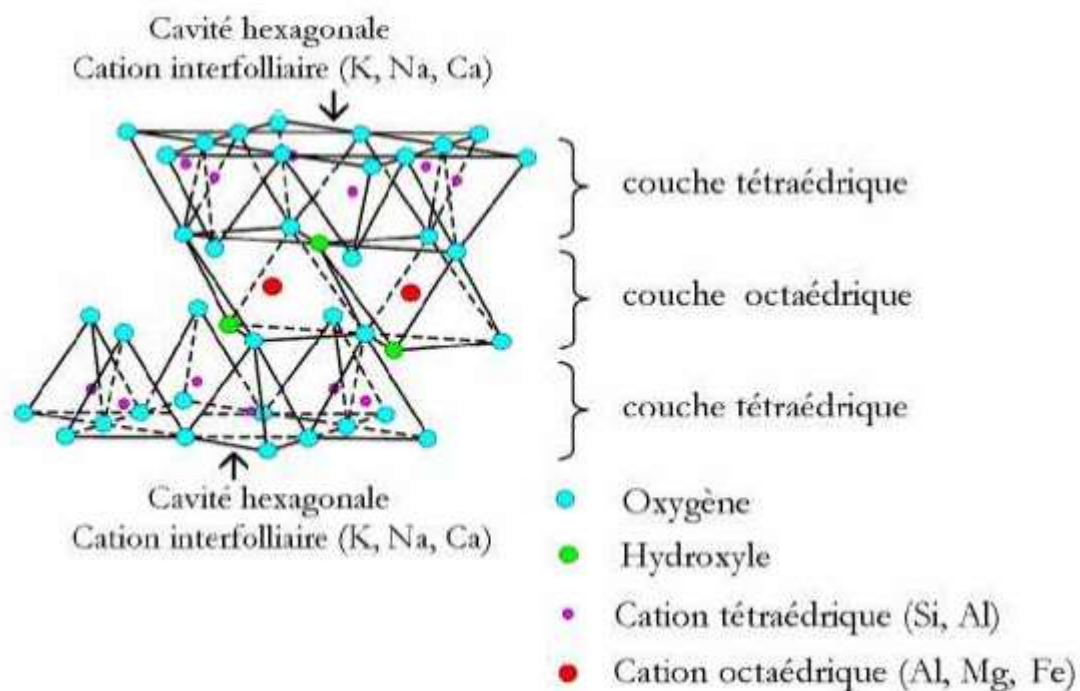


Figure. 1.3. Représentation schématique d'un feuillet de phyllosilicate 2:1 par [9].

Le tableau I.1 représenté la classification des phyllosilicates.

Tableau I.1 : Classification des phyllosilicates, d'après par [10].

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 non-hydratés	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

4.3. Principaux types d'argile :

Comme il a été présenté dans le tableau 1.1, 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.

5. Techniques de construction en terre

Il existe de nombreux et de différents modes de mise en œuvre de la terre [11], douze

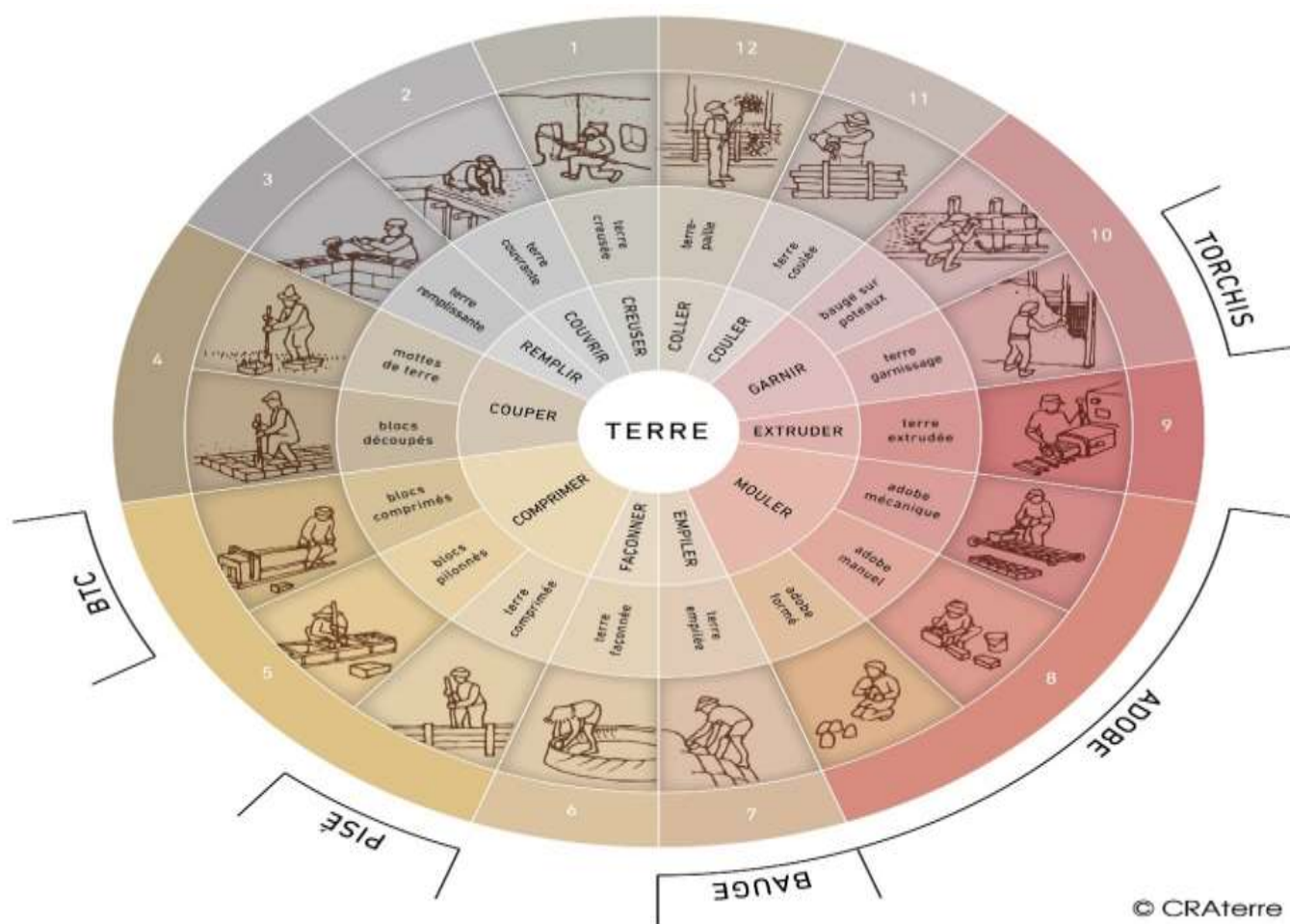


Figure I.4. Roue des techniques de construction en terre [2].

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

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

5.1. La bauge

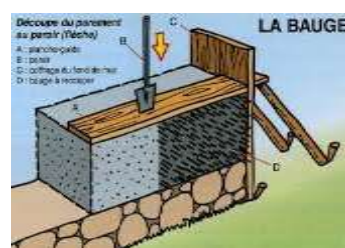
La terre, généralement amendée de paille ou autres fibres, est mise sous forme de boules grossières, qui sont empilées les unes sur les autres et entassées légèrement à l'aide des mains ou des pieds jusqu'à ériger des murs monolithiques façonnés. Dans d'autres cas, la bauge est incorporée dans une structure en bois [12], (Voir la figure I.5).



(a)



(b)



(c)

Figure 1.5. (a) Construction en bauge, (b) Mise en œuvre, (c) Principe de la bauge [13].

5.2. Le pisé

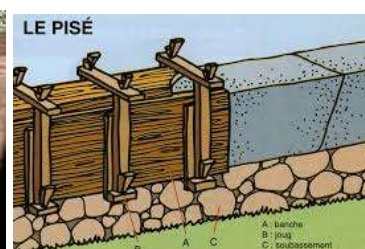
La terre est compactée en masse dans des coffrages, couche par couche et banchée avec une dame. (Voir la figure 1.6).



(a)



(b)



(c)

Figure I.6. (a) Mosquée en pisé édifée en 1788, (b) Compactage d'un mur en pisé, (c) Principe de pisé [13].

5.3. Béton de terre comprimée (BTC)

Les béton de terre comprimées sont des petits éléments de maçonneries généralement de forme parallélépipédique (Figure.I.7). Ils sont fabriqués dans des presses manuelles ou mécanisées avec de la terre humide et pulvérulente, composée d'une proportion équilibrée d'argiles, limons, sables et petits graviers. C'est une évolution technique du béton moulé d'adobe. L'addition de chaux est courante pour augmenter les caractéristiques mécaniques et la résistance à l'eau [14], (voir la figure 1.7).

.



Figure 1.7. Béton de terre comprimée

5.3.1. Caractéristiques de quelque type de béton de terre crue :

Le tableau suivant présente les caractéristiques des différents types des bétons en terre crue.

Tableau I.2 : Caractéristiques des bétons de terre crue [15], [16].

Caractéristiques	Type de béton de terre crue		
	Adobe	Pisé	BTC
Masse volumique Kg/m ³	1200 – 1700	1700-2200	1700 - 2200
Résistance à la compression MPa	2 – 5	< 2.4	< 2.4
Retrait au séchage mm/cm	1	1 - 2	0.2 – 1

6.Stabilisation

6.1. Définition

La stabilisation est une méthode permettant d'améliorer les propriétés du sol en le mélangeant avec d'autres matériaux ou additifs. En termes généraux, il s'agit du processus d'amélioration des paramètres de résistance au cisaillement du sol et, par conséquent, d'augmentation de sa capacité portante [17], [18]. De nos jours, deux méthodes souvent utilisées sont la stabilisation mécanique et chimique [19]. Chacune des deux méthodes peuvent être utilisés indépendamment ou simultanément, pour tenter d'optimiser les propriétés mécaniques du sol actuellement, la chaux sont l'agent stabilisant les plus couramment utilisé pour le traitement des sols à caractéristiques expansives. Plusieurs études ont été réalisées sur la stabilisation de sols expansifs avec l'utilisation de chaux [20], [21]. Cependant, les traitements au chaux fragilisent parfois les sols, étant défavorables dans certaines conditions de charge dynamique, notamment les charges de trafic sur les systèmes de chaussée. Ces dernières années, de nombreuses méthodes visant à améliorer les propriétés mécaniques des sols, ainsi que leur résistance à la compression et aux contraintes de traction grâce à l'ajout de fibres et de matériaux de renforcement [22], [23]. Ont été développées.

L'objectif principal du renforcement du sol est d'augmenter la stabilité, d'augmenter la capacité portante et de réduire les tassements du sol renforcé. L'option de renforcer le sol avec l'utilisation de fibres est fortement privilégiée dans le domaine de l'ingénierie géotechnique et géoenvironnementale [24], [24]. Le concept de renforcement du sol à l'aide de fibres discrètes distribuées de manière aléatoire s'inspire du phénomène naturel selon lequel l'herbe et/ou les plantes poussant sur une pente peuvent la stabiliser efficacement [26], [27]. Comparé aux méthodes traditionnelles de renforcement avec des géo-synthétiques, un sol renforcé avec des fibres courtes discrètes est plus facile à préparer et peut maintenir une résistance isotrope sans introduire d'éventuels plans de faiblesse [28].

6.1. 1. Stabilisation physico-chimique

Cette technique a sans cesse progressé depuis que sont mieux connues les forces d'interaction entre les particules de sols et l'eau.

Le traitement du matériau terre par des produits chimiques sera subdivisé en deux parties : un traitement dans la masse ou une protection de surface par imprégnation sur la partie exposée.

6.1.2. Stabilisation physico-mécanique

Dans l'intérêt de conférer aux matériaux des performances mécaniques satisfaisantes lors de leur mise en œuvre, on cherche à obtenir la meilleure densité possible : c'est le but de la stabilisation mécanique. Pour atteindre ce résultat, on agit sur la structure du matériau en modifiant l'arrangement des particules. Ces modifications sont apportées essentiellement par le compactage qui permet de réduire la porosité ou l'indice des vides du sol en rapprochant ses éléments constitutifs. L'obtention de la compacité optimum nécessite un bon arrangement des grains et ne peut être réalisée qu'en présence d'eau ; trop sec, le matériau se met mal en place, trop humide, il devient à la limite incompatible ; L'eau joue le rôle de lubrifiant, sa teneur est en relation avec l'énergie du compactage.

Ainsi le compactage est un moyen de stabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation physico-chimique. Il est le plus souvent défini par trois caractéristiques : Le mode, l'énergie et la teneur en eau.

6.2. Moyens de stabilisation

Dans la littérature, on peut trouver diverses classifications, selon : la nature, la forme, etc. Selon [14], il y a six modes de stabilisations :

- Stabilisation par densification ;
- Stabilisation par armement ;
- Stabilisation par enchainement ;
- Stabilisation par liaison ;
- Stabilisation par imperméabilité ;
- Stabilisation par hydrofugation.

Chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif, mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique.

6.2.1. Méthodes de compression

La méthode de densification influe fortement sur la résistance finale du matériau [1].

Il existe principalement quatre méthodes de compactage [14] :

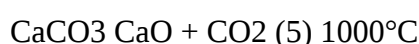
- La compression statique ;
- La compression dynamique par vibration ;
- La compression dynamique par impact ;
- La compression par pétrissage.

6.3. Stabilisation à la chaux

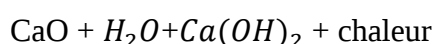
6.3.1. Généralités

L'utilisation de la chaux dans la stabilisation des sols est connue depuis l'antiquité, elle a été utilisée comme stabilisant de la chaussée par les Romains et d'autres civilisations anciennes .

La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium, mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit. On les distingue notamment dans le langage courant par rapport à leurs utilisations dans la construction : La chaux vive est le produit direct de calcination du calcaire, principalement de l'oxyde de calcium (CaO).



La chaux aérienne, ou chaux éteinte, est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Elle est dite « aérienne », car elle réagit avec le CO_2 de l'air.



La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau. Tous les types de chaux peuvent être employés, mais la préférence est donnée néanmoins aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques [1]. La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant $\text{IP} > 17$ et $\text{LL} > 40$.

La chaux éteinte est beaucoup plus conseillée que la chaux vive, car cette dernière présente deux inconvénients majeurs : conservation difficile à l'abri de l'humidité avant son emploi et manipulation pénible lors des mélanges.

Le Roux a prouvé que pour des sols riches en kaolinite, la résistance à la compression (de 2 jusqu'à 90 jours) croît avec la teneur en chaux, mais que pour des sols riches en illite, un optimum de 5 % de chaux se caractérise à moyen et à long terme.

6.3.2.Dosage

L'efficacité de la stabilisation des argiles avec la chaux est difficile à prédire. Le gain en résistance au cisaillement dépend de plusieurs variables : la minéralogie de l'argile, le pH du sol, la présence de sol organique, la capacité d'échange cationique, la grosseur des particules, la surface spécifique des particules, la quantité d'eau, la concentration en chaux ainsi que le temps de mûrissement.

Il n'y a pas de règle stricte mentionnant un optimum donné pour un sol entrant dans une classification donnée. L'ajout de 2 à 3 % de chaux provoque immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et un brisage des mottes. 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 [12].

Pour analyser l'influence de la minéralogie de l'argile, et à travers la réalisation d'éprouvettes traitées à la chaux et compressées, a pu suivre l'évolution des réactions sol-chaux, d'une part sous un aspect mécanique et d'autre part, sous un aspect minéralogique et chimique. Cette étude, lui a permis de faire un classement, de favorables au moins favorables dans l'ordre : kaolinite, > illite, > semectite.

6.4. Renforcement par les fibres

La renforcement par les fibres a été longtemps utilisée notamment celle fait à base de paille. Cette méthode de renforcement est intéressante car elle est adaptable à différents modes de mise en œuvre de la terre, à l'état liquide ou plastique et même par compression. Les fibres sont principalement employées pour la confection de bétons moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait. Pour renforcer les bétons de terre crue, il existe une autre technique faisant usage d'armatures fibreuses qui

convient bien à la pratique de bétons comprimés. La résistance apportée par des fibres permet

de résoudre d'autres problèmes rencontrés sur les bétons de terre crue, que la stabilisation avec addition ne peut pas forcément solutionner. Elles agissent sur les résistances mécaniques, les performances thermiques et encore d'autres aspects.

7. Les fibres

Sont utilisées pour apporter une armature à la terre. Elles sont d'origine animale, végétale ou synthétique. La paille est la fibre la plus employée pour stabiliser la terre. Elle réduit la fissuration au séchage et augmente la résistance à la traction [12].

7.1. Les fibres végétales :

L'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport à des composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables, neutres vis-à-vis des émissions de CO₂ et demandant peu d'énergie pour être produites.

Les fibres végétales comprennent :

- Des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok) ;
- Les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute) ;
- Les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco), (voir Figure I.8)

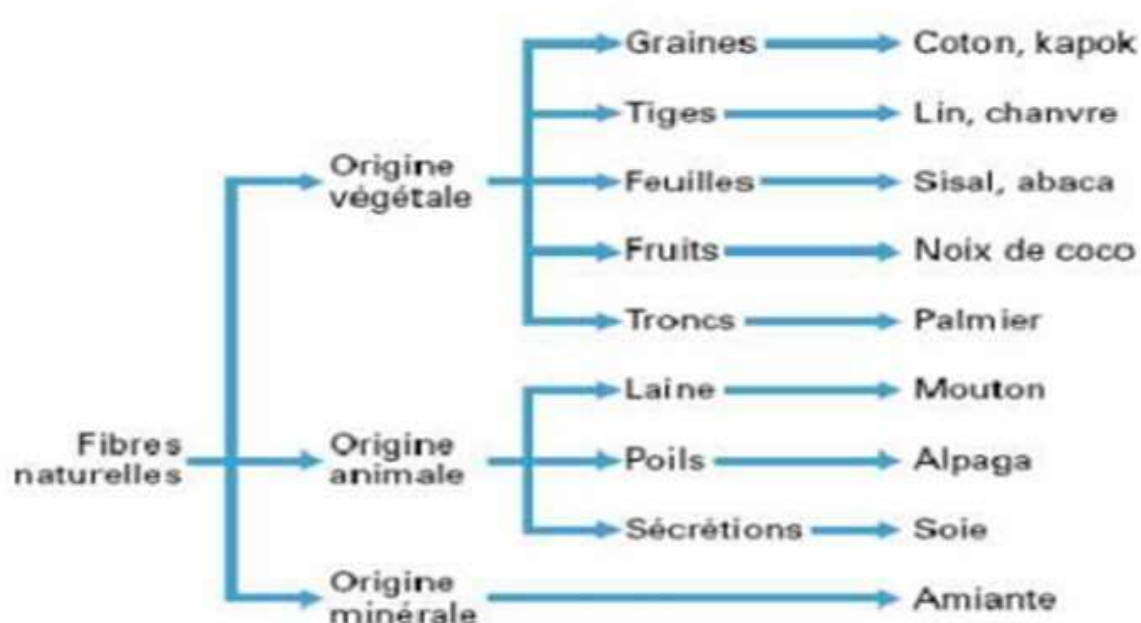


Figure I.8. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine

7.1.1. Les fibres de feuilles :

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

a). L'abaca

L'Abaca ou chanvre (Figure 1.11) de Manille est un bananier textile (Musacées) qui pousse aux Philippines : les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, et aussi de rabanes, nappes, stores, vêtements. La fibre d'Abaca a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22 μm . Elle est utilisée principalement dans la composition des papiers filtres, des sachets de thé. Ce sont des papiers poreux demandant une bonne résistance, en particulier au déchirement (Collection Mémento Technique). (Voir la Figure I.9)



Figure I.9. Fibre d'abaca (Mvenueat)

b). Les fibres de sisal

Le sisal est une espèce d'agave, ses fibres sont extraites des feuilles de la plante sisal (Figure I.10) dans le nom scientifique est agave sisalana. Originare du Yucatan (près des Antilles), elle est essentiellement cultivée en Amérique du sud, en Afrique et en extrême orient.

Une plante de sisal produit jusqu'à 300 feuilles et chaque feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres. Ces dernières sont relativement rigides et flexibles et sont multicellulaires avec des cellules ayant différentes formes. La longueur des fibres de sisal varie de 0,6 à 1,2 m avec un diamètre moyen de 200 μm leur couleur est crème (parfois jaunâtre). Les méthodes de traitement pour l'extraction des fibres ressemblent étroitement à celles du lin ; les fibres sont ensuite lavées à grande eau afin d'enlever les déchets. (Voir la figure I.10)



Figure I.10. Fibre de sisal

C) . Fibre de palmier

La fibre obtenue à partir du palmier à africain est l'un des matériaux qui, ces dernières années, ont commencé à être étudiés comme alternative pour le renforcement des sols. Une étude très intéressante sur l'utilisation du palmier comme mécanisme de renforcement du sol a été développée, montrant l'incidence de quatre variables différentes (contenu, taille et orientation des bandes de la gaine du palmier, ainsi que la résistance normale appliquée au cisaillement). Tests sur le comportement et la résistance du sol cohésif renforcé, avec des bandes de gaine de palmier. Les résultats des tests ont montré que l'utilisation de bandes de gaine naturelle de palmier améliorerait la résistance du sol testé. Une autre recherche s'est concentrée sur l'utilisation de fibres naturelles obtenues à partir de grappes vides de fruits du palmier à huile, à ajouter à un sol meuble dans des pourcentages variant de 5 à 8 %. Des tests de compactage ont été réalisés, ainsi que de compression libre et CBR, observant que dans les échantillons de sol compacté, plus d'ajouts de fibre de palmier ont montré une augmentation des paramètres de résistance au cisaillement et de capacité portante [29].

Des recherches menées sur l'utilisation de fibres de palmier séchées et broyées pour améliorer les propriétés d'un sol argileux (schiste) à haute plasticité ont montré que l'ajout de fibres orientées de manière aléatoire diminuait le poids unitaire sec maximum du sol et augmentait les valeurs de la résistance au cisaillement principalement dans le paramètre de cohésion [30].

Une étude a montré l'application potentielle de la fibre de palmier située en aval du fleuve yangtze, en chine, dans le but d'explorer le comportement mécanique d'un sol argileux renforcé avec des fibres de palmier au moyen d'essais de compression non confinés sur des échantillons traités avec des fibres de palmier de différentes longueurs et pourcentages, en se concentrant sur la résistance du sol renforcé avec des fibres de palmier [31].

D). Les caractéristiques physiques et mécaniques des quelque fibres végétales

Le tableau I.3 présente les caractéristiques physico-mécaniques de quelque fibres végétales.

Tableau.I.3. Caractéristiques physiques et mécaniques de quelques fibres végétales

Fibres	Densité (g/cm ³)	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (MPa)	) Module de Young (GPa)
Coton	1.5-1.6	7.0-8.0	587-597	5.5-12.6
Chanvre	--	1.6	690	--
Sisal	--	2.6	278	--
	1.37	5.2	363	15.2
	0.75-1.07	2.08-4.08	577.50	10.94-26.70
	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
Noix de Coco	1.2	30.0	175	4.0-6.0
	1.17	37.7	107	2.8
	0.67-1.00	13.7-41.0	174	2.5-4.5
	1.33	--	72	2.0
Palmier Dattier	0.51-1.08	7.5-17.4	170-290	1-5.25

7.1.2. Propriétés écologiques des fibres végétales

- La fibre végétale est naturelle et ne cause pas d'irritation pour la peau.
- Plus de confort pendant la manipulation et renouvelables.

8. L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des bétons de terre comprimée

L'avantage du coût des fibres naturelles par rapport au coût des fibres synthétiques explique en partie la tendance d'utilisation en faveur des fibres naturelles.

Mais il faut dire, que l'utilisation des fibres naturelles comme un matériau de construction pose un défi particulier à la science et à la technologie.

L'industrie des fibres naturelles doit relever le défi de développer de nouvelles technologies pour faciliter l'utilisation des fibres naturelles dans la production de matériaux de construction, en se basant sur leurs avantages naturels pour concurrencer efficacement les produits synthétiques. Les défis particuliers pour les scientifiques sont : l'adhérence fibre / matrice, la faible résistance, le problème de stockage sur de longues périodes, les fibres sont hydrophiles, les problèmes de compatibilité, la sensibilité à l'humidité, la dégradation des fibres pendant le traitement, l'orientation et la distribution des fibres. L'utilisation des fibres naturelles locales est plus avantageuse pour la population, vu son abondance, son coût faible, sa faible consommation d'énergie qui permet la réduction des impacts environnementaux, [32], [33], [34], [35], [36], [37]. Pour la stabilisation des BTC, il a été confirmé maintenant que l'emploi de liant minéraux (chaux) et le bitume comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des BTC [11]. Mais la stabilisation des BTC par des fibres et en particulier les fibres végétales n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs. Dans ce qui suit, on va passer en revue l'influence de la présence des fibres en générale et les fibres végétales en particulier, sur les propriétés mécaniques, hygroscopiques et thermiques des BTC.

8.1. Effet des fibres sur les propriétés mécaniques

Des études apparues depuis plusieurs années sur le BTC ont montré que l'addition des fibres naturelles réduit la taille des fissures causées par le retrait et améliore la durabilité et la résistance à la traction. Dans un travail de recherche publié en 2014 [37], Millogo et al. Se sont intéressés à la stabilisation d'un sol latéritique par des fibres d'*hibiscus cannabinus* (Kénafe), pour fabriquer des bétons de terre comprimée sans aucun stabilisant chimique. Les BTC ont été renforcés avec des teneurs en fibres de 0,2 à 0,8 % en poids et avec deux longueurs de fibres 30 mm et 60 mm. Les résultats montrent que la présence des fibres

d'hibiscus cannabinus a amélioré les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons. L'important effet a été observé avec le cas de 30 mm de longueur de fibre.

Les auteurs ont justifié l'augmentation des propriétés mécaniques à la non propagation de fissures, due à la présence des fibres dans la matrice d'argile. D'après les 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 en 1986, ont constaté dans une étude expérimentale sur la résistance sismique de la maçonnerie, une augmentation de la résistance à la compression du BTC de l'ordre de 20 % 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 couture de l'interface BTC-mortier de fibres de paille ce qui limite l'apparition des microfissures produites par le retrait de séchage [38].

Lors de sa discussion sur les types de stabilisants Stulz et Mukerji en 1988, reconnaissent la paille (blé, seigle, orge, etc) et les fibres végétales (sisal, chanvre, le coco et bagasse) comme une importante catégorie de stabilisants des BTC, mais ils ne l'ont pas justifié par des résultats de travaux de recherches [39]. Sallehan et Yaacob en 2011, ont constaté que l'ajout de 3% de fibres de palmier a amélioré la résistance à la compression des bétons fibrées (Voir la Figure I.12, I.13)

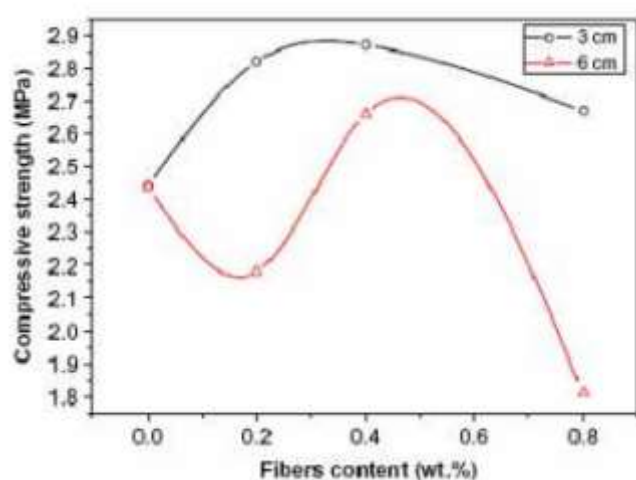


Figure I.11. Les courbes de la résistance à la compression en fonction de la teneur et la longueur des fibres [37].

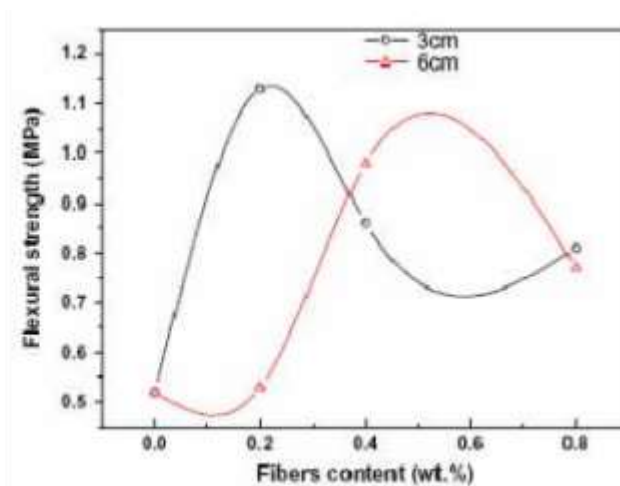


Figure I.12. Les courbes de la résistance à la flexion en fonction de la teneur et la longueur des fibres [37].

8.2. Effet des fibres sur l'absorption d'eau

On a vu auparavant que les fibres végétales ont un caractère hydrophile qui favorise l'adsorption d'eau, alors que d'autres types de fibres ont un caractère hydrophobe comme le cas des fibres de polypropylène. Cette faible insensibilité à l'eau des fibres végétales constitue un point faible dans son 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. Ravishankar et Raghavan en 2004, [40]. Ont conclu à travers les résultats des essais d'absorption d'eau réalisés dans l'étude citée dans le paragraphe précédent, qu'il y a une légère augmentation de l'absorption de l'eau avec l'augmentation de la teneur en fibres de palmier. Ravishankar et Raghavan en 2004, ont confirmé que pour les sols latéritiques stabilisés par la fibre de coco, le taux d'absorption de l'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en fibre de coco [42].

8.3. Effet des fibres sur les propriétés thermiques

Vu que l'étude des propriétés thermiques des BTC fibrées ne présente pas notre centre d'intérêt dans cet mémoire, on va limiter notre recherche bibliographique sur la conductivité thermique. Khedari et al en 2005, [43]. Ont constaté que la conductivité thermique des bétons à base d'argile latéritique comprimée stabilisée par des fibres de coco diminue avec l'augmentation de la teneur en fibres, et cette diminution a atteint un taux important qui est de l'ordre de 50 % (figure I.13). Millogo et al en 2014, [39]. Ont constaté aussi, dans le cadre de

l'étude présentée auparavant, que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation des teneurs et des longueurs des fibres d'hibiscus cannabinus (Figure I.13) [37].

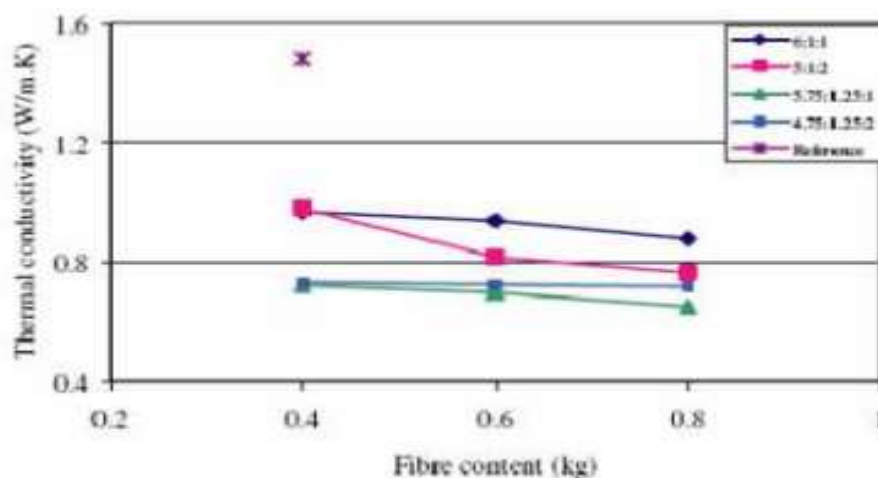


Figure I.13. L'influence de la teneur en fibres de coco sur la conductivité thermique [41].

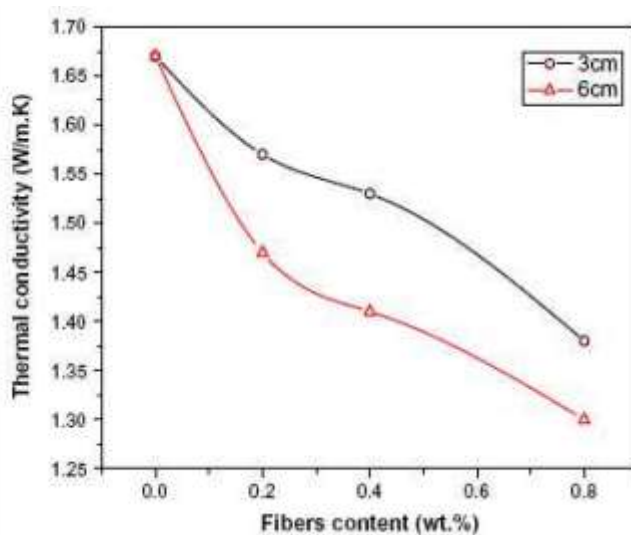


Figure I.14. L'influence de la teneur et la longueur des fibres d'hibiscus cannabinus sur la conductivité thermique du béton de terre comprimée [37].

9. Méthodes d'amélioration de la durabilité des composites renforcés par des fibres végétales

Différents travaux ont été réalisés afin de pallier à la dégradation des composites à base de fibres végétales. On peut distinguer deux familles de solutions, soit par modification des propriétés des fibres (par imprégnation avec des agents bloquants ou traitants), soit en diminuant l'agressivité de la matrice envers les fibres.

9.1. Traitement des fibres

Plusieurs travaux ont montré l'amélioration des propriétés mécaniques des fibres de cellulose après alcalisation avec différentes concentrations de NaOH. Mwaikambo et Ansell en 2002, ont traité du chanvre, du jute et des fibres de kapok avec plusieurs concentrations de NaOH et ont montré que la concentration optimale en masse correspondait à 6 % [42]. A ce taux, la plupart des composants non cellulosiques sont dégradés, la cellulose reste sous forme cristalline et l'adhésion fibre/matrice est améliorée. Okano et al en 1984, estiment quant à eux que cette transformation s'effectue au-dessus de 6 % en masse [43]. Le traitement à la soude à 6 % en masse permet ainsi d'enlever partiellement les matériaux amorphes présents à la surface de la fibre (cires, graisses...), ce qui modifie la composition chimique et la morphologie de la fibre et entraîne une augmentation de la rugosité ainsi que l'exposition de microfibrilles de cellulose [44].

9.2. Modification de la matrice

La deuxième option envisagée par les chercheurs pour améliorer le comportement à long terme des composites renforcés par des fibres végétales consiste à transformer la matrice afin de réduire son agressivité envers les fibres. Comme nous l'avons vu précédemment, cette agressivité est en partie liée au pH fortement basique du milieu interstitiel et à la présence d'hydroxyde de calcium amené à diffuser vers les fibres et à y reprécipiter en causant leur minéralisation.

10. Conclusion

A travers cette recherche bibliographique, le renforcement des sols avec des fibres naturelles est utilisé depuis l'antiquité ; cependant, l'utilisation de fibres courtes naturelles et synthétiques a récemment attiré une attention croissante en ingénierie géotechnique. Cette synthèse bibliographique montre au lecteur la tendance, en génie géotechnique, vers l'utilisation de fibres naturelles pour le renforcement et l'amélioration des propriétés techniques et mécaniques des sols argileux mous, à utiliser dans les structures de construction (c.-à-d. trottoirs, stabilisation des pentes, fondations). Pour les bâtiments, et on a remarqué que plusieurs travaux de recherches ont confirmé que l'emploi de liant minéraux (chaux) et le bitume comme stabilisants améliore la résistance mécanique et l'insensibilité à l'eau des BTC. Mais la stabilisation des BTC par des fibres et en particulier les fibres végétales n'a pas eu le consensus de tous les chercheurs. Il y a des recherches qui n'ont pas recommandé l'utilisation des fibres végétales dans la fabrication du BTC à cause de son incompatibilité avec le mode de compactage des BTC, alors que d'autres reconnaissent les fibres végétales comme une importante catégorie de stabilisants des BTC. Donc la synthèse sur les travaux antérieurs a mis en évidence les besoins d'expérimentation sur l'effet de l'introduction des fibres, et en particulier les fibres végétales, sur les propriétés mécaniques et hygroscopiques du béton de terre comprimée. C'est dans ce cadre que l'étude a été élaborée dans ce mémoire.

Chapitre II : Techniques Expérimentales Et Caractéristiques des matériaux utilisés

1. Introduction

La construction en bétons de terre comprimée avec les fibres de sisal est une technologie dont le but est l'utilisation des matériaux locaux, c'est à dire disponibles dans les alentours immédiats du site de construction. Le contexte même de la naissance des bétons de terre comprimée avec les fibres de sisal impliquent donc un spectre de terre à utiliser le plus large possible. Ainsi, les exigences résident uniquement au niveau des caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques qui peuvent prédire la qualité des bétons en fonction de leur destination (brique, pisé, terre de paille...etc). Dans ce chapitre, on présente les résultats des essais d'identifications de trois matériaux radicalement différentes (Argile et Sable de dune, et les fibres de sisal) utilisé pour confectionner les bétons en terre comprimé avec la fibre de sisal.

Le but de ce chapitre et avant d'accéder au programme expérimental, il est nécessaire de définir et d'exposer les méthodes et les techniques expérimentales, des essais utilisés dans ce projet à savoir :

- Les essais d'identification :(la masse volumique, L'absorption totale, analyse granulométrique, équivalent de sable, essai Proctor, limite d'Atterberg).
- L'essai chimique :(l'essai de bleu méthylène).
- Les essais mécaniques :(résistance à la compression simple, résistance à la traction par fendage).

Et

- L'observation au microscope électronique à balayage "MEB"

2. Essais d'identification physique

2.1. Masse volumique NF EN 1097-6

La masse volumique, aussi appelée densité volumique de masse, est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume.

2.1.1. Masse volumique apparente NF P 18-554

La masse volumique apparente d'un matériau est la masse volumique d'un mètre cube du matériau pris en tas, comprenant à la fois des vides perméables et imperméables de la particule ainsi que les vides entre particules, exprime généralement cette masse volumique en gramme par centimètre cube (g/cm^3), elle est donnée par la formule suivante :

$$\rho_a = \frac{M_t}{V_t} \dots \dots \dots (1)$$

M_t = La masse totale d'échantillon

V_t = Le volume total d'échantillon

2.1.2. Masse volumique absolue NF P 18-558

La masse volumique absolue ρ_s est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre des grains, elle est donnée par la formule suivante :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \dots \dots \dots (2)$$

M_s = La masse des grains solides

V_s = Le volume des grains solides

Le tableau II.1 présente les masses volumiques des roches, minéraux et des matériaux usuels, les masses volumiques indiquées sont des masses volumiques apparentes.

Tableau II.1: Masse volumique de diverses substances [45]

Roches, Minéraux, Matériaux usuels	Masse Volumique (Kg/m³)
Argile	1 300 – 1 700
Béton	2 200 (armé 2 500)
Béton bitumineux	2 350
Kaolin	2 260
Marbre	2 650 – 2 750
Pierre poncée	910
Quartz	2 650
Sable de dune	1 600 (sec) – 2 000 (saturé)
Terre végétale	1 250

2.2. Analyse granulométrique NF EN 933-2

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. Elle s'applique à tous les granulats de dimension nominale inférieure ou égal 63 mm, à l'exclusion des fillers.

2.2.1. Le but d'essai

L'essai a pour but de déterminer en poids, la distribution des particules des sols suivant leurs dimensions.

* Les résultats de cette analyse sont traduits par des courbes.

La courbe granulométrique nous renseigne sur son uniformité, on caractérise un sol par la granulométrie c'est-à-dire par le coefficient d'uniformité ou coefficient de Hazen, qui est défini comme suit :

C_u : Coefficient d'uniformité

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

D₆₀ : Diamètre des particules à 60% passant

D₁₀ : Diamètre des particules à 10% passant

- Si $(D_{60}/D_{10}) < 2$ le sol présente une granulométrie uniforme.
- Si $(D_{60}/D_{10}) > 2$ le sol présente une granulométrie variée.

2.3. Equivalent de sable (NF P 18-598)

2.3.1. Principe

L'essai utilisé pour évaluer la propreté des sables, il est effectué sur la fraction 0/2 mm du matériau à étudier.

Deux indices peuvent déterminées :

Es à vue (**Es_v**) et Es à piston (**Es_p**)

Es_v : Equivalent de sable Visuel

Es_p : Equivalent de sable à Piston

$$Es = 100 \cdot h_2 / h_1 \dots \dots \dots (3)$$

h_1 : Sable propre + éléments fins.

h_2 : Sable propre seulement (piston).

h'_2 : Sable propre seulement (visuel).

Les valeurs de l'équivalent de sable indiquent la nature du sable en fonction du moyen de mesure et permettent d'apprécier la qualité, voir tableau II.2.

Tableau II.2 : Nature et qualité du sable selon Es_v ou Es_p [45]

ES visuel	ES au piston	Nature et qualité du sable
ES < 65%	ES < 60%	Sable argileux - Risque de retrait ou de gonflement, à rejeter pour des bétons de qualité
$65 \leq ES < 75$	$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux - de propreté admissible pour béton de qualité quand ou ne craint pas particulièrement de retrait
$75 \leq ES < 85$	$70 \leq ES < 80$	Sable propre - à faible pourcentage de fines argileuses Convenant Parfaitement pour les bétons de haute qualité.
$85 \leq ES$	$80 \leq ES$	Sable très propre - l'absence presque totale de fines argileuses risque d'entraîner un défaut de plasticité du béton qu'il faudra rattraper par une augmentation du dosage en eau.

2.4. Limite d'Atterberg (NF P 94-051)

Par définition, les limites d'Atterberg sont des teneurs en eaux pondérales caractéristiques du sol, elles correspondent à des comportements particuliers sont déterminées sur la fraction du sol passant à travers des tamis de 400 μ m.

Ces limites séparent le passage du sol d'un état de consistance à un autre (voir figure II.1)

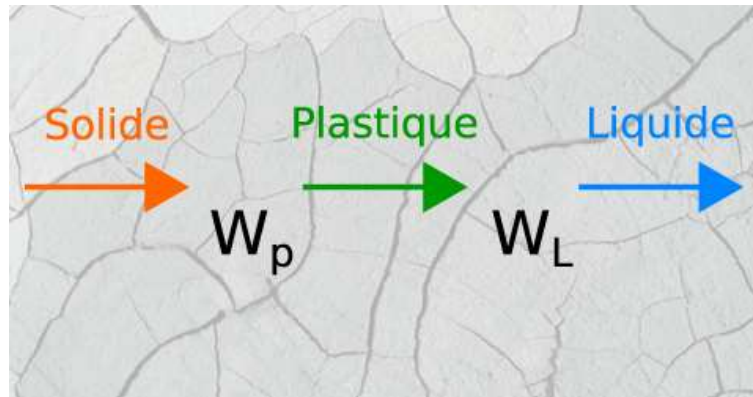


Figure.II.1 : Finition des limites d'Atterberg et les indices

2.4.1. Principe de détermination des limites de consistance

2.4.1.1. La limite de liquidité W_L

La limite de liquidité se détermine en utilisant l'appareil de Casagrande. On étend sur une coupelle une couche d'argile dans laquelle on trace une rainure au moyen d'un instrument en forme de V. on imprime à la coupelle des chocs semblables en comptant le nombre de chocs nécessaires pour fermer la rainure sur 1 cm, on mesure alors la teneur en eau de la pâte, bien entendu, tout l'appareillage est rigoureusement normalisé, W_L correspond à 25 coups. (Voir la Figure.II.2)



Figure.II.2 : Essai de limite de liquidité

2.4.1.2. La limite de plasticité W_p

Pour déterminer la limite de plasticité, on roule l'échantillon en forme de fuseau qu'on amincit progressivement. La limite de plasticité est la teneur en eau du fuseau qui se brise en petits tronçons de 1 à 2 cm de long au moment où son diamètre atteint 3 cm. On exécute en général, 2 essais pour déterminer cette limite. (Voir la figure II.4)

2.4.1.3. Indice de plasticité I_p

L'indice de plasticité I_p est la différence entre la limite de plasticité et la limite de liquidité, il mesure l'étendue du domaine de plasticité du sol. Il s'exprime donc par la relation :

$$I_p = W_L - W_p$$

La figure II.3 présente l'état de sol, la limite de plasticité et de liquidité en fonction de la teneur en eau

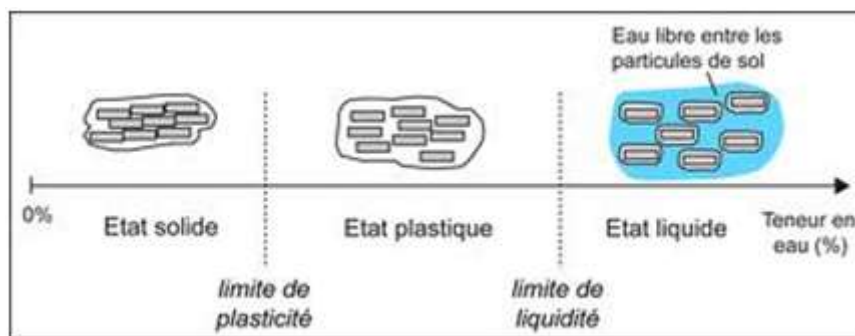


Figure II.3 : Présente l'état de sol, la limite de plasticité et de liquidité en fonction de la teneur en eau

La classification des sols selon la limite de liquidité et l'indice de plasticité présenté sur le tableau II.3

Tableau II.3 : Classification de Casagrande pour les sols fins [45]

	Limite de liquidité (W_L)	Indice de plasticité
Sable	$W_L \leq 35$	$I_p \leq 15$
Limon	$35 < W_L < 60$	$15 < I_p < 25$
Argile	$W_L \geq 60$	$I_p \geq 25$

La classification des sols en fonction de l'indice de plasticité présenté sur le tableau II.4.

Tableau II.4 : Classification des sols en fonction de l'indice de plasticité [45]

Indice de plasticité	Caractéristique
$I_p \leq 12$	Faiblement argileux
$12 < I_p \leq 25$	Moyennement argileux
$25 < I_p \leq 40$	Argileux
$I_p > 40$	Très argileux

La classification des sols fins est présentée sur les figures II.4.

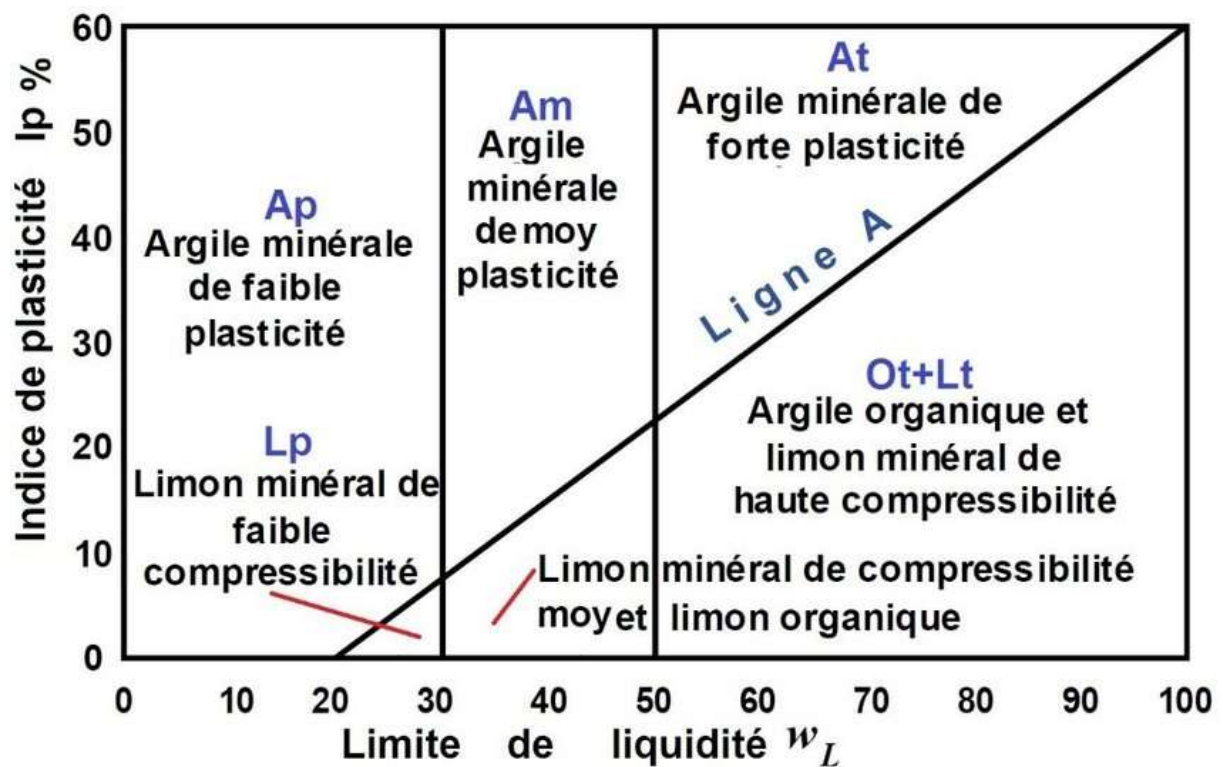


Figure II.4 : L'abaque de Casagrande pour la classification des sols fins

Figure II.5 présente la classification des sols

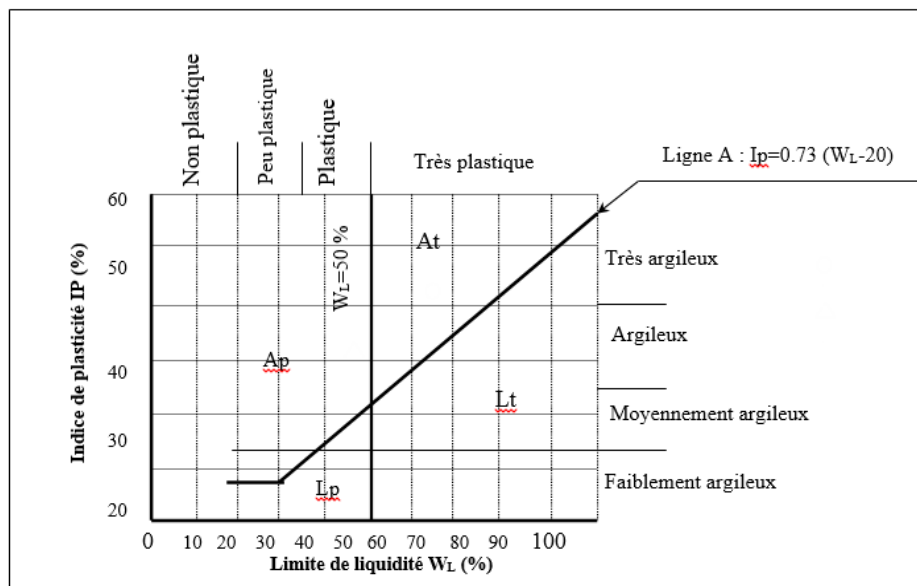


Figure II.5 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande [45].

Avec :

A_t : argiles très plastiques. A_p : argiles peu plastiques.

L_t : limons très plastiques. L_p : limons peu plastiques.

2.5. Essai de Proctor

2.5.1. Le but de l'essai

Cet essai permet de déterminer les caractéristiques de compactage d'un matériau en évaluant la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale selon l'énergie de compactage appliquée à l'éprouvette on distingue l'essai Proctor normal et modifié, qui conduit à des valeurs de couple différente.

Cet essai s'applique sur la fraction granulaire des matériaux testés avec un $D_{max} < 20$ mm

2.5.2. Principe

Le principe de l'essai consiste à humidifier un matériau à différentes teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle.

Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la densité sèche du matériau et on trace la courbe des variations de cette densité en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la densité sèche du matériau γ_{dmax} qui est obtenue pour une valeur particulière de

la teneur en eau **W_{opt}**, ce sont ces deux valeurs qui sont appelées caractéristiques optimales de compactage Proctor normal ou modifié suivant l'essai réalisé.

Deux essais Proctor sont reconnus par décision n 2128 du directeur du L.C.P.C : « l'essai Proctor normale et l'essai Proctor modifié dont les caractéristiques sont données dans le tableau II 5 :

2.5.3. Essai Proctor Normal (NF P 94-093) : Résistance souhaitée relativement faible, du type remblai non ;

Ou peu chargé ;

2.5.4. Essai Proctor Modifié (NF P 98-231-1) : Forte résistance souhaitée, du type chaussé autoroutière ;

Moule Proctor : Ø = 101.6 mm, H =117 mm

Les caractéristiques du moule Proctor présenté sur le tableau II.5

Tableau II.5 : les caractéristiques du moule Proctor

	Proctor normal	Proctor modifié
Poids de la dame	2 490 g	4 535 g
Diamètre du mouton	51 mm	51 mm
Hauteur de chute	305 mm	407 mm
Nombres de couches	3	5
Nombre de coups par couche	25	25
Poids approximatif d'une couche	650 g	400

2.6. L'Absorption d'eau NF 1097-6

L'essai consiste à poser des échantillons dans un bac à eau pendant 24 h et on mesure l'augmentation de la masse des échantillons (P h). L'indice A de l'absorption totale de l'eau de chaque échantillon est conventionnellement exprimé par la formule :

$$A\% = \frac{P_h - P_s}{P_s} \dots \dots \dots (4)$$

Où :

Ph : poids de l'échantillon à l'état humide.

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

3. Essais chimiques :

3.1. Essais Bleu Méthylène (NF P 94-068)

3.1.1. Principe

Consiste à mesurer par dosage la quantité de bleu de méthylène pouvant être adsorbée par le matériau mis en suspension dans l'eau.

La valeur de bleu du sol est directement liée à la surface spécifique des particules constituant le sol ou le matériau.

3.1.2. But de l'essai

Mesure la capacité d'adsorption d'un sol, déterminer l'argilosité d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol.

Pour calculer la valeur au bleu du sol (VBS) en appliquant la formule suivante :

$$Valeur\ du\ bleu = \frac{Masse\ du\ bleu\ introduite}{Masse\ sèche} ; \quad VB = \frac{B}{Ms} \dots \dots \dots (5)$$

Une relation entre la surface spécifique totale (Sst) et la valeur de bleu méthylène de la phase argileuse V_B (0/2 μm) :

$$Sst = 21 V_B (0/2\mu m) \dots \dots \dots (6)$$

Le tableau II.6. Présente la classification des argiles selon la surface spécifique Sst.

Tableau II.6 : Classification des argiles selon la surface spécifique (S_{st}) [45]

Espèce Minérale	S_{st} (m^2/g)
Montmorillonite	700 – 840
Illite	65 – 100
Kaolinite	10 – 20

4. Essais Mécaniques

4.1. But des essais

Les essais consistent à suivre le phénomène de durcissement dans le temps. Ces essais consistent à soumettre les éprouvettes compactées à des efforts de compression simple et de traction.

4.2. Préparation des échantillons

Les essais sont réalisés sur des échantillons confectionnés avec des éléments dont le diamètre de 5mm et compactés une teneur en eau et densité sèche de l'essai Proctor Normal, les mélanges utilisés dans ce projet sont (Argile pure, 90% argile + 10% sable, 80% argile + 20% sable, 70% argile + 30% sable, 60% argile + 40% sable)

Le mélange Argile + Sable et Argile + Sable + Liant (Chaux) a été préparé selon les conditions du Proctor Normal de chaque mélange.

On ajoute la proportion massique du sable ou liant correspondant à X_s^1 % ($X_s = 00\%$, 10% , 20% , 30% et 40%) et X_L^2 % ($X_L = 7\%$, 11% , 15% , 19%) de poids sec d'Argile et on mélange manuellement jusqu'à avoir une couleur homogène.

On ajoute une quantité d'eau représentant W_{opt} de poids sec du mélange, le tout malaxé manuellement dans le but d'avoir un mélange homogène Le mélange humide est soumis par la suite à un compactage statique à un seul piston dans un moule de diamètre 50 mm et 160 mm de hauteur (voir la Figure.II.6 et la Figure II.7).

¹ X_s : Quantité de sable ajoutée proportionnellement au poids sec d'argile

² X_L : Quantité de liant ajoutée proportionnellement au poids sec d'argile + sable



Figure.II.6 : Moule utilisé dans le compactage



Figure.II.7 : Presse hydraulique

4.3. Résistance à la compression simple (NF P 98-232-1)

La connaissance de cette dernière est de grande importance dans notre programme expérimental, Vu qu'elle nous permet de connaître l'aptitude du matériau à travailler dans les conditions de charges normales (en service), comme élément rentrant dans la construction des murs porteurs.

Pour l'essai de compression, les éprouvettes ont été soumises à un effort de compression dont la vitesse est 1mm/s appliqué parallèlement à l'axe du cylindre (voir figure II.8).

Les résultats pour chaque point sont les moyennes de trois valeurs.

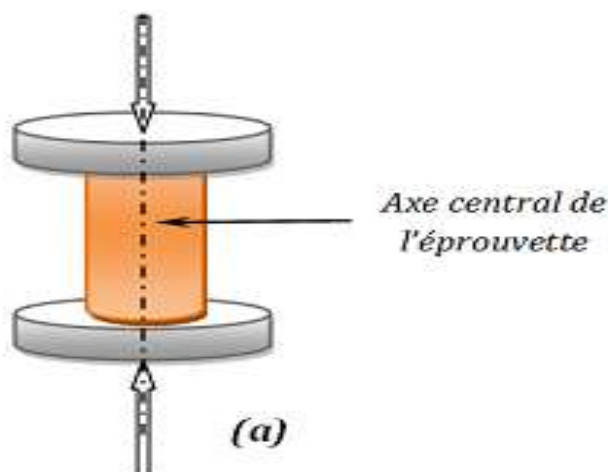


Figure II.8 : Schéma du mode d'application de l'effort de compression

4.4. Résistance à la traction (NF P 98-232-3)

Sachant que notre matériau ne travaille pas seulement en compression simple mais elles peuvent être aussi assujetties à des efforts de traction.

Concernant l'essai de traction, il ya plusieurs modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction (Figure II.9), parmi ces essais nous citons :

- Traction directe (non applicable aux sols) ;
- Traction par flexion (non applicable aux sols) ;
- Traction par fendage (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale (NF P 98-232-3). (Voir figure II.10, II.11)

$$R_t = 0,8 R_{tb} \text{ [46]}$$

R_t : Résistance à la traction

R_{tb} : Résistance à la traction par fendage

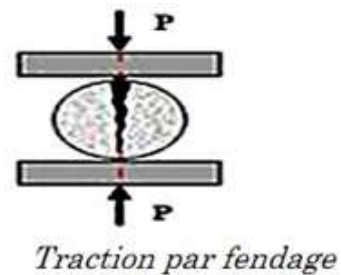


Figure II.9 : Modes de chargement permettant de soumettre une éprouvette à une contrainte de traction

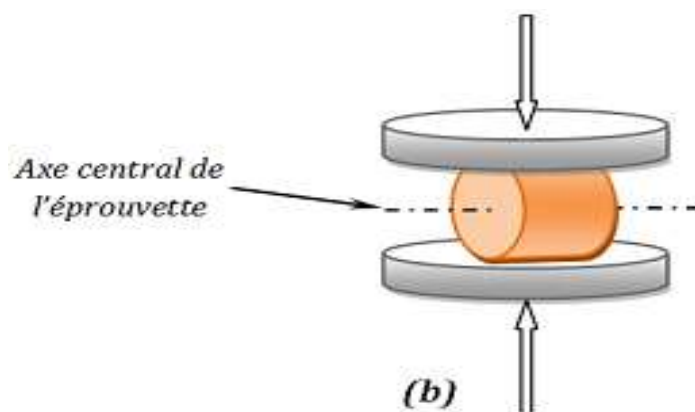


Figure II.10 : Schéma du mode d'application de l'effort de Traction par fendage (essai brésilien) ou l'essai de compression diamétrale



Figure II.11 : Essai de traction par fendage (essai brésilien)

4.5. Propriétés mécaniques des fibres

Les essais de traction ont été effectués sur une machine universelle de type MTS qui est pilotée par ordinateur (Figure II.12) Les fibres subissent un étirement sous une vitesse constante (5 mm/min). Le dépouillement des résultats, nous permet d'obtenir le module d'Young, la contrainte à rupture et l'allongement à la rupture.



Figure II.12: Machine universelle de type MTS pilotée par ordinateur

La figure II.13. Présente dispositif de l'essai de traction de fibre végétale.



Figure II.13 : Dispositif de l'essai de traction de fibre végétale de sisal.

5.Observation au microscope électronique à balayage "MEB"

On a examiné les surfaces de rupture des échantillons étudiés par Microscopie optique.
(Figure II.14)



Figure II.14 : Microscope électronique à balayage "MEB" au PTAPC LAGHOUAT CRAPC

6. Caractéristiques des Matériaux Utilisées

Le programme expérimental consiste à effectuer une série d'essais pour déterminer un bon nombre de paramètres et d'indices permettant l'identification des matériaux.

- Concernant l'identification des argiles, l'étude expérimentale comprend les analyses et les essais suivants :
 - Masse volumique
 - Analyse chimique
 - Analyses granulométriques par sédimentation.
 - Les limites d'Atterberg : Classification des argiles.
 - Essais de Proctor Normal.
 - Essais au bleu de méthylène.
 - Absorption de l'eau.
- Les essais menés sur le sable de dune sont :
 - Analyse granulométrique.
 - Essais « équivalent de sable ».
 - Essai au bleu méthylène.
- Les essais menés sur la chaux
 - Analyse chimique
- L'essai menés sur les fibres de sisal sont :
 - Analyse chimique
 - Propriétés physiques
 - Propriétés mécaniques

6.1. Argile :

Cette argile provienne de la région de Mraigha (prélevée de la carrière de Sofabril, une briqueterie de la région) distante de 6 Km au Nord de la ville de Laghouat. Elle se présente sous forme d'un sol de couleur Marron (Figure II.15 et II.16).



Figure II.15 : Localisation de la zone étudiée



Figure II.16 : L'argile de la région de Mraigha-Laghouat

6.1.1. Masse Volumique

Les résultats des masses volumiques représentées la moyenne de deux essais.

6.1.1.1. Masse Volumique Apparente

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau II.7.

Tableau II.7 : Essai de la masse volumique apparente

	Essai 1	Essai 2
M_0 (g)	2555.55	2555.55
M_1 (g)	2898	2919
V_1 (cm ³)	255.125	255.125
γ_{app} (g/cm ³)	1.3449	1.4246
γ_{app} moyenne (g/cm ³)	1.385	

6.1.1.2. Masse Volumique Absolue

Les résultats des essais sont présentés dans le tableau II.8

Tableau II.8: Essai de la masse volumique absolue

	Essai 1	Essai 2
M_1 (g)	347	347
V_1 (cm ³)	487	487
V_2 (cm ³)	691	705
γ_{ab} (g/ cm ³)	1.700	1.59
γ_{ab} moyenne (g/ cm ³)	1.645	

- ❖ D'après le tableau II.1 et les tableaux II.7 et II.8, les résultats des masses volumique apparente et absolue sont l'intervalle de résultats données par le tableau.II.1.

6.1.2. Analyse Granulométrique

La figure II.17. Présente la courbe granulométrique d'argile

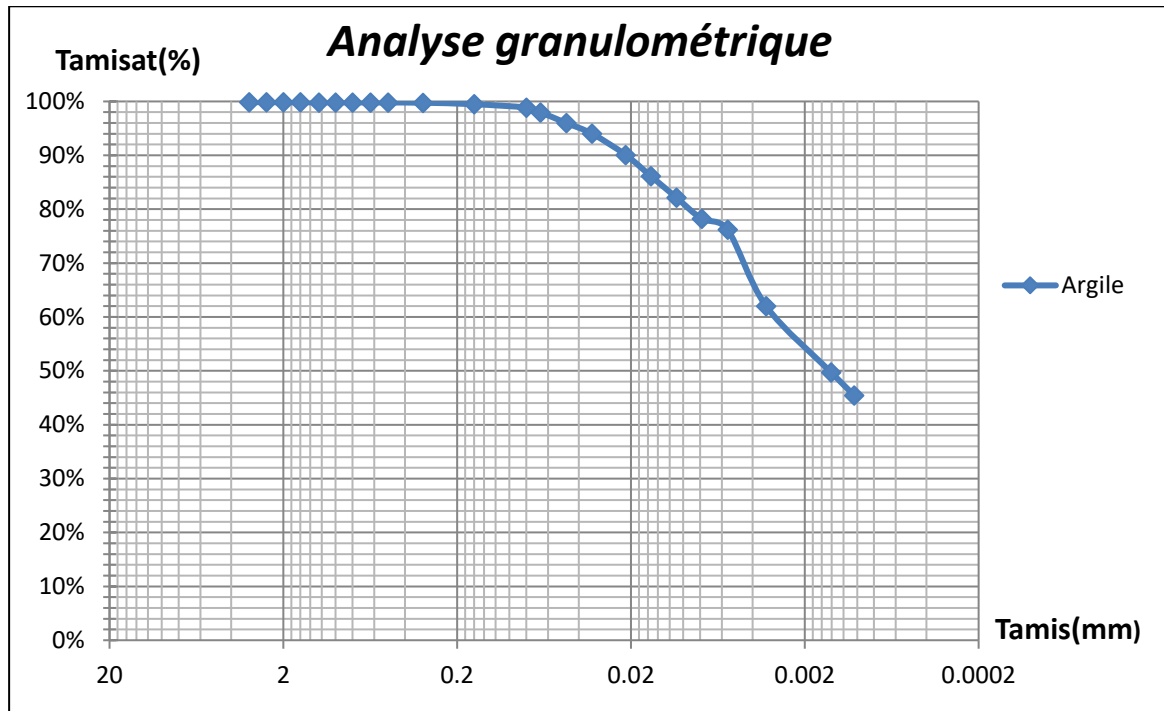


Figure II.17 : Courbe granulométrique d'argile

- ❖ Plus que 98% du passant sont inférieur à 0.08 Ø (80 µm) et 50% du passant sont inférieur à 0,00104207Ø.

6.1.3. Les limites d'Atterberg

Les résultats des limites d'argiles ont présenté dans le tableau II.9.

Tableau II.9 : Les limites d'Atterberg d'argile.

	Limite de liquidité (WL%)	Limite de plasticité (WP %)	Indice de plasticité (IP %)
Argile	53	31	22

Pour déterminer l'état d'argile utilisée, portant les résultats obtenus sur le diagramme de Casagrande. (Voir figure II.18)

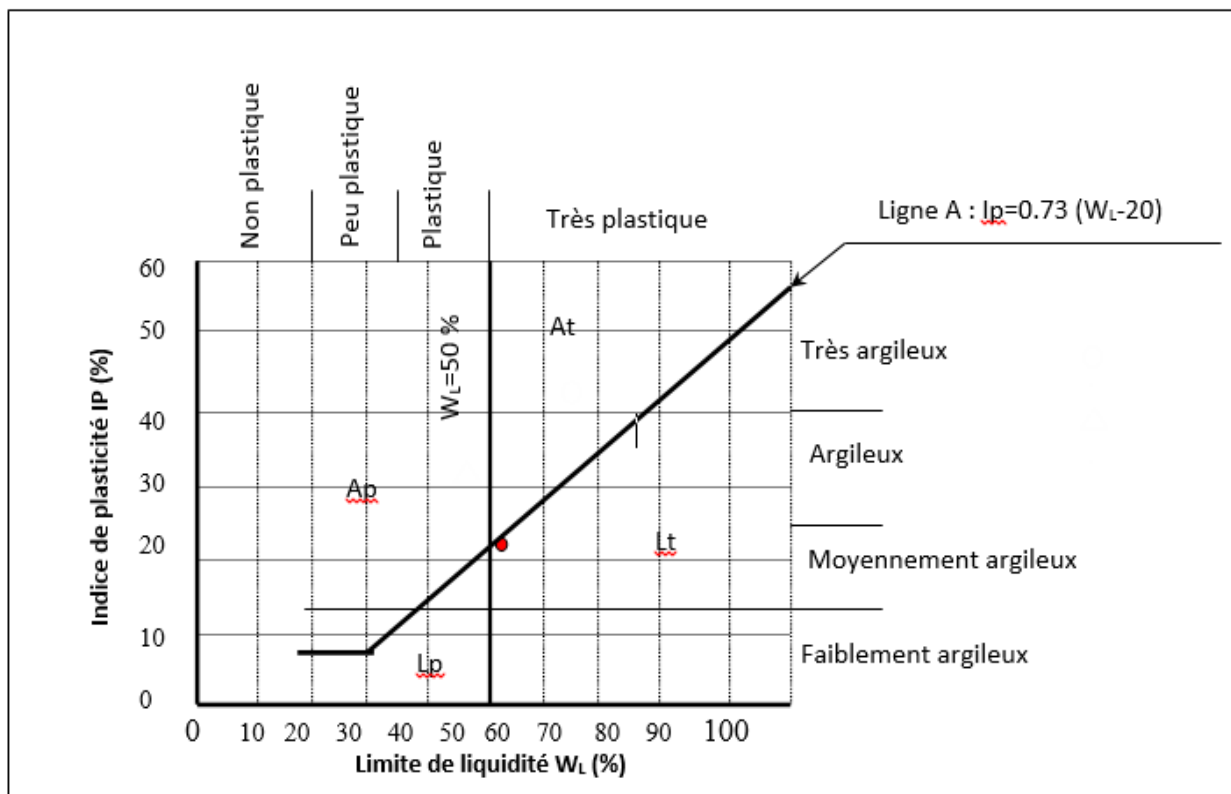


Figure II.18 : Classification des sols fins sur le diagramme de Casagrande [45]

- ❖ D'après le tableau II.3 page 32, notre sol classe parmi les sols limoneux.
- ❖ D'après le tableau II.4 page 33, notre sol est moyennement argileux.
- ❖ D'après la figure II.5 page 34 notre sol est plastique moyennement argileux.

6.1.4. Essai de Proctor Normal

Cet essai normalisé (NF P 94-093), permet de reproduire au laboratoire plus ou moins les conditions de compactage sur chantier. Il est effectué généralement selon deux modes de compactages d'intensités différentes : par l'essai Proctor modifié à énergie plus intense et par l'essai Proctor Normal (à énergie moyennement poussée), ce dernier a été choisi pour mener cette investigation.

La figure II.19 représente la courbe de Proctor Normal du sol utilisé (Argile).

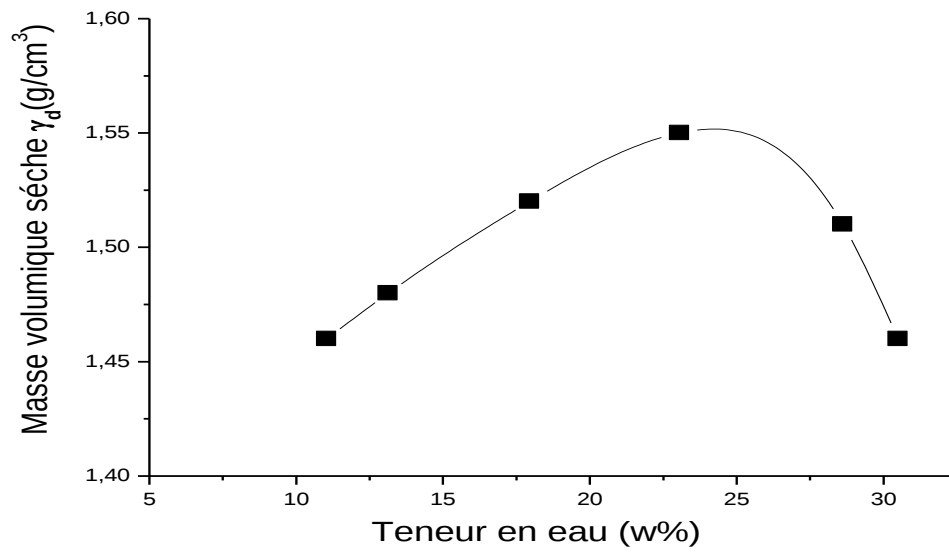


Figure II.19 : Courbe Proctor d'argile utilisé [47].

Les résultats de l'essai Proctor Normal montrent que l'argile a une densité maximale

$\gamma_{dmax}=1.55 \text{ g/cm}^3$ et une teneur en eau optimale $W_{opt}=24.4\%$

Le tableau II.10 présente l'analyse chimique d'argile.

Tableau II.10 : Analyse chimique d'argile Mrigha

Elément chimique	Sulfates SO_4^-	Carbonates $CaCO_3$	Chlorures Cl^-	Matières organiques
Pourcentage %	2.347	22.14	0.53	2.11

6.1.5. Essai au bleu de méthylène

Les résultats de cet essai sont regroupés dans le tableau II.11

Tableau II.11 : Résultats de l'essai au bleu de méthylène [47].

Sols	V _B	Sst (m ² /g)
Argile	3.8	79.8

* D'après le tableau II.6 page 37, l'argile étudiée est classée comme une Illite.

6.2. Sable de dune

Comme la région de Laghouat est considérée comme une région saharienne (région aride), la zone de provenance de sable de dune est située dans les environs très proches de la ville (Oasis nord).

6.2.1. Analyse chimique :

Cette analyse a été effectuée par l'LNHC³ de DJELFA, et qui a donné les résultats qui sont illustrés dans le tableau II.12

Tableau II.12 : Analyse chimique du sable de dune

Elément chimique	Symboles	Pourcentage du Sable de dune (%)
Résidu insoluble	SiO ₂ +Silice	95.87
Sulfates	SO ₃	0.91
Chlorures	Cl ⁻	0.36
Carbonate de Calcium	CaCO ₃	2.5
Matières organiques	MO	-----

- ❖ La constatation importante a signalé, est la présence d'un fort pourcentage en silice qui est supérieur à 95%, et par conséquent, le sable de dune de Laghouat est un sable siliceux.

³Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

6.2.2. Analyse Granulométrique

L'essai normalisé (NF P 18-560), par voie sèche, nous permet de déterminer la répartition des grains de sable suivant leurs grosseurs, cette répartition est traduite par la courbe granulométrique de la figure II.20.

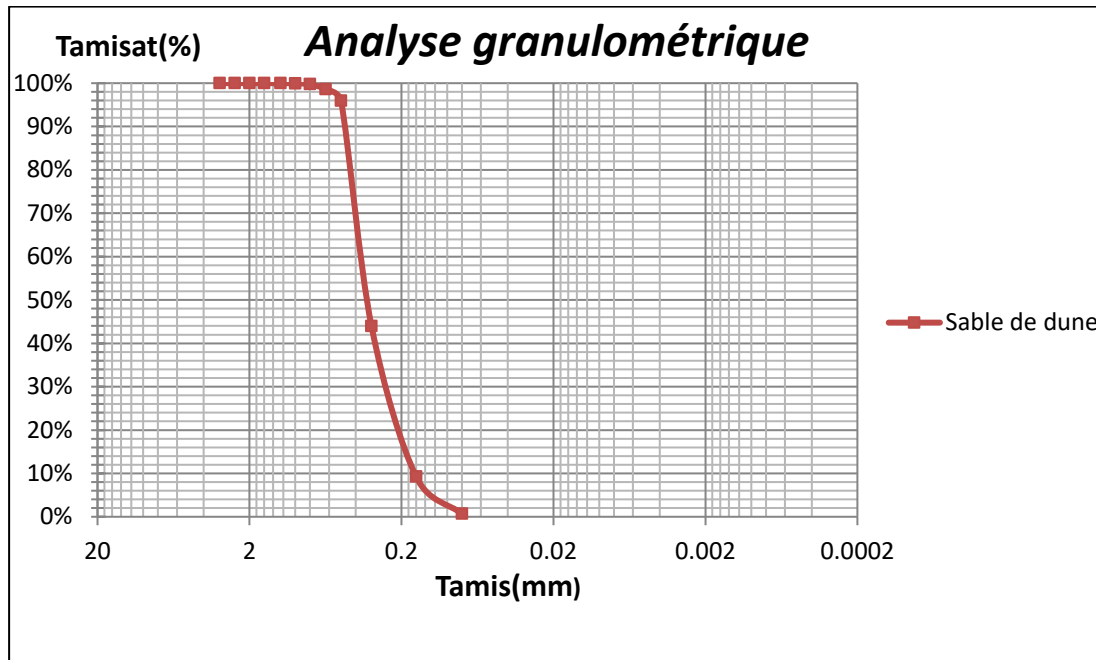


Figure II.20 : Courbe granulométrique du sable de dune.

Le tableau.II.13 présente le Paramètres d'identifications.

Tableau II.13 : Paramètres d'identifications de sable de dune

Granulométrie		
Paramètres	Cu	Cc
Sable	1,67	1,1

Cu : coefficient d'uniformité dit de Hazzen. $Cu = D_{60}/D_{10}$

Cc : coefficient de courbure. $Cc = (D_{30})^2/D_{60}.D_{10}$

- ❖ A partir de ces résultats, et d'après la classification des sols LCPC (C.208), le sable de dune se classe parmi les sables propres mal gradués symbolisé par les lettres SM (sable mal gradué), de granulométrie moyenne. Sa courbe est uniforme et serrée.

6.2.3. Equivalent de sable

Les résultats de l'essai de l'équivalent de sable de dune sont résumés dans le tableau II.14

Tableau II.14 : Résultats de l'essai d'Equivalent de sable

	Equivalent de sable	
Paramètres	ES _V	ES _P
Sable	84.17	74.20

A partir du tableau II.2 page 30 le sable de dune est classé parmi le sable propre.

6.2.4. Essai au bleu de méthylène

Les résultats de cet essai sont inclus dans le tableau.II.15

Tableau II.15 : Paramètres d'identifications de sable de dune

	Bleu de méthylène	
Paramètres	V _B	Sst (m2/g)
Sable	0.067	1.4

- ❖ D'après le tableau II.6 page 46 la valeur de la surface spécifique totale étant très faible, ce qui est en accord avec la définition même de la surface spécifique, que plus le taux des particules fins est important plus sa surface spécifique est grande.

6.3. Fibres de sisal

Les fibres utilisées dans cette étude sont des fibres végétales, il s'agit des fibres de sisal, connues par un nom commun Filasse. (Voir figure II.21)



Figure.II.21 : Fibres de Sisal

6.3.1. Absorption d'eau

(Voir figure. II.22)

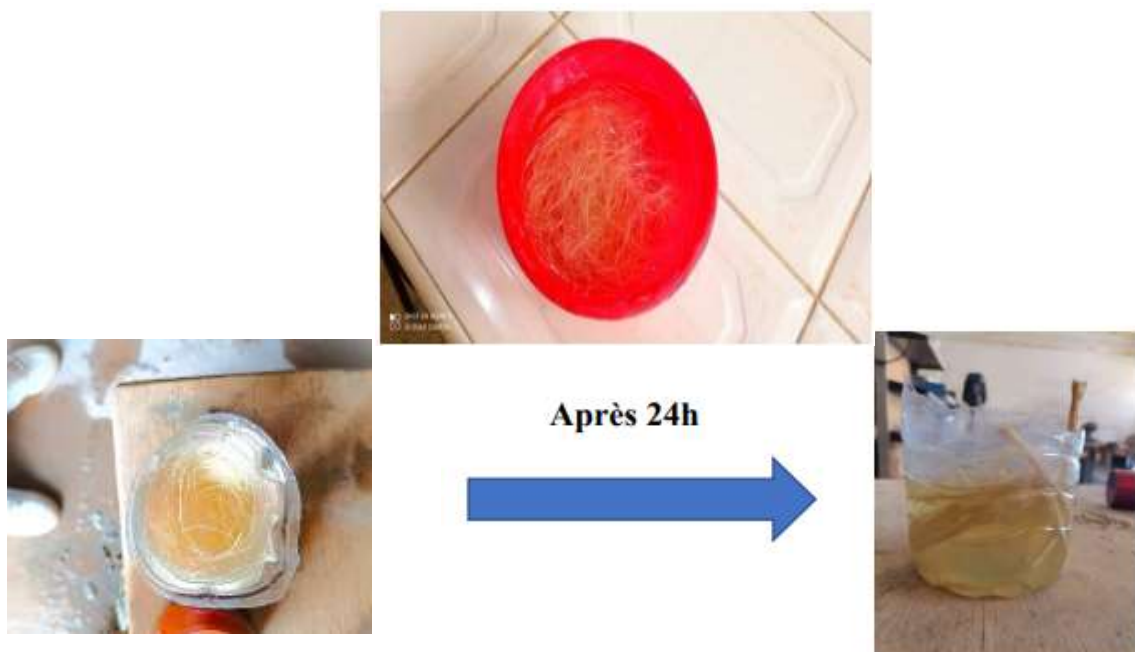


Figure II.22 : Absorption de l'eau par les fibres (%)

Le tableau II.16 Donne les résultats d'absorption d'eau.

Tableau II.16 : Résultats d'absorption d'eau par les fibres (%)

	Sec	Humide
La masse des fibres (g)	4.85	7.5

$$A\% = \frac{Ph - Ps}{Ps} = 54.64 \%$$

Ph : le poids humide de fibre

Ps : le poids sec de fibre

A% : pourcentage d'absorption d'eau

6.3.2. Analyse chimique :

Le tableau II.17 donne les résultats d'analyse chimique.

Tableau II.17 : Résultat d'analyse chimique de Sisal.

Nom De composition Chimique	Résultats (%)
Cellulose	49 à 78,8
Hémicellulose	10 à 24
Lignin	8 à 11
Pectine	2
Pentosanes	24

* D'après le tableau. II.17, les principaux constituants de fibre de sisal sont, le cellulose 50% et hémicellulose 20%, Aussi lignin et pentosane avec faible pourcentage de pectine 2%.

6.3.3. Propriétés mécaniques des fibres

Le tableau II.18 présente les résultats aux propriétés des fibres de sisal.

Tableau II.18 : propriétés physico-mécaniques des fibres de sisal non saturé (l'état naturel) [48].

Longueur des fibres	L=20 mm	L=30mm
Résistance à la traction [MPa]	600	350
Déformation à la rupture %	d=3.6	d=2.9
Module de Young (MPa)	E=23.265	E=16.815
Masse volumique apparente	69 kg/m ³	
Masse volumique absolue	1.18 kg/cm ³	

Le tableau II.19. Présente propriétés mécaniques des fibres.

Tableau II.19: Propriétés mécaniques des fibres l'état saturé [48].

Longueur des fibres	L=20 mm	L=30mm
Résistance à la traction [MPa]	900	800
Déformation à la rupture %	d=4.8	d=5.4
Module de Young (MPa)	E=18.337	E=15.001

- ❖ D'après le tableau II.19, on remarque que les fibres à l'état saturé sont supérieures à celle obtenue pour l'état naturel, par contre le module de Young de

fibre de sisal a l'état saturé diminue par rapport à l'état naturel. On remarque aussi que la résistance à la traction diminue en augmentant la longueur de fibre, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par [49].

6.3.4. Microstructure de fibres de sisal utilisées

Une étude de microstructure des fibres utilisées effectuée dans PTAPC LAGHOUAT CRAPC a été menée par microscope électronique à balayage équipé d'une microanalyse au centre de caractérisation physico-chimique à Laghouat. Les résultats sont représentés sur les figures ci-dessous.

La figure II.23 présente la coupe transversale de la fibre de sisal et qui montre que la fibre de sisal possède une section pleine comme les fibres du palmier dattier et contrairement aux fibres de cellulose.

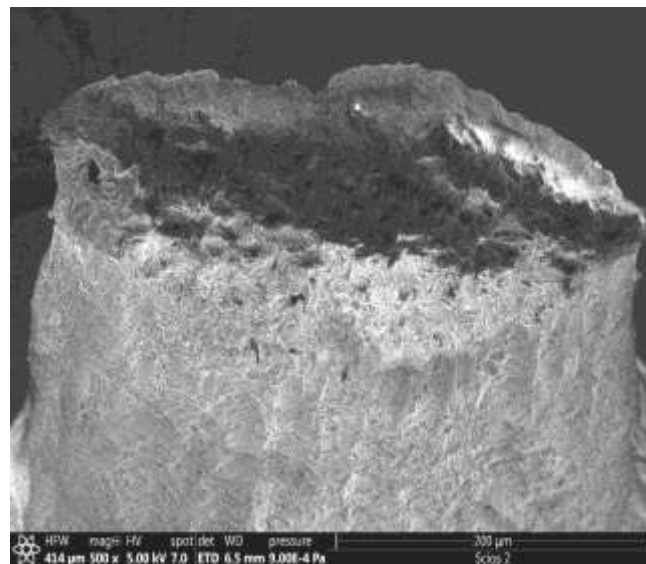


Figure II.23: Section transversale de la fibre de sisal

La figure II.24 montre que la fibre de sisal est constituée de très petits filaments formés d'un ensemble de feuillets. Les feuillets désordonnés permettent la flexibilité du filament.

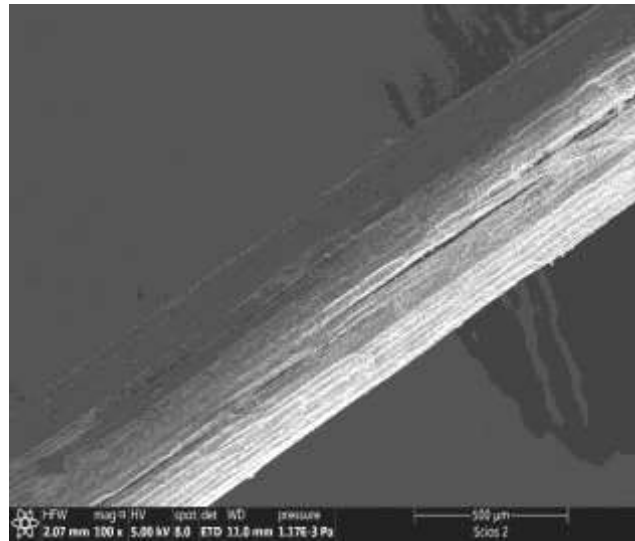


Figure II.24 : Vue longitudinale de la fibre de sisal par MEB

Il est montré sur La figure II.25, que la fibre de sisal est poreuse, ce qui affirme sa caractéristique hydrophile (le pouvoir d'absorber l'eau).

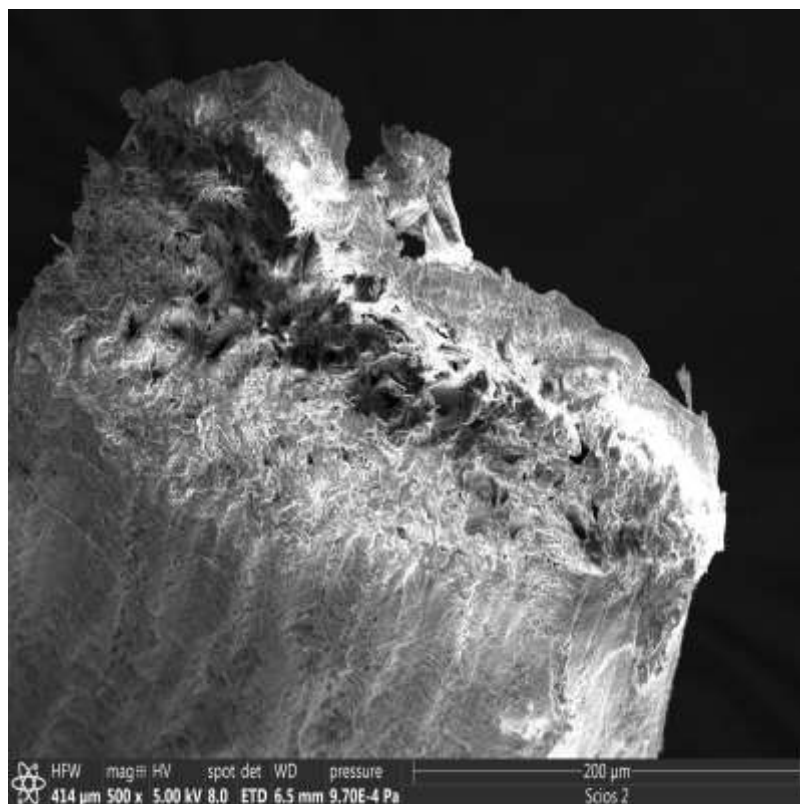


Figure II.25 : Observation des pores dans la fibre de sisal

La figure II.26 montre que la fibre de sisal possède des enchevêtrements sur sa surface ce qui améliore la liaison interfaciale fibre-matrice.

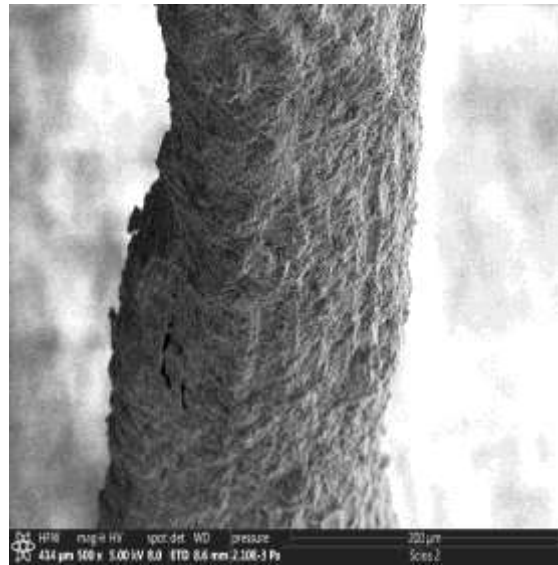


Figure II.26: Surface alvéolaires de la fibre de sisal

La microanalyse de la fibre de sisal montre la présence des atomes carbone et oxygène avec un pourcentage atomique important par rapport aux autres atomes et que le carbone est l'élément le plus prépondérant, ce qui affirme la présence des groupes carboxyliques provenant des constituants de la cellulose. Figure II.27.

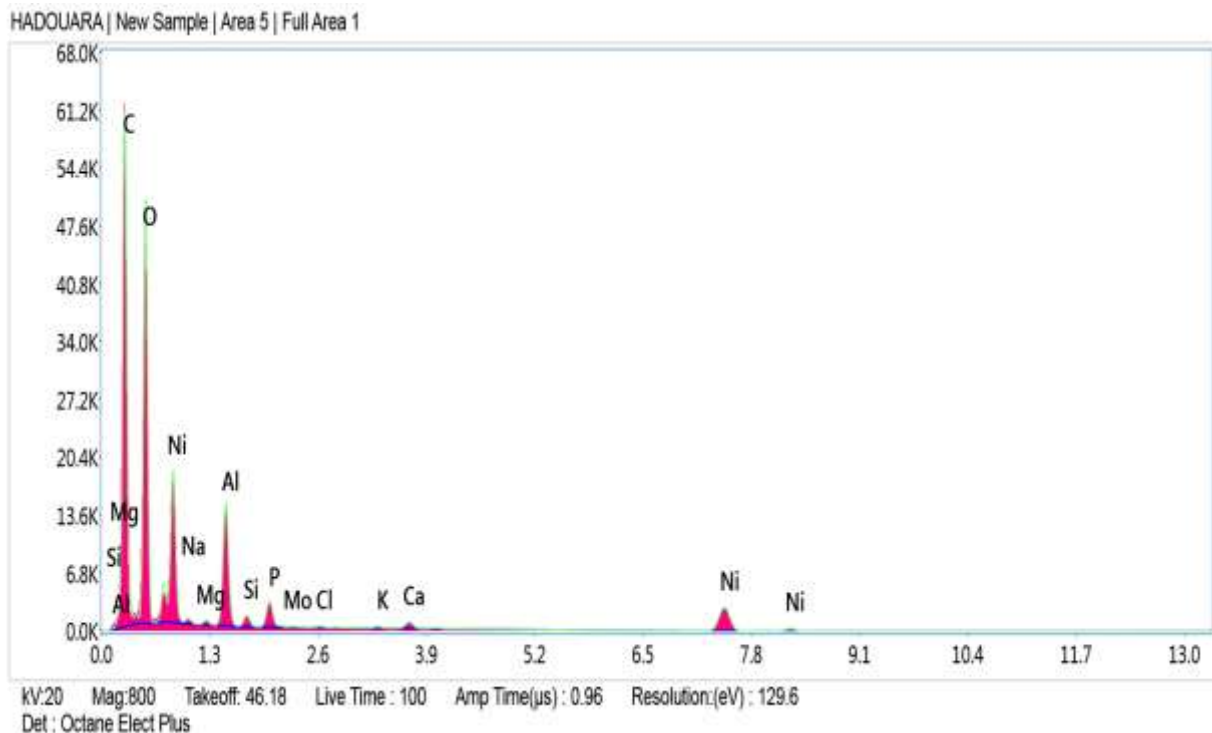


Figure II.27 : Microanalyse de la fibre de sisal par MEB "PTAPC LAGHOUAT CRAPC"

6.4. La Chaux

Tous les types de la chaux peuvent être utilisés, pour la stabilisation du sol. Dans cette étude, la chaux vive (Figure II.28), produite par l'unité de SARL.BMSD chaux de Saida, a été utilisé.



Figure.II.28 : La chaux de Saida

Les différents types de liants se distinguent par le mécanisme de leur durcissement qui est influencé par la composition des matières de départ. La chaux utilisée durant notre étude est celle de la région de Saida ; c'est une chaux éteinte présentant une faible concentration en éléments oxydes comme les silicates SiO_2 , et aluminates Al_2O_3 et une forte concentration en éléments basiques comme la chaux libre CaO , ce qui donne à notre liant son aspect aérien.

6.4.1. Analyse chimique de la chaux

L'analyse chimique réalisée au laboratoire de l'unité de fabrication de la chaux de Saida a donné les résultats récapitulés dans le tableau II.20.

Tableau II.20 : Composition chimique de la chaux de Saida

Composition chimique	Chaux broyée	Chaux hydratée
Humidité	< 5%	- -
CaO	> 83,3%	67,4% - 73,25%
MgO	< 0,5%	< 0,4 %
Fe₂O₃	< 2%	< 2%
Al₂O₃	< 1,5%	< 1%
SiO₂	< 2,5%	< 2,2%
SO₃	< 0,5%	< 1%
K₂O+NaO	0,47 à 0,50	< 0,4%
CO₂	< 5%	< 5%
CaCO₃	< 10%	< 10%
Ca (OH)₂		< 80%
Constance volumique	Bonne	Bonne
Insoluble	< 1%	< 0,35%

6.4.2. Caractéristiques physiques de la chaux

Le tableau II.21 qui donne les propriétés physiques.

Tableau II.21 : Propriétés physiques de la chaux utilisées

Masse volumique absolue (g/cm ³)	Masse volumique apparente (g/cm ³)	Surface spécifique (Kg /m ²)
2230g/m³	1490g/m ³	300/Kg/ m ²

6.5. Eau de gâchage

L'eau utilisée dans le mélange provient du réseau public.

7. Formulation et Préparation des éprouvettes de mortier de terre

7.1. Matériels spécifiques

Les moules cylindriques (diamètre=5 cm, hauteur=10 cm), (Figure.II.29) utilisées pour la détermination des différents essais fixés par notre programme (essai mécanique), le démoulage de moule cylindrique est effectué par la presse hydraulique voir la Figure.II.30.



Figure II.29 : Moule cylindrique



Figure II.30 : Démoulage du moule cylindrique

7.2. Formulation du BTCF

7.2.1. Optimisation de la chaux

La teneur en chaux optimale pour la brique peut être déterminée par essai de compression simple. Les pourcentages utilisés pour faire cette opération sont : 7%, 11%, 15%, 19%. Les résultats de l'optimisation sont présentés dans la figure II.31 et la figure II.32. Donc optimale est 15%.

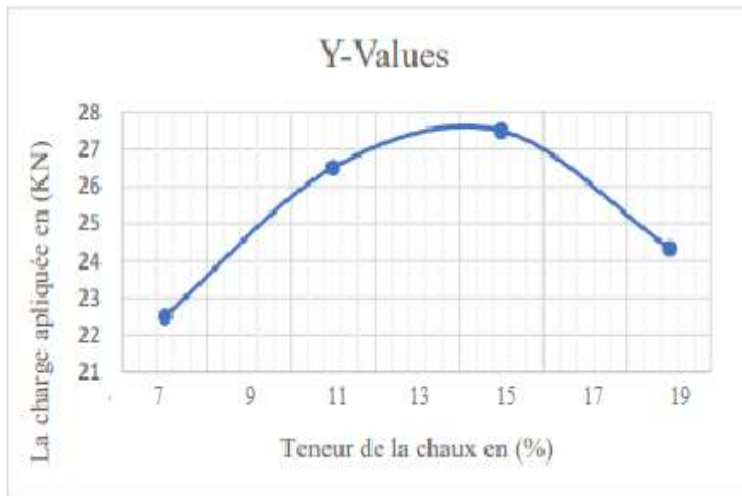


Figure II.31 : la teneur en chaux



Figure II.32 : mélange de chaux sec

7.2.2. Mélanges

Le poids du mélange global sec pour chaque béton il est pris (7 moules cylindriques) est pris égale à 2850 Kg, pour chaque mélange.

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur le tableau.II.22.

Tableau.II.22 : La composition des mélanges

Argile (%)	80	80	80	80	80	Par rapport au mélange sec (Sol-sable)
Sable de dune (%)	20	20	20	20	20	
Chaux (%)	15	14.75	14.5	14.25	14	Par rapport au mélange sec global
Fibres (%)	0	0.5	1	1.5	2	
Eau (%)	19.3	19.05	18.8	18.55	18.3	

8. L'essai d'absorption d'eau par BTCF :

L'absorption à l'eau du mortier de terre en fonction de la teneur et longueur des fibres après 1 jours d'immersion dans l'eau. (Voir figure II.33)

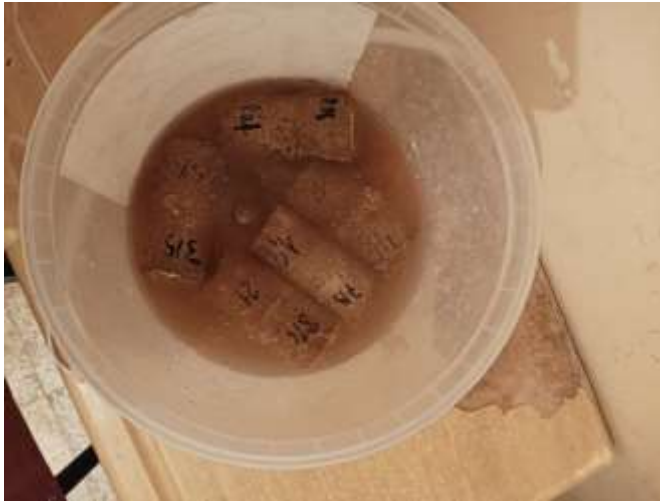


Figure II.33 : L'essai d'absorption d'eau pour différents échantillons

9. Conclusion

Dans ce chapitre, on a défini les méthodes, les principes et les modes opératoires des essais d'identification physique tel que la masse volumique, l'analyse granulométrique, équivalent de sable, les limites d'Atterberg, l'essai de Proctor, l'essai d'absorption d'eau et L'analyse chimique et d'autre part, les essais mécaniques tel que la résistance à la compression simple et à la traction par fendage (Essai Brésilien). Tous ces essais sont réalisés selon des normes normalisées et bien étudiés.

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

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

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

-L'analyse des résultats montre que :

- L'argile utilisée de Mrigha est une argile plastique moyennement argileux et qui a tendance d'être une Illite, et il a une teneur en eau optimale $W_{opt}=24.4\%$.
- Pour le sable de dune, c'est un sable siliceux propre et qui présente une courbe granulométrique serrée et se classe parmi les sables propres mal graduée (SM).
- Les fibres de sisal ont une bonne résistance qui est dans l'intervalle 350 à 900 MPa donné par la littérature, cette résistance due au pourcentage élevé de cellulose, avec une déformation à la rupture supérieure par rapport aux autres fibres végétales excepte les fibres de coco, et une valeur d'eau moyenne est de 54.64 %.
- La chaux utilisée est une chaux aérienne d'espèce sur l'analyse chimique.

La présentation de la composition des mélanges et les procédures de fabrication des BTCF dans ce chapitre, va nous permettre de mieux analyser les résultats et d'avoir une meilleure compréhension de l'influence des différents paramètres étudiés sur les propriétés du BTC fibré par le sisal.

Chapitre III : Résultats et interprétations

1. Introduction

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

Le choix des proportions optimales de fibre dans notre étude est réalisé sur des mélanges de mortier de terre à base d'un sol de la région de Biskra et stabilisé chimiquement avec 15% de chaux vive.

Le renforcement du mortier de terre par les fibres de sisal est réalisé par l'incorporation de divers teneurs (0%,0.5%,1%,1.5% et 2%), ce dernier est répété avec deux longueurs des fibres, à savoir : 20 mm et 30 mm.

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

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

- La résistance mécanique du mortier de terre : la résistance à la compression et la résistance à la traction par fendage ; la masse volumique apparente du mortier de terre ;
- L'insensibilité du mortier de terre vis-à-vis de l'eau, à savoir l'absorption ;
- L'étude de l'influence fibre-matrice et microanalyse par MEB.

- ❖ Les figures obtenues représentent les différentes échantillons (argile + sable), (argile + sable + chaux), (argile + sable + chaux + fibre) :



Figure.III.1 : Les échantillons (argile + sable de dune + chaux) qui ont été testés lors de l'étude



Figure.III.2 : Les échantillons traités [argile + sable + chaux +Sisal] qui ont été testés lors de l'étude

2. Effet de la longueur et le dosage de fibres de sisal sur les propriétés mécaniques du BTC

2.1 La résistance à la compression

Les résultats obtenus de la résistance à la compression du BTC avec fibres de sisal sont représentés sur le tableau. III.1 et la figure. III.4.

✚ Nous avons [50], qui a le même contenu et le même titre et obtient également le meilleur résultat en la résistance à la compression à 28 jours avec une augmentation de 56% pour les fibres de 20 mm et de dosage de 1.5 % par rapport à la valeur du BTC sans fibres, qui était estimée 2 Mpa comme le pourcentage le plus élevé. À partir de là, nous commencerons notre travail et verrons l'étendue du changement, de l'équation ou de la diminution d'un emploi de [50].

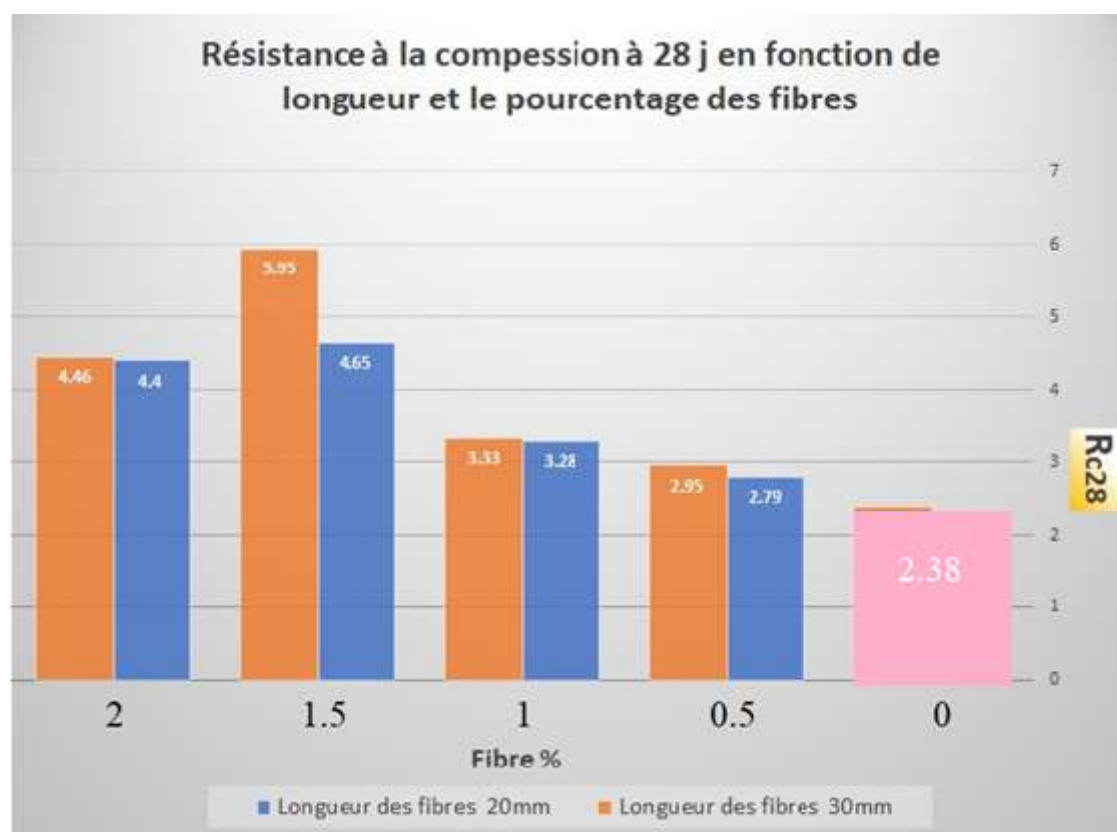


Figure.III.3. La résistance à la compression en fonction de la longueur et le pourcentage des fibres de sisal à 28 j.

Tableau.III.1 : Variation de la résistance à la compression du BTC en fonction du pourcentage et de la longueur de fibres de sisal dans le temps.

Compositions		Compression simple (MPa) age de :			Pourcentage (%) De L'augmentation ou La diminution
		7 j	14 j	28 j	
Longueur des fibres (mm)	Pourcentage des fibres (%)				
0 (Témoin)		1.06	1.66	2.38	Réf
20	0.5	2.03	2.08	2.79	+0.17
30		2.10	2.13	2.95	+0.24
20	1	2.19	2.21	3.28	+0.38
30		2.19	2.31	3.33	+0.4
20	1.5	3.09	3.29	4.65	+0.95
30		3.82	4.34	5.95	+1.50
20	2	2.55	3.00	4.40	+0.85
30		2.75	3.19	4.46	+0.87

D'après le tableau. III.1 et la figure. III.3, on remarque pour les deux longueur des fibres en fonction de tous pourcentages (0, 0.5, 1, 1.5, 2%) que la résistance à la compression du composite croît dans le temps.

Concernant l'effet de l'incorporation des fibres dans le mortier de terre, le tableau III.1 montre que la résistance à la compression augmente avec le pourcentage et la longueur de fibres jusqu'au 1.5 % après on a enregistré une diminution de la résistance à la compression pour le pourcentage 2% pour les deux longueurs, cela est due à l'excès de fibres qui influe sur

la mise en œuvre du composite et par conséquent une chute de la résistance à la compression. Nos travaux sont en accord avec les résultats de [47], [48].

- ✚ Les meilleurs résultats de la résistance à la compression à 28 jours sont obtenus par l'ajout de fibres de 30 mm de longueur et pour 1.5% de dosage.
- ✚ Ainsi, le résultat de l'ajout de fibres d'une longueur de 30 mm à raison de 1.5% a montré une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours par rapport aux résultats de [50] d'environ 39%.

2.2. La résistance à la traction par fendage

Le tableau III.2 et la figure III.5 présente les résultats à la traction par fendage à différents âges.

- ✚ Nous commencerons le deuxième travail par rapport de la résistance à la traction par fendage à 28 jours et en comparant avec les résultats de [50], nous verrons l'efficacité des résultats ou leur absence, de sorte que nous obtenons :
- ✚ On trouvé [50] sur 30.55%. À partir de la valeur du BTC sans fibre, dont la valeur a été estimée à environ 0.87 Mpa de la valeur de la résistance à la compression en ajoutant 0.5% de fibres d'une longueur de 20mm, (meilleur résultat).

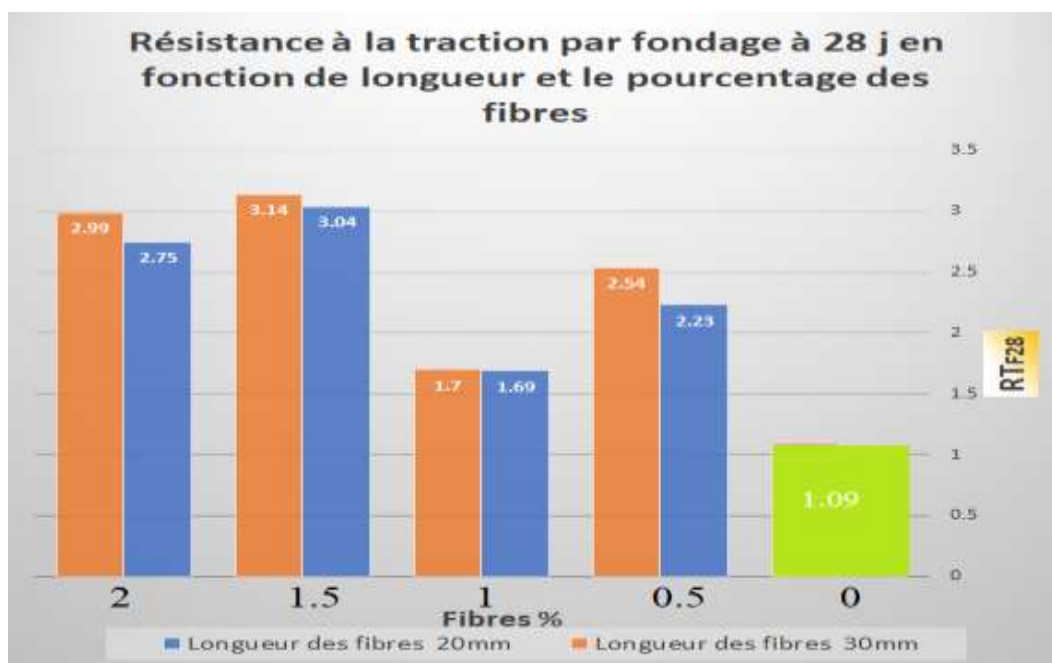


Figure.III.4 : La résistance à la traction par fendage en fonction de la longueur et le pourcentage des fibres de sisal à 28 j

Tableau.III.2 : Variation de la résistance à la traction par fendage du BTC en fonction du pourcentage et de la longueur de fibres de sisal dans le temps.

Compositions		Traction par fendage (MPa)			Pourcentage (%) De L'augmentation ou La diminution
Longueur des fibres (mm)	Pourcentage des fibres (%)	7 j	14 j	28 j	
0 (Témoin)		0.66	0.76	1.09	Réf
20	0.5	1.01	1.24	2.23	+1.05
30		1.05	1.54	2.54	+1.33
20	1	1.99	1.66	1.69	+0.55
30		2.07	1.68	1.70	+0.56
20	1.5	2.15	2.20	3.04	+1.78
30		2.18	2.22	3.14	+1.88
20	2	1.03	1.65	2.75	+1.52
30		1.12	1.52	2.99	+1.74

Le tableau. III.2 et la figure. III.4 montrent que la résistance à la traction par fendage croît dans le temps jusqu'à l'âge de 28 jours pour tous les longueurs et les pourcentages des fibres utilisées.

La résistance à la traction par fendage augmente en fonction du pourcentage de fibres jusqu'au 1.5% de fibres après elle diminue à 2% et cela est due à une perte de mise en œuvre du a l'exés, cette constatation est remarquée pour les deux longueur 20 et 30 mm.

La meilleur résistance à la compression est obtenu pour les fibres de 30 mm et pour un pourcentage de 1.5% et elle est de l'ordre 3.14 MPa.

- ✚ Ainsi, le résultat de l'ajout de fibres d'une longueur de 30 mm à raison de 1.5% a montré une très grande augmentation de la résistance à la traction par fendage à 28 jours par rapport aux résultats de [50] d'environ 188 %.

3. Effet de la longueur et le dosage de fibre de sisal sur les propriétés physiques du BTCTF

3.1. La Masse volumique

- ✚ Les résultats de l'essai de la masse volumique dans [50], est 1550 kg/m^3 à 1600 kg/m^3 , la valeur la plus faible étant obtenue en ajoutant 1.5% de fibres d'une longueur de 20 mm, ce qui a été estimé à 1550 kg/m^3 . Nous commencerons par notre travail présenté dans le tableau.III.3 et voyez l'étendue de son efficace.

Tableau.III.3 Les résultats de l'essai de masse volumique en fonction de la longueur de fibre de sisal et de son pourcentage

Pourcentage des fibres (%)	Masse volumique (kg/m^3)	
	Longueur des fibres	
	20mm	30mm
0	1601	
0.5	1621	1618
1	1614	1611
1.5	1597	1589
2	1580	1576

Le tableau III.3 montre que la masse volumique décroît avec l'augmentation du pourcentage de fibres pour les deux longueurs cela et due au fait que l'incorporation des fibres de sisal dans la matrice (mortier de sable) crée des vides à l'intérieur de cette dernière d'où une chute de la masse volumique du composite, Masse volumique de fibres est de l'ordre de 1.18 kg/cm^3 , fait alléger le poids du composite. Vos résultats sont en accord avec les travaux de différents expérimentateurs [48], [49].

La plus faible masse volumique est obtenu pour les fibres de 30 mm avec pourcentage 2% et elle de l'ordre 1576 kg/m^3 .

✚ On note convergence de ces résultats avec les résultats de [50].

3.2. L'absorption d'eau

La figure III.5 présente les résultats à la traction par fendage à différents âges.

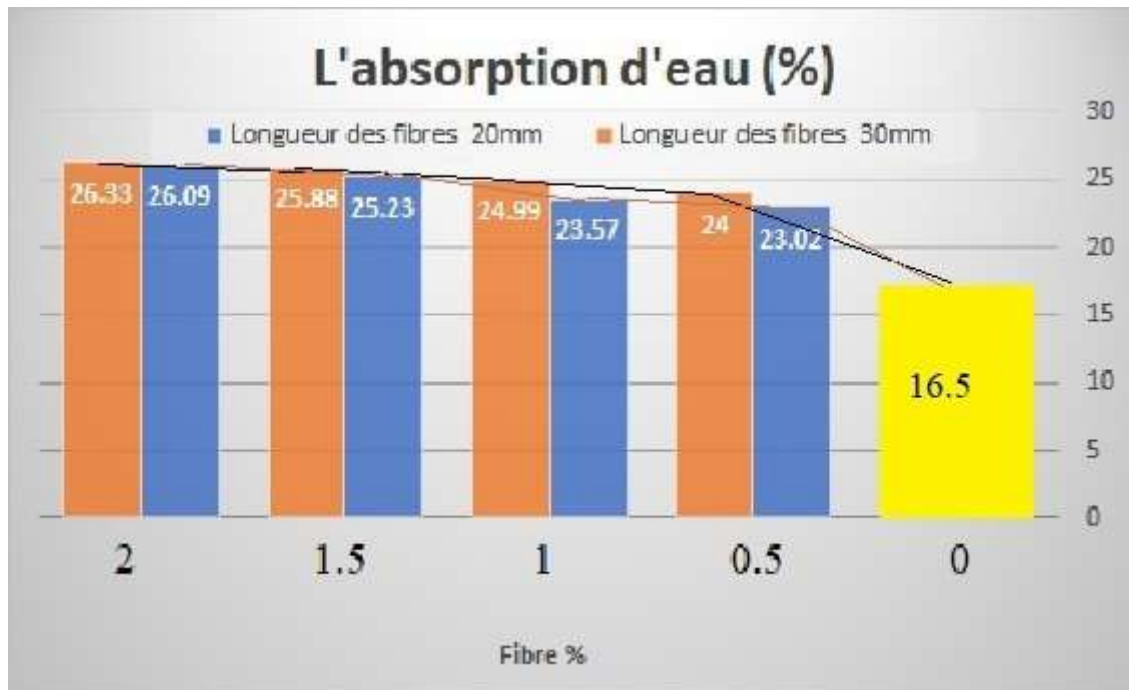


Figure.III.5 Variation de la valeur d'absorption d'eau en fonction de l'incorporation et longueur des fibres de sisal.

D'après la figure. III.5 l'absorption d'eau augmente sensiblement avec le pourcentage et la longueur de fibres de sisal est cela due à la caractéristique hydrophile fibres utilisées et de l'augmentation de pourcentage de vides l'incorporation de ces dernières dans la matrice (mortier de terre).

Nos résultats sont un accord avec les travaux [48], [49].

✚ Le sisal que nous utilisons a donc une capacité d'absorption de moitié par rapport à [50], et c'est une bonne chose, qui maintient les BTC équilibrés et plus solides.

4. Etude la microstructure équipée d'une microanalyse des matrices de fibres de sisal étudiés

Les surfaces de rupture des échantillons de mortier de terre avec les fibres de sisal étudié sont été examinées par un microscope électronique équipé d'une microanalyse.

La figure.III.6 montre que la rupture des fibres de 20 mm de longueur se fait par fracture des fibres.

Fibre fracturée

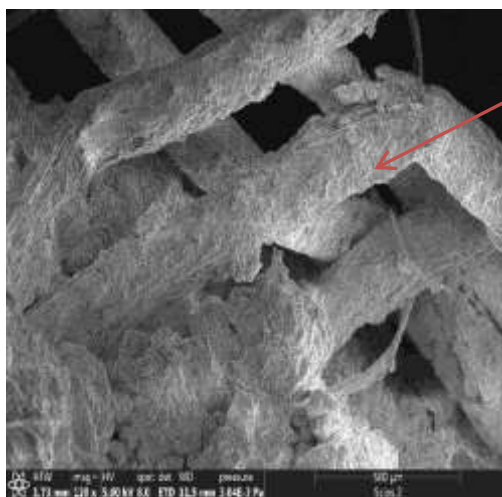
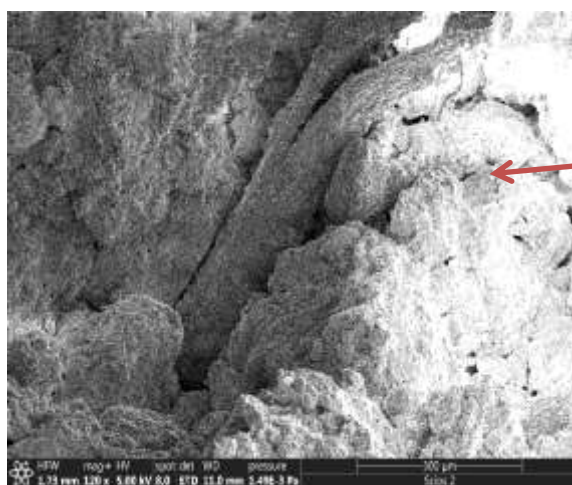


Figure.III.6. Mode de rupture des fibres de 20 mm de longueur

Il est montré sur la figure.III.7 que le mode de rupture des fibres de 30mm de longueur se fait par traction



**Fibres rompues
par traction**

Figure.III.7: Mode de rupture des fibres de 30 mm de longueur

La figure III.8 montre une bonne compatibilité chimique entre la matrice mortier de terre et la fibre de sisal, ce qui a été affirmée par microanalyse, figure III.9 qu'on trouve seulement les mêmes constituants de la matrice avec les mêmes pourcentages atomiques et que la matrice n'attaque pas la fibre.

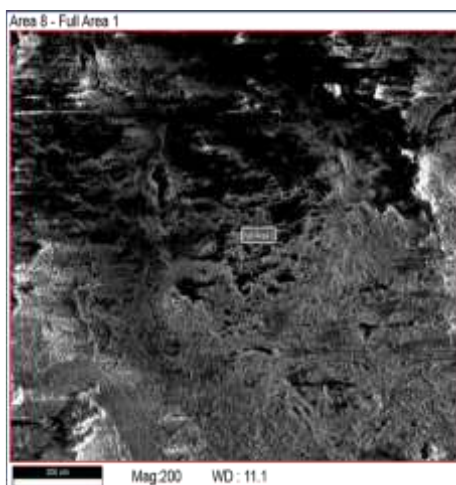


Figure III.8. Compatibilité chimique entre le mortier de terre et la fibre de sisal (pas d'attaque chimique)

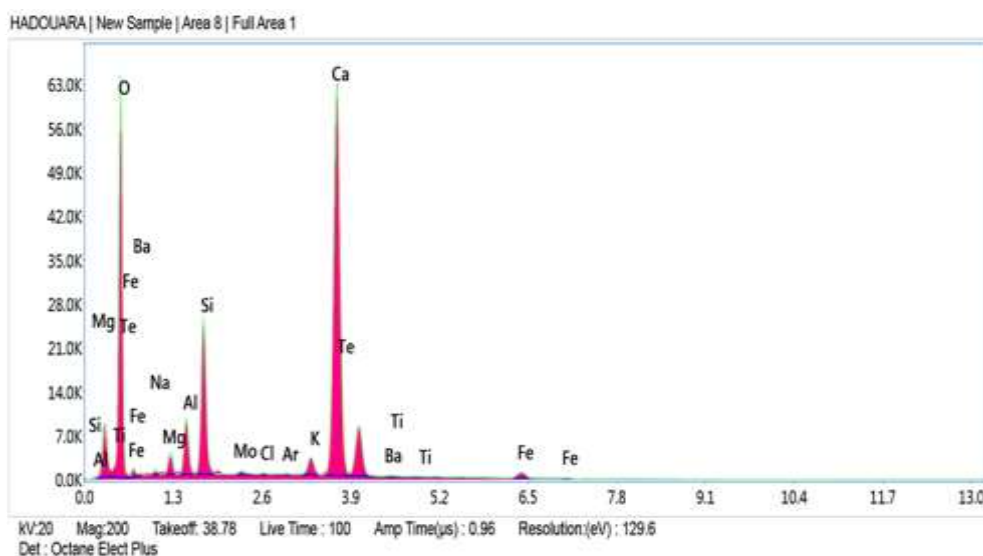


Figure III.9. Microanalyse de l'interface mortier de terre –fibre de sisal

On remarque bien sur la figure III.10, que la matrice s'adhère bien à la fibre et en plus la chaux crée des liens entre les particules de sol, ce qui contribue à modifier la plasticité et à améliorer la résistance des sols ce qui a été constaté d'après nos résultats des propriétés mécaniques et en accord avec les travaux [49], donc il est clairement démontré que le traitement des sols avec des agents de cimentation améliore certaines de leurs propriétés.

La plupart des améliorations sont causées par la modification des liens physiques et chimiques entre les particules, ce qui affecte la microstructure des sols.

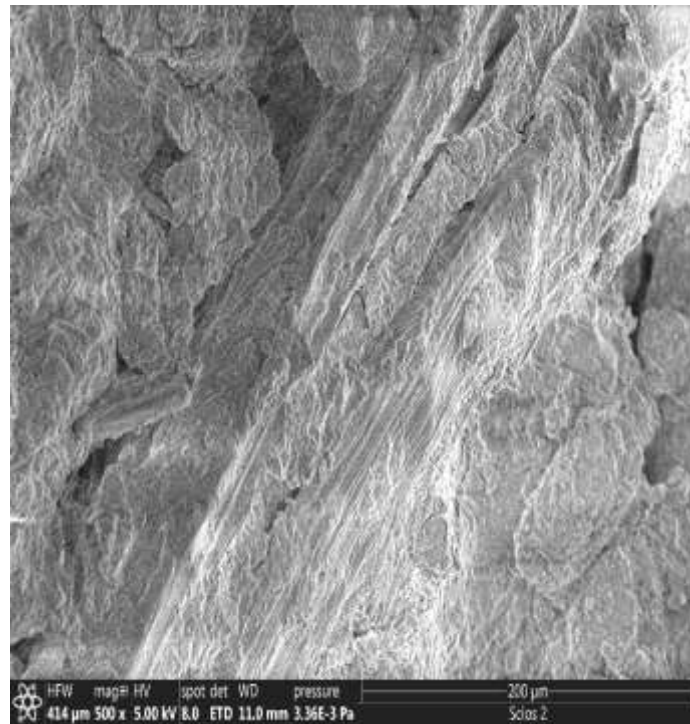


Figure III.10. L'interface mortier de terre – fibre de sisal

La figure III.11 montre une bonne adhérence entre la fibre, le sable et la matrice terre-chaux

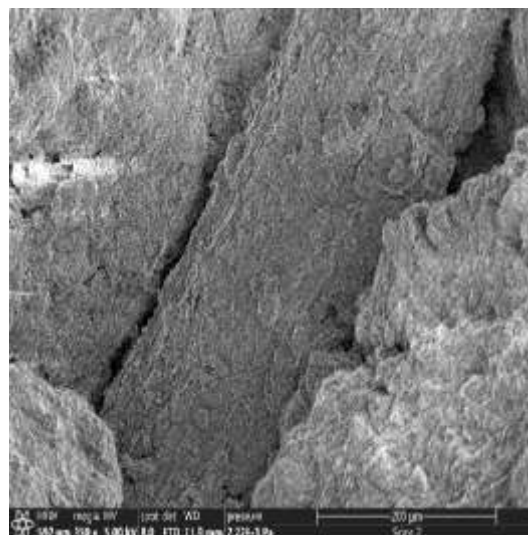


Figure III.11: liaison interfaciale entre la fibre de sisal et le mortier de terre

5. Conclusion

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

❖ Les principales

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

- Pour obtenir les meilleures caractéristiques mécaniques, il a été constaté que la terre Utilisée dans cette étude nécessite une teneur optimale en chaux de 15% en poids ;

- La plus grande valeur de la résistance à la compression peut être obtenue en ajoutant 1,5% des fibres d'une longueur de 30 mm, tandis que la valeur la plus basse de la résistance est en ajoutant 0,5% des fibres d'une longueur de 20 mm ;

- La résistance à la traction par fendage du composite étudié augmente avec le dosage et la longueur de fibres de sisal utilisées. Le meilleur résultat à l'âge 28 jours est obtenu pour les fibres de 30 mm de longueur avec un pourcentage de 1.5%.

- La masse volumique augmente avec l'incorporation des fibres et la valeur optimal obtenue est de 1.5% de pourcentage et 30 mm de longueur ;

- L'ajout de fibres dans les mélanges augmente légèrement l'absorption d'eau.

-L'étude de microstructure de mortier de sisal montre que la liaison a interfaciale est efficace d'après le mode de rupture obtenu.

Conclusion Générale

Le but de la présente étude était d'élaboration eux éco-matériau qui répond aux critères environnementaux et technico-économiques de l'heure.

D'après les recherches bibliographiques on peut conclure que ce matériau est étudié dans son ensemble et son application dans le domaine de construction demande des certifications par les organismes pilote de construction comme C.N.E.R.I.B en Algérie.

LA caractérisation des matériaux utilisées montre que :

- ✓ L'argile utilisé est une illite.
- ✓ Le sable de dune est siliceux, propre et à granulométrie série.
- ✓ Les fibres ont une bonne résistance à la traction par fendage et une absorption d'eau moyenne.
- ✓ La chaux a un aspect arien d'après son analyse chimique.

La résistance à la compression augmente avec le pourcentage et la longueur de fibres, meilleur résultat est de l'ordre 5.95 Mpa pour la fibre de 30 mm de longueur et 1,5% de dosage.

Concernent la résistance à la traction par fendage est d'ordre de 3.14 Mpa pour les fibres de 30 mm de longueur et 1,5% de dosage.

La masse volumique des composites étudiés diminue avec le dosage et la longueur de fibres la plus faible masse volumique est de l'ordre de 1576 kg/m^3 pour les fibres de longueur de 30 mm de longueur est 2% de dosage.

L'absorption d'eau des composites étudiées doit sensiblement avec le pourcentage et la valeur est de l'ordre de 26,33% pour les fibres de 30 mm de longueur est du pourcentage 2%.

La liaison interfaciale s'est révélée efficace, le mode de rupture de fibres le plus dominant c'est des fibres coupées longitudinalement par traction.

Il y'a une bonne compatibilité chimique entre le mortier de terre et la fibre de sisal utilisée d'après la microscopie électronique équipée d'une microanalyse (pas de réaction chimique).

Ce travail a montré la possibilité d'utiliser des fibres de sisal dans des matériaux de terre (BTC). Ces fibres peuvent être utilisées dans la pratique de la construction pour, entre autres, des éléments de construction non structuraux.

Conclusion Générale

Les perspectives de cette étude sont nombreuses, le programme expérimental pourrait être complété par les études suivantes :

- Vérifier les propriétés thermiques (conductivité thermique) sur l'utilisation de ces fibres végétales dans les matériaux cimentaires.
- Développer autres traitements chimiques avec différentes concentrations.
- L'étude de l'interactions physico-chimiques aux interfaces entre la fibre de sisal et la matrice de BTC, durabilité à long terme des fibres végétales dans des milieux alcalins similaires à la solution interstitielle du milieu alcalin.

References bibliographies

1. **Doat, P.**, Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979). Construire en terre, par le CRA Terre, Collection And Architecture. 272p. Novembre. ISBN 2-862227-009-1, France. P09.
2. **Anger, R, & Fontaine, L.** (2009). Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture. Paris, Belin/Cité des sciences et de l'industrie. '(La technique de construction) p 26-42.
3. **Butt, W.A, Mir, B.A; Jha, J.N.** Strength behavior of clayey soil reinforced with human hair as a natural fibre. Geotech. Geol. Eng. 2016, 34, 411–417. [CrossRef]
4. **Http://www.craterre.org/**, figure I.2 Carte cratère montrant la présence de construction en terre dans le monde.
5. **Http://www.sidielhadjaissa.com/**, photo I.4 Ksar Aïn Madhi Laghouat-Algérie.
6. **Houben H**, Rigassi V, Garnier P. Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149 p, 1996
7. **Michot A.** Caractéristiques thermo-physiques de matériaux à base d'argile : évolution avec des traitements thermiques jusqu'à 1400°C. Thèse de Doctorat, Université de Limoges, France, 116 p, 2008.
8. **Le Pluart L.** Nanocomposites Epoxyde/amine/montmorillonite : Rôle des interactions sur la formation, la morphologie aux différents niveaux d'échelle et les propriétés mécaniques des réseaux. Thèse de doctorat de L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France, 2002.
9. **Benchabane A.** Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères. Thèse de doctorat de l'ULP de Strasbourg I, France, 2006.
10. **MITCHELL JK.** Fundamentals of soil behavior, 2ème édition, John Wiley and sons, New York, 437 pp, 1993.
11. **Houben H**, Guillaud H. Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology, 1994
12. **Houben, H., & Guillaud, H.** (1989). Traité de construction en terre. Marseille : Parenthèses. (2ème éd. 1995 ; 3ème éd. 2006).
13. **Delbecq, D.** . Approche contemporaine de la construction en terre Histoire de la construction en terre, (2011).

14. **Rigassi V.** Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATerre-EAG, Friedrich Vieweg& Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995.
15. **DELEBECQUE.R,** "Éléments de Construction Bâtiment", Edition Delagrave ; 1990.
16. **GUILAUD. H,** "Centre International pour la Construction en Terre", Ecole d'Architecte de Grenoble, Encyclopédie de Bâtiment, Tome 2 Edition Wake, CRATerre ; 1997.
17. **Afrin, H. A** Review on Different Types Soil Stabilization Techniques. Int. J. Transp. Eng. Technol. 2017, 3, 19. [CrossRef]
18. **Ikeagwuani, C.C ; Nwonu, D.C.** Emerging trends in expansive soil stabilisation : A review. J. Rock Mech. Geotech. Eng. 2019, 11, 423–440. [CrossRef]
19. **Radhakrishnan, G ; Kumar, M.; Raju, G.** Laboratory evaluation of the effects of 3-chloride compounds on the geotechnical properties of an expansive subgrade soil. J. Inst. Eng. Series A 2017, 98, 477–482. [CrossRef]
20. **Chittoori, B.; Neupane, S.** Evaluating the application of microbial induced calcite precipitation technique to stabilize expansive soils. In Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers and Climate Changes Conference; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2018; pp. 10–19. [CrossRef].
21. **Puppala, A.J ; Pedarla, A ; Bheemasetti, T.** Soil modification by admixtures: Concepts and field applications. In Ground improvement case histories ; Butterworth-Heinemann : Oxford, UK, 2015 ; pp. 291–309. [CrossRef].
22. **Dilrukshi, R.A.N.; Watanabe, J.; Kawasaki, S.** Strengthening of sand cemented with calcium phosphate compounds using plant-derived urease. GEOMATE J. 2016, 11, 2461–2467. [CrossRef]
23. **Achal, V.; Kawasaki, S. Biogrout:** A novel binding material for soil improvement and concrete repair. Front. Microbiol. 2016, 7, 314. [CrossRef] [PubMed]
24. **Ayeldeen, M.; Kitazume, M.** Using fiber and liquid polymer to improve the behaviour of cement-stabilized soft clay. Geotext. Geomembr. 2017, 45, 592–602. [CrossRef]
25. **Quang, K.** Study on strength behavior of cement stabilized sludge reinforced with waste cornsilk fiber. Int. J. Geomate 2017, 13, 140–147. [CrossRef] .
26. **Veylon, G.; Ghestem, M.; Stokes, A.; Bernard, A.** Quantification of mechanical and hydric components of soil reinforcement by plant roots. Can. Geotech. J. 2015, 52, 1839–1849. [CrossRef]

27. **Wang, Y.; Guo, P.; Shan, S.; Yuan, H.; Yuan, B.** Study on Strength Influence Mechanism of Fiber-Reinforced Expansive Soil Using Jute. *Geotech. Geol. Eng.* 2016, 34, 1079–1088. [CrossRef]
28. **Ahmad, F.; Bateni, F.; Azmi, M.** Performance evaluation of silty sand reinforced with fibres. *Geotext. Geomembr.* 2010, 28, 93–99. [CrossRef]
29. **Arifin, Y.F.; Normelani, E.** The Use of Natural Fiber from Oil Palm Empty Fruit Bunches for Soft Soil Stabilization. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*; IOP Publishing: Bristol, UK, 2019; Volume 669, p. 012026. [CrossRef]
30. **Laila, P.; Kumar, A.; Memon, R.** Effect of Date Palm Fiber on the Engineering Properties of Expansive Jamshoro Shale. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Development in Civil Engineering*, London, UK, 14–15 March 2015; pp. 335–337.
31. **Qu, J.; Zhu, H.** Function of Palm Fiber in Stabilization of Alluvial Clayey Soil in Yangtze River Estuary. *J. Renew. Mater.* 2021, 9, 767. [CrossRef].
32. **Coutts RSP, Ni Y.** Auto claved bamboopulp fibre reinforced cement. *Cem Concr Compos*; 17(2):99–106, 1995.
33. **Aggarwal LK** Bagasses-reinforced cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 17(2):107–12, 1995.
34. **Bouhicha M, Aouissi F, Kenai S.** Performance of composite soil reinforced with barleystraw. *Cem Concr Compos*, 27(5):617–21, 2005.
35. **Binici H, Aksogan O, Shah T.** Investigation of Reinforced Mud Brick as Building Material. *Construction and Building Materials*, 19(4):313–318, 2005.
36. **Hejazi SM, Sheikhzadeh M, Abtahi SM, Zadhoush A.** A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. *Constr Build Mater* 2;30:100–16, 2012.
37. **Millogo Y, Morel J-C, Aubert JE, Ghavami K.** Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Constr Build Mater* ; 52:71–78, 2014.
38. **Vergas J, Bariola J, Blondet M.** Seismic Strength of Adobe masonry. *Materials & Structures*, 19, pp. 253–258, 1986.
39. **Stulz R, Mukerji K.** Appropriate Building Materials: A catalogue of Potential Solutions. Swiss Centre for Appropriate Technology, Skat-Publications, Switzerland, 1988.

40. **Ravishankar U, Raghavan S.** Coir stabilized lateritic soil for pavements. In : Indian geotech conf, Ahmedabad, India; 2004.
41. **Khedari J, Watsanasathaporn P, Hirunlabh J.** Development of fibre-based soil cement block with low thermal conductivity. *Cem Concr Compos*; 27(1):111–116, 2005.
42. **Mwaikambo L, Ansell M.** Chemical modification of hemp, sisal, jute and kapok fibres by alkalization. *Applied Polymer Science*, 84, 2222-2234, 2002.
43. **Okano T, Sarko A.** Mercerization of cellulose I. X-Ray diffraction evidence for intermediate structures. *Journal of Applied Polymer Science*, 29, 4175-82, 1984.
44. **Juarez C, Dura A, Valdez P, Fajardo G.** Performance of “Agave Lecheguilla” natural fiber in portland cement composites exposed to severe environment conditions. *Building and Environment*, 2005.
45. **PHILIPPONNAT et HUBERT,** Classification géotechnique des sols basée sur la classification U.S.C.S. 1997.
46. **GOUAL I,** "Comportement mécanique et hydrique d'un mélange de tuf et de sable calcaire de la région de Laghouat : Application en construction routière". Thèse de magister 2012. Université Aboubakar Belkaid Tlemcen.
47. **SALMI A & NAILI M.** " Etude du comportement physico-mécanique des murs en blocs de terre comprimés et stabilisés : Application : construction en région saharienne". Mémoire de Master 2016. Université Amar Thlaji Laghouat.
48. **MAIZA A.** " Etude de la durabilité d'un composite à base de plâtre et sable de dune renforcé par des fibres de sisal". Mémoire de Master 2022. Université Amar Thlaji Laghouat.
49. **Djoudi A, Khenfer M.M, Bali A, Kadri EH, Debicki G.** Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete. *International journal of physical sciences* Volume 7 (21).2012. pp. 2845-2853
50. **Assam B.** " Effet des fibres de sisal sur les propriétés mécaniques et hygroscopiques du mortier de terre". Mémoire de Master 2022. Université Mohamed khider –Biskra.

Références bibliographiques

NF P 94-054 Sols reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau. Octobre 1991

NF P 94 -056 Analyse granulométrique des sols tamisage à sec après lavage. AFNOR; p 15, 1996.

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

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

NF P18-592 Essai au bleu de méthylène. AFNOR ; p 5. 1996.

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

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