

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET.



FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT GÉNIE CIVIL

Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Génie Civil

Option : géotechnique

Présenté par :

REBAH CHAIMA

BOUSSAADIA KALTOUM

Sujet du mémoire

Etude des comportements de la terre crue stabilisée à l'aide des fibres

Soutenue publiquement Le 24/06/2024 devant le jury composé de :

Mr. Krim K	Président
Mr. Kerroum N	Rapporteur
Mr. Chikh A	Examineur
Mr. Djebli B	Examineur
Mr. Bouaakaz kh	Examineur

2023/2024

ملخص:

قدم الطين الخام العديد من المزايا لبناء مساكن مستدامة ومريحة واقتصادية. تركز هذه الدراسة على تحسين استقرار التربة الخام باستخدام الألياف والمثبتات مثل الأسمنت والجير لتقليل حساسيتها للماء. قمنا بتحسين الطوب بإضافة 3% من الجير، و3% من الأسمنت، ومزيج من الاثنين. بالإضافة إلى ذلك، قمنا بتحسين المتانة بإضافة 3% من الألياف النباتية مثل القش و3% من ألياف فيلاص، وكذلك مزيج من هذه المواد الأربعة. تظهر النتائج أن أفضل تركيبة للمزيج هي 3% من الألياف و3% من الأسمنت. تحقق الخلطات الأربعة من متانة الطوب لدينا، مما يوفر مقاومة أفضل وأداءً جيدًا.

الكلمات المفتاحية:

الارض الخام ، الالياف ، الاستقرار ، الجير ، الاسمنت ، التنمية المستدامة

Résumé:

La terre crue présente de nombreux avantages pour la construction de logements durables, confortables et économiques. Cette étude se concentre sur l'amélioration de la stabilisation des sols bruts en utilisant des fibres et des liants tels que le ciment et la chaux pour réduire leur sensibilité à l'eau. Nous avons amélioré les adobes en ajoutant 3 % de chaux, 3 % de ciment, et une combinaison des deux. De plus, nous avons amélioré la durabilité en incorporant 3 % de fibres végétales telles que les pailles et 3 % de filasse, ainsi qu'un mélange des quatre ajouts. Les résultats montrent que la meilleure formulation du mélange est obtenue avec 3 % de fibres et 3 % de ciment. Les quatre mélanges vérifient la durabilité de notre adobe, offrant une meilleure résistance et de bonnes performances mécaniques.

Mots clés :

Terre crue, fibres, Stabilisation, chaux, ciment, développement durable

Abstract :

Earth has many advantages for constructing sustainable, comfortable, and economical housing. This study focuses on improving the stabilization of raw soils using fibers and binders such as cement and lime to reduce their sensitivity to water. We improved the adobe by adding 3% lime, 3% cement, and a combination of the two. Additionally, we enhanced durability by incorporating 3% plant fibers such as straw and 3% flax, as well as a mixture of these four additives. The results show that the best mixture formulation is achieved with 3% fiber and 3% cement. The four mixtures verify the durability of our adobe, providing better resistance and good performance.

Keys word:

earth, fibers, Stabilization, lime, cement, sustainable development.

Dédicaces

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères,pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

Remerciements

*D'abord je remercie Allah de m'avoir donné le courage et la
détermination*

Nécessaires pour finaliser ce travail.

*Il ne m'aurait été possible, à moi seul, d'achever le présent travail
sans*

*L'assistance, l'appui et le suivi minutieux de mon encadreur Mr
kerroum nadir*

*Nous tenons à exprimer nos profonds respects et reconnaissances à
Mr Serbah Boumediene.*

*Maitre de conférences à l'université de Tiaret, pour ses
encouragements et son aide nous ont été d'un soutien
particulièrement précieux et indispensable.*

*Mes remerciements vont aussi au président et aux membres du jury de
soutenance qui m'ont fait l'honneur d'examiner ce travail.*

Sommaire

Sommaire

Sommaire

Résumé

Dédicaces

Remerciement

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale..... 1

Chapitre I :

Généralité sur les techniques de la construction en terre.

1. Introduction5

2. Rappel historique sur la terre crue :.....5

3. Terre Crue dans l'Antiquité en Algérie6

3.1 Les Fouilles et la Terre Crue à Timgad6

3.2 Découvertes de Murs en Terre Crue en Algérie6

4. la terre crue :7

5. Principales Techniques de Construction en Terre Crue :7

5.1 Adobe :.....8

5.1.1 Définition :.....8

5.1.2 La production :9

5.1.2.1 Le mode de production manuel :.....9

5.1.3 Les avantages de l'adobe :.....10

5.2 Pisé11

5.2.1 Définition11

5.2.2 Les avantages de pisé :11

Sommaire

5.3 Bouge :	12
5.3.1 Définition	12
5.3.2 Les Avantages de bouge :	12
5.4 Torchis :	13
5.4.1 Définition :	13
5.4.2 Les Avantages de torchis :	13
5.5 Bloc de terre comprimée :	13
5.5.1 Définition :	13
6. Diversités des produits de blocs de terre comprimée :	14
Blocs pleins	14
Blocs creux :	14
Blocs alvéolaires :	14
Blocs à emboitements :	14
Blocs parasismiques :	14
Blocs spéciaux :	15
7. Avantages du matériau terre :	15
8. conclusion	16

Chapitre II : Matériau terre et développement durable

1. Introduction	18
2. Histoire et origine du concept de développement durable :	18
2.1 Définition	18
2.2 Les dimensions du développement durable	18
3. Les défis du développement durable	19
4. Le développement durable en Algérie	20

Sommaire

5. La Construction durable	20
5.1 Les aspects de la construction durable	21
6. La différence de la construction de la terre crue et du béton.....	21
7. Durabilité du matériau	22
7.1 Définition :.....	22
7.2 Essai Drip Test.....	23
7.3 Essai d'arrosage (Spray Test).....	24
7.4 Essais de la brosse métallique (Wire Brush Tests)	25
7.5 Essai d'absorption capillaire :	26
7.6 Essai de gel-dégel	27
8. Conclusion	27

Chapitre III :

Stabilisation de matériau terre

1. Introduction	29
2. Stabilisation des sols	29
2.1 Critères Essentiels pour la Stabilisation des Sols	29
2.2 Objectif de la Stabilisation des Sols	29
2.3 Méthodes de stabilisation	30
a) Stabilisation mécanique	30
b) La Stabilisation physico-chimique:	30
2.4 Moyens de stabilisation	31
2.5 La stabilisation au ciment	32
2.6 La stabilisation à la chaux	33
2.7 Stabilisation mixte chaux-ciment	35
2.8 Rôle de l'association de la chaux et du ciment comme stabilisants dans les adobes	35
2.9 Les ajouts minéraux	36
3. Efficacité de dosage	36

Sommaire

4. Stabilisation par fibres	37
4.1 Introduction	37
4.3 Les différents rôles de l'ajout de fibres	38
1. Renforcement mécanique	38
2. Contrôle de la fissuration	38
3. Amélioration de la durabilité	38
4. Amélioration des propriétés physiques	39
5. Légèreté et isolation	39
4.4 Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction	39
a) Fibres synthétique	39
b) Fibres artificielles	40
c) Fibres naturelles	40
4.5 Les fibres végétales	41
4.6 Diversité des fibres végétales	41
4.7 Les fibres animales	42
4.8 Fibre de paille	42
4.8.1 Définition	42
4.8.2 Avantage de la paille	43
4.9 Fibre de filasse	44
4.9.1 Définition	44
5. L'effet de la stabilisation par les fibres naturelles sur les propriétés des Adobes ..	45
6. L'effet des fibres sur les propriétés mécaniques	47
7. L'effet des fibres sur l'absorption d'eau	47
8. conclusion	47

Sommaire

Chapitre IV

Matériaux de l'Etude et Technique Expérimentale

1. Introduction.....	49
2. Méthode et matériau.....	49
3. Identification des matériaux bruts.....	50
3.1 Analyse granulométrique par lavage les normes [NF P 94-056]	50
3.1.1 Le principe de l'essai.....	50
3.2 Sédimentométrie [NF P 94-057].....	51
3.2.2 Principe de l'essai.....	51
3.2.3 Mode opératoire.....	51
3.3. Courbe granulométrique.....	52
3.4 L'essai d'équivalent de sable [NFP 18-598].....	55
3.4.1 Mode opératoire.....	55
3.4.2 Expression des résultats.....	56
3.5. Les limites D'Atterberg selon la Norme-NF-P94-051 [1993].....	56
3.5.1 But de l'essai.....	56
3.5.2 Principe de l'essai.....	57
3.5.3 Classification USCS (Unified Soil Classification System)	60
3.6 Conclusion.....	62
4. Analyse chimique.....	62
4.1 essai de pH.....	62
4.2 Principe de détermination de la teneur en sulfates NA-16002 – 5042	62
4.2.1. Les formules des calculs.....	63
4.3. Principe de l'essai d'évaluation des carbonates NA-2789.....	63
4.3.1 La formule de calcul.....	64
4.4. Essai au bleu de méthylène [NF P 94-068].....	64
4.4.1 But de l'essai.....	64

Sommaire

4.4.2 Principe de l'essai.....	64
4.4.3 Matériels utilisés.....	64
5. Les essais mécaniques et les essais de durabilité.....	65
5.1 Préparation et confection des adobes pour les essais mécaniques et durabilités.....	65
5.1.1 Etapes de préparation.....	65
5.2 Dimensions de moule.....	66
5.3 Organigramme des mélanges utilisés à la fabrication des adobes.....	66
5.4 Les essais mécaniques.....	67
5.4.1 Essai compression simple s selon la Norme –NF.....	67
6. Les essais de durabilité.....	74
6.1 Essai remontée capillaire ASTM- D559.....	74
6.2 L'essai d'abrasion selon la norme ASTM-D4977.....	77
6.2.1 Principe de l'essai.....	77
6.2.2 Mode opératoire de l'essai.....	77
6.3 Essai goutte à goutte (Drip Test).....	79
6.3.1 But de l'essai.....	79
6.3.2 Principe de l'essai.....	80
Conclusion générale.....	81
Référence bibliographie.	83

Liste des figures

List des figures

Figure 1-1 : bâtiment ancien en terre crue

Figure 1.2 : Roue des différentes techniques de construction en terre crue [4]

Figure1.3 : Fabrication brique de terre : adobe-terre crue

Figure 1.4 : Les techniques de la construction en pisé (vallée du Todrha)

Figure 1.5 : Les techniques de la construction avec la bauge

Figure 1.6 : Les techniques de la construction en torchis

Figure1.7 : Différents produits de blocs de terre comprimée

Figure 2.1 : schémas du développement durable

Figure2.2 : mur en terre crue

Figure 2.3 : maison moderne en brique

Figure 2.4 : schéma Drip Test [25]

Figure 2.5 : Schéma du dispositif expérimentale (spray test)

Figure 2.6 : dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire[29]

Figure 3.1 : Le ciment

Figure 3.2 : La chaux

Figure3.3 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine

Figure3.4 : Classification des fibres végétales in[38] d'après, [39]

Figure3.5 : Fibres animales

Figure3.6 : La paille d'orge

Figure3.7 : fibre de la filasse

Figure 4.1 : échantillon de sol

Figure 4.2 : essai analyse granulométrique par lavage

Figure 4.3 : essai de Sédimentométrie

Figure 4.4 : la courbe granulométrique

Figure 4.5 : Essai équivalent de sable

Figure 4.6 : diagramme de détermination de la teneur en eau

Figure : 4.7 : la limite de liquidité

Figure4.8 : la limite de plasticité

Figure 4.9 : Limite de liquidité de sol+3%chaux

Figure 4.10 : le diagramme de casagrand

Figure 4.11 : Détermination de la teneur en sulfate

Figure4.12 : l'essai d'évaluation des carbonates

Figure4.13 : essai au bleu de méthylène

Figure 4.14 : Les adobes préparés

List des figures

Figure 4.15 : dimension de moule utilisée

Figure 4.16: Résultats d'essai La résistance à la compression

Figure 4.17 : Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 40 jrs

Figure 4.18 : essai remontée capillaire

Figure 4.19 : résultats de l'essai de remontée capillaire

Figure 4.20 : L'essai d'abrasion

Figure 4.21 : résultat de l'essai goutte à goutte

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 2.1: Résultat de la consommation d'énergie en construction des maisons en pierres, pisé et béton [23]

Tableau 2.2: Classification d'érodabilité du sol testé par drip Test [Norme-NZS-4298, 1998], [Norme-SAZS-724, 2012].

Tableau 2.3: Classification d'érodabilité du sol testé par Spray Test, [Norme-SAZS-724, 2012], [NZS-4298, 1998]

Tableau 2.4: Limite De Masse Perdue Propose Par Fitzmaurice [1958][28]

Tableau 4.1: les résultats de l'équivalent de sable du matériau

Tableau 4.2: résultats limite de liquidité des sols traités par la chaux

Tableau 4.3: résultats de limite de plasticité des sols bruts

Tableau 4.4: Résultats d'analyse chimique du sol

Tableau 4.5: récapitulatif

Tableau 4.6: résultats de l'essai de remontée capillaire

Tableau 4.7: Résultat L'essai d'abrasion

Tableau 4.8: Résultat de l'essai goutte à goutte

Introduction générale

Introduction générale

La terre crue offre de nombreux avantages, notamment une faible consommation d'énergie, des qualités esthétiques et une bonne inertie thermique. Cependant, elle présente des inconvénients tels que le manque de résistance et la sensibilité à l'eau, ce qui a conduit à l'utilisation de fibres naturelles comme la paille pour améliorer ses performances. L'usage de la terre crue dans la construction reste courant, notamment dans les pays en développement où une grande partie de la population vit dans des habitats en terre. Pour les pays en développement, ce pourcentage s'élève à 50% de la population rurale et à au moins 20% de la population urbaine et périurbaine.

Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées, mais on connaît aussi l'emploi des fibres pour construire en torchis, en terre-paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé. Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont généralement utilisées pour le renforcement des sols afin d'augmenter les résistances à la compression et au cisaillement.

En Algérie, la construction en terre est pratiquée dans de nombreuses régions du pays, du nord au sud, avec des techniques variées. Par exemple, l'habitat Ghermoul d'Alger centre est un témoignage du bâti colonial réalisé sur plusieurs étages en maçonnerie de moellon de pierre hourdé au mortier de terre et chaux. En revanche, au sud, le Toub de terre est le matériau le plus répandu pour l'édification de la grande majorité des ksour.

Le chapitre 1 est une étude bibliographique sur la structure des terres utilisés, les différentes techniques utilisées et leurs avantages.

Le chapitre 2 examine l'état de l'art du développement durable et les essais en laboratoire de durabilité. Il explore les principes fondamentaux du développement durable, mettant en lumière les efforts de conservation de l'environnement et l'intégration de matériaux écologiques dans la construction. Les essais en laboratoire évaluent la résistance et la durabilité des matériaux de construction en terre, fournissant ainsi des données cruciales pour l'amélioration des pratiques de construction durable.

Dans **le chapitre 3**, sont présentées diverses méthodes de stabilisation physico-chimiques et mécaniques des terres brut et stabilité. Ces méthodes visent à renforcer les propriétés des sols pour les rendre plus adaptés à la construction, en réduisant leur sensibilité à l'eau et en améliorant leur résistance. Des techniques telles que l'ajout de liants et l'incorporation de fibres naturelles ou synthétiques sont explorées, offrant ainsi un aperçu des différentes approches utilisées dans l'industrie de la construction durable.

Introduction générale

Le **chapitre 4** détaille les résultats obtenus à partir des essais en laboratoire et des expérimentations sur le terrain, ainsi que les formulations adoptées pour améliorer notre adobe. Il met en évidence les avancées significatives réalisées dans le domaine de la construction durable, notamment en ce qui concerne l'amélioration de la résistance, de la durabilité et des performances globales des matériaux de construction. Ces résultats contribuent à l'élaboration de nouvelles normes et pratiques dans le secteur de la construction, favorisant ainsi un développement plus durable et respectueux de l'environnement.

Chapitre I

**Généralités sur les Méthodes
de Construction en Terre :
de l'Antiquité à nos Jours**

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

1. Introduction :

Le chapitre porte sur la construction en terre crue et explore une technique ancienne et durable qui utilise des matériaux naturels tels que l'argile, le sable et la paille pour construire des structures solides et durables. Cette méthode offre de nombreux avantages, notamment un faible impact environnemental, un véritable matériau écologique : inépuisable et recyclable, économe en énergie, à forte inertie thermique, aux propriétés acoustiques élevées, aux capacités d'assainissement de l'air, et aux grandes qualités esthétiques. Un de ses inconvénients majeurs est toutefois sa fragilité à l'eau.

2. Rappel historique sur la terre crue :

Les premières traces de construction en terre remontrient donc à environ 11 millénaires tandis que les plus anciens bâtiments qui nous sont parvenus datent du début de l'antiquité. Les origines du bloc de terre comprimé remontent à des milliers d'années où la terre était moulée en briques séchées au soleil. Cette technique nouvelle qu'on nomme adobe, marque une étape historique dans l'évolution de l'habitat humain. [1] La terre crue est le matériau de construction traditionnel par excellence. On en retrouve la trace à l'âge de Bronze et la muraille de Chine présente des tronçons. De nombreux monuments inscrits au patrimoine mondial de l'humanité sont en terre crue: forteresses marocaines, pyramides d'Egypte... [2]. Aujourd'hui encore, environ 40% de l'humanité habite des constructions en terre crue. Facilement mobilisable dans les régions où pierre et bois manquent, sa mise en œuvre est simple et ne nécessite pas de matériel sophistiqué. De même sa mise en œuvre, sans transport, sans cuisson, sans processus de transformation industriel lui confère une empreinte écologique et bilan CO2 exceptionnel [2].



Figure 1-1 : bâtiment ancien en terre crue

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

3. Terre Crue dans l'Antiquité en Algérie

Les récentes découvertes archéologiques dans les sites préromains et romains du Maghreb mettent en lumière l'utilisation de la terre crue dans l'architecture locale. Cette étude vise à examiner cette pratique spécifiquement sur le terrain algérien, en se basant sur une enquête historiographique centrée sur les rapports de fouilles et les documents d'archives. Elle propose un inventaire préliminaire des découvertes liées à l'architecture résidentielle et militaire, tout en mettant en évidence l'attitude initialement défavorable des archéologues envers la terre crue au début du XXe siècle, ce qui explique en partie le nombre limité de découvertes de cette époque sur ce territoire.

3.1 Les Fouilles et la Terre Crue à Timgad

En théorie, bien que certains historiens reconnaissent l'utilisation de ce matériau dans l'architecture antique en Afrique du Nord, leur sensibilisation à sa présence réelle sur les sites était limitée. Le parti pris de certains savants, comme St. Gsell, est révélateur. Bien qu'il mentionne des murs en pisé dans des textes anciens, il estime qu'ils ne peuvent être détectés lors des fouilles en raison de leur dégradation rapide. Cette perception influence la documentation archéologique des ancêtres berbères.

3.2 Découvertes de Murs en Terre Crue en Algérie

Pour comprendre pleinement l'utilisation de la terre crue dans l'Algérie, il est nécessaire d'élargir la recherche au-delà de la période romaine pour inclure des découvertes antérieures. Les textes anciens et les découvertes archéologiques sur d'autres sites du Maghreb indiquent que la terre était utilisée localement avant l'arrivée des Romains. Les techniques telles que le pisé ou la terre coffrée, décrites par Pline, sont attestées dès le IIIe siècle av. J.-C. en Afrique.

Le seul cliché publié de la fouille permet seulement de distinguer les solins de pierre sur lesquels s'élève une masse de terre plus ou moins bien visible mais pas suffisamment pour préciser s'il s'agit de pisé ou d'adobes.

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours



Fig. ... : Sidi M'cid, Constantine. Vue des constructions de l'îlot d'habitat préromain. On distingue des couches de terre sur les soubassements en pierre (d'après BERTHIER 1980, p. 20, fig. 7)

4. la terre crue :

La terre crue est un matériau de construction composé de terre naturelle non cuite. Elle est utilisée depuis des millénaires dans diverses cultures pour bâtir des habitations, des murs et d'autres structures. Les techniques de construction avec la terre crue incluent l'adobe, le torchis, le bouge et le pisé.

La terre crue revient en vogue dans l'architecture contemporaine en raison de ses qualités écologiques et de ses performances thermiques.

4. Principales Techniques de Construction en Terre Crue :

Il existe différents modes de mise en œuvre de la terre crue. Chacune de ces techniques est née de contextes géographiques différents, de modes de vie particuliers, de coutumes différentes, de climats variés ou encore selon les matériaux disponibles. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : **le pisé, l'adobe, le torchis, la bauge et les briques de terre comprimée (BTC)** mais il en existe de nombreuses autres. Chaque technique a ses spécificités et utilise une terre bien précise. En effet, chacune d'elle demande une courbe granulométrique différente ainsi que des états hydriques et hygrométriques différents. H. Guillaud et H HOUBEN (1995) [3] ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des techniques (Figure 1,2), mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité. En plus

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

d'adobe peut varier d'une dimension de 15 largeur, 25longuer et d'épaisseur 10 cm jusqu'au 30x 60 x 10cm. La construction en adobe est très répandue dans le monde, de la Chine aux pays du Moyen Orient, de l'Afrique, à l'Amérique latine, en France et Etats Unis d'Amérique. [5, 6, 7]

5.1.2 La production :

La production des blocs d'adobe doit prendre en compte des étapes successives depuis l'extraction de la terre jusqu'à stockage final du matériau prêt à être utilisé en construction [8]

5.1.2.1 Le mode de production manuel :

On distingue deux principaux modes de production des adobes :

➤ Moules simples :

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

La terre peut être employée à deux états hydriques différents, soit sous forme de pâte mi molle et selon une méthode dite du "coup d'eau" (moule préalablement nettoyé et mouillé pour faciliter le démoulage), soit sous forme de pâte mi-ferme et selon une méthode dite du "coup de sable" (le moule préalablement nettoyé et mouillé est sou-poudré de sable pour faciliter le démoulage). Dans ces deux techniques de moulage manuelles rendements moyens de production se situent de 400 à 600 blocs par jour pour 2 ouvriers [8]

➤ Moules multiples :

Il associe l'utilisation de grands moules à compartiments multiples, généralement en forme d'échelles ou de forme carrée subdivisée en petits compartiments et la livraison de la terre, à l'état assez liquide par brouettes, dumpers ou bulldozers à godet. Parfois la terre est directement déversée depuis le malaxeur qui est alors mobile et tracté par ou sur un camion. Les moules doivent être manipulés facilement par 2 ouvriers (pas trop lourds) et doivent être propres et mouillés avant d'y déverser la terre. Compte tenu de l'état hydrique plus liquide de la terre, les adobes produites de cette façon présentent un risque de retrait et donc de fissuration plus importante. Il convient donc de compenser ce risque en utilisant une terre dont la texture est riche en gros sables et petits graviers. L'organisation de la production mécanisée

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

se fait autour de deux principaux postes qui sont le malaxage et le moulage et mobilise 5 à 6 ouvriers selon la taille des unités, La production moyenne pour ce type d'organisation est de l'ordre de 8 000 à 10 000 blocs par jour [8].



Figure1.3 : Fabrication brique de terre : adobe-terre crue

5.1.3 Les avantages de l'adobe :

L'adobe possède plusieurs avantages par rapport aux matériaux industriels sont :

- Il a la capacité de régulariser l'humidité de l'air.
- D'emmagasiner la chaleur
- Réduire la consommation d'énergie.
- De ne produire virtuellement aucune pollution.
- Construction peu coûteuse.
- N'entraîne pas la production de gaz [9].

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

5.2 Pisé

5.2.1 Définition

Le pisé, ou construction en terre crue compactée, est une technique traditionnelle de construction qui utilise de la terre humide et compactée entre des moules en bois pour créer des murs et des structures.



Figure 1.4 : Les techniques de la construction en pisé (vallée du Todrha)

5.2.2 Les avantages de pisé :

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire. [9] La terre possède de multiples qualités dans le domaine du bâti :

- Régulateur d'humidité : capacité à laisser transiter la vapeur d'eau.
- Durée de vie : patrimoine de bâtiments centenaires très présents.
- Déphasant : il ralentit le transfert de chaleur (et permet un confort d'été indéniable).
- Élément de forte inertie, c'est-à-dire qu'il a une bonne capacité de stocker la chaleur et de la restituer par rayonnement.
- Bonne isolation phonique et qualité acoustique.

5.3 Bouge :

5.3.1 Définition :

Un mur de bauge se façonne en déposant de la terre crue mêlée à de la paille, cette dernière permettant d'améliorer sa cohésion et sa résistance. C'est un mur porteur. [10]



Figure 1.5 : Les techniques de la construction avec la bauge.

5.3.2 Les Avantages de bouge :

- Qualité plastique du matériau.
- Pas besoin de coffrage (pisé), ni d'armature (torchis). [10]

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

5.4 Torchis :

5.4.1 Définition :

Une structure en colombages et claires de bois est hourdée avec une ou plusieurs couches de terre. Cette terre argileuse, amendée de paille ou d'autres fibres, constitue les parois de la bâtisse. [9]



Figure 1.6 : Les techniques de la construction en torchis.

5.4.2 Les Avantages de torchis :

- Plus solide que la terre crue seule.
- Séchage rapide. [10]

5.5 Bloc de terre comprimée :

5.5.1 Définition :

Cette version moderne du bloc de terre crue moulée, emploie des terres aux caractéristiques assez proches de celles du pisé mais pouvant être plus argileuses (jusqu'à 25%) et écrêtées de leurs plus gros éléments (diamètre > 20 mm). La fraction sableuse (gros sables) doit être dominante et la fraction graveleuse (petits graviers) peut être moindre. Le matériau ainsi composé, d'une granulométrie assez uniforme est compacté à un état hydrique peu humide au moyen de presses de type et de registre de performance très divers. La

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

production des blocs de terre comprimée peut être assimilée à celle des blocs de terre cuite produits par compactage, exception faite de la phase de cuisson. [12]

Il existe pour ces presses plusieurs sortes de moules produisant différents types de briques (Figures 1.7). Selon le travail qui sera réalisé (maçonnerie porteuse, maçonnerie de remplissage, maçonnerie armée, travaux particuliers, pose par juxtaposition, pose par emboîtement,...), la brique la mieux adaptée sera choisie. [13]

6. Diversités des produits de blocs de terre comprimée :

Aujourd'hui, le marché accueille une large gamme de produits de terre comprimée (HOUBEN, 2006) :

a- Blocs pleins :

Ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipèdes, cubes, hexagones multiples, etc.). Leur usage est très varié. [10]

b- Blocs creux :

On observe normalement de 15 % de creux, 30 % avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs. Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu). [10]

c- Blocs alvéolaires :

Ils présentent l'avantage d'être légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compression plus forte que la normale. [10]

d- Blocs à emboitements :

Ils peuvent éventuellement permettre de se passer de mortier mais exigent des moules assez sophistiqués et en général des pressions de compression plus ou moins élevées. [10]

e- Blocs parasismiques :

Leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleur intégration de systèmes structuraux parasismiques : chaînage par exemple. [10]

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

f- Blocs spéciaux :

Les blocs sont fabriqués exceptionnellement pour une application spécifique. [10]

7. Avantages du matériau terre :

- Ecologique: peu d'énergie et d'eau pour sa mise en œuvre et son élimination, ne génère ni déchets ni CO2 lors de sa transformation. [11]
 - Economique : un matériau local (ne demande pas de transport).La réalisation en terre crue peut faire baisser le prix de la construction jusqu' à 50% par rapport à d'autres (béton, brique cuite....) [11]
 - Confort et sécurité : Il résiste au feu, un très bon isolant thermique et phonique et il absorbe très grande quantité de l'humidité. Il donne le confort psychologique. [11]
 - Les performances techniques des blocs de terre comprimée : on peut observer en conditions réelles de production sont extrêmement variées. [14]
- Type 1 : bloc de terre comprimée non stabilisée.
 - Type 2 : bloc de terre comprimée stabilisée, produit dans des conditions correctes.
 - Type 3 : bloc de terre comprimée stabilisée, produit avec soin, avec des équipements performants et faisant l'objet d'une démarche qualité.
 - Type 4 : bloc de terre comprimée stabilisée, produit dans des conditions industrielles exceptionnelles. [14]



Figure1.7 : Différents produits de blocs de terre comprimée

Chapitre I : Généralités sur les Méthodes de Construction en Terre : de l'Antiquité à nos Jours

8. conclusion :

En fin de compte, les techniques de construction en terre crue offrent des opportunités passionnantes pour le développement durable et une meilleure utilisation de nos ressources naturelles. Ces techniques s'appuient sur l'utilisation de matériaux disponibles dans la région, tels que la terre et les pierres, pour créer des bâtiments solides et durables. Avec la disponibilité de la technologie et des connaissances, ces technologies peuvent être améliorées et développées pour répondre aux besoins des différentes communautés. Il s'agit en effet d'un domaine intéressant et exaltant qui mérite d'être exploré et approfondi

Chapitre II

**Exploration de la durabilité
des matériaux en terre et
essais en laboratoire**

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire

1. Introduction

Les méthodes de construction en terre ont privilégié l'efficacité au détriment de la durabilité, de la qualité et de l'harmonie avec l'environnement. Les utilisateurs étaient souvent considérés comme de simple consommateurs, mettant ainsi en péril l'avenir de l'humanité sur terre. L'un des objectifs fondamentaux du développement durable est de créer un modèle de développement intégrant l'économie, la société et l'environnement, reconnaissant ainsi leur interconnexion. Cette approche repose sur l'idée que le bien-être de l'environnement, de l'économie et de la société est intrinsèquement lié.

2. Histoire et origine du concept de développement durable :

Le mot de développement durable apparaît au début des années 1970 et 1980 dans des écrits scientifiques. Plusieurs auteurs s'accordent pour dire que cette définition publiée en 1987 est encore aujourd'hui la plus répandue et la plus acceptée pour le développement durable.[17]

2.1 Définition :

La définition offerte par le rapport Brundtland soit : "un mode de développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. [18]

2.2 Les dimensions du développement durable :

Un des objectifs fondamentales du développement durable est la tentative de créer un modèle de développement qui intègre à la fois l'économie la société et l'environnement Cet objectif naît de l'idée que le bien-être de l'environnement, de l'économie et de la société sont intimement liés.

La **Figure 2.1** est la représentation graphique la plus répandue de lien qui existe entre ces trois dimensions autrement dit ce schéma devrait répondre aux caractéristique suivantes :

- **Le développement durable ou soutenable :** l'être humain est au centre des préoccupations économiques sociale et environnementale lui seul est capable d'agir sur ces tenants et permettre ainsi la pérennité de notre planète.

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire

- **Le développement vivable** : Il s'agit de prendre en compte les facteurs environnementaux et sociaux, c'est-à-dire d'assurer un cadre de vie acceptable.
- **Le développement viable** : Cela signifie que les facteurs économique et environnementaux doivent être pris en compte ensemble c'est-à-dire permettre à long terme et de façon autosuffisante.
- **Le développement équitable** : L'objectif est d'allier la croissance économique tout en respectant les droits de l'homme de parvenir à une plus grande équité notamment dans le commerce mondial.

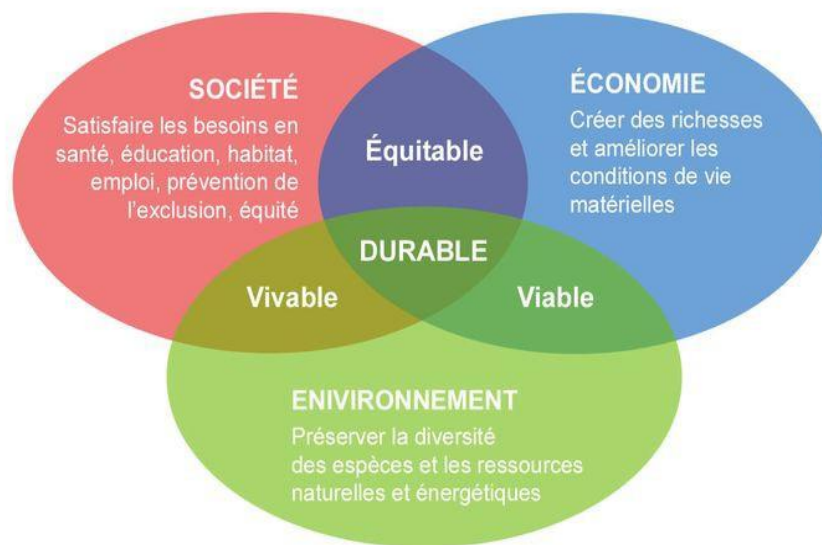


Figure 2.1 schémas du développement durable

3. Les défis du développement durable :

Dans le domaine du développement durable les défis à relever sont nombreux et importants. Ils nous conduisent à repenser notre économie et notre croissance en faveur d'une société plus économe en matière première et en énergie. Parmi ces défis citent :

- ✓ Le changement climatique
- ✓ La consommation d'énergie
- ✓ La production de déchets
- ✓ Les menaces pour la santé publique
- ✓ La pauvreté
- ✓ L'exclusion sociale

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire

- ✓ La gestion des ressources naturelles
- ✓ La perte de biodiversité

Dans un tel contexte les démarche en faveur du développement durable s'impose aujourd'hui comme obligations. Le développement durable doit pouvoir répondre principalement aux différents problèmes posés par la croissance démographique la capacité limitée de la planète et les inégalités sociales. Aménageurs, urbaniste, maître d'ouvrage et promoteurs doivent donc établir des compromis entre les exigences environnementales, sociale et économique. [19]

4. Le développement durable en Algérie :

Depuis 2000 l'Algérie a adopté une stratégie du développement durable reposant sur différents axes Il s'agit de politiques mises en place d'une façon progressive, à travers des instruments de planifications et d'actions qui concernent notamment la gestion de ses actifs naturels et la lutte contre la pollution ,des choix économique et sociaux ,et l'implication des différents acteurs de la société au processus de développement soutenable.[20]

5. La Construction durable :

La construction durable, également appelée éco-construction, est bien plus qu'un simple concept ; c'est une approche fondamentale de la conception et de la réalisation des bâtiments. Son objectif principal est de minimiser l'impact environnemental des bâtiments tout en améliorant la qualité de vie de ceux qui les habitent.

Pour atteindre cet objectif, **la construction durable en terre** intègre une multitude de pratiques et de technologies innovantes. Cela inclut l'utilisation de matériaux durables et écologiques, tels que les matériaux recyclés ou naturels, ainsi que des techniques de construction économes en énergie et respectueuses de l'environnement. Par exemple, les bâtiments durables sont souvent conçus pour maximiser l'utilisation de la lumière naturelle, réduire la consommation d'eau et d'énergie, et favoriser une bonne qualité de l'air intérieur.

En outre, la construction durable prend en compte tout le cycle de vie d'un bâtiment, de sa conception à sa démolition. Cela signifie non seulement minimiser les impacts environnementaux pendant la phase de construction, mais aussi concevoir des bâtiments qui sont faciles à entretenir, à rénover et à déconstruire à la fin de leur vie utile.

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire

En fin de compte, la construction durable vise à créer des bâtiments qui sont non seulement écologiquement responsables, mais aussi économiquement viables et socialement bénéfiques. Elle offre une approche holistique de la construction, intégrant les considérations environnementales, économiques et sociales pour répondre aux besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.

5.1 Les aspects de la construction durable :

- L'utilisation de matériaux durable recyclables et locaux.
- La réduction de la consommation d'énergies et l'intégration d'énergies renouvelables.
- L'optimisation de l'utilisation de l'eau.
- La gestion responsable des déchets et des émissions.
- La création d'espaces intérieurs confortables et sains.

6. La différence de la construction de la terre crue et du béton:

Les méthodes de construction utilisant la terre crue et le béton présentent des distinctions majeures. Selon des études menées par le Centre National d'Études et de Recherche Intégrée au Bâtiment (CNERIB) dans notre pays, l'utilisation de la terre comme matériau de construction peut réduire les coûts globaux jusqu'à 32% par rapport au béton armé[21]. La terre crue, disponible localement, élimine le besoin de transport et est recyclable à l'infini . Elle trouve des applications variées dans la construction de murs, de briques et d'autres éléments (voir figures 2.2 et 2.3). Avec un bilan environnemental très positif, la construction en terre crue répond efficacement à la quête de solutions respectueuses du développement durable [22].. En contraste, la fabrication du béton requiert une importante consommation d'énergie et de ressources, en plus de générer des émissions de gaz à effet de serre (voir Tableau 2.1)

Tableau 2.1 : Résultat de la consommation d'énergie en construction des maisons en pierres, pisé et béton [23]

Energie totale(G.J)	97	70	239
Transport (t.km)	1390	1041	6707
	Maçonnerie en pierre	Pisé	Béton

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire



Figure 2.2 mur en terre crue



Figure 2.3 maison moderne en brique

7. Durabilité du matériau

7.1 Définition :

La durabilité définit la durée de la persistance de certaines caractéristiques et allure de leur évolution dans le temps sous l'effet des agents agressifs de l'environnement, [24]



L'action de l'environnement englobe tous les facteurs de dégradation qui influent sur un matériau, notamment le vent et l'eau sous toutes ses formes.

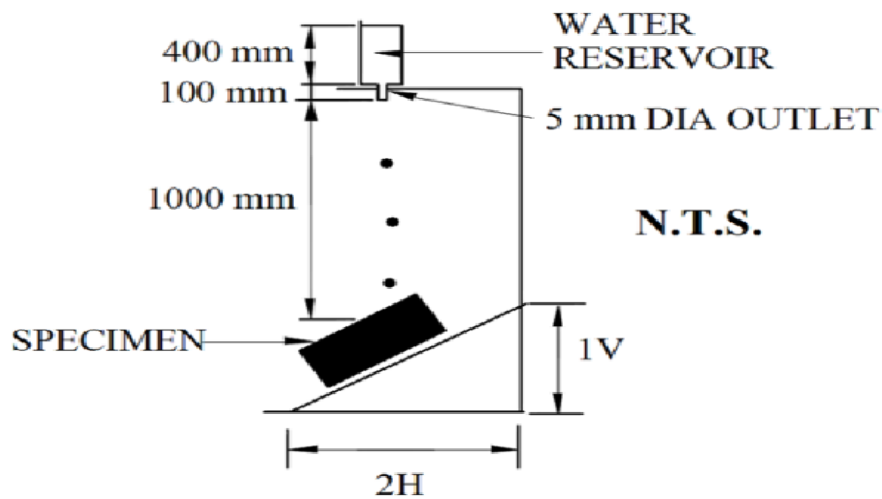
La performance, quant à elle, se définit comme une fonction décrivant la variation, au fil du temps, des propriétés spécifiques de mesure choisies, englobant ainsi les

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire

caractéristiques physico-mécaniques, la résistance aux agressions et la durabilité face aux exigences imposées.

7.2 Essai Drip Test

La méthode "Drip Test" a été développée conformément à la norme SAZS-724 de 2012. Elle implique l'utilisation d'un réservoir constitué d'une bonbonne inversée munie d'un robinet de précision, permettant d'imposer une charge hydraulique constante. La fréquence des gouttes a été réglée à 15 gouttes par minute en moyenne, conformément à la norme, pour



utes.

éco
uler
100
ml
d'ea
u
entr
e
20
et
60
min

Figure 2.4 schéma Drip Test [25]

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire

Le tableau 2.2 présente la classification de l'érodabilité du sol testée par la méthode Drip Test, selon les normes NZS-4298 de 1998 et SAZS-724 de 2012. Cette classification permet de catégoriser les sols en fonction de leur susceptibilité à l'érosion en utilisant la méthode de test par goutte à goutte. Les différentes catégories fournissent des indications précieuses sur la stabilité et la résistance du sol aux processus d'érosion, ce qui est essentiel pour la gestion et la conservation des sols dans divers environnements et applications.

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire

Tableau 2.2 Classification d'érodabilité du sol testé par drip Test [Norme-NZS-4298, 1998], [Norme-SAZS-724, 2012].

Profondeur de creusement (mm)	Indice d'érodabilité (D)
Indice d'érodabilité de 1 ne peut être déterminé que par un essai spray test.	1
$0 < D < 5$	2
$5 \leq D < 10$	3
$10 \leq D < 15$	4
$D > 15$	5 (effondrement)

7.3 Essai d'arrosage (Spray Test)

L'Essai Spray Test, une méthode normalisée utilisée pour évaluer la résistance à l'érosion des murs en terre, est largement employé, notamment au Zimbabwe et en Australie, selon les Normes ZS-724 de 2012 et NZS-4298 de 1998. Les principaux paramètres de cet essai sont les suivants : une douche est positionnée à une distance de 470 mm de la surface de l'échantillon, avec des jets d'eau horizontaux continus pendant une heure. La pression de l'eau est maintenue à 50 kPa tout au long de l'essai, avec une vitesse initiale des jets d'eau de 9.9m/s. La douche est équipée de 35 trous, chacun ayant un diamètre de 1,3 mm, et la zone d'impact est circonscrite dans un cercle de diamètre 150 mm. La profondeur d'érosion maximale acceptable par heure est fixée à 60 mm, et toutes les 15 minutes, l'essai est interrompu pour mesurer la profondeur d'érosion et le taux d'érosion, selon les critères détaillés dans le Tableau 5.5 du document de référence.

Ces différents tests, cités par Heathcote [2002] et Nguyen et Taibi [2015], offrent des méthodologies diverses pour évaluer la résistance à l'érosion des matériaux en terre. Cela est essentiel pour garantir la durabilité et la stabilité des constructions en terre, en s'assurant qu'elles peuvent résister aux conditions climatiques locales et aux impacts mécaniques.

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire

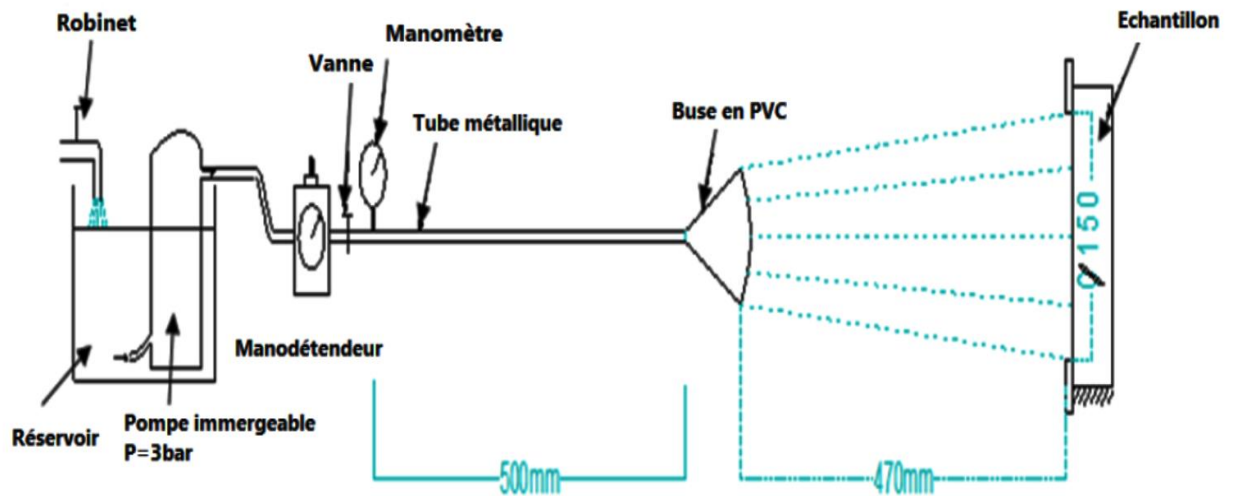


Figure 2.5 Schéma du dispositif expérimental (spray test)

Tableau 2.3 Classification d'érodabilité du sol testé par Spray Test, [Norme-SAZS-724, 2012], [NZS-4298, 1998]

Depth of Erosion(mm/hr)			Erodibility index
< 20			1
20 ≤ D	≤	D	<50
50 ≤ D	D	<	90
90 ≤ D	D	<	120
D ≥ 120			5(Fail)

7.4 Essais de la brosse métallique (Wire Brush Tests)

Cette méthode est probablement l'essai le plus largement reconnu pour la durabilité des matériaux en terre stabilisés au ciment. Il a été développé vers la fin de la deuxième guerre mondiale comme « la méthode d'essai de drainage-humidification du mélange de sol-ciment compacté » [26]. Afin de déterminer la quantité minimale du ciment requise dans le sol-ciment pour obtenir un degré de dureté suffisant pour résister aux intempéries, [27] **Wire Brush Test, ASTM D559** : Selon la norme, Le sol est compacté en trois couches dans un moule Proctor normal de 102 mm de diamètre et de 116 mm de hauteur à l'aide de la dame Proctor normale. Après le compactage, l'échantillon est stocké

Chapitre II Exploration de la durabilité des matériaux en terre et essais en laboratoire

dans un environnement à humide L'échantillon est ensuite immergé dans l'eau pendant 5 à 6 heures, Ensuite, il est séché dans une étuve à 105 °C pendant 42 heures. Après le cycle de séchage-humidification, l'échantillon est brossé avec une brosse métallique. La brosse est appliquée avec deux coups fermes, exerçant une pression verticale de 1.5 kg (13 newtons) et dispose de 50 groupes de dix poils, chaque poil mesurant 50 mm de longueur, 1.6 mm de largeur et 0.46 mm d'épaisseur L'essai consiste en 12 cycles de séchage-humidification. Après chaque cycle, la brosse métallique est utilisée pour enlever les particules détachées de la surface de l'échantillon La masse du matériau perdue après chaque cycle est mesurée La perte de masse totale après 12 cycles est calculée en pourcentage de la masse initiale de l'échantillon .

Tableau 2.4 – Limite De Masse Perdue Propose Par Fitzmaurice [1958][28]

Type of development	weight Loss	
	in any climate	in dry climate (500mm ruin p.a)
permanent buildings	<5%	<10%
rural buildings	<10%	<10%

7.5 Essai d'absorption capillaire :

Les méthodes normalisées pour mesurer l'absorption capillaire ont été développées au cours du 20e siècle, en particulier avec l'avancement des normes et des méthodologies de test dans les industries de la construction et des matériaux. Les premières normes normalisées pour l'essai d'absorption capillaire ont été développées par des organisations de normalisation telles que l'American Society for Testing and Materials (ASTM), l'International Organization for Standardization (ISO) et d'autres organismes nationaux et internationaux. Ces normes ont établi des procédures standardisées pour réaliser les tests, assurant ainsi une comparabilité et une reproductibilité des résultats entre différents laboratoires et fabricants.

L'essai consiste à mesurer la capacité d'un matériau à absorber l'eau. C'est souvent utilisé dans le domaine de la construction pour évaluer **la porosité et la perméabilité** des matériaux comme le béton ou la pierre et matériau terre. L'essai implique généralement de placer le matériau en contact avec de l'eau et de mesurer la hauteur à laquelle l'eau monte à l'intérieur du matériau au fil du temps. Cela permet d'évaluer différentes propriétés du matériau en relation avec son interaction avec l'eau.



Figure 2.6 dispositif expérimental de l'essai d'absorption capillaire[29]

7.6 Essai de gel-dégel :

L'essai de gel-dégel pour les matériaux en terre, comme les adobes, est crucial pour évaluer leur durabilité dans des conditions climatiques rigoureuses. Cet essai consiste à soumettre les matériaux à des cycles alternés de gel et de dégel pour simuler les conditions naturelles auxquelles ils pourraient être exposés. Le protocole d'essai de cycles gel-dégel consiste à placer quatre éprouvettes dans un congélateur à une température de (-15 ± 3) °C pendant 24 heures, puis à les transférer dans une chambre thermique à une température de (20 ± 2) °C pendant 24 heures pour dégeler. Ce cycle de gel-dégel dure 48 heures. Après les cycles 0, 2, 4 et 8, les éprouvettes sont testées en compression simple.

8. Conclusion :

Les essais de durabilité des matériaux en terre sont cruciaux pour évaluer leur résistance aux conditions environnementales et leur longévité. Ces tests sont généralement conçus pour simuler les conditions auxquelles les matériaux seront exposés pendant leur utilisation dans la construction.

Ces essais permettent d'évaluer comment ces matériaux réagissent dans différentes conditions environnementales, telles que l'exposition à l'humidité, aux variations de température, aux cycles de gel-dégel, et à la charge mécanique.

Chapitre III

**Traitements des matériaux
terres «Liants hydrauliques,
fibre végétales»**

Chapitre III : Traitements des matériaux terres

« Liants hydrauliques, fibre végétales »

1. Introduction :

La stabilisation des matériaux en terre est une pratique ancienne et essentielle dans le domaine de la construction et de l'ingénierie civile. Depuis des millénaires, les êtres humains ont utilisé la terre comme matériau de construction en raison de sa disponibilité, de son faible coût et de sa durabilité. Cependant, la terre crue peut présenter des propriétés mécaniques variables et peut être sujette à des problèmes tels que le retrait, le gonflement et l'érosion, ce qui peut compromettre la stabilité et la durabilité des structures construites sur ces matériaux.

2. Stabilisation des sols :

2.1 Critères Essentiels pour la Stabilisation des Sols :

Cependant, la stabilisation des sols est un problème complexe, impliquant de nombreux paramètres. Pour réussir une stabilisation, il est essentiel de prendre en compte plusieurs facteurs :

- **Les propriétés de la terre :** Connaître la composition et les caractéristiques physiques et chimiques du sol est crucial.
- **Les améliorations envisagées :** Déterminer les objectifs spécifiques de la stabilisation, comme l'augmentation de la résistance, la réduction de la perméabilité, ou l'amélioration de la durabilité.
- **L'économie du projet :** Analyser les coûts liés aux différentes méthodes de stabilisation et choisir la plus économique tout en étant efficace.
- **Les techniques de mise en œuvre :** Sélectionner les méthodes de stabilisation les plus adaptées aux caractéristiques du sol et aux objectifs du projet.
- **La maintenance du projet réalisé :** Planifier l'entretien nécessaire pour maintenir les propriétés du sol stabilisé à long terme. [3]

2.2 Objectif de la Stabilisation des Sols :

En stabilisant un sol, nous intervenons sur sa texture et sa structure. Les cinq opérations possibles lors de la stabilisation sont les suivantes :

- **Réduction du volume des vides entre les particules:** Cette opération vise à compacter le sol pour diminuer l'espace entre les grains, ce qui augmente la densité et la stabilité du sol.

Chapitre III : Traitements des matériaux terres **« Liants hydrauliques, fibre végétales »**

- **Fermeture des vides qui ne peuvent être supprimés :** Certains vides ne peuvent pas être complètement éliminés mais peuvent être scellés ou remplis pour améliorer la résistance du sol.
- **Augmentation des liens entre les particules:** Renforcer les liaisons entre les grains de sol en utilisant des liants ou d'autres techniques pour améliorer la cohésion et la stabilité du sol.
- **Amélioration des caractéristiques mécaniques de la terre:** Augmenter la résistance à la compression et la cohésion du sol en réduisant les vides, et en améliorant ou créant des liaisons entre les particules. Cela permet d'obtenir un sol plus résistant et durable.
- **Réduction de la sensibilité à l'eau et de la perméabilité:** Diminuer le gonflement et le retrait du sol en présence d'eau en bouchant les vides, ce qui réduit la perméabilité et améliore la stabilité du sol face aux variations d'humidité.) [30]

2.3 Méthodes de stabilisation :

a) Stabilisation mécanique

La stabilisation mécanique est un processus utilisé dans le domaine de la construction et de l'ingénierie civile pour renforcer et améliorer les propriétés mécaniques des sols. Ce processus est souvent utilisé pour rendre les sols plus adaptés à la construction d'infrastructures telles que les routes, les autoroutes, les pistes d'aéroport, les fondations de bâtiments, BTC etc.

- **Objectif :** La stabilisation mécanique implique des techniques visant à améliorer les propriétés physiques du sol sans l'ajout de stabilisants chimiques telles que la résistance à la compression, la résistance au cisaillement, la portance, la durabilité et la stabilité, afin de les rendre plus adaptés à un usage spécifique

b) La Stabilisation physico-chimique:

.La stabilité de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou produits chimiques qui peuvent modifier ses propriétés par des réactions physico-chimiques entre les particules de terre et les produits ajoutés ou par la formation d'une matrice qui lie et enrobe les particules. On peut citer notamment le ciment, la chaux, l'asphalte et les sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériaux ou de produits chimiques ajoutés dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité. Il existe en fait deux façons d'utiliser des produits chimiques pour traiter les matériaux terre comme les

Chapitre III : Traitements des matériaux terres « Liants hydrauliques, fibre végétales »

adobes, BTC et Traitement de masse (introduction d'une quantité minimale de stabilisant dans la masse du sol) et Traitement de surface (revêtement, peinture, imperméabilisant), protégeant la surface par imprégnation des parties exposées.

Elle permet d'améliorer la résistance à l'eau et la résistance à la compression des briques. Il existe un grand nombre de produits stabilisants, pouvant être employés autant dans la masse que sur la surface des parois. Je restreindrai cependant leur étude aux produits les plus courants: le ciment, la chaux et le bitume (pour les adobes). Chacun d'eux fonctionne avec une variété de terre spécifique. En effet, on ne peut pas utiliser l'un ou l'autre stabilisant sans connaître le type de terre que l'on utilise. La stabilisation risque d'être moins efficace ou peut réduire les performances de la terre. La stabilisation devient nécessaire lorsque l'ouvrage est exposé aux intempéries. A contrario, cette stabilisation ne l'est pas lorsque l'ouvrage est à l'abri de l'eau. Toutefois, dans nos régions, afin d'éviter l'effondrement des murs lors d'éventuelles inondations, il peut être intéressant d'utiliser, en plus d'une coupure capillaire, des briques stabilisées sur les premières lignes. [31]

Objectif :

- La stabilisation chimique a pour objectif principal d'améliorer les propriétés des sols en modifiant leur composition chimique, notamment en augmentant leur résistance, leur durabilité, leur portance et leur stabilité.
- La stabilisation physique vise à améliorer les propriétés mécaniques des sols et à les rendre plus adaptés à un usage spécifique, tel que Matériau terre les adobes, la construction de routes, de fondations de bâtiments ou d'autres matériaux de construction.
- La stabilisation physique vise principalement à renforcer la structure des sols en modifiant leur agencement et leur compacité, afin d'améliorer leur portance, leur résistance et leur stabilité.

2.4 Moyens de stabilisation :

La stabilisation des sols peut être réalisée par divers moyens, selon : la nature, la forme, etc., chacun adapté à des conditions spécifiques et à des objectifs particuliers. Il y a six modes de stabilisations : [32]

- Armer.
- Densifier.

Chapitre III : Traitements des matériaux terres « Liants hydrauliques, fibre végétales »

- Enchaîner.
- Liaisonner.
- Imperméabiliser.
- Hydrofuger.

Effectivement, chaque stabilisant peut agir en combinant plusieurs procédés, à la fois physiques et chimiques, pour améliorer les propriétés du sol. Cette capacité à combiner différentes approches offre une flexibilité considérable dans le choix des méthodes de stabilisation en fonction des caractéristiques spécifiques du sol et des objectifs du projet.). [33]

2.5 La stabilisation au ciment :

Les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier ont eu lieu aux États-Unis en 1915. Parallèlement, la stabilisation au ciment dans la construction de bâtiments a débuté en Allemagne dès les années 1920. Aux États-Unis, à partir de 1935, l'utilisation du sol-ciment s'est répandue, notamment dans la construction de routes et de pistes d'aérodrome. Depuis lors, la stabilisation au ciment est devenue une pratique courante dans le monde entier, aussi bien dans les travaux publics que dans le secteur du bâtiment. [34]

Le ciment est sans doute l'un des meilleurs stabilisants pour les adobes L'ajout de ciment, avant la compression, permet d'améliorer les caractéristiques du matériau, en particulier sa résistance à l'eau, par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosses. Le ciment va agir principalement sur les sables et les graviers comme dans le béton ou dans un mortier sable-ciment. De ce fait, il est inutile, voire néfaste, d'utiliser des terres trop argileuses (> 30 %). D'après Venuat, tous les ciments normalisés peuvent en principe être utilisés pour la stabilisation des sols, mais la préférence est donnée aux ciments de classes faibles, car une grande résistance n'est pas nécessaire. Cependant, d'autres auteurs recommandent l'utilisation d'un type de ciment spécifique en fonction de la nature du sol, Pour les sols contenant un certain pourcentage d'argile, il est recommandé d'utiliser un ciment riche en alite (C3S) et en bélite (C2S) qui produisent beaucoup de portlandite (Ca(OH)₂) après hydratation. Verdeyen conseille l'utilisation de ce type de ciment pour les sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30 % (indice des plasticités <25%).

Chapitre III : Traitements des matériaux terres **« Liants hydrauliques, fibre végétales »**

L'action du ciment sur le sol se déroule en plusieurs phases, comme décrit par Verdeyen :

1. L'hydratation initiale provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile.
2. La progression de l'hydratation conduit à la désagrégation des agglomérats d'argile, permettant une pénétration en profondeur des gels de ciment.
3. Une interpénétration intime se produit entre les gels de ciment et les agglomérats argileux, avec une hydratation qui persiste mais à un rythme plus lent. . [30]

Cette réaction complexe entre le ciment et le sol permet d'améliorer les propriétés du sol, notamment sa résistance et sa cohésion, ce qui en fait une technique précieuse dans la stabilisation des sols pour diverses applications de construction et d'ingénierie.



Figure 3.1 Le ciment

2.6 La stabilisation à la chaux :

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

Chapitre III : Traitements des matériaux terres **« Liants hydrauliques, fibre végétales »**

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 (Ca(OH)₂). Elle est dite « aérienne », car elle réagit avec le CO₂ 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. La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant IP > 17 et LL > 40.

La chaux éteinte est largement préférée à la chaux vive pour la stabilisation des sols, en raison de deux inconvénients majeurs associés à cette dernière : sa conservation difficile à l'abri de l'humidité avant son utilisation et la manipulation laborieuse lors des mélanges. Des études menées par Le Roux ont démontré que, pour des sols riches en kaolinite, la résistance (de 2 jusqu'à 90 jours) augmente avec la teneur en chaux. Cependant, pour des sols riches en illite, un optimum de 5 % de chaux se caractérise à moyen et à long terme. Ces résultats mettent en évidence l'importance de choisir le type et la quantité de chaux appropriés en fonction des caractéristiques spécifiques du sol pour obtenir les meilleurs résultats en termes de stabilisation et de résistance du sol. [30]

Chapitre III : Traitements des matériaux terres **« Liants hydrauliques, fibre végétales »**



Figure 3.2 La chaux

2.7 Stabilisation mixte chaux-ciment :

Ce type de traitement s'effectue sur les sols trop humides et plastiques. On utilise d'abord la chaux seule à des faibles teneurs puis le ciment. Les deux liants ne sont pas concurrents mais complémentaires. Un traitement préalable à la chaux permet l'assèchement du sol trop humide. Sa floculation en présence de chaux le rend pulvérulent et friable donc plus apte à être mélangé ensuite au ciment. Le ciment dont la cinétique d'hydratation est plus grande que celle de la chaux permet l'obtention des résistances mécaniques dès les premiers jours de traitement. Il n'existe actuellement aucune étude connue sur les mécanismes spécifiques régissant le traitement mixte chaux-ciment. Cependant, il est suggéré que la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) libérée par le ciment en solution pourrait jouer un rôle stabilisant similaire à celui de la chaux. Les hydrates résultant de la réaction entre la chaux libre et la portlandite ciment peuvent également se combiner avec ceux issus du ciment dissous. Bien que cette hypothèse soit basée sur une observation empirique, une étude plus approfondie des mécanismes sous-jacents serait nécessaire pour une compréhension complète de ce processus de stabilisation mixte.[34]

2.8 Rôle de l'association de la chaux et du ciment comme stabilisants dans les adobes :

La stabilisation combinée chaux-ciment peut être utilisée pour augmenter la résistance à long terme qui n'est pas réalisable en utilisant uniquement du ciment ou de la

Chapitre III : Traitements des matériaux terres **« Liants hydrauliques, fibre végétales »**

chaux. Une combinaison de ciment et de chaux est utilisée comme stabilisant pour les adobes. Les combinaisons utilisées étaient **3% ciment 3% chaux** et **3% ciment chaux**. Un rapport ciment de 3 % : chaux de 3 % permet d'obtenir une résistance levée à long terme. La combinaison du ciment et de la chaux est bénéfique car le cimentai de à stabiliser la partie sable et la chaux aide à stabiliser la partie argileuse. La résistance et la durabilité peuvent donc être améliorées. Rahman et coll. Les blocs sont préparés partir d'argile, de sable et de mélanges d'argile et de sable. Le ciment, la chaux et une combinaison de chaux et de ciment sont utilisés comme stabilisants. Ils sont montrés que l'argile et le sable stabilisés mélangés à du ciment présentaient la plus grande résistance à la compression par rapport aux autres méthodes de stabilisation. Cependant, pour des raisons économiques, l'effet stabilisant combiné de la chaux et du ciment est supérieur à l'utilisation du ciment seul. De nombreuses études ont été menées sur les adobes en utilisant différents stabilisants. L'adéquation de ces stabilisants aux sols à faible teneur en argile et en limon (moins de 15 %) reste un domaine de recherche.

2.9 Les ajouts minéraux :

Les additifs minéraux sont des matériaux siliceux ou silice-aluminium avec des phases réactives et amorphes. Ils peuvent avoir des propriétés hydrauliques, c'est-à-dire qu'ils s'hydratent automatiquement au contact de l'eau. Par conséquent, ils peuvent avoir des propriétés pouzzo la niques, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'additif réagit avec la chaux éteinte pour former du silicate de calcium hydraté (C-S-H), responsable des propriétés adhésives de la matrice cimentaire. L'utilisation d'additifs minéraux en remplacement partie Lou complet du ciment ou de la chaux dans la stabilisation des sols présente plusieurs aspects bénéfiques.

Leur valeur en matière de stabilisations non seulement économique mais aussi écologique. Ou complet du ciment ou de la chaux dans la stabilisation des sols présente plusieurs aspects bénéfiques. Leur valeur en matière de stabilisations non seulement économique mais aussi écologique.

3. Efficacité de dosage :

L'efficacité du dosage de l'argile stabilisante à la chaux est influencée par divers facteurs, rendant sa prévision difficile. Parmi ces variables, on trouve la minéralogie de

Chapitre III : Traitements des matériaux terres « Liants hydrauliques, fibre végétales »

l'argile, le pH du sol, la présence de sol organique, la capacité d'échange cationique, la taille et la surface spécifique des particules, la quantité d'eau, la concentration en chaux et le temps de durcissement. Il n'y a pas de règles strictes qui définissent une valeur optimale pour les sols selon leur classification. Cependant, l'ajout de 2 à 3 % de chaux entraîne généralement une diminution immédiate de la plasticité du sol et une rougeur des mottes de terre. En général, pour les stabilisants ordinaires, des dosages de 6 à 12 % sont utilisés. Il est important de noter qu'il existe un rapport de chaux optimal pour chaque type de sol, ce qui nécessite une évaluation spécifique pour chaque cas.

4. Stabilisation par fibres :

4.1 Introduction :

La stabilisation par armature à l'aide de fibres est très employée de par le monde en construction en terre. Les fibres sont principalement employées pour la confection des blocs moulés par pétrissage, avec des terres plutôt argileuses présentant souvent un important retrait.

Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille présentent une grande variété, mais l'utilisation de fibres est également courante dans la construction en torchis, en terre-paille, en bauge, ainsi que dans la fabrication de blocs comprimés et de murs en pisé. Les fibres, telles que la paille ou d'autres matériaux similaires, sont souvent ajoutées au mélange pour renforcer la structure et améliorer les propriétés mécaniques du matériau de construction. Cette pratique est largement répandue dans les techniques de construction traditionnelles et écologiques, où l'emploi de matériaux naturels et locaux est privilégié pour assurer une construction durable et respectueuse de l'environnement. [3] Effectivement, les fibres synthétiques sont souvent utilisées dans le renforcement des sols pour améliorer leurs propriétés mécaniques, notamment en augmentant leur résistance à la compression et au cisaillement. Ces fibres sont généralement mélangées avec le sol lors de sa préparation ou incorporées dans des géotextiles pour former des renforts de sol. [35]

Dans le reste de ce chapitre, nous allons passer en revue les principales fibres utilisées dans la fabrication des matériaux composites en général et les briques de terre fibrée et le renforcement des sols en particulier.

Chapitre III : Traitements des matériaux terres

« Liants hydrauliques, fibre végétales »

4.3 Les différents rôles de l'ajout de fibres

L'ajout de fibres dans divers matériaux, que ce soit dans le domaine de la construction, des composites, ou des textiles techniques, joue plusieurs rôles cruciaux en améliorant les propriétés mécaniques, la durabilité et les performances générales des matériaux. Voici les principaux rôles joués par les fibres :

1. Renforcement mécanique:

- **Augmentation de la résistance à la traction et à la compression:** Les fibres augmentent la capacité du matériau à résister aux forces de traction et de compression, ce qui est particulièrement important dans les composites et les bétons fibrés.
- **Amélioration de la résistance au cisaillement:** En renforçant le matériau, les fibres aident à mieux répartir les forces de cisaillement, réduisant ainsi le risque de déformation ou de rupture.

2. Contrôle de la fissuration:

- **Réduction de la propagation des fissures:** Les fibres aident à limiter la propagation des fissures en absorbant et en redistribuant les contraintes, ce qui est crucial dans les matériaux de construction comme le béton.
- **Prévention de la fissuration plastique:** Les fibres peuvent empêcher la formation de fissures plastiques, souvent causées par le retrait de l'eau dans les matériaux à base de ciment.

3. Amélioration de la durabilité:

- **Résistance à l'usure et à l'abrasion:** Les fibres augmentent la résistance à l'usure et à l'abrasion, prolongeant ainsi la durée de vie des matériaux exposés à des conditions de friction ou d'érosion.
- **Résistance aux conditions environnementales:** Les fibres améliorent la résistance aux variations de température, à l'humidité, et à d'autres facteurs environnementaux, rendant les matériaux plus durables.

Chapitre III : Traitements des matériaux terres **« Liants hydrauliques, fibre végétales »**

4. Amélioration des propriétés physiques:

- **Augmentation de la ductilité:** Les fibres rendent les matériaux plus ductiles, ce qui signifie qu'ils peuvent se déformer davantage sans se casser, augmentant ainsi leur capacité à absorber les chocs et les vibrations.
- **Réduction de la perméabilité:** En comblant les microfissures et les pores, les fibres peuvent réduire la perméabilité des matériaux, les rendant moins susceptibles à la pénétration de liquides et de gaz.

5. Légèreté et isolation:

- **Réduction du poids:** Les fibres, notamment les fibres synthétiques et minérales comme la fibre de carbone, permettent de produire des matériaux légers mais robustes, essentiels dans les secteurs de l'aéronautique et de l'automobile.
- **Isolation thermique et acoustique:** Certaines fibres offrent d'excellentes propriétés d'isolation thermique et acoustique, améliorant ainsi le confort et l'efficacité énergétique des bâtiments et des produits manufacturés.

4.4 Types des fibres utilisées dans le domaine de la construction:

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, parmi eux nous citons :

- a. Les fibres métalliques (acier, fonte) ;
- b. Les fibres organiques (polypropylènes, polyesters, polyamides et polystyrènes) ;
- c. Les fibres minérales (amiante, verre, carbone) ;
- d. Les fibres végétales (Jute, sisal, coir, bois, bambou, palmier) ;
- e. Les fibres animales (poil, laine, soie)

a) Fibres synthétique :

Les fibres synthétiques sont fabriquées de polymères de synthèse obtenus à partir de substances fournies par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20ème siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point ; elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, toutes comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l'intérêt de beaucoup d'industriels pour leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et

Chapitre III : Traitements des matériaux terres

« Liants hydrauliques, fibre végétales »

modifier leurs propriétés. Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont :

- Les polyamides (Nylons) ;
- Les polyesters ;
- Les dérivés polyvinyliques ;
- Les polyoléfiniques : les polyéthylènes et les polypropylènes : sont d'une importance croissante et leur production s'élève maintenant à environ 8% de toutes les fibres synthétiques. [37]

b) Fibres artificielles

Les fibres artificielles sont largement utilisées dans divers domaines industriels, notamment en génie civil. Ce groupe comprend des fibres telles que les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier, entre autres. Elles sont particulièrement répandues dans l'industrie de la construction en raison de leurs propriétés mécaniques supérieures et de leur capacité à renforcer les matériaux de construction. Ces fibres sont choisies pour améliorer la résistance, la durabilité, et les performances globales des structures construites.[8]

c) Fibres naturelles :

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine (figure 1.35):

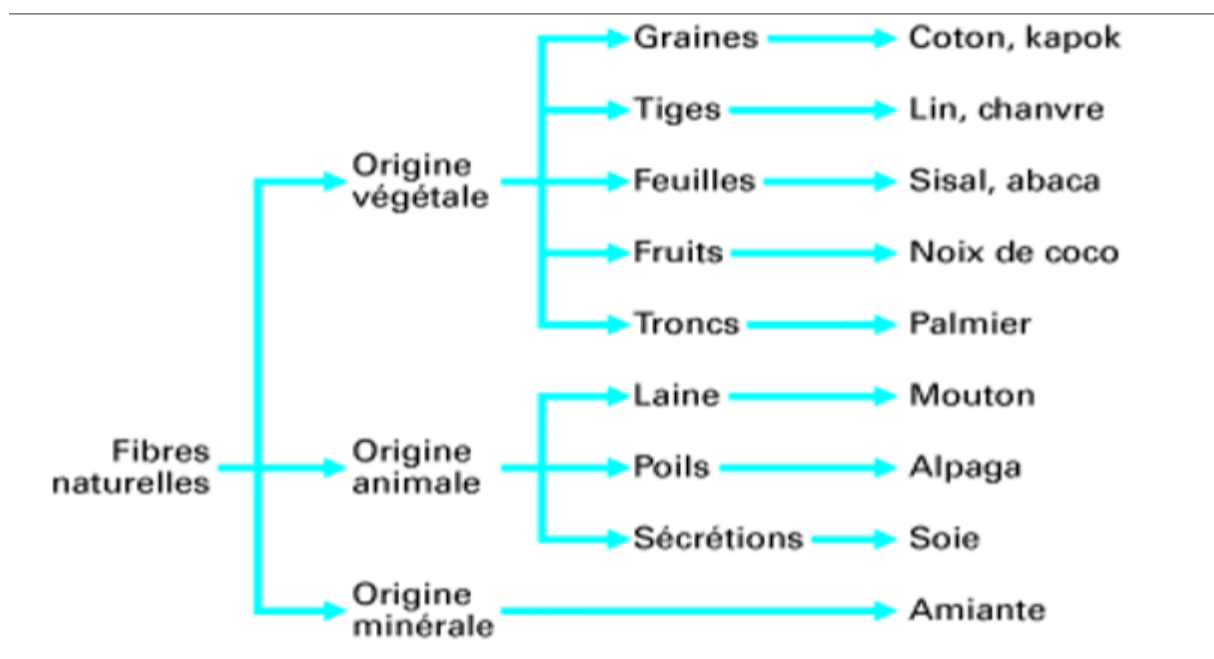


Figure3.3 : Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine

Chapitre III : Traitements des matériaux terres

« Liants hydrauliques, fibre végétales »

4.5 Les fibres végétales :

L'utilisation des fibres naturelles d'origine végétale dans la construction remonte à la période où l'on fabrique des briques renforcées par la paille ou des roseaux. Dans le temps moderne (depuis les années 70), le premier composite liant avec les fibres végétales c'était le plâtre. Plusieurs ouvrages sont réalisés avec du plâtre renforcé de fibres végétales.

4.6 Diversité des fibres végétales :

- Fibres dérivées des poils spermatiques des graines (coton, kapok)
- Fibres ligneuses extraites des tiges végétales (lin, chanvre, jute, ortie)
- fibres extraites des feuilles (sisal, chanvre), de la tige (palmier) et de l'enveloppe des fruits (noix de coco).

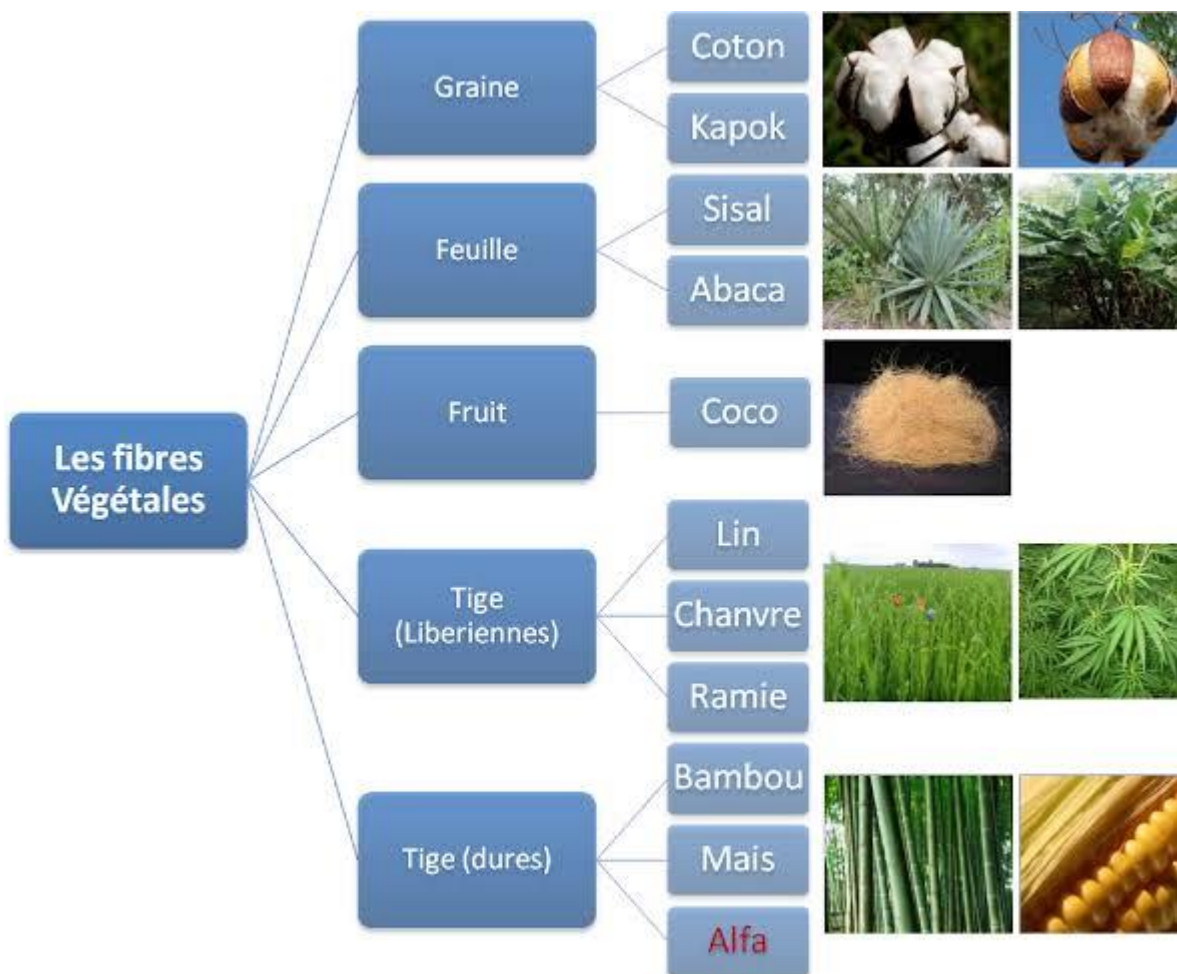


Figure3.4 : Classification des fibres végétales in[38] d'après, [39]

Chapitre III : Traitements des matériaux terres **« Liants hydrauliques, fibre végétales »**

4.7 Les fibres animales :

Composées de substances organiques, les fibres animales, ou protéiniques, se présentent sous forme de poils ou de plumes ou de soies tel que : (Laine, Alpaga, Chameau, Cachemire, Guanaco...). [40]



Figure 3.5 : Fibres animales

4.8 Fibre de paille :

Le début du XXI^e siècle voit le retour des industries aux fibres végétales. Avec la préoccupation croissante pour l'environnement et incitant les gouvernements et les institutions à investir dans le durable, la tendance est de s'orienter vers ce type de fibres environnementales et fonctionnelles. Ce rendement est particulièrement important avec la raréfaction et le coût croissant des ressources pétrolières.

4.8.1 Définition :

La paille de blé et d'orge est une plante à récolte bisannuelle largement cultivée dans le monde entier (Figure 3.4). C'est la fibre la plus couramment utilisée dans la bauge. Au cours du XIX^e siècle, l'évolution des pratiques agricoles a généré un excès de paille qui a pu être utilisé dans la construction en bauge comme une source matériau locale.

Chapitre III : Traitements des matériaux terres

« Liants hydrauliques, fibre végétales »



Figure3.6 : La paille d'orge

4.8.2 Avantage de la paille :

La paille présente plusieurs avantages dans différents domaines :

Construction écologique : La paille est un matériau de construction naturel et renouvelable, ce qui en fait un choix écologique pour les maisons et bâtiments durables. Son utilisation réduit la dépendance aux matériaux de construction traditionnels et contribue à la réduction des émissions de carbone.

Isolation thermique : La paille a d'excellentes propriétés d'isolation thermique, ce qui aide à maintenir une température confortable à l'intérieur des bâtiments. Elle offre une isolation efficace contre le froid en hiver et la chaleur en été, ce qui peut réduire les besoins en chauffage et en climatisation.

Respectueux de l'environnement : La culture de la paille nécessite moins de ressources que d'autres matériaux de construction, tels que le bois ou le béton. Elle peut également être produite localement, ce qui réduit les émissions associées au transport.

Stockage de carbone : La paille stocke du carbone pendant sa croissance, ce qui contribue à réduire les niveaux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Lorsqu'elle est utilisée comme

Chapitre III : Traitements des matériaux terres **« Liants hydrauliques, fibre végétales »**

matériau de construction, elle continue à stocker ce carbone pendant la durée de vie du bâtiment.

Coût : La paille est souvent moins chère que d'autres matériaux de construction, ce qui en fait une option économique pour les projets de construction. De plus, sa disponibilité locale peut réduire les coûts de transport.

En résumé, la paille est un matériau de construction polyvalent et durable qui offre des avantages écologiques, économiques et de performance énergétique pour les bâtiments et les maisons.

4.9 Fibre de filasse :

4.9.1 Définition :

.La filasse est une fibre végétale naturelle extraite de différentes plantes, telles que le chanvre ou le lin. Lorsqu'elle est incorporée dans un sol, elle peut améliorer ses caractéristiques mécaniques, notamment sa résistance au cisaillement. Le comportement au cisaillement d'un sol fait référence à sa capacité à résister aux forces qui le déforment ou le font glisser.

La teneur et les dimensions des fibres de filasse jouent un rôle clé dans l'efficacité de l'amélioration du sol. En général, plus la teneur en fibres est élevée, plus le sol amélioré présentera une résistance au cisaillement accrue. Cependant, il est important de trouver le juste équilibre, car une teneur excessive en fibres peut également entraîner une diminution de la perméabilité du sol.

Les dimensions des fibres de filasse sont également un facteur déterminant. Des fibres plus longues ont tendance à offrir une meilleure résistance au cisaillement, car elles fournissent une plus grande surface de contact entre les particules du sol. De plus, des fibres plus épaisses peuvent renforcer davantage la structure du sol amélioré.

Chapitre III : Traitements des matériaux terres **« Liants hydrauliques, fibre végétales »**



Figure3.7 : fibre de la filasse

5. L'effet de la stabilisation par les fibres naturelles sur les propriétés des Adobes :

La stabilisation des adobes par l'ajout de fibres naturelles a un impact significatif sur leurs propriétés mécaniques et physiques. Voici les principaux effets observés :

1. Renforcement mécanique:

- Les fibres naturelles, telles que la paille ou les roseaux, renforcent la cohésion des adobes en formant un réseau tridimensionnel à l'intérieur de la masse.
- Cela améliore la résistance à la compression et à la traction des adobes, les rendant plus robustes et moins susceptibles de se fissurer ou de se déformer.

2. Contrôle de la fissuration:

- Les fibres naturelles agissent comme des armatures, limitant la propagation des fissures dans les adobes.
- Elles absorbent également l'humidité et aident à réduire les effets du retrait et du gonflement, minimisant ainsi le risque de fissuration due aux variations de température et d'humidité.

Chapitre III : Traitements des matériaux terres

« Liants hydrauliques, fibre végétales »

3. Amélioration de la durabilité:

- En renforçant la structure des adobes, les fibres naturelles augmentent leur durabilité et leur résistance aux intempéries.
- Cela prolonge la durée de vie des bâtiments en adobe et réduit les besoins en entretien et en réparation.

4. Isolation thermique et acoustique:

- Les fibres naturelles ajoutent des propriétés isolantes aux adobes, les rendant efficaces pour réguler la température intérieure et réduire les bruits extérieurs.
- Cela améliore le confort des occupants et contribue à des économies d'énergie en réduisant les besoins de chauffage et de climatisation.

5. Compatibilité environnementale:

- Les fibres naturelles sont écologiques et renouvelables, ce qui en fait un choix durable pour la stabilisation des adobes.
- Leur utilisation réduit l'empreinte écologique des constructions en adobe tout en préservant les ressources naturelles.

En résumé, l'ajout de fibres naturelles dans les adobes améliore leur résistance mécanique, contrôle la fissuration, augmente leur durabilité, offre une isolation thermique et acoustique, et contribue à une construction plus respectueuse de l'environnement. Cela fait des adobes stabilisés par des fibres naturelles une option attrayante pour les constructions durables et traditionnelles.

Chapitre III : Traitements des matériaux terres « Liants hydrauliques, fibre végétales »

6. L'effet des fibres sur les propriétés mécaniques :

Des études apparues depuis plusieurs années sur le BTM 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.

7. L'effet des fibres sur l'absorption d'eau :

La faible insensibilité à l'eau des fibres végétales peut effectivement constituer un défi dans leur utilisation pour la fabrication des produits en terre crue. [8]. L'effet des fibres sur l'absorption d'eau dépend de leur nature, qu'elles soient d'origine végétale, synthétique ou minérale. Les fibres végétales, par exemple, ont tendance à être hydrophiles, ce qui signifie qu'elles ont une affinité pour l'eau et peuvent absorber une certaine quantité d'humidité. En revanche, les fibres synthétiques comme le polypropylène sont généralement hydrophobes, repoussant l'eau et ayant une absorption d'eau limitée.

Dans les matériaux de construction et autres applications, cette caractéristique peut être un élément crucial à considérer. Une absorption excessive d'eau peut affaiblir la structure du matériau, entraîner une dégradation prématurée et compromettre ses performances. À l'inverse, une capacité limitée d'absorption d'eau peut être bénéfique dans des applications où une résistance à l'humidité est nécessaire.

8. conclusion

Ce chapitre est consacré à nous fournir des informations sur les techniques de stabilisation du sol et sur l'importance de l'utilisation de fibres pour stabiliser le sol. Il souligne que le sol peut être amélioré grâce à l'ajout de fibres, et que différents types de sol nécessitent des stabilisateurs spécifiques

Chapitre IV

*Matériaux de l'Etude et
Technique Expérimentale*

1.Introduction :

La nature de la terre, celle des liants utilisés comme stabilisants, la nature des fibres employées sont des paramètres fondamentaux qui influent sur le comportement des adobes en terre. Par conséquent, pour étudier correctement les propriétés des adobes en terre, il est essentiel d'analyser ces paramètres. Ce chapitre présente non seulement la caractérisation des matériaux, mais aussi l'ensemble des formulations à étudier et les procédures des essais de traitements.

2. Méthode et matériau :

L'échantillon prélevé provient de la région de Ksar Chellala la wilaya de Tiaret. Ce choix a été fait en raison de la disponibilité et de l'abondance des matériaux dans cette région (Figure 4.1). Les traitements appliqués dans cette recherche incluent l'utilisation de **chaux**, de **ciment**, de fibres de **paille et de filasse**. La chaux est utilisée comme stabilisant pour augmenter la résistance à l'eau et la durabilité des adobes. Le ciment est employé pour améliorer la cohésion et la résistance mécanique des briques de terre. Les fibres de paille sont ajoutées pour renforcer la structure des adobes, réduire les fissures de retrait et améliorer la résistance à la traction. La filasse est utilisée de manière similaire aux fibres de paille, augmentant la résistance et la flexibilité des adobes. Ces traitements visent à optimiser les propriétés mécaniques et la durabilité des matériaux locaux utilisés dans la fabrication des adobes.



Figure 4.1 échantillon de sol

3. Identification des matériaux bruts:

Dans cette étude, les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du matériau brut sont présentées. La caractérisation de ces matériaux bruts est une opération indispensable pour orienter le choix de la méthodologie et des outils à mettre en œuvre dans cette recherche.

➤ **Les propriétés physico-chimiques**

L'analyse granulométriques (Tamisage sous l'eau, sédimentométrie).

Les limites d'Atterberg (WL, WP)

La valeur au bleu de méthylène (VBS)

La détermination des carbonates du CaCO_3 (au calcimètre)

La détermination de l'acidité du matériau (Essai au PH-mètre)

➤ **Les propriétés mécaniques** (les paramètres de compactage et portance)

Les essais de compression simple (RC, résistance à la compression)

La détermination du module d'élasticité E , E_{50} et $E_{\text{sécant}}$.

➤ **La durabilité :** (Drip test, brossage de surface test et test de capillarité)

3.1 Analyse granulométrique par lavage les normes [NF P 94-056]

L'analyse granulométrique est essentielle pour comprendre la composition des échantillons bruts. Elle permet de déterminer la taille et les proportions des différents grains présents dans l'échantillon. Cette méthode est utilisée pour les granulats jusqu'à 80 μm . Pour les particules inférieures à 80 μm , on utilise l'essai de sédimentométrie.

3.1.1 Le principe de l'essai

Implique de faire passer un échantillon de sol à travers des tamis (Figure 4.2) de diamètre décroissant (31,5.25.20.16.12,5.10.8.6,3.5.4.2.1.0,5.0,4.0,315.0,200.0,100.0,08), de peser le refus de tamisage de chaque tamis et de tracer ainsi la courbe granulométrique pour classer le sol. Les pourcentages obtenus sont ensuite exploités sous forme graphique.



Figure 4.2 essai analyse granulométrique par lavage

3.2 Sédimentométrie [NF P 94-057] :

Cet essai vise à mesurer la distribution des tailles de particules inférieure 80 μ m dans un échantillon de sol en utilisant un densimètre pour créer une courbe granulométrique.

3.2.2 Principe de l'essai

Le principe repose sur la vitesse de décantation des particules dans un liquide au repos, selon la loi de Stokes.

3.2.3 Mode opératoire

On pèse 40 g du matériau contenu dans les sachets et on verse de l'eau distillée dans une éprouvette graduée jusqu'à obtention d'un demi-litre. Ensuite, on verse 40 g de l'échantillon dans l'éprouvette. On place cette éprouvette sous agitation pendant 1h30, puis pendant 30 minutes. Après cette agitation, on ajoute au matériau un agent défloculant tel que le silicate de soude, le pyrophosphate de soude ou le phosphate de sodium. La solution se prépare en mélangeant un litre d'eau distillée avec 102 g de phosphate de sodium solide.

On attend 1h30 après l'ajout de l'agent défloculant, puis on remplit l'éprouvette d'eau distillée jusqu'à un litre. On laisse le matériau se stabiliser et les particules se décanter pendant une durée de 18 à 24 heures. Après cette stabilisation, on agite l'ensemble de la solution pendant 2 minutes à l'aide d'un agitateur afin de séparer à nouveau les grains.

Ensuite, on ne touche plus à l'éprouvette pour ne pas perturber les particules. On plonge le densimètre dans l'éprouvette et on prend les lectures. Pendant l'essai, on plonge également le thermomètre pour relever la température (voir la figure 4.3).



Figure 4.3 essai de Sédimentométrie

3.3. Courbe granulométrique

Une courbe granulométrique représente la répartition des différentes tailles de particules dans un échantillon de sol. L'échelle logarithmique sur l'axe des abscisses est utilisée pour les diamètres des tamis, ce qui permet de mieux visualiser une large gamme de tailles de particules (voir la figure 4.4). L'échelle arithmétique sur l'axe des ordonnées représente les pourcentages des refus cumulés ou des tamisats cumulés, montrant la proportion de particules de chaque taille retenue par les tamis successifs.

Les résultats de l'analyse granulométrique par tamisage sous l'eau et sédimentométrie montrent que le sol étudié est principalement composé de limon, dont les grains ont une taille comprise entre $2 \mu\text{m}$ et $63 \mu\text{m}$. Le pourcentage de limon varie entre 22 % et 58 %, ce qui en fait le composant majoritaire du sol. En outre, le sol contient également une proportion notable d'argile, avec des pourcentages allant de 18 % à 20 %.

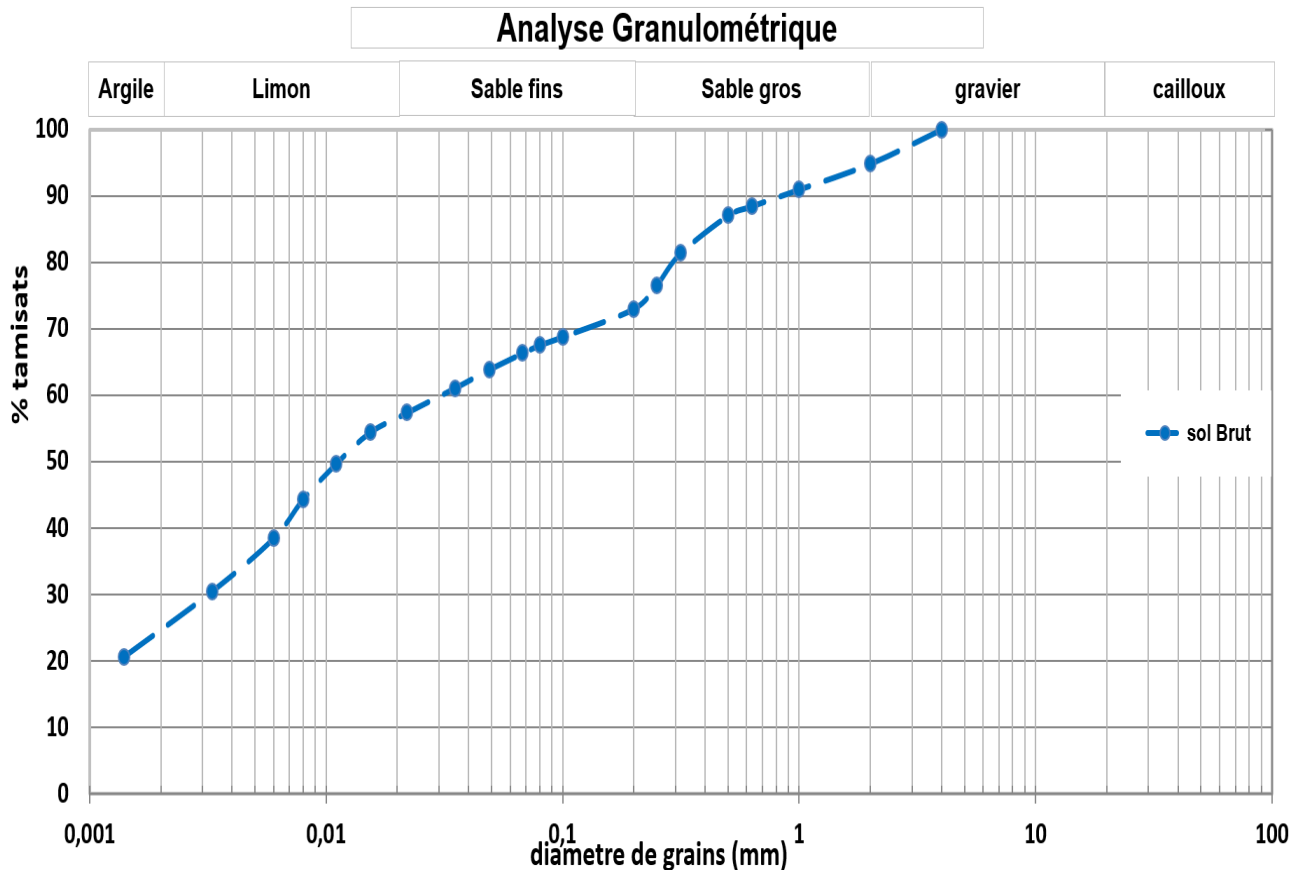


Figure 4.4 la courbe granulométrique

La présence de particules sableuses, qui sont des grains de taille supérieure à $63 \mu\text{m}$, est également significative dans ce type de sol, avec des pourcentages de sable pouvant atteindre jusqu'à 42 %. Ces résultats sont résumés dans la figure 4.2 et montrent la répartition des différentes fractions granulométriques au sein du sol.

En résumé, le sol est principalement limoneux, avec une proportion variable mais importante d'argile et de sable, ce qui pourrait influencer ses propriétés physiques et mécaniques, telles que la perméabilité, la cohésion, et la stabilité.

- D60: Diamètre pour lequel 60% en masse des particules constituant le sol ont un diamètre inférieur ou égale à D60.
- D50: Diamètre moyen ou diamètre pour lequel 50% en masse des particules constituant le sol ont un diamètre inférieur ou égale à D50.
- D30: Diamètre pour lequel 30% en masse des particules constituant le sol ont un diamètre inférieur ou égale à D30.
- D10: Diamètre efficace, ou diamètre pour lequel 10% en masse des particules constituant le sol ont un diamètre inférieur ou égale à D10.

Le coefficient d'uniformité ou de Hazen exprimé par la relation suivante:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Le coefficient de courbure est donné par la formule suivante:

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{(D_{60}) \times (D_{10})}$$

- **Détermination de D₁₀, D₃₀ et D₆₀**

Le tableau ci-dessous montre les valeurs D₁₀, D₃₀ et D₆₀.

Tableau 4.2: Différents diamètres de la courbe granulométrique du sol de tiaret.

Notation	Valeur en (mm)
D ₁₀	0.0005
D ₃₀	0.003
D ₅₀	0.01
D ₆₀	0.035

Détermination du coefficient d'uniformité (Hazen) :

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{0.035}{0.0005} = 70$$
$$C_u = > 2,$$

Cela signifie que le diamètre des particules correspondant à 60% de refus cumulés est 70 fois plus grand que celui correspondant à 10% de refus cumulés. Un C_u élevé indique une large gamme de tailles de particules, ce qui suggère un sol bien gradué. Un sol bien gradué possède des particules de différentes tailles, ce qui peut améliorer ses propriétés mécaniques, comme la compaction et la stabilité.

- **Coefficient de Courbure (C_c) :**

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{0.003^2}{0.0005 \times 0.035} = 0.5$$

Un Cc de 0.5 est en dehors de la plage typique de 1 à 3 pour un sol bien gradué. Cela suggère que le sol n'est pas bien gradué et pourrait avoir une courbe granulométrique mal équilibrée.

- **Distribution des Particules :**

- Un Cc de 0.5 indique que la distribution des particules de tailles intermédiaires (D30) par rapport aux plus petites (D10) et aux plus grandes (D60) n'est pas équilibrée.

Cela peut signifier que le sol manque de particules de taille intermédiaire, ce qui peut affecter ses propriétés mécaniques et hydrauliques. Les sols avec un Cc faible peuvent avoir une moins bonne capacité de compaction et de stabilité. Ils peuvent être plus susceptibles à l'érosion et avoir des propriétés de drainage inadéquates.

3.4. L'essai d'équivalent de sable [NFP 18-598]

L'essai vise à mesurer la propreté du sol en évaluant la fraction d'un granulat passant à travers un tamis à mailles carrées de 5 mm. Il permet de rendre compte de manière globale de la quantité et de la qualité des éléments fins en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments sableux qui se sédimentent et les éléments fins qui flocculent.

3.4.1 Mode opératoire

Pour exécuter l'essai, la solution lavant est d'abord siphonnée dans l'éprouvette cylindrique. Pour exécuter l'essai, la solution lavant est d'abord siphonnée dans l'éprouvette cylindrique jusqu'au trait repère inférieur. Ensuite, une prise d'essai humide, correspondant à une masse sèche de $120 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ de matériau, est versée avec précaution à l'aide de l'entonnoir dans l'éprouvette posée verticalement. Pendant 10 minutes \pm 10 secondes, l'éprouvette est agitée, puis lavée. Enfin, on laisse reposer pendant 20 minutes \pm 10 secondes. On mesure les éléments suivants :

- h1 : hauteur de sable propre + éléments fines (flocculant).
- h2 : sable propre seulement.



Figure 4.5 : Essai équivalent de sable

3.4.2 Expression des résultats :

La figure 4.5 montre les dimensions à considérer dans l'essai de l'équivalent de sable (h1,h2). Tableau 4.3 résume les résultats de l'équivalent de sable obtenus et .

Tableau 4.1 les résultats de l'équivalent de sable du matériau

échantillon		ES	Observation
1	ES visuelle %	48	Peu plastique
1	ES piston %	50	
2	ES visuelle %	46	Peu plastique
2	ES piston %	48	

3.5. Les limites D'Atterberg selon la Norme-NF-P94-051 [1993] :

3.5.1 But de l'essai

Les limites d'Atterberg sont des mesures utilisées pour déterminer les propriétés de plasticité et de plasticité d'un sol .Le teneur en eau étant exprimées en pourcentage, l'indice de plasticité est un nombre sans dimension.(La figure 4.6)

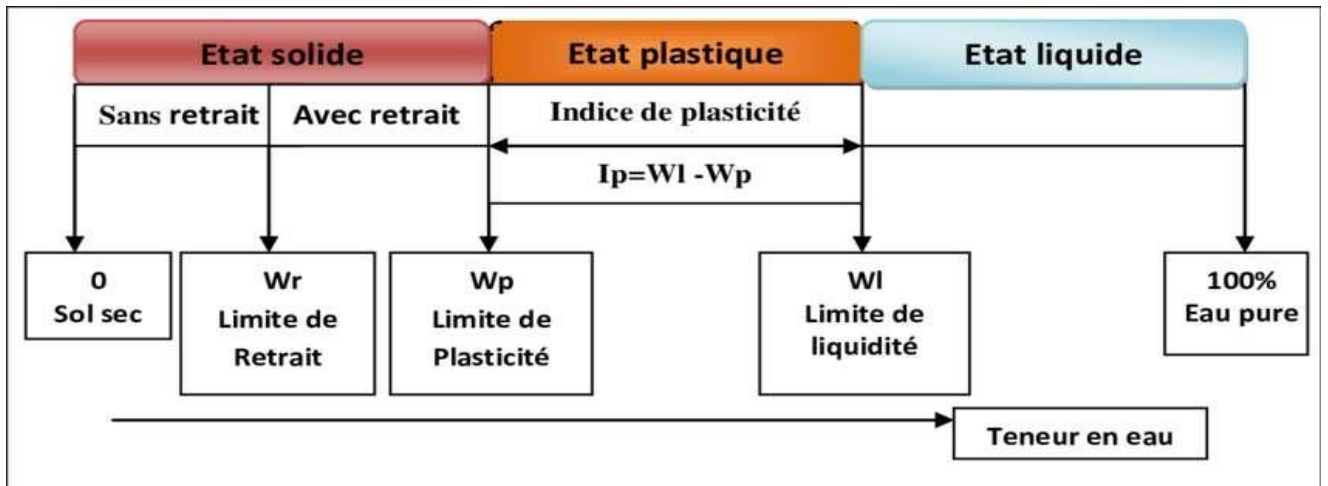


Figure 4.6 diagramme de détermination de la teneur en eau

3.5.2 Principe de l'essai

Il semble que le principe de l'essai soit de déterminer la teneur en eau du sol en observant deux phénomènes : la fermeture d'une rainure dans un sol placé dans une coupelle sous chocs répétés, et la fissuration d'un rouleau de sol confectionné manuellement (La figure 4.7).

Les limites de plasticités sont déterminées sur la fraction de sol passant au travers du tamis 400 μ m Les deux limites utilisées sont :



Figure : 4.7 la limite de liquidité

WL : limite de liquidité : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état liquide et un état plastique.

WP : limite de plasticité : teneur en eau d'un sol remanié caractérisant la transition entre un état plastique et un état solide. A partir des résultats obtenus, nous déterminons l'indice de plasticité.

IP : indice de plasticité définit l'étendue du domaine plastique du sol entre les limites de liquidité et de plasticité $IP = WL - WP$



Figure 4.8 : la limite de plasticité

Tableau 4.2 : résultats des limites d'Atterberg et l'indice de plasticité (Conformément à la NF P 94-051 03/93)

Nombre de coups	27	20	34	18
N° de la tare	A9	A10	A22	A3
Masse totale du sol humide	20,45	19,98	16,31	20,51
Masse totale sol sec	15,92	15,50	13,08	15,70
Masse de la tare	2,4	2,40	2,40	2,41
Masse de l'eau	4,53	4,48	3,23	4,81
Masse du sol sec	13,52	13,1	10,68	13,29
Teneur en eau (%)	33,51	34,20	30,24	36,19
Limite de liquidité		33,54		

Nombre de coups : logN	27	20	34	18
Teneur en eau %	33,51	34,20	30,24	36,19

Ce Tableau permet de comparer ce résultat avec celui que l'on obtient à l'aide de la formule empirique $WL = W(N/25)^{0,121}$

N coups	N/25	$(N/25)^{0,121}$	W	WL	WL moy
27	1,08	1,01	33,51	33,82	33,32
20	0,8	0,97	34,20	33,29	
34	1,36	1,04	30,24	31,39	
18	0,72	0,96	36,19	34,78	

WL=33,5%

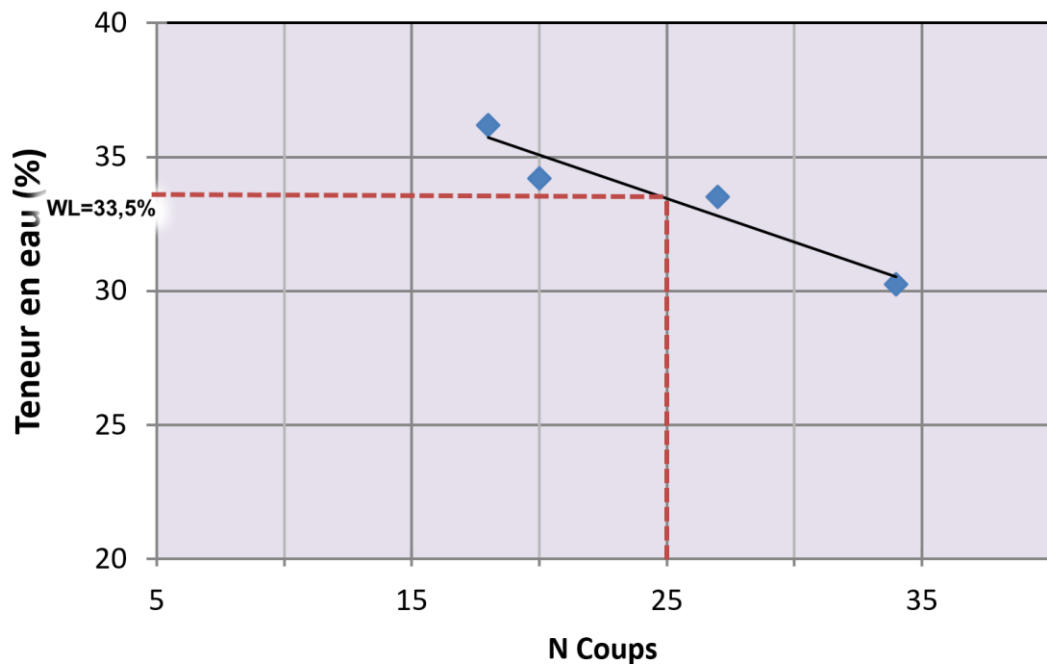


Figure 4.9 : Limite de liquidité de sol+3%chaux

Tableau 4.3 : résultats de limite de plasticité des sols bruts

N° de la tare	La Limite de plasticité 1		
	1	12	22
poids total humide (g)	6,59	6,22	6,28
poids total sec (g)	6,09	5,79	5,78
poids de la tare (g)	2,40	2,39	2,44
poids de l'eau (g)	0,50	0,43	0,50
poids du sol sec (g)	3,69	3,40	3,34
Teneur en eau (%)	13,55	12,65	14,97
limite de plasticité moy (wp)	13,72		
Indice de plasticité (Ip)	19,78		
Indice de liquidité (IL)	0,32		
Indice de consistance Ic =	0,68		
Teneur en eau naturelle	20		

- **Indice de liquidité (IL) : 0,32**

- Cela signifie que le sol est dans un état de consistance ferme. Un IL de 0,32 indique que le sol est plus proche de l'état plastique que de l'état liquide.

- **Indice de consistance (Ic) : 0,68**

- Cela confirme que le sol est relativement ferme et montre une bonne cohésion.

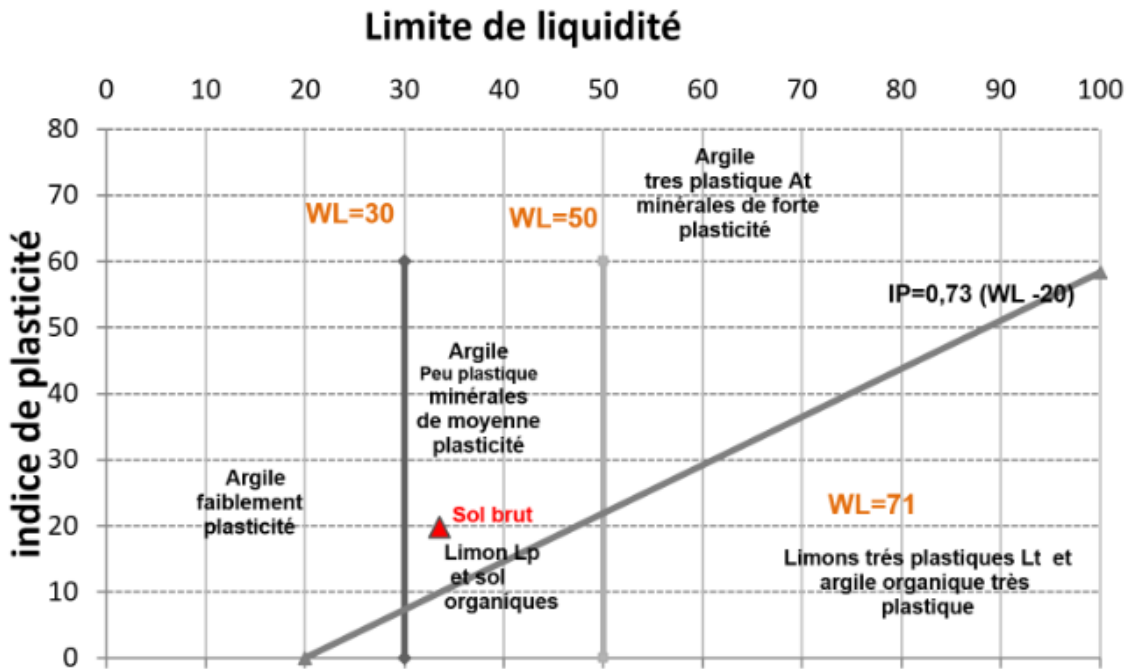


Figure4.10 : Le position du sol brut sur le diagramme de plasticité de Casagrande

Le diagramme de plasticité de Casagrande ci-dessus montre les propriétés de votre sol avec les valeurs calculées. Le point bleu représente les caractéristiques de votre sol :

- **Limite de liquidité (WL) :** 33,50 %
- **Indice de plasticité (Ip) :** 19,78 %

Le point se situe au-dessus de la ligne A ($Ip = 0,73(WL - 20)$), ce qui indique que le sol est argileux. Selon la classification des sols, il se situe probablement dans la zone des argiles de plasticité moyenne à élevée.

3.5.3 Classification USCS (Unified Soil Classification System):

Dans le système de classification unifiée des sols (USCS), nous utilisons les limites d'Atterberg pour distinguer entre les sols fins (argiles et limons). La classification est la suivante :

- **Argiles de haute plasticité (CH) :** $WL > 50\%$
- **Argiles de basse plasticité (CL) :** $WL \leq 50\%$
- **Limons de haute plasticité (MH) :** $WL > 50\%$
- **Limons de basse plasticité (ML) :** $WL \leq 50\%$

Pour déterminer si le sol est une argile ou un limon, nous devons examiner la position sur le diagramme de plasticité de Casagrande et l'indice de plasticité (Ip) par rapport à la limite de liquidité (WL).

1. Propriétés Limites d'Atterberg :

- Limite de liquidité (WL) : 33.50 %
 - Indice de plasticité (Ip) : 19.78 %
2. **Granulométrie :**
- Sol majoritairement composé de limon (22% à 58%)
 - Présence notable d'argile (18% à 20%)
 - Présence significative de sable (jusqu'à 42%)
3. **Surface spécifique volumétrique (VBS) :**
- Une VBS de 0.26 est typique des sols à grains fins avec une proportion notable d'argiles et de limons.
- **Sur le diagramme de Casagrande :**
- La **ligne A** : $I_p = 0.73(WL - 20)$
 - Les sols au-dessus de cette ligne sont classés comme argiles (C).
 - Les sols en dessous de cette ligne sont classés comme limons (M).

En utilisant les valeurs fournies :

- **WL = 33,50 %**
- **Ip = 19,78 %**

Comparons cet I_p théorique de la ligne A (9.855) avec notre I_p observé (19.78).

- Puisque 19.78 est bien au-dessus de 9.855, notre sol se situe au-dessus de la ligne A, indiquant qu'il s'agit d'une **argile**.
- Comme $WL = 33.50$ (ce qui est inférieur à 50), et $I_p = 19.78$, nous pouvons classer ce sol comme une **argile de basse plasticité (CL)** selon le système USCS.
- **Classification USCS :** Argile de basse plasticité (CL)

Ces classifications fournissent des indications sur les propriétés de performance du sol pour des usages en ingénierie civile, comme la construction des adobes et BTC.

- **Classification USCS avec granulométrie et VBS :**

Selon la granulométrie :

- **Limon (22% à 58%) :** Ce sol a une forte composante limoneuse.
- **Argile (18% à 20%) :** Une proportion notable d'argile.
- **Sable (jusqu'à 42%) :** Une proportion significative de sable.

1. **Combinaison des résultats :**

- Avec un WL de 33,50 % et un I_p de 19,78 %, le sol est classé comme une argile (C).
- La granulométrie montre une proportion significative de limon (22% à 58%), d'argile (18% à 20%), et de sable (jusqu'à 42%).

2. **Classification finale :**

- Avec ces pourcentages granulométriques et les limites d'Atterberg, nous classons le sol comme une **argile limoneuse (CL-ML)**.

- Ce type de sol est souvent rencontré dans les sols de transition entre les limons et les argiles de basse plasticité.

Ces classifications fournissent une bonne compréhension des propriétés du sol pour les applications en génie civil, telles que la conception des fondations et des remblais.

3.6 Conclusion:

Les sols argileux limoneux (CL-ML) et les sols classés A-4 ou A-6 peuvent nécessiter des traitements pour améliorer leurs propriétés mécaniques et leur stabilité avant d'être utilisés pour des matériaux de constructions. Les méthodes de stabilisation chimique, mécanique, et de précharge sont couramment utilisées pour améliorer ces types de sols. Un traitement adéquat permet de garantir la sécurité et la durabilité des matériaux de constructions.

4. Analyse chimique :

L'analyse chimique vise à identifier les éléments constitutifs de sol, notamment les chlorures, carbonates et sulfates, et à déterminer leur pourcentage.

4.1 essai de pH

Le pH est mesuré à l'aide d'une électrode en verre, tandis que le titre alcalimétrique est établi par volumétrie à l'aide d'un acide minéral dilué conformément.

4.2 Principe de détermination de la teneur en sulfates NA-16002 – 5042 :

Principe de détermination de la teneur en sulfates repose généralement sur une réaction chimique entre les sulfates présents dans l'échantillon et un réactif spécifique, comme le chlorure de baryum. Cette réaction produit un précipité de sulfate de baryum, dont la quantité peut être mesurée pour déterminer la concentration en sulfates dans l'échantillon.. **La figure 4.11**



Figure 4.11 : Détermination de la teneur en sulfate

4.2.1. Les formules des calculs :

- $SO_3^{2-} = 34.3 \times (P_2 - P_1) / P_0$
- $CaSO_4 = 184.23 \times (P_2 - P_1) / P_0$

4.3. Principe de l'essai d'évaluation des carbonates NA-2789 :

L'essai d'évaluation des carbonates repose sur la réaction chimique entre les carbonates présents dans l'échantillon et un acide, généralement de l'acide chlorhydrique. Cette réaction produit du dioxyde de carbone, qui se libère sous forme de bulles. La quantité de dioxyde de carbone libéré est mesurée pour évaluer la quantité de carbonates dans l'échantillon. (La figure 4.12)



Figure 4.12 : l'essai d'évaluation des carbonates

4.3.1 La formule de calcul

$$\text{CaCO}_3 \% = 100 \cdot m_2 / m_1 \cdot 100 / (100 - H)$$

Le tableau suivant illustre le résultat d'analyse chimique de notre sol :

Tableau 4.4 : Résultats d'analyse chimique du sol

Les essais	échantillon	échantillon
Carbonates (%)	22	48
Sulfates (%)	0	0
PH	8.7	8,2

4.4. Essai au bleu de méthylène [NF P 94-068]

4.4.1 But de l'essai

L'essai au bleu de méthylène vise à évaluer l'impact des fines d'argile présentes dans les sables et graviers naturels ou artificiels.

4.4.2 Principe de l'essai

Le principe consiste à fixer des molécules de bleu de méthylène sur les particules d'argile, puis à mesurer la quantité de bleu fixée pour déterminer la valeur du bleu méthylène.

La figure 4.13



Figure 4.13 : essai au bleu de méthylène

4.4.3 Matériels utilisés :

- 1- Balance de précision
- 2- un bécher plastique ou verre
- 3- Un agitateur à ailettes de diamètre 70 à 80 mm et de vitesse de rotation 600 à 800 tr/min
- 4- Une burette de 100 ml
- 5- Papier filtre sans cendre (<0.010)

- 6- Une baguette en verre de 8 mm de diamètre
- 7- Une solution de bleu de méthylène qualité médicinale à 10g/l
- 8- Eau déminéralisée photo

Essai de bleu de méthylène Ce test consiste à injecter, successivement des dosages précis de bleu de méthylène jusqu'à avoir saturation des particules d'argiles. La valeur de bleu est exprimée par la formule suivante :

$$100 \cdot V \cdot 0.01 / M$$

Avec V : volume de bleu méthylène absorbé ;
M : la masse de prise d'essai.

- L'essai au bleu de méthylène donne $VBS = 0.26 \% \leq 1 \%$ (selon [NF P 94-068]) Notre sol est entre $0.2 \leq VBS \leq 2.5$, cela implique qu'il n'est pas très absorbant. Sol limoneux (sol peu plastique et sensible à l'eau).

5. Les essais mécaniques et les essais de durabilité :

5.1 Préparation et confection des adobes pour les essais mécaniques et durabilités

5.1.1 Etapes de préparation :

La préparation de l'adobe suit généralement ces étapes :

1. **Préparation du mélange** : mélanger de l'argile, du sable, de la paille et de l'eau dans des proportions appropriées.
2. **Pétrissage** : malaxer le mélange jusqu'à ce qu'il soit homogène et malléable.
3. **Moulage** : former des briques ou des blocs d'adobe à partir du mélange.
4. **Séchage** : laisser sécher les briques ou les blocs au soleil jusqu'à ce qu'ils durcissent.
5. **Stockage** : stocker les briques ou les blocs séchés dans un endroit sec jusqu'à leur utilisation dans la construction.



Figure 4.14 : Les adobes préparés

5.2 Dimensions de moule :

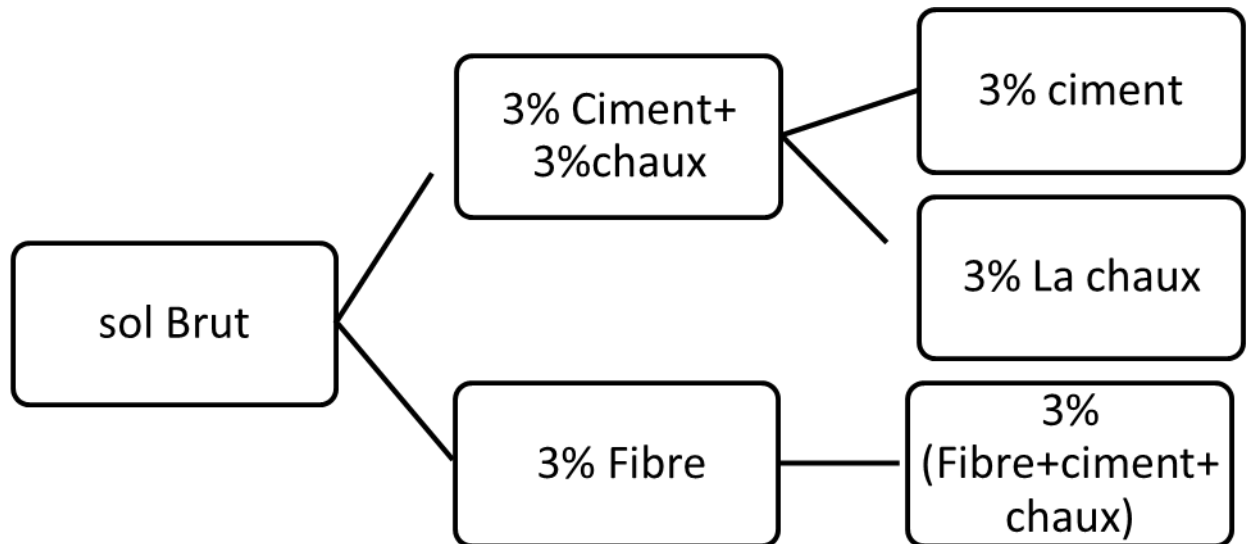
Nous avons utilisé un moule en bois de dimension 295*14*95 mm selon la norme [XP-P13-901]



Figure4.15 : dimension de moule utilisée

5.3 Organigramme des mélanges utilisés à la fabrication des adobes :

Dans le cadre de notre étude sur les différentes formulations de stabilisation du sol brut, nous avons exploré plusieurs compositions. La première formulation consiste en un mélange de 3% de ciment et de 3% de chaux, visant à améliorer la stabilité et la durabilité du sol. Une autre approche est d'utiliser uniquement 3% de ciment, afin de déterminer l'effet spécifique du ciment sur les propriétés du sol. De même, nous avons testé une formulation avec 3% de chaux seule pour évaluer son impact. Par ailleurs, nous avons incorporé des fibres dans la composition avec une formulation comprenant 3% de fibres, ainsi qu'une combinaison de 3% de fibres avec du ciment et de la chaux. Chaque formulation a été préparée pour observer les modifications dans les caractéristiques mécaniques et physiques du sol brut, en cherchant à identifier la combinaison optimale pour une meilleure performance.



5.4 Les essais mécaniques :

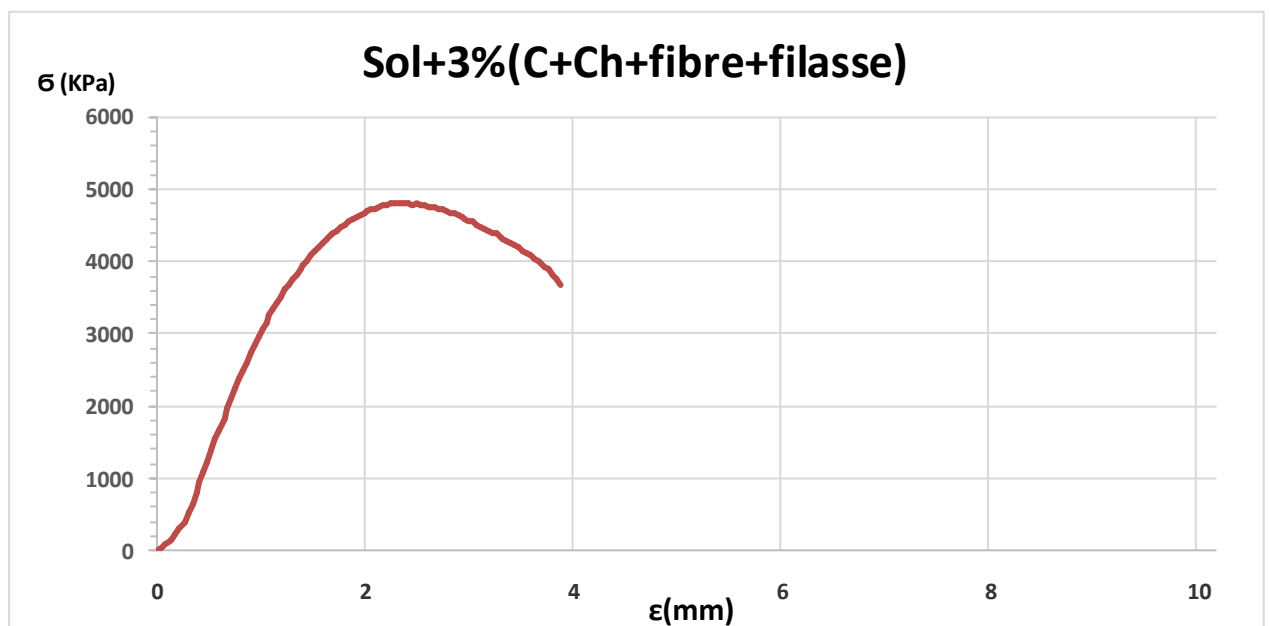
5.4.1 Essai compression simple s selon la Norme –NF

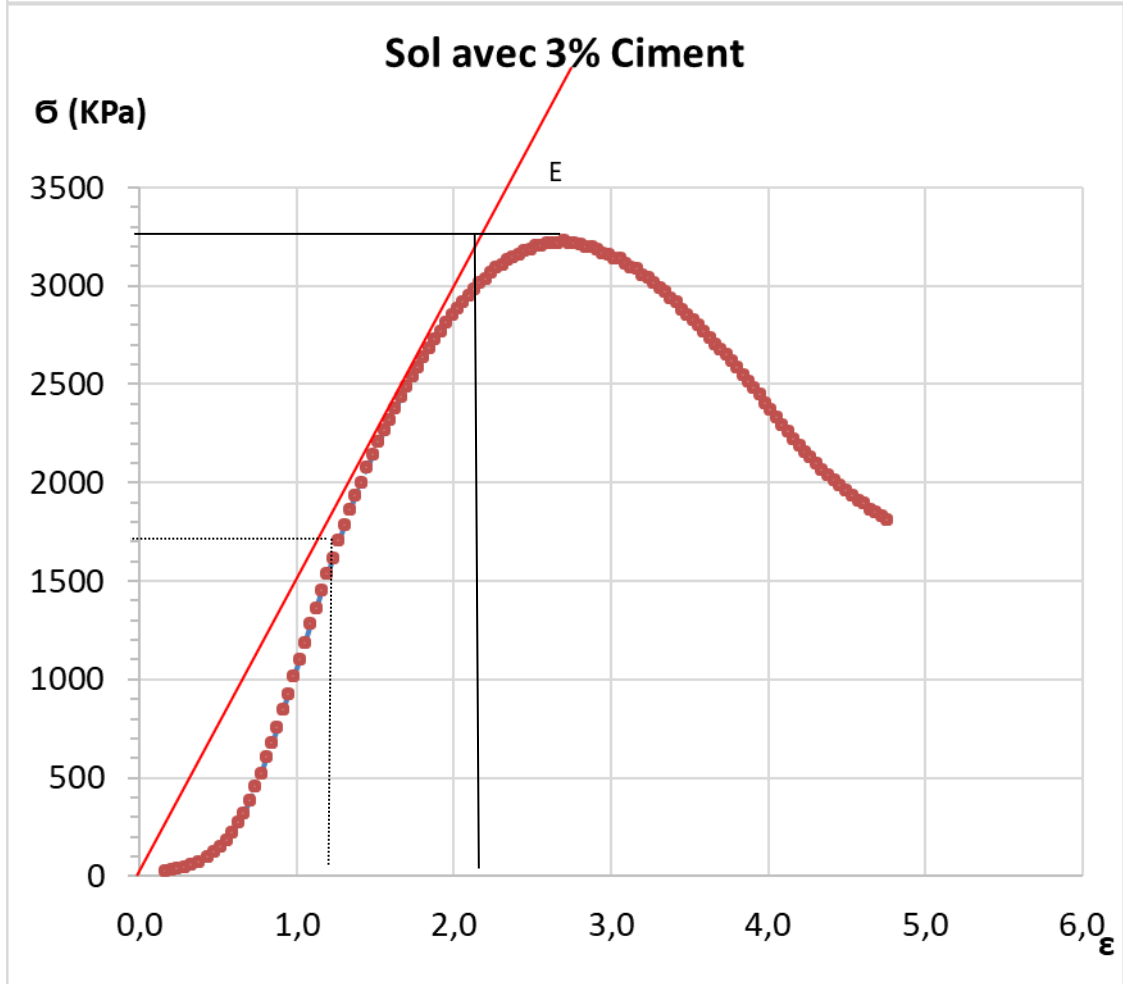
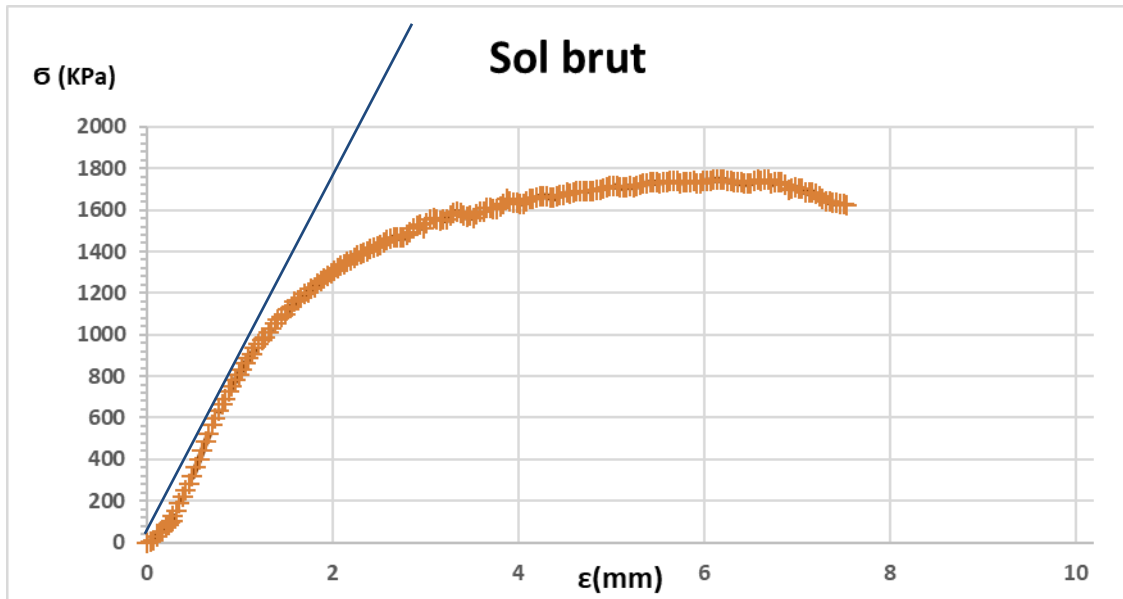
Les essais de résistance à la compression simple (RC) sont effectués sur des adobes de dimensions 295*95*14 mm confectionnées à WOPM et 0.985×pdOPM et compactées statiquement à l'aide d'une presse statique. La détermination de cette résistance a pour but d'étudier l'effet des liants utilisés (**ciment, la chaux, fibre de paille, fibre de fillasse**) sur les paramètres de résistance mécanique de sol traités. Ceci nous permettra de caractériser le comportement du sol traité. Nous avons donc mesuré les résistances à la compression simple des éprouvettes concernant le sol brut sans traitement et les formulations proposées après, 40 jours de maturation. Le calcul de la résistance à la compression simple se fait par la formule suivante : $RC=FrS$

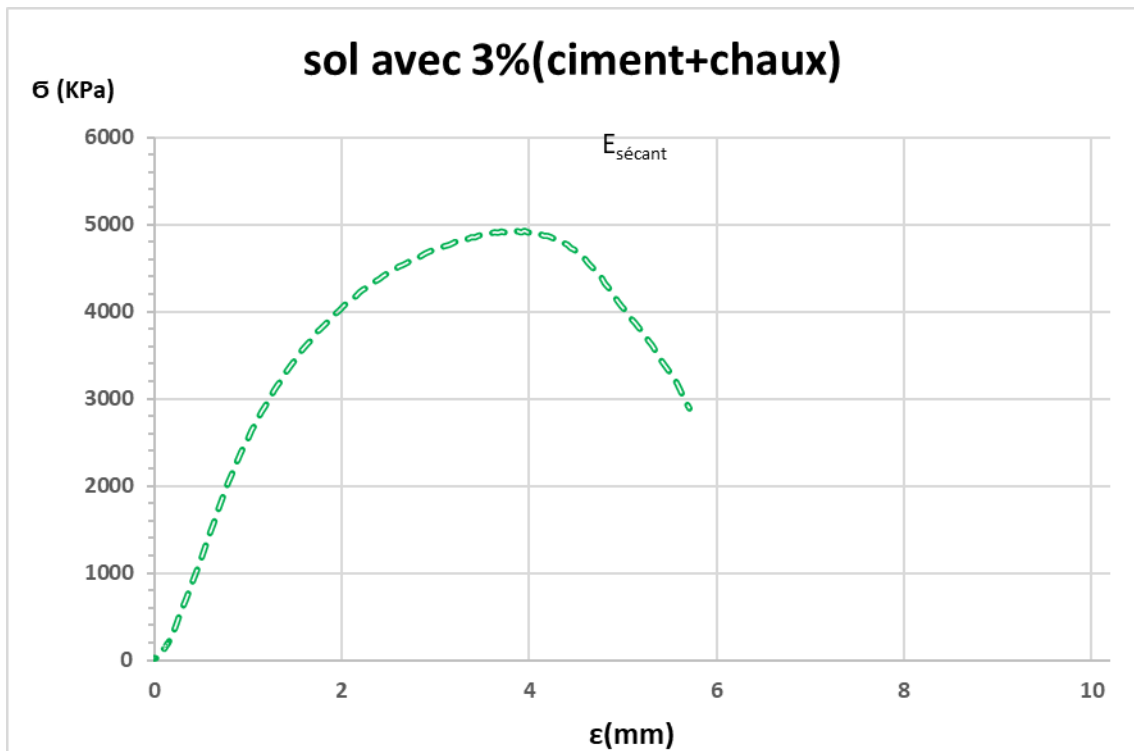
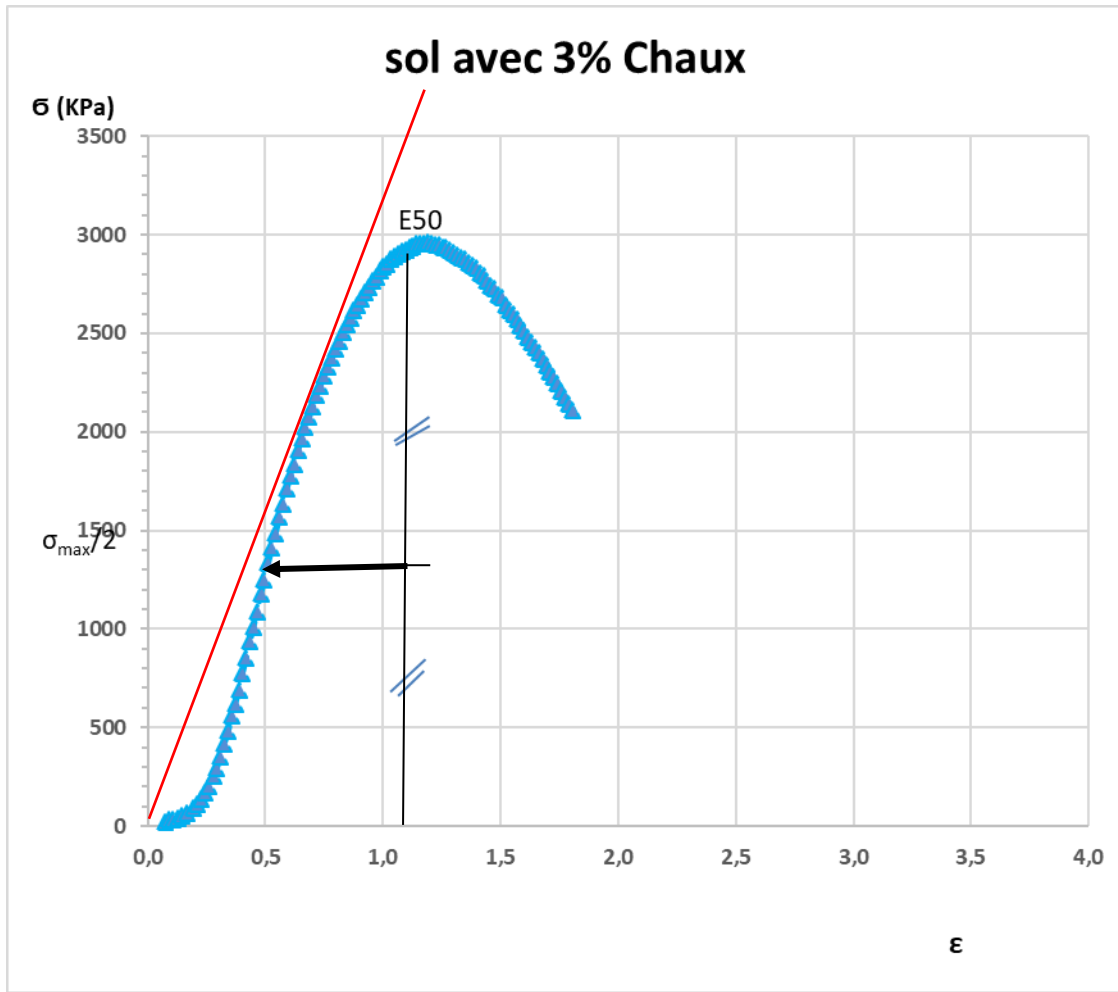
Fr : la valeur maximale de la force appliquée sur l'éprouvette au moment de la rupture S: la surface de la section de l'éprouvette, (cm²).



Figure 4.16: Résultats d'essai La résistance à la compression







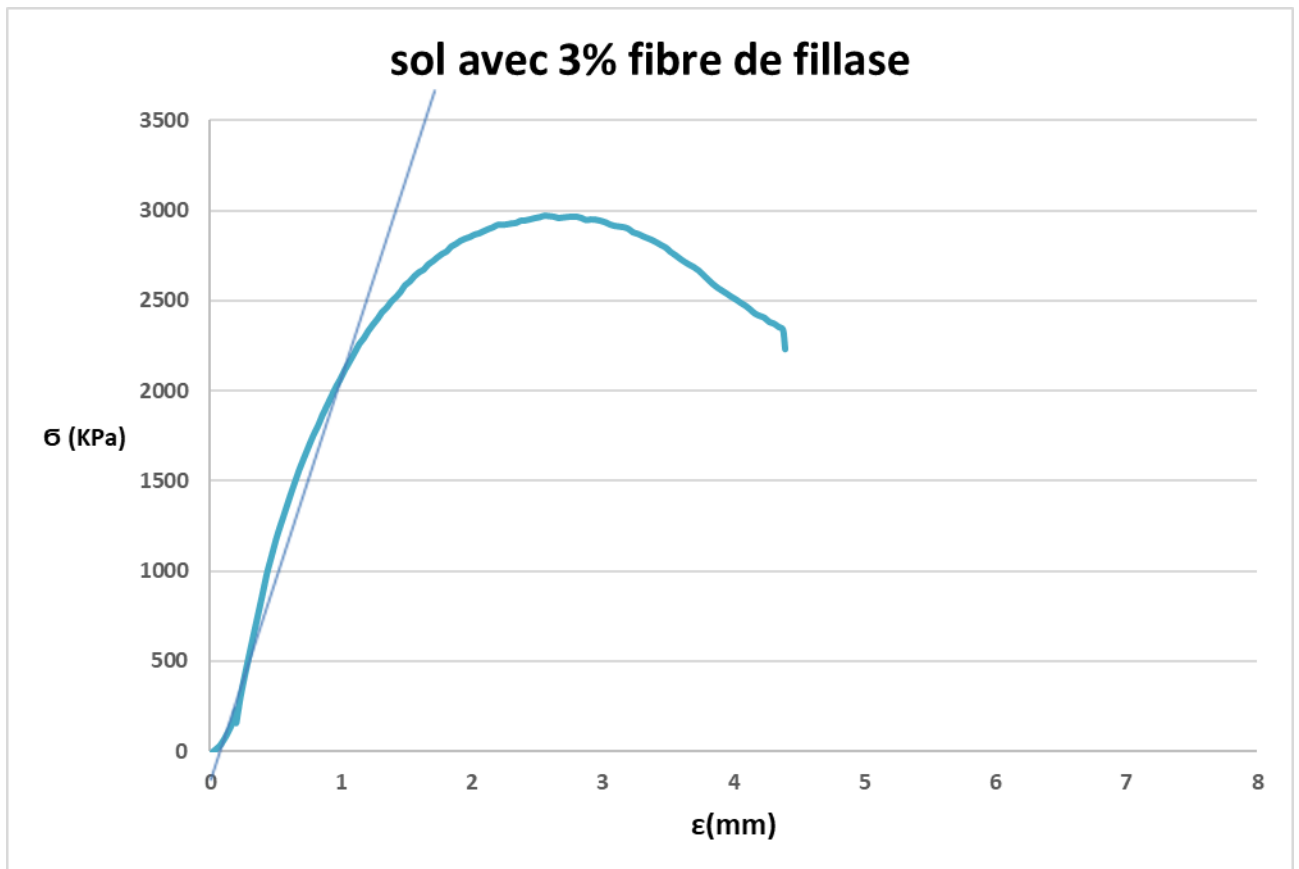
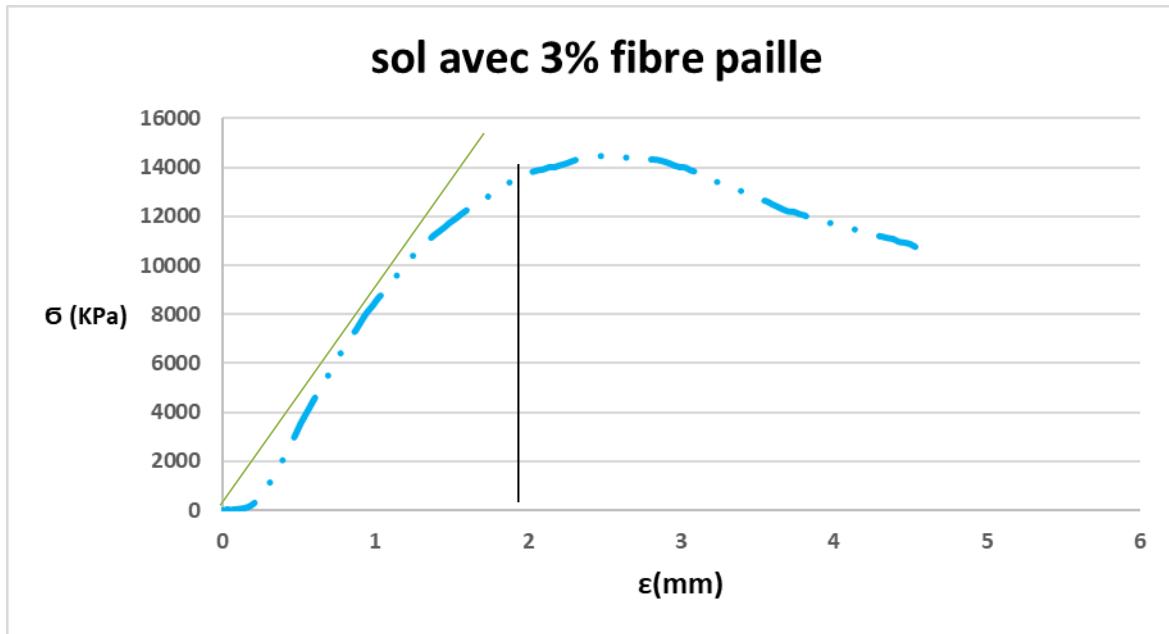


Figure 4.17 : Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 40 jrs

Tableau 4.5 : récapitulatif

ECH	Age (j)	Formulations	σ max (MPa)	σ max (MPa) moyenne	σ max/2 (MPa)	ϵ (%)	E (MPa)	E ₅₀ (MPa)	E _{sécant}
1	40		1,540						
2	40	Sol brut	1,726	1725	0,862	120	0,826	0,718	4,1
3	40		1,940						
4	39	Sol	2,600						
5	39	+3%Chaux	2,985	2.990	1,495	130	3,147	1,15	0,85
6	39		3,100						
7	38	Sol	3,200						
8	38	+3%Ciment	3,393	3395	1,697	125	1,616	1,357	0,9
9	38		3,460						
10	37	Sol +3% fibre	13,950						
11	37	de paille	14,044	14.042	7,021	60	8,776	11,70	0,3
12	37		14,150						
13	36	Sol	2,822						
14	36	+3%fillasse	2,940	2.942	1,471	80	2,101	1,838	2.1
15	36		3,150						
16	35	Sol	4,836						
17	35	+3%chaux+	5,014	5.010	2,505	100	2,569	2,505	4
	35	3%ciment	5,180						
	34	Sol	4,910						
	34	+3%(chaux+	4,856	4.866	2,833	95	2,703	2,982	2,5
	34	Ciment +fibre de paille +filasse	4,790						

Pour interpréter les résultats de tests mécaniques sur notre matériau, il est important de comprendre les différentes valeurs et leur signification. une interprétation des résultats présentés :

Interprétation des résultats

1. σ max (MPa) :

○ La contrainte maximale que le matériau peut supporter, les valeurs varient de 1 725 MPa à 14 042 MPa, indiquant une gamme de résistances maximales.

2. ϵ (%) :

○ Les valeurs de déformation varient de 60% à 130%, ce qui indique combien le matériau s'étire avant de se rompre. Une déformation plus élevée signifie que le matériau est plus ductile.

3. E (MPa) :

○ Le module d'élasticité (E) mesure la raideur du matériau en MPa. Les valeurs varient de 0,826 MPa à 8,776 MPa, montrant une diversité dans la rigidité du matériau.

4. E50 (MPa) :

○ Ce module d'élasticité est mesuré à 50% de la contrainte maximale. Les valeurs varient de 0,718 MPa à 11,70 MPa, ce qui montre la rigidité du matériau à une contrainte inférieure.

5. E sécant :

○ Le module sécant est une mesure de la rigidité du matériau basée sur la pente de la courbe contrainte-déformation. Les valeurs varient de 0,3 à 4,1, indiquant des différences significatives dans la manière dont les matériaux se comportent sous des charges différentes.

Le matériau étudié présente une gamme variée de propriétés mécaniques en fonction des conditions de chargement. Dans le premier cas, il affiche une contrainte maximale modérée accompagnée d'une déformation relativement faible de 120%, avec un module d'élasticité de 0,826 MPa, indiquant une certaine flexibilité. En comparaison, dans des conditions de traitement, le matériau devient plus ductile avec une contrainte maximale plus élevée et une déformation de 130%, et un module d'élasticité augmenté à 3,147 MPa, révélant une rigidité accrue. cas l'ajout des ciment montre une contrainte maximale encore plus élevée mais une déformation modérée de 125%, avec un module d'élasticité intermédiaire de 1,616 MPa. De façon contrastée, dans une autre configuration, ce matériau présente la contrainte maximale la plus élevée avec une déformation minimale de 60%, illustrant une rigidité notable de 8,776 MPa et un module d'élasticité à 11,70 MPa à 50% de déformation, démontrant sa résistance extrême mais sa faible ductilité.

• **Rigidité vs. Ductilité** : nos matériaux avec des valeurs élevées de module d'élasticité (E) et de module sécant sont plus rigides, tandis que ceux avec des valeurs élevées de déformation (%) sont plus ductiles.

• **Utilisation appropriée** : Les matériaux plus rigides (comme le quatrième formulation) sont adaptés aux applications nécessitant une haute résistance, tandis que les matériaux plus ductiles (comme le deuxième cas) sont préférables pour les applications où une certaine flexibilité est requise.

En conclusion, l'analyse de ces résultats permet de choisir la formulation du matériau approprié en fonction des exigences spécifiques de l'application, en considérant la résistance maximale, la rigidité et la ductilité du matériau.

6. Les essais de durabilité :

6.1 Essai remontée capillaire ASTM- D559 :

Cet essai de remontée capillaire par immersion dans un récipient rempli d'eau vise à reproduire les conditions réelles d'utilisation du matériau terre, notamment dans les murs exposés à l'eau de pluie en pied de mur. Voici un résumé de la méthode d'essai :

1. Objectif: Déterminer la quantité d'eau absorbée par capillarité par les échantillons de terre enduits et non saturés en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

2. Dispositif de test: Les échantillons préalablement séchés sont placés verticalement dans un récipient en plastique contenant de l'eau, de manière à ce que le niveau d'eau reste à 5 mm au-dessus de la face inférieure de l'éprouvette. La partie inférieure de l'éprouvette est imperméabilisée avec un ruban adhésif pour empêcher l'eau de pénétrer par le bas.

3. Mesure de l'évolution de la masse : Les échantillons sont pesés à des intervalles de temps prédéterminés (5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 180 et 240 minutes). Cette mesure permet de suivre l'absorption d'eau par les échantillons au fil du temps.

4. Analyse des résultats : Les données de masse sont utilisées pour tracer une courbe d'absorption d'eau en fonction du temps. En ajustant une droite à ces points en fonction de la racine carrée du temps, on peut obtenir le coefficient d'absorption d'eau par capillarité.

En résumé, cet essai permet de caractériser la vitesse d'absorption d'eau des matériaux terreux par capillarité, ce qui est crucial pour évaluer leur comportement dans des conditions réelles d'utilisation, telles que la remontée capillaire dans les murs exposés à l'eau de pluie.

_ Le procédé d'interprétation

Des résultats de l'essai d'absorptivité des différentes briques implique la création de droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps. L'équation de ces droites est donnée par : $Q/A+S$

Q : représente la quantité d'eau absorbée en centimètres cubes (cm^3)

A : représente la surface du spécimen en contact avec l'eau en centimètres carrés (cm^2)

T : représente le temps en secondes (s)

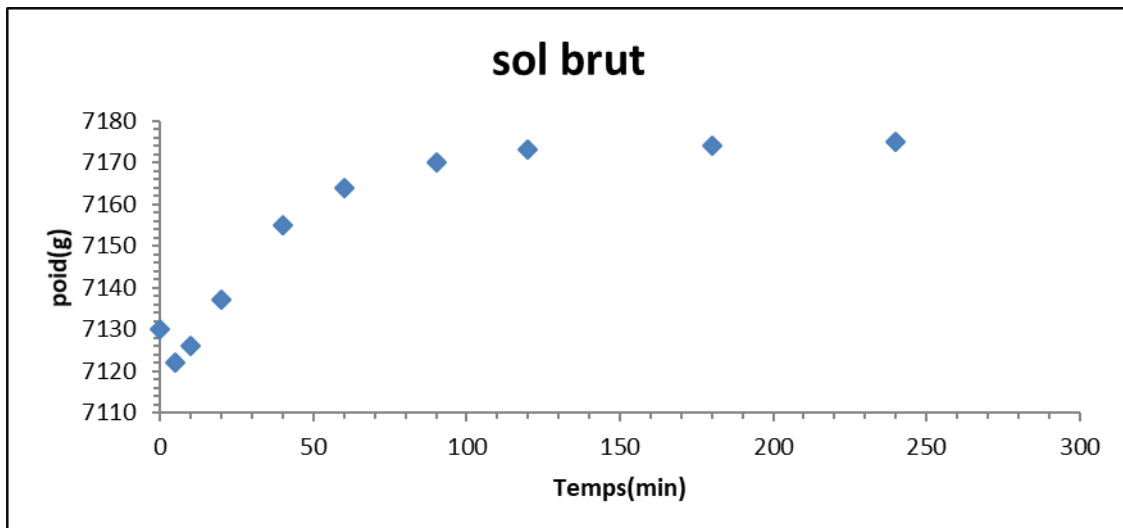
S : représente le coefficient de sportivités du spécimen en centimètres par seconde à la puissance 1/2 ($\text{cm/s}^{1/2}$)

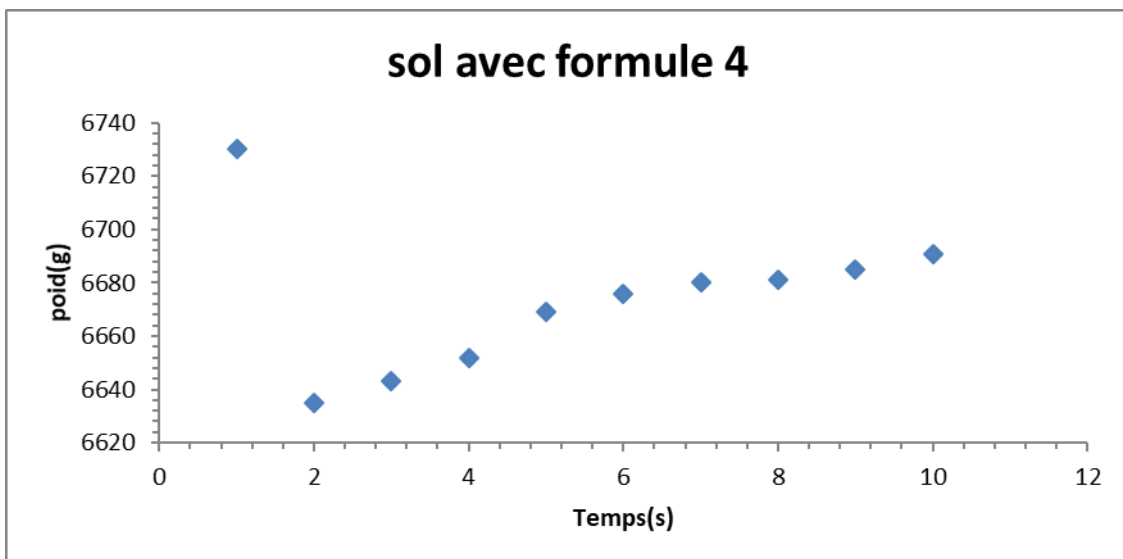
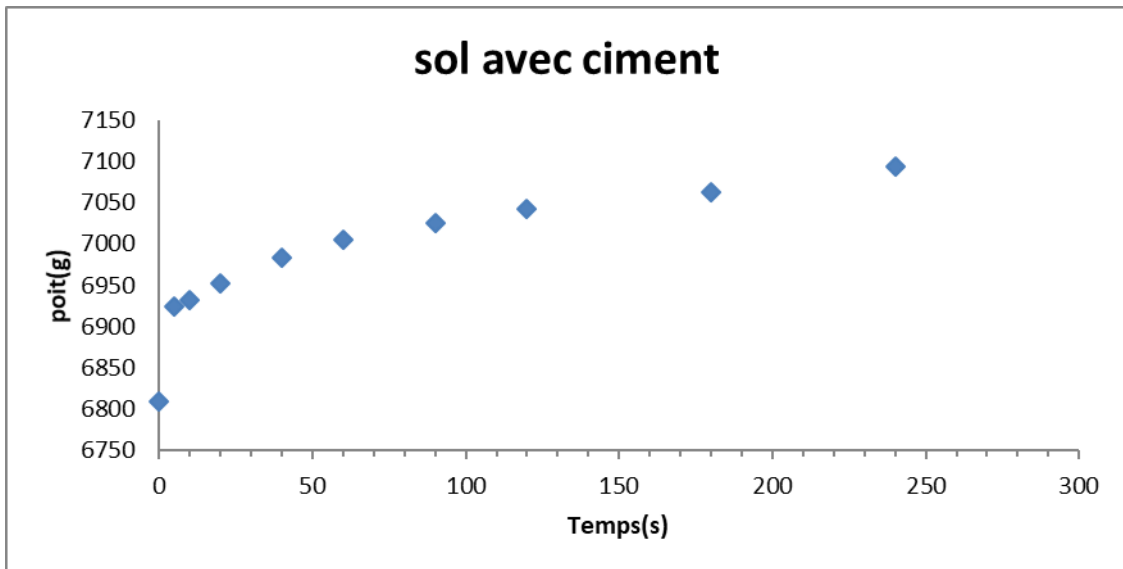
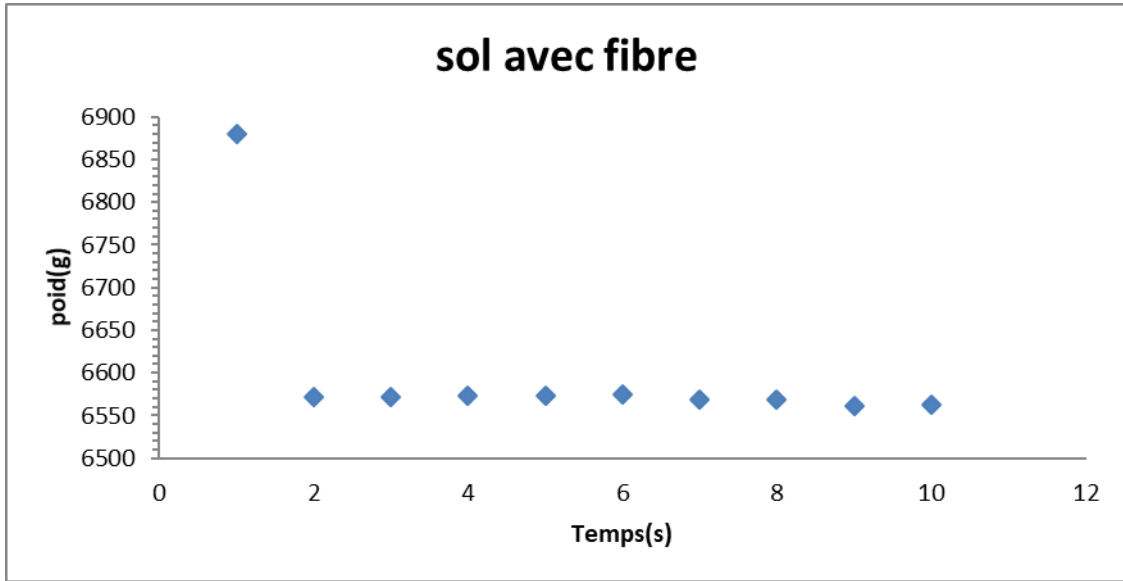


Figure 4.18 essai remontée capillaire

Tableau 4.6 : résultats de l'essai de remontée capillaire

Les échantillons	Brut(g)	Ciment(g)	Chaux(g)	Fibre(g)	Mix(g)
0min	7130	6810	6830	6880	6730
5min	7122	6925	6553	6572	6635
10min	7126	6932	6562	6571	6643
20min	7137	6953	6551	6573	6652
40min	7155	6984	6582	6573	6669
60min	7164	7005	6607	6574	6676
90min	7170	7025	6631	6569	6680
120min	7173	7042	6649	6569	6681
180min	7174	7062	6690	6561	6685
240min	7175	7093	6709	6563	6691





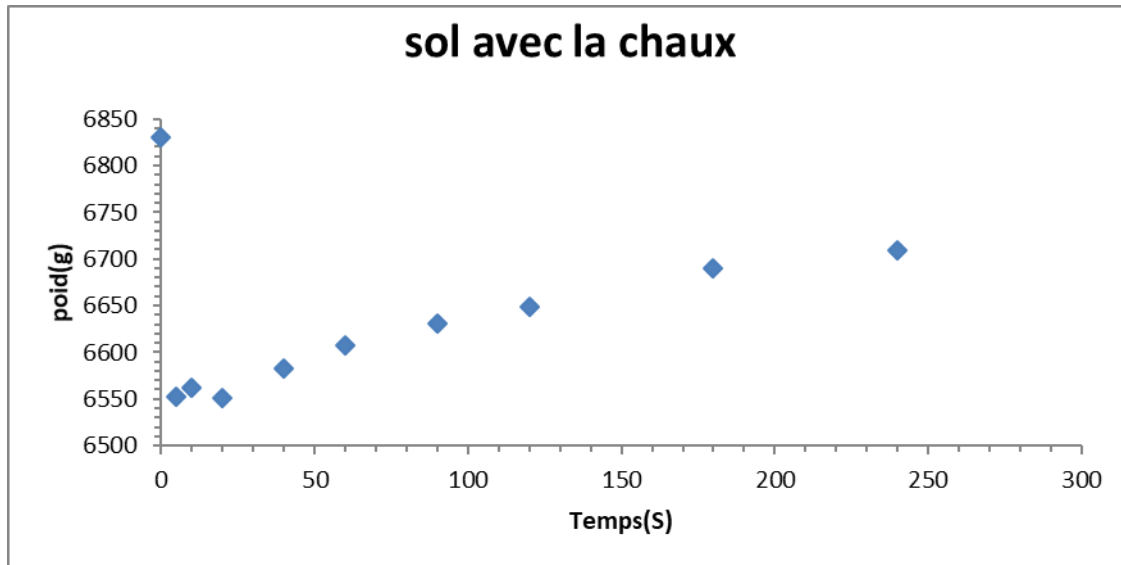


Figure 4.19 résultats de l'essai de remontée capillaire

6.2 L'essai d'abrasion selon la norme ASTM-D4977 :

6.2.1 Principe de l'essai :

L'essai d'abrasion selon la norme ASTM D4977 est d'évaluer la résistance à l'abrasion d'un matériau en le soumettant à des conditions d'usure simulées. Cela permet de déterminer la durabilité et la performance du matériau dans des environnements où il est susceptible d'être exposé à des forces abrasives, telles que le frottement, l'usure ou le contact avec des particules abrasives.

6.2.2 Mode opératoire de l'essai :

L'essai d'abrasion selon la norme ASTM-D4977 consiste à soumettre des échantillons de briques à des contraintes de frottement à l'aide d'une brosse métallique lestée d'un fardeau, simulant ainsi un vieillissement accéléré. À la fin de l'essai, des mesures de poids sont effectuées pour évaluer les éventuels changements. L'appareil utilisé est conçu pour réaliser le test en effectuant 50 cycles en aller-retour sur l'échantillon, tout en assurant un mouvement rectiligne horizontal.

Pour préparer le dispositif, vous devrez suivre ces étapes :

1. Faire coulisser le bac porte-poids vers le haut pour libérer de l'espace.
2. Placer la brique sur le plateau coulissant en la posant sur sa grande surface de 295x140 mm.
3. Fixer la brique sur le plateau à l'aide de la vis de serrage prévue à cet effet, en utilisant des cales en bois si nécessaire.

4. Faire coulisser le bac porte-poids vers le bas jusqu'à ce qu'il entre en contact avec la brosse et la brique.
5. S'assurer que tous les poils de la brosse ont à peu près la même longueur et que le plan formé par les extrémités des poils est parallèle à celui de la brique.

Pour réaliser l'essai d'abrasion selon le procédé décrit :

1. Pesez les pièces de fer plat pour lester la brosse à 3 kg.
2. Assurez-vous que la brosse recouvre bien la surface de la brique.
3. Démarrez les 50 cycles d'aller-retour en coulisant le plateau par sa poignée.
4. Vérifiez l'état des composants après chaque essai.
5. Utilisez un pinceau plat pour enlever les grains détachés de l'échantillon.
6. Avant l'essai, pesez l'échantillon avec une précision de 0,01 g et enregistrez la masse initiale.
7. Nettoyez le plateau coulissant et fixez l'échantillon avec la face à tester vers le haut.
8. Mettez la brosse en contact avec l'échantillon et effectuez les 50 cycles complets.
9. Retirez l'échantillon du plateau et nettoyez-le doucement pour enlever les grains détachés.
10. Après l'essai, pesez à nouveau l'échantillon avec une précision de 0,01 g et enregistrez la masse.
11. Pour interpréter les résultats, soustrayez le poids de l'échantillon après l'essai du poids avant l'essai pour obtenir le poids des grains détachés.



Figure 4.20 : L'essai d'abrasion

Formule : $P = A - B$

Où :

- P est le poids des grains détachés en grammes.
- A est le poids de l'échantillon avant l'essai en grammes.
- B est le poids de l'échantillon après l'essai en grammes.

Tableau 4.7 : Résultat L'essai d'abrasion

Echantillons	P : poids de l'échantillon avant l'essai(g)	P : Poids de l'échantillon Après l'essai (g)	$\Delta p = p - p'$ (g)	$\Delta p/p * 100$	$\Delta p/s(g/cm^2)$
Brut	7130	7,120	10	0,140	0,024
97%sol+3% chaux	6830	6790	40	0,585	0,096
97%sol+3%ciment	6810	6780	30	0,440	0,072
97%sol+3%ciment+chaux	7210	7170	40	0,554	0,096
97%sol+3% Fibre1	7760	7740	20	0,257	0,048
97%sol+3% Fibre2	6880	6876	4	0.058	0.009
97%sol+3% ciment +chaux+fibre1+fibre2	6730	6660	70	1,040	0,169

Il semble que les résultats de l'essai d'abrasion selon la norme ASTM-D4977 soient médiocres, à l'exception des briques contenant des fibres, pour lesquelles les résultats sont acceptables. En conclusion, l'objectif de ce travail était d'améliorer le sol sédiment pour qu'il puisse être utilisé comme matériau de construction dans le domaine du bâtiment, notamment pour la réalisation de projets de gîtes ruraux à l'aide de briques en terre moulée (adobe). La première phase consistait à identifier le sol et à évaluer ses propriétés par rapport aux normes de l'adobe, tandis que la deuxième phase impliquait le traitement et l'amélioration du sol à l'aide de formulations spécifiques.

6.3 Essai goutte à goutte (Drip Test) :

6.3.1 But de l'essai :

But de cet essai est probablement de mesurer l'effet de l'érosion causée par des gouttes d'eau sur la surface de l'échantillon testé. En contrôlant précisément la fréquence et le diamètre des gouttes, ainsi que la hauteur de chute, on peut évaluer la résistance de l'échantillon à ce type d'usure. Cela peut être important pour évaluer la durabilité et la

performance de divers matériaux dans des conditions d'exposition à la pluie ou à d'autres formes d'humidité.

6.3.2 Principe de l'essai :

D'après les normes [Norme-NZS-4298, 1998] et [Norme-SAZS-724, 2012], un essai Drip Test implique l'utilisation d'une mèche textile de 16 mm de largeur pour créer des gouttes d'eau, avec un diamètre d'environ 6 mm par goutte et un débit d'environ 14 gouttes par minute. Le volume total d'eau écoulée varie entre 20 et 60 minutes, avec une quantité totale de 100 ml. La hauteur de chute est de 400 mm par rapport à la surface inclinée de l'échantillon, à un angle de 27°. Les caractéristiques spécifiques des gouttes, telles que leur fréquence et leur diamètre, sont également importantes à prendre en compte dans cet essai.



Figure4.21 : résultat de l'essai goutte à goutte

Tableau 4.8 : Résultat de l'essai goutte à goutte

Les échantillons	15min	30min	40min	1h
Brut	0.2	0.4	0.7	0.9
Sol+ciment	0	0	0	0
Sol+chaux	0	0	0	0.1
Sol+fibres1	0.4	0.6	0.7	0.9
Sol+fibres2	0	0	0	0.1

Conclusion générale

Conclusion Générale

La terre crue connaît un regain d'intérêt dans la construction, tant dans les pays en développement que dans les pays industrialisés, grâce à ses avantages économiques, environnementaux et esthétiques. Elle offre une alternative durable aux matériaux de construction traditionnels. Les techniques ancestrales telles que l'adobe, le pisé, le torchis, et la terre-paille, bien que très anciennes, font l'objet de recherches pour améliorer leurs propriétés physiques, mécaniques et leur durabilité.

L'utilisation de fibres naturelles dans la construction présente plusieurs défis, notamment en termes d'adhérence, de résistance, de stockage prolongé, et de compatibilité avec d'autres matériaux. Cependant, les méthodes artisanales intégrant des fibres, comme la paille dans l'adobe, montrent une grande diversité et peuvent renforcer les structures, améliorant ainsi leurs propriétés mécaniques et leur durabilité.

Ce mémoire se concentre sur la stabilisation de la terre crue avec des fibres pour réduire sa sensibilité à l'eau et améliorer ses propriétés mécaniques. L'étude a été divisée en quatre phases :

1. **Phase 1** : Identification du sol et positionnement de ses propriétés par rapport aux normes d'adobe.
2. **Phase 2** : Traitement du sol avec différentes formulations :
 - 97% sol + 3% chaux.
 - 97% sol + 3% ciment.
 - 94% sol + 3% ciment + 3% chaux.
3. **Phase 3** : Évaluation de la résistance en compression.
4. **Phase 4** : Fabrication d'adobes avec diverses formulations et étude de leur durabilité (montée capillaire et abrasion).

Les résultats montrent que les propriétés de plasticité et de résistance du matériau terre ne répondent pas toujours aux normes, nécessitant des recommandations pour son utilisation. Le matériau initial affiche une contrainte maximale modérée avec une déformation relativement faible de 120% et un module d'élasticité de 0,826 MPa, indiquant une certaine flexibilité. Après traitement, le matériau devient plus ductile avec une contrainte maximale plus élevée et une déformation de 130%, et un module d'élasticité augmenté à 3,147 MPa, révélant une rigidité accrue. L'ajout de ciment montre une contrainte maximale encore plus élevée mais une déformation modérée de 125%, avec un module d'élasticité intermédiaire de 1,616 MPa. Dans une autre configuration, le matériau présente la contrainte maximale la plus élevée avec une déformation minimale de 60%, illustrant une rigidité notable de 8,776 MPa et un module d'élasticité à 11,70 MPa à 50% de déformation, démontrant sa résistance extrême mais sa faible ductilité.

En conclusion, bien que la terre crue présente des défis techniques, ses avantages environnementaux et économiques, combinés aux améliorations apportées par la recherche, en font une option viable et efficace pour une construction durable.

Référence

Bibliographie

Référence bibliographique

[1]: HOUBEN H, GUILLAUD H. Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology; 1994.

[2]: Fiche technique QUALIREMO, « La terre crue » « [www. tkTerreCru.html](http://www.tkTerreCru.html). » Avril 2008

[3]: Touatia Amraoui i. La construction en terre crue dans l'Antiquité en Algérie : historiographie et données archéologiques. Antiquités Africaines, 2020, 56, pp.47-59. fhal-02958899f

[4]: Guillaud, HOUBEN H., &, H. (1995). Traité de construction en terre (2ème édition). Marseille, Editions Parenthèses

[5]: HOUBEN , 2006

[6]: RICHARD P., « Adobe » , mémoire Maître en environnement , Université de Sherbrooke Canada, Octobre 2010

[7]: MAKRI M., « Projet GE12 Construction en terre » Technologie compiègme , 2010 .

[8]: CRA Terre EAG « Bloc de terre comprimée volume I » Manuel de production .

[9]: DJOUHRI M., « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister , Université de Ouargla, 2007.

[10]: Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de Master MOSTEFAOUI S& DERDER K 2020/2021 de Tiaret « Etude des comportements de la terre crue stabilisée à l'aide des fibres ».

[11]: Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique : ARIOUA A& TAHMI L 2018 /2019 de M'SILA

[12]: Mémoire MASTER ACADEMIQUE, CHAHMA S, 2018 de OUARGLA

[13]: Mémoire de Master 2016/2017 « la construction en terre a TABLAT ;un savoir-faire DELAISSE » de BLIDA

[14]: Eco construction et efficacité énergétique – Juin 2017

[15]: CNERIB /1994 [Guide technique de béton de terre stabilise]. Pp -19 L'homme, l'architecture et le climat.] Édition du moniteur 1978. Pp 121-151/308-345/351-373

[16]: blocs de terre comprimée .

Bloc de terre comprimée volume I » Manuel de production

[17]: Jacobs. M .Sustainable développement as a contested concept in Dobson, A .Fairness and futurity Essays on environmental sustainability and social justice .Oxford university press, 1999 p.23

Référence bibliographique

[18] : Commission mondiale sur l'environnement et le développement, Notre avenir à tous, Edition du Fleuve, 1989, p.51

[19] : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publicsth3/techniques-du-batiment-construire-developpement-durable-43820210/construction-dansle-developpement-durable-tba1400/application-du-developpement-durable-a-la-constructiontba1400niv10001.html#:~:text=1>

[20] : Ridha Younes BOUACIDA EL-Bahith Review 16/2016 Quelle intégration de l'Algérie dans le développement durable ? Un essai d'analyse à partir d'indicateurs statiques Université du 20 /08/1955- Skikda ; Algérie, CAE-CERGAM, AMU, France p.87

[21] : I Safia SALMI, La construction en pisé entre performance énergétique et perception des usagers cas de village kabyle AIT ITCHIR, mémoire magister, TIZI OUZOU, 2014,P9

[22] : http://www.terraterre.net/terraterre_terrecrue.htm

[23] : MEMOIRE DE MAGISTER spécialité architecture, université MOULOU D MAMMERI-TIZI OUZOU thème la construction en pisé entre performances énergétiques et perception des usagers cas du village kabyle AIT ITCHIR

[24] : Fouad Ghomari Thèse de doctorat Génie Civil et sciences de l'Habitat Laboratoire : URGC-Géotechnique (lyon, INSA 1985-1995)

[25] [27]: **Heathcote K. A.** An investigation into the erodibility of earth wall units. A thesis submitted in fulfillment of the requirements For the degree of Doctor of Philosophy, University of Technology Sydney, 2002.

[26]: **ASTM-D559.**, Wetting and Drying Test of Compacted Soil-Cement Mixtures, 1944.

[28]: **Fitzmaurice. R**, Manual on stabilized soil construction for housing. Fitzmaurice, Technical Assistance Program, United Nations, 1958.

[29] : **Couvreur L.** Matière eau : développement de contenus pédagogiques pour le projet amàco. Mémoire du Diplôme de Spécialisation et d'Approfondissement Architecture de Terre DSA-Terre, Ecole nationale supérieure d'architecture de Grenoble, 2014.

[30] : Mahamat S. (2010). Étude comparative entre l'amélioration des briques en terre comprimée stabilisée par le ciment et la chaux éteinte.

[31] :(Loréa, 2014)

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

Référence bibliographique

[33] : Layeb.A, Halbaoui.A(2017). Caractérisations physico-mécaniques d'un bloc de terre stabilisé avec la chaux à base des fibres (déchet de pneu usés - Verre)

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

[35] :Estabragh AR, Bordbar AT, Javadi A. Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers. GeotechGeolEng, 29:899–908, 2011.

[36] : (Ghania, 2019)

[37] :<https://www.theses-algerie.com/2430937793013176/>

[38] :Dallel M., Evaluation du potentiel textile des fibres d'Alfa (Stipa Tenacissima L.) : Caractérisation physico-chimique de la fibre au fil, Thèse de doctorat dans le génie des procédés, Université de haute Alsace, 2012

[39]:Fibres et renforts végétaux Solutions composites, Fibres Recherche Développement (FRD), Troyes – France, 2012.

[40] :Boukemmoum Nour El Houda.Nouaouria Abdessalam. Valorisation des sédiments de barrages Cas du barrage d’Ain Dalia (Souk Ahras). Mémoire master. Université 08 mai 1945.2019