

**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 : Structure

Présenté par :

**MOSTEFAOUI Salima**

**DERDER Karima**

*Sujet du mémoire*

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

*Soutenu publiquement le 14/09/2021 devant le jury composé de :*

**Mr. Rabahi A** : Président

**Mr. Kerroum N** : Rapporteur

**Mr. Krim K** : Examineur

**Mr. Djebli B** : Examineur

2020/2021

**Résumé :**

La terre crue est utilisée pour la construction de bâtiments depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés. Ce matériau, souvent critiqué pour sa sensibilité à l'eau et son manque de durabilité, présente dans sa forme actuelle de nombreux avantages pour la construction de logements durables, confortables et économiques

L'objectif principal de ce travail est d'étude de à l'amélioration de la stabilisation de à la terre crue l'aide des fibres, Pour améliorer l'insensibilité à l'eau du terre crue on a fait appel aux liants, à savoir le ciment et la chaux et les fibres

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les constructions en terre et ses différentes techniques utilisées, ainsi que leurs avantages

Le deuxième chapitre fait le point sur Construction en terre et développement durable

Le troisième chapitre présente les différents modes de stabilisation

Le quatrième chapitre a été consacré à matériaux de l'étude et techniques expérimentales

Enfin, la conclusion générale est une synthèse des résultats obtenus aux chapitres

**Mots clés :**

Terre crue, la construction en terre, développement durable, Stabilisation, fibres, l'eau, résistance, chaux, ciment, sensibilité à l'eau.

## ملخص:

تم استخدام الأرض الخام لبناء المباني منذ العصور القديمة ، كما يتضح من تقاليد الموائل في أجزاء كثيرة من كوكبنا. بعد أن تم التخلي عنها ونسيانها مع ظهور مواد البناء الصناعية ، وخاصة الخرسانة والصلب ، أصبحت اليوم موضوع اهتمام متجدد في مجال الدفع الصناعي. هذه المادة ، غالبًا ما تكون موجودة بسبب حساسيتها للماء وافتقارها إلى المتانة ، في شكلها الحالي من المساكن المستدامة لبناء مساكن متينة ومريحة واقتصادية.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تحسين استقرار التربة الخام باستخدام الألياف ، ولتحسين الحساسية تجاه الماء من التربة الخام استخدمنا مواد رابطة ، وهي الأسمنت والجير والألياف. خصص الفصل الأول لدراسة بيليوغرافية عن الإنشاءات الترابية والتقنيات المختلفة المستخدمة ومزاياها. يستعرض الفصل الثاني بناء الأرض والتنمية المستدامة يعرض الفصل الثالث أوضاع التثبيت المختلفة أما الفصل الرابع فقد خصص لدراسة المواد والتقنيات التجريبية أخيراً، الاستنتاج العام هو ملخص للنتائج التي تم الحصول عليها في الفصول السابقة.

### الكلمات المفتاحية

الأرض الخام ، البناء الترابي ، التنمية المستدامة ، الاستقرار ، الألياف ، الماء ، المقاومة ، الجير ، الأسمنت ، الحساسية للماء.

## **Abstract**

Raw earth has been used for the construction of buildings since the earliest times, as evidenced by traditional habitat in many parts of our planet. After having been abandoned and forgotten with the advent of industrial building materials, in particular concrete and steel, it is now the subject of renewed interest in developing and industrialized countries alike. . This material, often criticized for its sensitivity to water and its lack of durability, has in its current form many advantages for the construction of durable, comfortable and economical housing.

The main objective of this work is to study to improve the stabilization of the raw earth using fibers, to improve the water insensitivity of the raw earth we have used binders, know cement and lime and fibers

The first chapter is devoted to a bibliographical study on earthen constructions and its different techniques used, as well as their advantages.

The second chapter takes stock of Earth construction and sustainable development

The third chapter presents the different stabilization modes

The fourth chapter was devoted to study materials and experimental techniques

Finally, the general conclusion is a summary of the results obtained in the chapters

### **Mots classes:**

Rawearth, earthen construction, sustainabledevelopment, Stabilization, fibers, water, resistance, lime, cement, sensitivity to water.

## Dédicaces

*Nous avons toujours pensé à faire ou offrir quelque chose à nos parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme effort, rien que pour nous voir réussir et voilà l'occasion est venue.*

*A ceux qui sont donnés la vie symbole de beauté, et de fierté de sagesse et de patience. A nos chers parents.*

*« Seuls les faibles blâment notre parents, notre race, l'époque où ils.*

*Sont nés, le manque de chance ou les aléas du destin. Mais chacun d'entre nous à le pouvoir de dire :*

*\*Voici ce que je suis aujourd'hui et voilà ce qui je serai*

*Demain\**

### **Remerciements**

*Nous tenons tout d'abord à remercier Allah de nous avoir donné le courage et la détermination nécessaires pour finaliser notre travail.*

*Nous tenons à présenter tous nos respects et notre gratitude à Mr Nadir keroum. Maitre de conférences au département de Génie civil à l'université de Tiaret pour ses encadrements, ses orientations, sa disponibilité et ses encouragements pour mener à bien ce travail.*

*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.*

# Sommaire

**Résumé**

**Dédicaces**

**Remerciement**

**Sommaire**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale**

## Chapitre I :

### Aperçu à matériau terre

1. Introduction .....	5
2. Diversité de la construction en terre .....	5
2.1 Adobe : .....	6
2.1.1 Définition .....	7
2.1.2 La production .....	7
2.1.3 Modes de production de l'adobe .....	7
2.1.4 Les avantages de l'adobe .....	9
2.2 Pisé : .....	9
2.2.1 Définition .....	9
2.2.2 Les avantages de Pisé .....	10
2.3 Torchis .....	11
2.4 Bouge .....	11
2.5 Terre façonnée .....	12
2.6 Terre coulée .....	13
2.7 Le bloc de Terre comprimée .....	14
2.8 Terre paille .....	14
2.9 Blocs découpés .....	15
2.10 Terre extrudée .....	15
3. Avantage du matériau Terre .....	15
a) Avantage économique .....	15
b) Avantage environnement .....	16
c) Avantage socio-économique .....	16
4. conclusion .....	16

## **Chapitre II :**

### **Construction en terre et développement durable**

1. Introduction .....	19
2. le concept de développement durable .....	19
2.1 définition .....	19
2.2 les trois piliers du développement durable .....	19
3. les enjeux du développement durable .....	20
3.1 Une liste des enjeux du développement durable .....	21
4. la construction durable .....	21
5. Secteur bâtiment comme un écosystème.....	21
6. Matériaux et construction durable.....	22
7. Conclusion .....	23

## **Chapitre III :**

### **Stabilisation de matériaux terre**

1. Définition .....	25
2. Objectif .....	25
3. Procédés : .....	25
a) Stabilisation mécanique .....	25
b) Stabilisation physique .....	26
c) Stabilisation chimique.....	26
4. Moyens de stabilisation.....	26
5. Stabilisation :.....	27
5.1 Généralités.....	27
5.2 Mécanisme de stabilisation.....	28
5.3 Efficacité et dosage .....	29
6. Stabilisation à la chaux à la chaux :.....	29
6.1 Généralités.....	29
6.2 Mécanismes .....	30
a. L'échange cationique.....	30
b. La floculation et l'agglomération de l'argile.....	31
6.3 Efficacité et dosage .....	31
7. Stabilisation chaux-ciment .....	31
8. Stabilisation par fibres .....	32



9. Généralités sur les fibres.....	32
9.1 Introduction .....	32
9.2 Historique et perspectives de l'utilisation des fibres .....	32
9.3 Différents types de fibres : .....	33
a) Fibres synthétique .....	33
b) Fibres artificielles .....	34
c) Les fibres naturelles.....	35
10. Fibre de paille .....	36
10.1 Définition .....	36
10.2 Avantage de la paille .....	37
11. l'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols.....	38
12. L'effet de la stabilisation par les fibres naturelles sur les propriétés des Adobes .....	39
13. L'effet des fibres sur les propriétés mécaniques .....	39
14. L'effet des fibres sur l'absorption d'eau .....	39
15. Conclusion.....	39

## **Chapitre IV**

### **Matériaux de l'étude et technique expérimental**

1. Introduction .....	41
2. Origine du sol .....	41
3. Essais d'identification du sol (sédiment naturel) .....	41
3.1 L'analyse granulométrique [Norme-NF-XP-P94-041, 1995] .....	42
3.2 Teneur en eau .....	43
3.3 Limites d'Atterberg. Norme-NF-P94-051 [1993] 3.3.1 La limite de liquidité WL.....	43
3.3.2 Limite de plasticité Wp .....	44
3.3.3 La limite de retrait W <sub>r</sub> .....	44
3.4 Valeurs au bleu de méthylène VBS.....	45
3.5 Classification LPC-USCS .....	46
3.6 Essai de compactage dans un moule Proctor et CBR modifié .....	47
4. le Traitement de sol par un correcteur granulométrique et par des liants hydraulique (ciment, chaux) .....	48
4.1 Diagramme des Formulations étudiées .....	48
4.2 La Correction Granulométrique .....	49

4.3Variation de l'état de plasticité des formulations étudiées.....	50
5. Confection des éprouvettes la norme (NF P98-230-2).....	52
6. Compression simples selon la Norme-NF-XP-P13-901 .....	54
7. Résistance à la compression simple et le module d'élasticité .....	55
8. Fabrication des adobes selon la norme française XP-P13-901 .....	66
8.1Organigramme pour fabrication des adobes.....	67
8.2Mode de production de l'adobe.....	67
9. les essais de durabilité .....	68
9.1Essai de remontée capillaire ASTM-D559.....	68
9.2L'essai d'abrasion selon la norme ASTM-D497.....	71
10. Conclusion.....	75
Conclusion générale .....	78
Références bibliographique.....	82

## Liste des figures

**Figure I.1** : Roue des différentes techniques de construction en terre

**Figure I.2** : Moulage et séchage des blocs adobes

**Figure I.3** : Moule de l'adobe.

**Figure I. 4** (a), (b) maison traditionnelle en adobe, (c) Mosquée Cité de Ghadamès en Libye

**Figure I.5** : Patrimoine en pisé

**Figure I. 6** : Cycle de production du pisé

**Figure I.7** : (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France

**Figure I. 8:** techniques de construction en torchis alsace France

**Figure I. 9:** construction en terre empilée: (a) maison à sadah Yémen, (b) Bourrine de Vendée; (c) mosquée deBoboDioulasso

**Figure I.10** : Construction d'un mur en terre crue avec la technique de la bauge.

**Figure I.11** : Construction en blocs découpés, Burkina Faso

**Figure 1.12** : La terre coulée, un béton de terre

**Figure I.13** : Différents produits de blocs de terre comprimée

**Figure II.1** Les 3 piliers du développement durable

**Figure II-2** : Comparatif des énergies induites des différents matériaux de construction

**Figure II. 3:** Répartition des consommations énergétiques selon différents postes des bâtiments en fonction de leurs performances énergétiques

**Figure III.1**Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine

**Figure III.2** Fibres animales

**Figure III.3**Classification des fibres végétales

**Figure III.4** : La paille d'orge

**Figure III.5** Evolution du coefficient d'absorption de la paille selon le temps d'immersion

**Figure IV.1** Les échantillons étudiés

**Figure IV.2**Colonne de tamis au tamis de 80µm

**Figure IV.3** présente la distribution granulométrique du sol.

**Figure IV.4** Appareil de Casagrande pour déterminer la limite de liquidité

**Figure IV.5**La procédure pour la détermination de la limite de plasticité

**Figure IV.6**taux de retrait pour sol (le sédiment)

**Figure IV.7**Mise en œuvre de l'essai au bleu de méthylène et Test de la tache

**Figure IV.8** Nomination d'un sol en fonction de sa valeur au bleu de méthylène (VBS)

**Figure IV.9** Les grandes familles de la classification LPC

**Figure IV.10** Appareillage pour l'essai Proctor

**Figure IV .11** la courbe de correction granulométrique.

**Figure IV.12** Pourcentage de formule 1

**Figure IV.13** Pourcentage de formule 2 et formule 3

**Figure IV.14** Résultats des Limites d' Atterberg des formulations étudiées placés dans l'abaque de Casagrande

**Figure IV.15** la mise en place de l'échantillon dans le moule

**Figure IV.16** les étapes de compactage de l'éprouvette

**Figure IV.17** démoulage de l'éprouvette

**Figure IV.18** Le développement des éprouvette dans le cellophane et le papier d'aluminium

**Figure IV.19:** l'éprouvette pour l'essai à la résistance à la compression

**Figure IV. 20:** mode opératoire de la compression simple

**Figure IV. 21** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 7jrs

**Figure IV. 22** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 21jrs

**Figure IV. 23** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 28jrs

**Figure IV. 24** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 7jrs

**Figure IV. 25** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 21jrs

**Figure IV. 26** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 28jrs

**Figure IV. 27** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 7jrs

**Figure IV. 28** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 21jrs

**Figure IV. 29** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 28jrs

**Figure IV. 30** Evolution de la résistance RC en fonction de la teneur en eau

**Figure IV. 31** Le moule d'adobe 295x14x95 mm

**Figure IV. 32:** les ajouts

**Figure IV. 33:** Mode opératoire de fabrication des adobes

**Figure IV. 34:** Schéma du dispositif de l'essai d'absorption

**Figure IV. 35:** mode opératoire de l'essai remontée capillaire

**Figure IV. 36** Résultats de l'essai de remontée capillaire

**Figure IV. 37** Résistance à l'abrasion (Surface brossée)

**Figure IV. 38:** Résistance à l'abrasion (Dispositif de l'essai)

**Figure IV. 39:** Brosse utilisée pour l'essai

**Figure IV. 40:** mode opératoire de l'essai

## Liste des tableaux

**Tableau I.1** : Caractéristiques des briques terres crues

**Tableau II.1** comparatif des énergies induites des différents matériaux de construction

**Tableau III.1** : Moyens de stabilisation des terres remaniées

**Tableau III.2** Les propriétés des fibres de paille.

**Tableau IV.1**Présentation des essais géotechniques effectuées sur les échantillons

**Tableau IV.2** Les résultats obtenus des essais aux limites d'Atterberg

**Tableau IV.3** Les Résultats de la détermination de la limite de retrait( $W_r$ )

**Tableau IV.4**Récapitulatif de valeur au bleu méthylène.

**Tableau IV.5**Les résultats des essais d'identification du sol (sédiment), Selon la classification LPC–USCS

**Tableau IV.6**Les valeurs de l'optimum Proctor modifié de sol étudié

**Tableau IV.7** résultats de la limite des Formulations étudiées

**Tableau IV.8**Résistance à la compression simple (7jrs) et le module d'élasticité

**Tableau IV.9**Résistance à la compression simple (21jrs) et le module d'élasticité

**Tableau IV.10**Résistance à la compression simple (28jrs) et le module d'élasticité

**Tableau IV.11** Résistance à la compression simple (7jrs) et le module d'élasticité

**Tableau IV.12**Résistance à la compression simple (21jrs) et le module d'élasticité

**Tableau IV.13** Résistance à la compression simple (28jrs) et le module d'élasticité

**Tableau IV.14** Résistance à la compression simple (7jrs) et le module d'élasticité

**Tableau IV.15** Résistance à la compression simple (21jrs) et le module d'élasticité

**Tableau IV.16** Résistance à la compression simple (28jrs) et le module d'élasticité

**Tableau IV.17** des résultats de l'essai de remontée capillaire

**Tableau IV.18**de résultats de l'essai d'abrasion

## *Introduction générale*

---

## Introduction générale :

---

La terre crue a été et demeure l'un des principaux matériaux de construction utilisés par les hommes depuis des milliers d'années. Aujourd'hui encore, plus d'un tiers des habitants de la planète 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 [17].

Dans les pays en développement, la construction en terre apparaît comme un moyen efficace de production à court terme d'un habitat économique permettant le logement du plus grand nombre, l'essor d'une exploitation des ressources locales en matériau de construction, la formation de techniciens et d'artisans du bâtiment, la création d'emplois.

Une des raisons de l'importance de la terre dans la construction est sa disponibilité et sa proximité du site de réalisation de l'habitat. La mise en œuvre doit être relativement aisée et fait appel à un outillage réduit, souvent d'origine paysanne. Pour ces raisons, la construction en terre crue concerne essentiellement le bâtiment rural, même s'il existe de nombreux exemples de constructions en terre crue en milieu urbain.

Parmi les avantages de la terre crue, nous pouvons aussi souligner le peu d'énergie que nécessite sa mise en œuvre, ses qualités esthétiques et une bonne inertie thermique, celle-ci permet d'avoir un habitat frais en été et qui conserve la chaleur en hiver. Mais le problème des constructions en terre, c'est qu'elles souffrent d'un déficit en résistance, d'une fissuration systématique due au retrait et se heurtent aux problèmes liés à leur sensibilité à l'eau. Depuis l'antiquité à nos jours, l'homme a cherché à éviter les inconvénients du matériau terre, en utilisant plusieurs moyens de stabilisation permettant d'améliorer ses performances et sa sensibilité vis-à-vis de l'eau, ce qui a donné naissance à plusieurs produits en terre : l'adobe, le pisé, le torchis, le bloc de terre comprimée (BTC) et autres.

La stabilisation de la brique de terre (adobe) par armature à l'aide de fibres, dont très souvent la paille est employée de par le monde depuis l'antiquité. Aujourd'hui, même dans les productions les plus modernes et industrielles, pour l'adobe aux U.S.A par exemple, on incorpore encore très souvent de la paille.

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 [17]. Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement dans le renforcement des sols pour augmenter les résistances à la compression et au cisaillement [36] [37]

En Algérie, la construction en terre est très répandue dans toute sa longue histoire, particulièrement dans les zones rurales et les régions arides. Aujourd'hui, on assiste à un

## **Introduction générale :**

---

regain d'intérêt pour ce matériau, qui s'explique d'abord par la volonté de réaliser une partie du programme consacrée au logement rural (environ 40%), ensuite par le souci d'adapter la législation au nouveau contexte international en matière du développement durable. Dans cet esprit, une loi sur la promotion des Energies Renouvelables a été d'ailleurs promulguée en août 2004[38].

On a mené cette étude dans le but d'examiner les propriétés mécaniques de la brique de terre. Cette étude s'intéresse aussi à la sensibilité à l'eau de la brique de terre fibré, en étudiant son absorption totale et son gonflement après immersion dans l'eau. L'intérêt aussi est donné à l'étude du comportement mécanique en compression du brique de terre fibré.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique sur les constructions en terre et ses différentes techniques utilisées, ainsi que leurs avantages

Le deuxième chapitre fait le point sur Construction en terre et développement durable

Le troisième chapitre présente les différents modes de stabilisation

Le quatrième chapitre a été consacré à matériaux de l'étude et les techniques expérimentales

Enfin, la conclusion générale est une synthèse des résultats obtenus aux chapitres précédents ainsi que des recommandations



## *Chapitre I*

---

### *Aperçu à matériaux terre*

## 1 .Introduction :

La construction en terre crue recèle de nombreux avantages, grâce aux qualités inhérentes au matériau : recyclabilité, performance énergétique, résistance au feu, durabilité...mais évidemment, il est nécessaire de respecter les règles essentielles de l'art de bâtir en terre crue Afin de garantir les œuvres.

Par ailleurs, la diversité des procédés de l'architecture de terre et la simplicité de sa mise en œuvre, sont deux points forts qui lui procurent l'autonomie technologique et la diminution de l'impact tant financier qu'environnemental de la construction grâce aux économies d'énergie. Ces architectures sont ancrées dans la vision contemporaine de progrès [1].

## 2. Diversité de la construction en terre :

De l'Amérique latine jusqu'en chine, le matériau terre et l'architecture en terre sont représentés sous différentes techniques de construction et de fabrication [2].

Parmi les techniques les plus connues, on cite : le pisé, l'adobe, (ou thob) les blocs de terre comprimée (BTC), les blocs de terre stabilisée(BTS), la terre paille et le torchis. Elles font l'objet actuellement d'un développement technologique tant sur le plan de la maîtrise et de l'amélioration des performances que sur le processus de production.

H. Guillaud et H. Houben (1995) ont schématiquement répertorié les douze techniques principales dans une « roue » des techniques de construction en terre (Figure I.1), mais ils précisent tout de même qu'il en existe environ une centaine dans la réalité.

En plus d'être simplificateur, ce tableau circulaire ne fait pas non plus la distinction entre les techniques traditionnelles et les techniques nouvelles [3].

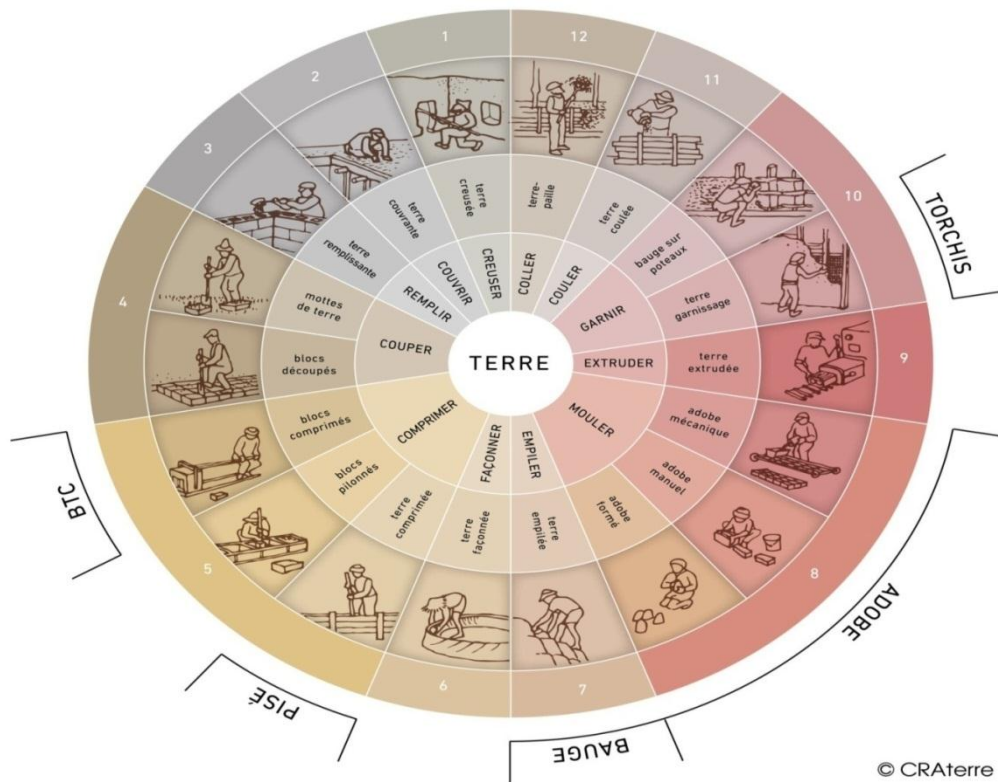


Figure I.1 : Roue des différentes techniques de construction [32]

Ci-après on présentera d'une manière synthétisée les principales techniques.

## 2.1 Adobe :

### 2.1.1 Définition :

Les premiers éléments de construction préfabriqués utilisés par l'homme étaient des briques moulées en terre crue appelées « adobes », on est une technologie utilisée depuis des millénaires partout à travers le monde. L'adobe est un matériau de construction fait d'un mélange de sable, d'argile, une quantité du paillé hachée ou d'autre fibre. De nature assez argileuse (jusqu'à 30% de fraction fine), mais très sableuse, ajoutée d'eau jusqu'à obtenir un état de pâte semi ferme (15 à 30% d'eau).

Chaque élément du mélange joue son rôle. Le sable réduit la probabilité de microfissures dans le bloc de terre, l'argile agglutine les particules et la paille hachée, quant à lui, donne un certain grade de flexible. Ce mélange est par la suite déposé à la main dans un moule en bois de façon fabriqué des petits éléments de maçonnerie, la dimension requise pour être démoulé et séché directement au sol (figure 1.2). La brique d'adobe peut varier d'une dimension de 15 X 25 X 10 cm soit 30 X 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.

### **2.1. 2 La production:**

La production des blocs d'adobe doit prendre en compte des étapes successives depuis l'extraction de la terre jusqu'au stockage final du matériau prêt à être utilisé en construction 6.

### **2.1.3. Modes de production de l'adobe:**

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

#### **a. Le mode de production manuel**

##### **-Moules simples**

Il correspond à un moulage traditionnel soit par façonnage manuel ou à l'aide d'un moule Façonnée à la main (**Figure I.2**), 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.

##### **-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 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 [6].

**Tableau I.1** : Caractéristiques des briques terres crues (adobe)

Caractéristiques	Adobe
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	1200-1700
Résistance à la compression MPa	$2 \times 10^{-3}$ - $5 \times 10^{-3}$
Conductivité $\lambda$ (W/m.°C)	0.46-0.81
Absorption d'eau (%)	5
Isolation acoustique (dB)	-
Retrait au séchage (mm/m)	1

**Figure I.2** : Moulage et séchage des blocs adobes [33]**Figure I.3** : Moule de l'adobe.

### 2.1.4 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.



**Figure I. 4** (a), (b) maison traditionnelle en adobe,  
(c) Mosquée Cité de Ghadamès en Libye

## 2.2 Pisé :

### 2.2.1 Définition :

Le pisé, technique séculaire de mise en œuvre de terre crue, offre des qualités d'habitabilité et d'adaptation exceptionnelles mais nécessite une attention et un suivi régulier. Bien construit et protégé, le bâtiment en pisé traverse les siècles et s'adapte tout naturellement aux divers besoins des hommes. Traditionnellement, les bâtiments en pisé portent de « bonnes bottes » et un « bon chapeau ». C'est à dire que le soubassement est traité de manière à éviter les remontées capillaires, (le plus souvent en galets, en pierre ou en briques de terre cuites maçonnées) et le débord de toiture est suffisant pour éviter le ruissellement de l'eau sur la façade. Le pisé, quant à lui, est en fait la compaction d'un volume de terre à l'intérieur d'un coffrage de façon manuelle en utilisant un pilon ou à l'aide de machinerie spécialisée. (Figure I.3) montre un exemple de coffrage qui peut être utilisé pour la fabrication de murs en pisé.

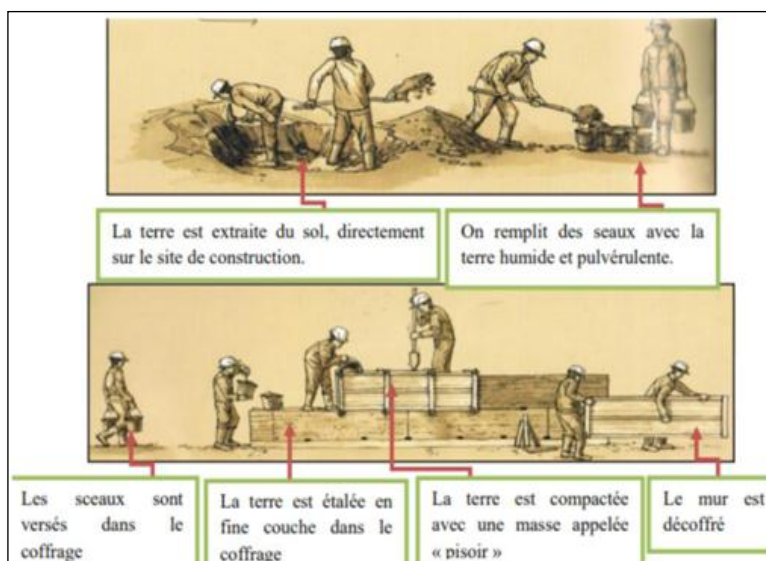
### 2.2.2. Les avantages de pisé :

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.
- Reprise aisée, mais nécessitant un savoir-faire [8].



**Figure I.5 :** Patrimoine en pisé : (a) la grande muraille de Chine,(b) l'Alhambra de Grenade ,(c) les tulous des Hakkas (d) Meknes et Aït Ben Haddou à Marrakech ,(e & f) de nombreuses fermes, habitations rurales et manoirs en France[33]



**Figure I. 6 :** Cycle de production du pisé [34].

### 2. 3 Torchis :

La technique du torchis utilise une ossature en bois emplie de terre, ou le plus souvent d'un mélange de terre et de paille. Le matériau à l'état plastique est ainsi forcé de remplir les espaces vides. La surface peut être laissée telle qu'elle ou enduite pour obtenir des finitions plus régulières. Les murs en torchis ne sont pas porteurs et leur épaisseur est généralement comprise entre 15 et 20 cm.



**Figure I.7 :** (a) La technique du torchis illustrée ; (b) Une construction en torchis à Angers, France



**Figure I. 8:** techniques de construction en torchis alsace France.

### 2. 4 Bauge (Terre empilée) :

La bauge est montée en piles de terre autoportantes sans l'aide de mortier ou de coffrage. Pour ce type de constructions, la terre est légèrement humidifiée et est souvent mélangée à des fibres végétales. Le matériau mélangé est soit empilé à la main sous forme de monticules, soit jeté vigoureusement contre un mur. La surface rugueuse est ensuite enduite de manière à obtenir une paroi lisse. Étant données les quantités importantes d'eau apportées au matériau pendant la construction, des phénomènes de retrait de dessiccation importants sont



susceptibles de se produire. Une sélection soignée de la terre et de la mise en œuvre est nécessaire. La faible énergie de compactage conduit à de faibles densités, même si le retrait tend à l'augmenter.



**Figure I. 9:** construction en terre empilée: (a) maison à sadah Yémen, (b) Bourrine de Vendée; (c) mosquée deBoboDioulasso



**Figure I.10 :** Construction d'un mur en terre crue avec la technique de la bauge.

## 2.5 Terre façonnée :

La technique de la terre façonnée (**Figure I. 9**) se met en œuvre avec de la terre à l'état plastique, sans moule ni coffrage. Cette façon de faire permet d'obtenir une large gamme de formes architecturales souvent très riches tout en réduisant la main d'œuvre et les coûts de construction. Les outils utilisés sont simples et les murs réalisés avec cette technique permettent un bon accrochage des enduits. Par contre, le contrôle du séchage et des fissurations de retrait sont complexes et les performances mécaniques du matériau sont plutôt problématiques. [9]



**Figure I.11 :** Construction en blocs découpés, Burkina Faso

## 2.6 Terre coulée (béton en terre):

La technique de la terre coulée (**Figure I.12**) peut être comparée à la technique du béton maigre coulé. Elle met en œuvre la terre à l'état de boue liquide dont la granularité est de préférence sableuse ou graveleuse.

Les avantages de cette technique sont multiples : préparation aisée du matériau, facilité de mise en œuvre et large registre d'applications, mais elle comporte également un gros désavantage : le retrait au séchage est important. La stabilisation peut néanmoins résoudre ce problème. On peut également compartimenter les constructions afin de réduire le retrait ou alors simplement boucher les fissures après séchage lorsque celles-ci ne posent pas de problèmes structurels. La terre coulée permet de fabriquer des briques, des pavés et des murs, armés ou non. [10]



**Figure 1.12 :** La terre coulée, un béton de terre

## 2.7 Les blocs de terre comprimée :

Cette version moderne du bloc de terre crue moulée, ou adobe, 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 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. [11]

Il existe pour ces presses plusieurs sortes de moules produisant différents types de briques (**Figures I.13**). 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. [10]



**Figure I.13** : Différents produits de blocs de terre comprimée

## 2.8 Terre paille :

La technique terre –paille est une technique réalisée sur une ossature en bois .Le mélange utilisé comprend plus de paille que dans le torchis. Pour le préparer, on tamise la terre à 1.5 cm, puis on la jette dans la bétonnière avec de l'eau. Il est important de toujours remuer pour que l'argile reste en suspension. On sort la boue que l'on met dans une remorque dans laquelle on rajoute la paille (imprégnée d'eau). On laisse alors le mélange s'imprégner une nuit avant de l'utiliser. Il faut faire un coffrage entre les poteaux d'ossature et y tasser la terre- paille. Puis les banches sont retirées immédiatement. L'intervalle entre les pontaux peut être plus grand que dans le torchis et, comme on ne s'installe pas de tiges en bois, on utilise

beaucoup moins de bois. La largeur moyenne d'un mur est de 28 cm pour un poids de 200/300 kg/m<sup>3</sup>.

### 2.9 Blocs découpés :

Selon les régions, cette technique (**Figure I.9**) est connue sous différents noms : « t'épate » au Mexique, « caliche » aux U.S.A. « mer gel » en Hollande, « Marl » en Angleterre et « tuf » dans les pays méditerranéens. La taille des blocs découpés se réalise en carrière. L'extraction de ces blocs est semblable à celle de la pierre traditionnelle, c'est-à-dire qu'elle se réalise à l'aide de pioches, burins, coins et scies. Ces carrières présentent une terre suffisamment cohérente et d'une dureté telle qu'on peut directement y tailler des blocs utilisables pour la construction.

La terre de ces carrières est généralement riche en éléments carbonatés. Les blocs découpés se mettent en œuvre comme des blocs classiques.

### 2.10 Terre extrudée :

La terre est extrudée par une puissante machine proche ou dérivée du matériel utilisé pour la fabrication de produits destinés à être cuits.

## 3. Avantages du matériau terre :

La terre crue offre beaucoup d'avantages. En effet c'est un matériau écologique et 100% recyclable. Elle a aussi une bonne inertie thermique et acoustique (bon coefficient d'absorption des bruits). Elle offre une bonne perméabilité à la vapeur d'eau ce qui lui permet d'être un régulateur naturel de la température.

De nombreuses recherches traitant du matériau terre sont conduites car la terre constitue un matériau qui répond aux préoccupations de la construction durable dans la mesure où il répond à plusieurs critères ciblés. Parmi ses critères nous pouvons énumérer les points suivants :

#### a. Avantage économique :

- Réduction de la fuite des devises par une diminution des matériaux importés (ciment, acier et bois).
- une production manuelle à haute intensité de main d'œuvre qui favorise l'économie locale.
- Matériau local.
- le matériau terre est moins cher que les matériaux conventionnels, notamment dans les pays en développement où l'emploi manuel n'est pas coûteux.

- Les matériaux de constructions (béton, brique de terre cuite, parpaing) consomment beaucoup d'énergie qui sont parmi les plus élevés de tous les secteurs de l'activité humaine. La terre réduit des coûts énergétiques qui associés à la construction dont la fabrication, mise en œuvre simple (presse, les moules, coffrage légers) et le transport des matériaux terre ne nécessitent que peu d'énergie (pétrole, gaz,...).
- Le matériau terre diminue la consommation énergétique liée à la climatisation et au chauffage,

**b. Avantage environnemental :**

- Matériau naturel.
- La terre peut être entièrement recyclable qui ne produit aucun déchet d'exploitation industrielle ou chimiques.
- Les constructions en terre fonctionnent également très bien de manières hygrothermique qui contribuent à la régulation des ambiances du confort thermique, déphasage thermique (effusivité et diffusivité) et donnent aussi aux bâtiments la possibilité de "respirer" en absorbant ou libérant de l'humidité en fonction des conditions hydriques environnantes, La réduction des émissions de gaz (un bilan de pollution entièrement positif).

**c. Avantage socio-économique :**

- La création des emplois sur l'ensemble de la chaîne de production
- La terre permet de prolonger l'héritage des traditions architecturales en matériaux locaux.
- Les constructions en terre peuvent garantir l'accès à la dignité d'un logement décent à des populations qui vivent le plus souvent dans des conditions précaires et misérables.
- Quel que soit les techniques de la construction en terre, le traitement est maintenu au minimum.

**4. conclusion :**

La Terre est un matériau disponible en quantité et utilisée dans la construction depuis des millénaires, faisant de la construction en terre crue l'habitat le plus répandu au monde. La terre est l'un des plus anciens matériaux de construction. Car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau le plus proche, celui que l'on a sous les pieds, disponible partout dans le monde.

La brique en terre crue et la brique compressée, de même que le pisé, sont les techniques de construction en terre qui ont été les plus utilisées dans l'histoire de la construction jusqu'à nos jours.

Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de constructions industrielles, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés.

## *Chapitre II*

---

### *Construction en terre et développement*

## 1. Introduction :

L'esprit productif adopté par les humains tout au long du 20<sup>ième</sup> siècle a dominé tous les domaines de l'activité industrielle, notamment les secteurs de bâtiment. Produire plus, fut le mot d'ordre, sans tenir compte des retombées néfastes sur l'environnement naturel. Les procédés de constructions rationalisent la construction tout en négligeant la qualité, la durabilité, l'adaptation de l'habitat avec son milieu, et ils considèrent l'utilisateur comme un consommateur passif. Des risques menacent donc l'avenir de l'homme sur la terre. Il est intéressant de savoir choisir des matériaux de construction, plus ils subissent de transformations plus ils sont nocifs à l'environnement et à la santé etc...

## 2. Le concept de développement durable :

La première définition du développement durable apparaît en 1987 dans le Brundtland [12] publié par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement. [13]

### 2.1 Définition :

Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs. Deux concepts sont inhérents à cette notion :

- ▀ Le concept de « besoins », et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et
- ▀ L'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale impose sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et à venir

### 2.2 Les 3 piliers du développement durable :

La notion du développement durable s'appuie sur trois piliers complémentaires qui sont l'**environnement**, l'**économie** et le **social**, auxquels on pourrait ajouter le culturel. Ils sont représentés par trois cercles et leurs intersections (figure2-1), interprétables comme suit :

- ▀ Environnement et social : des rapports sociaux dans un environnement viable ;
- ▀ Environnement et économie : une prise en compte de l'environnement avec une approche économique viable ;
- ▀ Economie et social : un développement économique équitable.

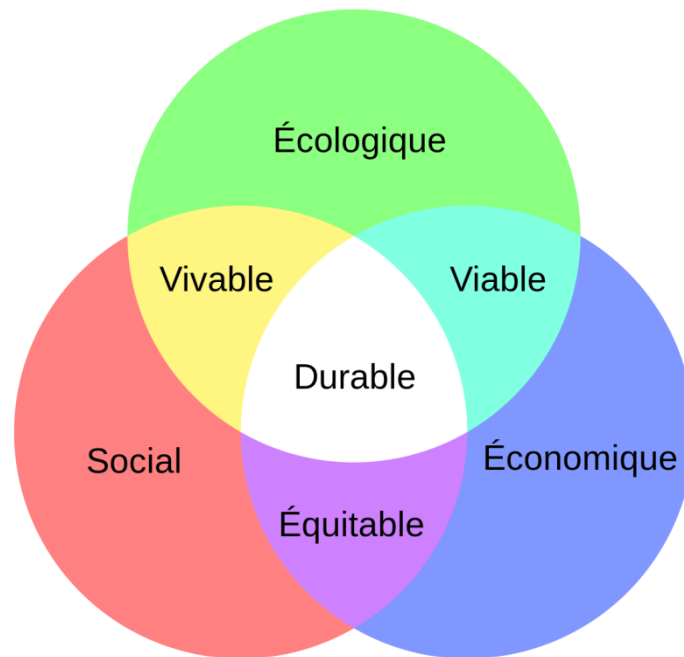
Engager une politique de développement durable revient à faire en sorte que ces trois cercles se superposent au maximum. Par conséquent, agir en faveur du développement durable consiste à concilier au mieux :

- ▀ Le progrès économique.
- ▀ Les conditions sociales.



■ Le respect de l'environnement.

Aménageurs, urbanistes, maîtres d'ouvrage et promoteurs doivent donc établir des compromis entre les exigences environnementales, sociales et économiques. [47]



**Figure II.1** Les 3 piliers du développement durable

### 3. Les enjeux du développement durable :

Les enjeux du développement durable se retrouvent en fait dans tous les aspects de nos vies : la façon dont nous consommons, donc nous agissons au quotidien pour préserver notre santé, les ressources que nous utilisons au quotidien nous nous chauffer, nous éclairer, nous nourrir. Ils sont aussi au cœur de la façon dont nous concevons notre vie en communauté : nos institutions et la façon dont nous participons à la vie politique et démocratique, les choix politiques, culturels et sociaux que nous nous imposons collectivement. Mais aussi notre modèle de répartition des richesses, de fiscalité, notre système juridique. En bref, les enjeux du développement durable sont partout à la fois. Impossible de les synthétiser et de les résumer d'une façon parfaitement exhaustive, et pourtant, pour les comprendre, il est nécessaire de savoir identifier les grands enjeux qui sont au cœur de cette complexité.

Une approche pourrait être de regrouper ces enjeux par thématiques : le réchauffement climatique, la démocratie, la préservation de la biodiversité, la transition énergétique, les transformations agricoles. Ainsi, on pourrait aboutir à une liste d'enjeux plus simples à comprendre et proposer pour chacun de ces enjeux des actions, des changements, des modèles nouveaux, afin de peut-être trouver des solutions.

### 3.1 Une liste des enjeux du développement durable :

Parmi ces enjeux, voici sans doute les plus importants :

- Changements climatiques et atmosphériques
- Biodiversité et écosystèmes
- Transition agricole et alimentaire
- Transition énergétique
- Mobilité durable
- Innovations durables et responsables
- Préservation de la santé
- Bien-être et qualité de vie
- Égalité et droits humains
- Lutte contre la pauvreté et l'exclusion
- Répartition des richesses
- Transparence et démocratie
- Consommation responsable
- Réduction des déchets et des gaspillages
- Modèles économiques alternatifs.

### 4. La construction durable :

La construction durable ou l'éco construction est la production d'un bâtiment en lui permettant de respecter au mieux l'écologie à chaque étape de la construction.

Elle cherche à s'intégrer le plus respectueusement possible dans un milieu en utilisant au mieux des ressources peu transformées, locales, saines, et en favorisant les liens sociaux

### 5. Secteur du bâtiment comme un écosystème :

- Ne pas dilapider le capital non renouvelable de la planète.
- Une transformation simple de matière en matériaux.
- Des déchets biodégradables.

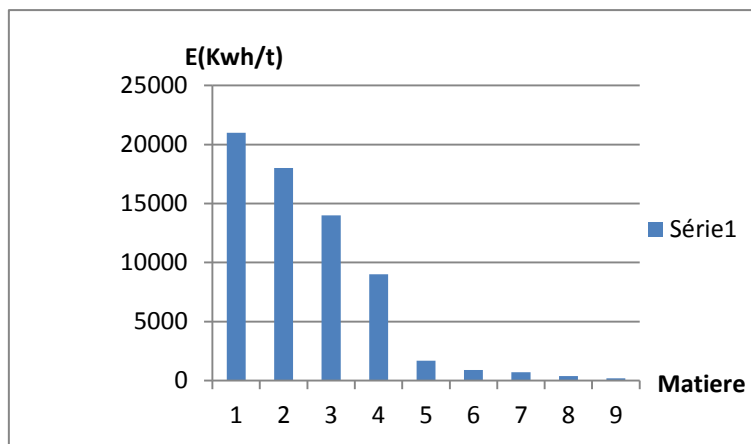
Naissance de l'approche sérieuse du matériau terre dans la construction et son inscription dans une réflexion multidisciplinaire sur un habitat éco-responsable:

- Un habitat socialement équitable
- Ecologiquement soutenable
- Economiquement viable

La terre crue ne nécessite pratiquement pas de dépenses énergétiques.... L'énergie nécessaire à la construction d'une maison moyenne de 100 m<sup>2</sup> en béton armé est suffisante pour construire l'équivalent de 50 maisons en terre crue de même surface

Plastique (moyenne)	21000 kWh/t
Polyuréthane	18000 kWh/t
Laine de verre	14000 kWh/t
Ferrailles pour béton	9000 kWh/t
Ciment	1700 kWh/t
Brique cuite et tuiles	900 kWh/t
Bois	700 kWh/t
Béton	400 kWh/t
Bloc de terre stabilisée	200 kWh/t

**Tableau II .1** comparatif des énergies induites des différents matériaux de construction [38]



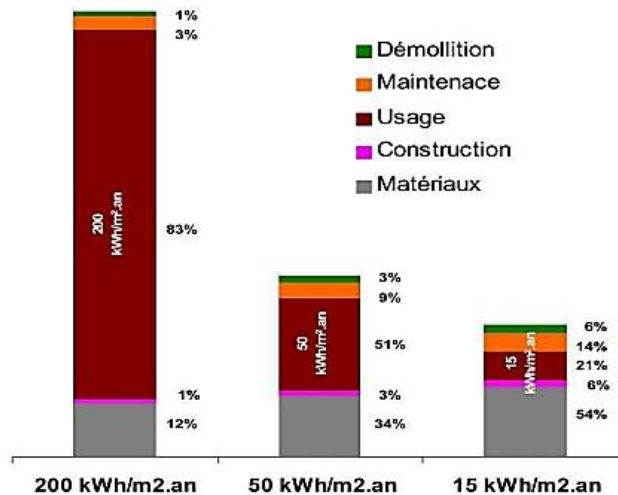
**Figure II.2 :** Comparatif des énergies induites des différents matériaux de construction

## 6. Matériaux et construction durable :

D'un point de vue impact environnemental, la consommation énergétique durant la vie d'un bâtiment dépend de différents facteurs : les matériaux de construction, la construction, l'usage, la maintenance et la démolition ou fin de vie. Actuellement, pour la plupart des bâtiments, la quasi-totalité de la consommation énergétique est liée à son exploitation (l'usage). Cependant, l'évolution des bâtiments vers les hautes performances énergétiques

entraîne une hausse de la part des matériaux de construction en défaveur de l'usage **Figure II. 3**

Cela montre qu'il est nécessaire non seulement de limiter les consommations énergétiques liées à la phase d'exploitation des bâtiments (grâce aux qualités thermiques des matériaux, par exemple) mais également liées à la phase de construction (matériaux à faible énergie grise) [48]



**Figure II. 3:** Répartition des consommations énergétiques selon différents postes des bâtiments en fonction de leurs performances énergétiques [48]

## 7. Conclusion :

A l'instant où l'humanité se rend compte des limites de la planète, il se produit une prise de conscience de l'importance de ne pas porter gravement atteinte aux conditions de vie de nos descendants. Notre mode de vie doit répondre à cette exigence et chercher des solutions alternatives, afin de limiter l'impact des risques majeurs tel que : l'effet de serre, l'épuisement des ressources, l'iniquité dans le partage des richesses et la pollution de l'air, de l'eau et des sols.

Le matériau terre se propose comme l'une des solutions les plus prometteuses du fait qu'elle ne génère pas d'émission de carbone lors de sa production. De plus, le matériau terre, est biodégradable et réutilisable. La performance, de la terre, en matière d'isolation hygrothermique, permet d'économiser de l'énergie, procure un confort par rapport à l'environnement et assure une qualité saine de l'atmosphère intérieure

## *Chapitre III*

---

### *Stabilisation de matériaux terre*

## Stabilisation

### 1. Définition :

Stabiliser la terre c'est modifier les propriétés d'un système terre – eau – air pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière. Mais la stabilisation est un problème complexe, car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître :

- Les améliorations envisagées.
- Les propriétés de la terre à stabiliser.
- L'économie du projet : couts et délais de réalisation.
- Les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et les systèmes constructifs.
- La maintenance du projet réalisé : cout d'entretien.

L'amélioration des propriétés de la terre par stabilisation sera un succès si le procédé employé est compatible avec les impératifs du programme : cout et délais de réalisation, cout d'entretien notamment [14]

### 2. objectif :

En stabilisant, nous intervenons sur la texture et structure de la terre. Cinq opérations possibles sont:

- La réduction de volume de vide entre les particules.
- La fermeture des vides qui ne peuvent être supprimés.
- L'augmentation des liens entre les particules.
- Améliorer les caractéristiques mécaniques de la terre (résistance à la compression, simple) en réduisant les vides entre les particules, en améliorant ou en créant des liaisons entre les particules.
- Réduire la sensibilité à l'eau (gonflement, retrait) et la perméabilité en bouchant les vides entre les particules. [15]

### 3. procédés :

Trois procédés permettent de stabiliser la terre :

#### a) Stabilisation mécanique :

La stabilisation mécanique est le terme général utilisé pour la stabilisation du sol par compactage. Ce procédé modifie les propriétés de la terre (la densité, la compressibilité, la perméabilité et la porosité), en intervenant sur la structure. .

**b) Stabilisation physique :**

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur sa texture, c'est-à-dire en mélangeant judicieusement des fractions de grains de taille différente.

**c) Stabilisation chimique :**

La stabilisation de la terre est assurée par l'ajout d'autres matériaux ou de produits chimiques qui modifient ses propriétés, soit du fait d'une réaction physicochimique entre les particules de la terre et le produit ajouté soit en créant une matrice qui lie ou enrobe les particules. On peut citer, en particulier du ciment, de la chaux, du bitume, et de sous-produits industriels. Le choix et la quantité de matériau ou de produit chimique à ajouter dépendent de la nature du sol et du degré d'amélioration de la qualité du sol souhaité.

Le traitement du matériau terre par des produits chimiques se fait pratiquement de deux manières :

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

**4. Moyens de stabilisation :**

Dans la littérature, on peut trouver divers classifications, selon : la nature, la forme, etc. Selon [16], il y a six modes de stabilisations :

- Densifier.
- Armer.
- Enchaîner.
- Liaisonner.
- Imperméabiliser.
- Hydrofuger.

Chaque stabilisant n'agit pas obligatoirement selon un procédé exclusif, mais il peut aussi cumuler plusieurs procédés : physique et chimique (tableau I.5) [8].







Stabilisant		Nature	Procédé	Moyens	Principe	Symbole
Sans apport de stabilisant		Mécanique		Densifier	Créer un milieu dense qui bloque les pores et les canaux capillaires	
Avec apport de stabilisant	Stabilisants inertes	Minéraux	Physique	Armer	Créer une armature omnidirectionnelle qui réduit le mouvement	
		Fibres				
	Stabilisant physico-chimique	Liants	Chimique	Enchaîner	Créer un squelette inerte qui s'oppose à tout mouvement	
				Liaisonner	Former des liaisons chimiques stables entre les cristaux d'argile	
				Imperméabiliser	Entourer les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et canaux	
	Hydrophobants		Hydrofuger	Éliminer au maximum l'adsorption et l'absorption d'eau		

Tableau III.1 : Moyens de stabilisation des terres remaniées

## 5. Stabilisation au ciment :

### 5.1 Généralités :

Les premières tentatives de stabilisation au ciment dans le domaine routier, ont lieu aux U.S.A en 1915. La stabilisation au ciment, en construction de bâtiments, s'est développée indépendamment en Allemagne, dès 1920. Aux U.S.A, à partir de 1935, le sol-ciment est de plus en plus employé : routes, pistes d'aérodrome. Depuis lors, dans le monde entier, on ne compte plus les applications de la stabilisation au ciment autant dans le domaine des travaux publics que dans celui du bâtiment [17].

Le ciment est sans doute l'un des meilleurs stabilisants pour le bloc de terre comprimée. 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 conviennent en principe pour la stabilisation des sols, mais la préférence est donnée aux ciments de classes faibles, car une grande résistance n'est pas nécessaire. Alors que d'autres auteurs, préconisent un type de ciment selon la nature du sol :

- Sol contenant un certain pourcentage d'argile : emploi du ciment riche en alite C3S et bélite C2S qui donne, après hydratation, beaucoup de portlandite, Ca(OH)<sub>2</sub>. Verdeyen conseille le ciment pour les sols dont la teneur en argile n'excède pas 20 à 30 % (Ip < 25 %)



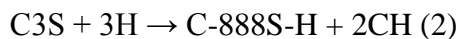
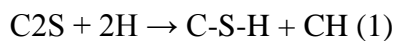
D'un mortier de ciment pur hydraté et la réaction avec le squelette sableux. Réaction avec l'argile selon trois phases :

- L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile.
- Progression de l'hydratation qui active la désagrégation des agglomérats d'argile ; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.
- Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation Persiste mais plus lente [15].

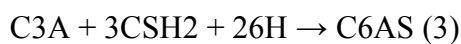
### 5.2 Mécanisme de stabilisation :

Une fois le mélange avec le sol est réalisé, le ciment va se dissoudre et s'hydrater si la quantité d'eau est suffisante pour former des constituants hydratés. La principale réaction provient de l'hydratation des deux silicates de calcium (C3S et C2S) qui forment deux nouveaux composés: la portlandite (CH) et le silicate de calcium hydraté

(C-S-H:  $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ):



L'hydratation des aluminates tricalciques (C3A) dépend de la teneur en gypse du ciment. En présence de gypse, l'ettringite est formée ce qui contribue à l'augmentation de la résistance :



La phase ferrite (C4AF) réagit rapidement en présence de gypse pour former de l'ettringite selon la réaction suivante :



La minéralogie et la granulométrie des sols traités influent peu sur les effets du ciment puisque la poudre de ciment contient en elle-même tout ce dont elle a besoin pour réagir et former des produits cimentaires ; le ciment va créer des liens physiques entre les particules augmentant ainsi la résistance des sols.

Dans le cas des sols cohérents, beaucoup de particules sont plus fines que les grains de ciment, donc elles ne peuvent pas être revêtues par du ciment. Cependant, suite au compactage appliqué sur les hydrates de ciment, ces derniers forment un squelette rigide qui sera de plus en plus résistant à mesure que l'hydratation avance, menant à l'augmentation de la résistance

De plus, une réaction en trois étapes avec de l'argile se produit [18] :

1. L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. La chaux libérée pendant l'hydratation du ciment réagit aussitôt avec l'argile. La chaux est vite consommée et l'argile entame une dégradation.
2. Progression de l'hydratation, la désagrégation des agglomérats d'argile ; ceux-ci sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment.
3. Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste, mais plus lente.

Dans certains cas, les particules d'argile pourront ralentir la prise du ciment en formant autour des grains une enveloppe protectrice. La composition chimique et minéralogique des argiles ainsi que leur quantité jouent donc un rôle fondamental dans les phénomènes d'interaction qui auront lieu et qui se poursuivront dans le temps entre elles et le ciment [15].

### **5.3 Efficacité et dosage :**

La meilleure efficacité est obtenue par une compression à l'état humide. Les meilleures résistances à la compression sont atteintes avec des graves et des sables plutôt qu'avec des limons et des argiles [17].

En général, il faut au moins 5 à 6 % de ciment pour obtenir des résultats satisfaisants. La résistance en compression reste très dépendante du dosage, 8 % de ciment constituent souvent une limite supérieure économiquement acceptable [40].

D'après Gooding [41], le bloc de terre stabilisée avec 3 à 12% en masse de ciment, semble être le bloc le plus courant.

## **6. Stabilisation à la chaux :**

### **6.1 Généralités :**

L'utilisation de la chaux dans la stabilisation des sols est connue depuis l'antiquité. Elle a été utilisée comme stabilisant de la chaussée par les Romains et d'autres civilisations anciennes. La chaux est une matière généralement poudreuse et de couleur blanche, obtenue par décomposition thermique du calcaire. Chimiquement, c'est un oxyde de calcium avec plus ou moins d'oxyde de magnésium, mais la désignation usuelle de chaux peut englober différents états chimiques de ce produit. On les distingue notamment dans le langage courant par rapport à leurs utilisations dans la construction :

- La chaux vive est le produit direct de calcination du calcaire, principalement de l'oxyde de Calcium (CaO).

- La chaux aérienne, ou chaux éteinte, est obtenue par la réaction de la chaux vive avec de l'eau. Elle est constituée surtout d'hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Elle est dite « aérienne », car elle réagit avec le  $\text{CO}_2$  de l'air.
- La chaux hydraulique contient en plus des silicates et des aluminates, car elle provient de calcaires argileux. Elle est appelée « hydraulique » parce qu'elle durcit en présence d'eau.
- Tous les types de chaux peuvent être employés, mais la préférence est donnée néanmoins aux chaux aériennes qu'aux chaux hydrauliques. La chaux est surtout conseillée pour les sols contenant une fraction argileuse de 20 % et les sols ayant  $\text{IP} > 17$  et  $\text{LL} > 40$ .
- La chaux éteinte est beaucoup plus conseillée que la chaux vive, car cette dernière présente deux inconvénients majeurs : conservation difficile à l'abri de l'humidité avant son emploi et manipulation pénible lors des mélanges. Le Roux a prouvé que pour des sols riches en kaolinite, la résistance (de 2 jusqu'à 90 jours) croît avec la teneur en chaux, mais que pour des sols riches en illite, un optimum de 5 % de chaux se caractérise à moyen et à long terme [15].

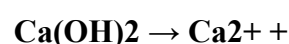
### 6.2 Mécanismes :

Deux phases regroupant quatre types de réactions peuvent se produire lors d'une stabilisation à la chaux ; l'échange cationique, la floculation et l'agglomération des argiles [43].

#### -à L'échange cationique :

La première réaction de la phase de modification est celle de l'échange cationique qui initie le processus de stabilisation très rapidement suivie par la floculation et l'agglomération de l'argile. Cet échange de cations est en général relativement très rapide, soit de l'ordre de quelques heures [44]. En contact avec la chaux, les liaisons entre les particules argileuses sont modifiées ce qui les rend moins sensibles à l'eau. Certains minéraux argileux, telles les montmorillonites et l'illite, sont plus actifs sur le plan de l'échange cationique [44].

Lorsque la chaux vive est ajoutée au sol argileux une réaction de déshydratation se produit créant ainsi l'hydroxyde de calcium. Cette réaction assèche le sol considérablement. Ceci entraîne une dissolution de la silice et de l'alumine des particules d'argile [12]. L'hydroxyde de calcium se dissocie suivant l'équation ci-dessous:



Les ions de calcium libérés entraînent l'échange cationique des ions de calcium bivalents ( $\text{Ca}^{2+}$ ) de la chaux avec le sodium monovalent ( $\text{Na}^+$ ) et l'hydrogène ( $\text{H}^+$ ) de l'argile.

L'échange cationique peut apporter les changements importants suivants [42]:

- Réduction de la distance (épaisseur) entre les groupes de feuillets d'argiles réduisant la sensibilité à l'eau
- Flocculation des particules d'argiles
- Augmentation de l'angle interne de friction entre les particules agglomérées provoquant une augmentation de la résistance au cisaillement
- Diminution de l'indice de plasticité

Changement de texture du sol d'une argile plastique vers un granulat friable

#### **b-La flocculation et l'agglomération de l'argile :**

On appelle flocculation de l'argile, le fait de passer d'un état dispersé, dans lequel l'argile est plastique et sujette à des variations de volume suivant son niveau d'humidité, à un état flocculé beaucoup moins plastique et donc plus stable.

L'argile prend donc l'apparence de matériaux granulaires s'agglomérant en grumeaux. La flocculation et l'agglomération sont attribuées à un contenu élevé en électrolyte, un pH élevé et la réduction d'épaisseur entre les couches d'argiles par l'échange cationique. Comme l'échange cationique, la flocculation et l'agglomération sont relativement rapides où les changements significatifs ont lieu à l'intérieur dans quelques heures [42].

#### **6.3. Efficacité et dosage :**

L'efficacité de la stabilisation des argiles avec la chaux est difficile à prédire. L'efficacité en résistance au cisaillement dépend de plusieurs variables : la minéralogie de l'argile, le pH du sol, la présence de sol organique, la capacité d'échange cationique, la grosseur des particules, la surface spécifique des particules, la quantité d'eau, la concentration en chaux ainsi que le temps de mûrissement [42].

Il n'y a pas de règle stricte mentionnant un optimum donné pour un sol entrant dans une classification donnée. L'ajout de 2 à 3 % de chaux provoque immédiatement une diminution de la plasticité de la terre et un braisage des mottes. Pour des stabilisations ordinaires, on pratique en général des dosages de 6 à 12 %. On notera qu'une proportion optimale de chaux existe pour chaque type de terre [17].

#### **7. Stabilisation 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 flocculation 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 pas à notre connaissance d'étude sur les mécanismes qui régissent ce traitement. Apparemment, on peut penser que la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  libérée par le ciment en solution joue le même rôle stabilisant que celui de la chaux. Les hydrates formés par la chaux libre et par la portlandite du ciment vont se cumuler à ceux provenant du ciment dissous [46]

## **8. Stabilisation par fibres :**

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 sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terrepaille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé [17] Pour le cas des fibres synthétiques, elles sont utilisées généralement dans le renforcement des sols pour augmenter les résistances à la compression et au cisaillement [46].

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.

## **9. Généralités sur les fibres :**

### **9.1 Introduction :**

Les fibres sont caractérisées par une longueur au moins trois fois supérieure à leur diamètre. On peut dire que sous l'appellation " fibres" se cache une grande famille de matériau qui a été introduite dans le commerce comme de nouvelles applications. Elles sont classées selon leur origine (naturelles, synthétiques et artificielles), leur forme (droite, ondulée, aiguille, ...etc), leur dimension (macro ou micro-fibre) et aussi par leurs propriétés mécaniques. Cependant, pour faire un choix de fibres à utiliser pour une application donnée, il faut tenir compte de la compatibilité de la fibre avec la matrice, et le mode de performance du composite.

### **9.2 Historique et perspective de l'utilisation des fibres :**

L'idée de l'utilisation des fibres est très ancienne. Les fibres ont été utilisées dans la fabrication des cordes et textiles. Comme élément de renforcement des matériaux de construction traditionnels, la première utilisation des fibres a été observée dans la fabrication des briques argileuses ou dans les mises en œuvre des plâtres, et spécialement par des fibres végétales. La naissance de la fibre industrielle, suite aux développements technologiques, a

augmenté les champs d'applications des fibres dans plusieurs domaines. Utilisé dans le domaine des textiles depuis le XIXe siècle sous forme de fibre de coton, et partir de l'année 1935 la fibre de Nylon (plastique), et récemment la fibre de polypropylène prédomine depuis l'année 1950 la production des cordes et câbles utilise les fibres de verre et d'acier. Cependant, dans le domaine de la construction, la première fibre utilisée dans le renforcement des ciments fut la fibre d'amiante vers les années 1900 Si la fibre d'amiante est considérée comme étant la première fille dans la famille des fibres minérales utilisées dans le renforcement des ciments, la fibre de verre est la première sœur. En effet, le renforcement des ciments par les fibres de verre a commencé à partir des années 50, pour répondre aux exigences et aux nécessités de production des matériaux résistants, durables et légers, mais aussi et surtout pour se substituer à l'amiante, originaire de plusieurs maladies sanitaires. Depuis 1966, les efforts ont été concentrés pour l'amélioration de la qualité de la fibre de verre notamment sa résistance aux alcalis Parallèlement, la technologie d'utilisation des fibres d'acier fût développée.

Des recherches se poursuivent pour adapter ces matériaux aux bétons à hautes performances Dernièrement, des recherches sont axées vers l'incorporation des fibres végétales ou naturelles tels que le sisal, la jute et la hampe dans le renforcement des matériaux de construction et particulièrement dans les ciments L'avenir du développement dans le domaine du béton de fibre sera fort probablement attribué aux fibres végétales, notamment pour les pays en voie de développement.

### **9.2.1 Différents types de fibres :**

Plusieurs types des fibres sont utilisés dans la construction, elles peuvent être classées par famille:

- a. Les fibres synthétiques.
- b. Les fibres artificielles.
- c. Les fibres naturelles.

#### **a. Fibres synthétiques :**

Les fibres synthétiques sont fabriquées avec des polymères de synthèse obtenus à partir de substances ou de composés fournis par l'industrie pétrochimique. Elles ont fait leurs apparitions au début de 20ème siècle, après la réussite de la fibre de Viscose, depuis lors, un grand nombre de fibres synthétiques ont été mises au point; elles possèdent chacune des propriétés qui répondent à un type particulier d'application. Ces fibres, tout comme les fibres artificielles, sont obtenues par filage. Elles suscitent l'intérêt de beaucoup d'industriels pour

leur faible coût, leur disponibilité et leur indépendance des saisons et surtout la possibilité de les adapter et modifier leurs propriétés, par contre, elles sont très critiquées quant à leur comportement vis-à-vis de l'environnement que ce soit pendant le processus de fabrication ou après leur utilisation et les difficultés de leur recyclage .

Les principales catégories de fibres synthétiques commercialisées sont:

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

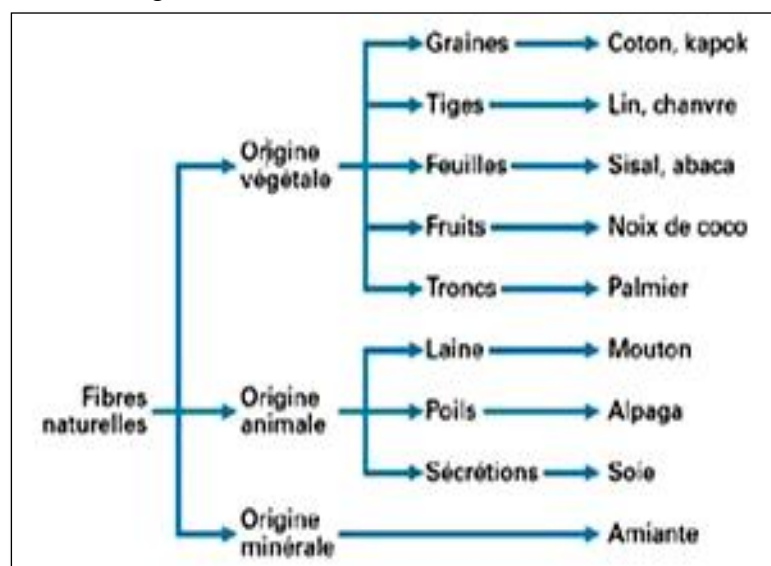
#### b.Fibres artificielles :

Ce type de fibres est le plus utilisé dans le domaine industriel en général et dans le domaine de génie civil en particulier. Il regroupe les fibres de verre, les fibres de carbone, les fibres d'acier et d'autres. Elles sont aujourd'hui les plus répandues dans l'industrie de la construction.

#### c. Les fibres naturelles :

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

- Les fibres animales (poils ; sécrétions)
- Les fibres minérales
- Les fibres végétales



**Figure III.1** Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine

**Les fibres animales :**

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

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



**Figure III.2** Fibres animales in [19]

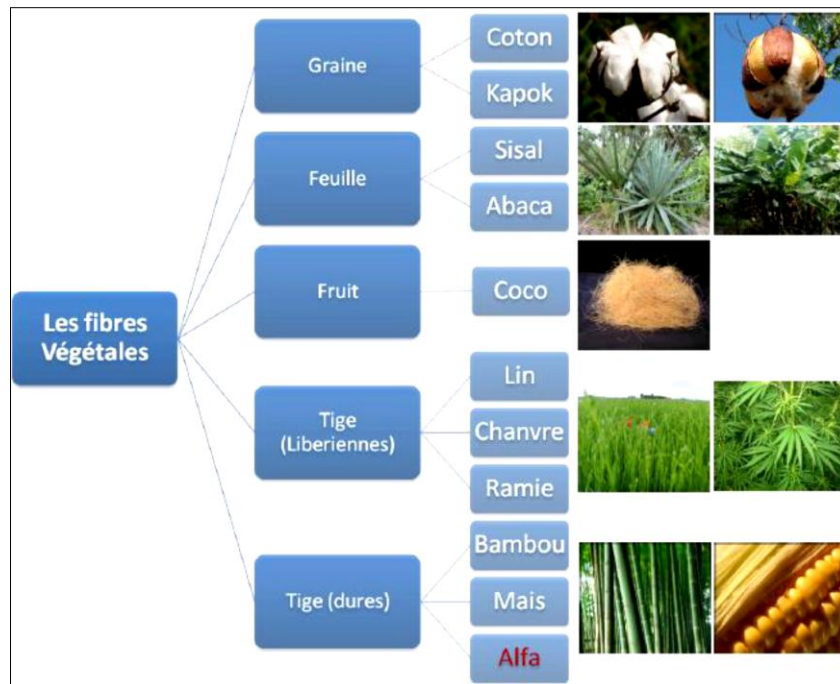
**Les fibres végétales :**

Les fibres végétales sont extraites des plantes, soit de la tige comme le lin et le chanvre, soit de la feuille comme les fibres de palmier dattier voir même du fruit lui-même comme la noix de coco. Elles font partie de la biomasse. Elles sont caractérisées par une faible densité, un pouvoir d'isolation thermique, des résistances à la traction élevées, et une biodégradabilité qui constitue un avantage majeur pour l'écologie [22]. Leurs principaux composants sont la cellulose, l'hémicellulose, la lignine et les pectines. Leurs proportions déterminent l'ensemble des propriétés de fibres.

**Les fibres végétales comprennent :**

- des fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok).
- les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ortie).
- les fibres extraites de feuilles (sisal), de troncs (palmier), d'enveloppes de fruits (noix de coco).





**Figure III.3** Classification des fibres végétales in [21] d'après [22]

Dans ce mémoire, nous nous concentrerons sur les fibres de paille, qui constituent l'une des ressources végétales les plus abondantes au monde et encore peu exploitée aujourd'hui. Par conséquent, il est nécessaire de souligner certains points importants pour ces fibres

### 10-Fibre de paille :

Le début du XXI<sup>e</sup> 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.

#### 10.1 Définition :

La paille de blé et d'orge est une plante à récolte bisannuelle largement cultivée dans le monde entier (Figure I-14). C'est la fibre la plus couramment utilisée dans la bauge. Au cours du XIX<sup>e</sup> 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



**Figure III.4** : La paille d'orge

### 10.2 Les avantages de la paille :

L'utilisation de fibres végétales présente différents avantages pour une utilisation comme renfort de matériaux. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles et de faible coût [23], [24], [25].

De plus, leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, leur valorisation permet la réduction l'impact environnemental par rapport à des fibres minérales ou polymères de par leur nature renouvelable, biodégradable, neutre vis-à-vis des émissions de CO<sub>2</sub> et demandant peu d'énergie pour être produites [26].

L'ajout de fibres dans un matériau offre une résistance isotrope [27], [28],[29]. Leur présence empêche la propagation de la fissure lors de la traction après déformation initiale [30]. L'augmentation de la teneur en fibres permet de diminuer le nombre de fissures causées par le retrait et d'augmenter la conductivité hydraulique du sol argile compacté [31], [32].

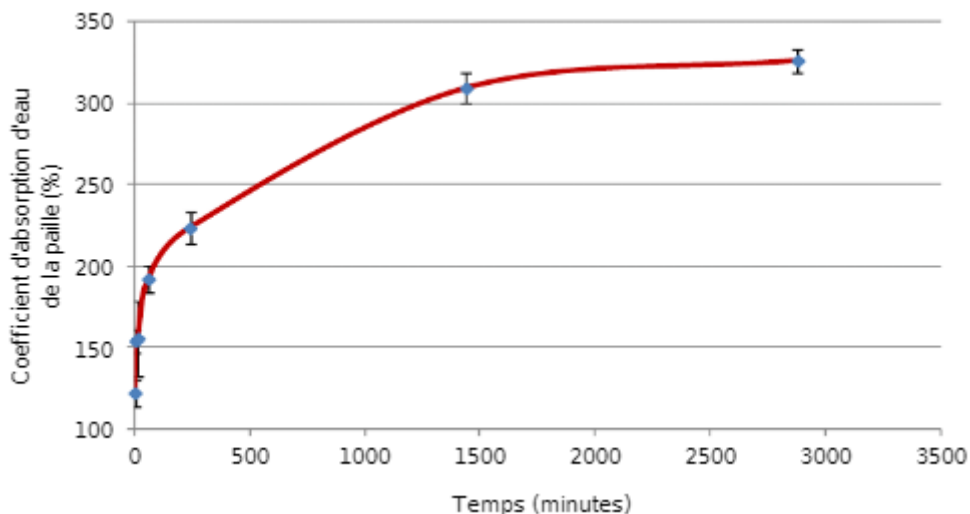
Elle provient de Laulne (Manche). Les propriétés des fibres de paille sont présentées dans **Tableau III.2**

La variabilité de la longueur de la paille s'explique par l'influence d'une multitude de facteurs sur son développement agricole mais aussi sur sa transformation industrielle et la méthode utilisée pour la récolte.

Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Longueur (cm)	Teneur en eau initiale (%)
1,1821 ± 0,0731	37,44 ± 12,10	8,41

**Tableau III.2** Les propriétés des fibres de paille.

Une autre caractéristique importante des fibres végétales est le coefficient d'absorption d'eau. En effet, le comportement des fibres vis-à-vis de l'eau va influencer d'une part le mélange à l'état frais, lorsque l'eau de gâchage est disponible et peut être absorbée par les fibres, mais également le comportement à long terme puisque la capacité des fibres végétales à absorber plus ou moins d'eau pourra entraîner des variations volumiques des fibres dans le mélange et engendrer des modifications de l'interface fibres/matrice. Ce coefficient d'absorption d'eau, les fibres ont été immergées dans de différentes durées (1 minute, 5 minutes, 15 minutes, une heure, 4 heures, 24 heures et 48 heures). Après immersion, les fibres sont essorées à l'aide d'un centrifugeuse à une vitesse de 500 tours par minutes pendant 15 secondes. Les résultats obtenus montrent que ce coefficient d'absorption pour la paille est très élevé (figure 2). En effet, les fibres de pailles testées sont capables d'absorber une masse d'eau supérieure à leur masse propre.

**Figure III.5** Evolution du coefficient d'absorption de la paille selon le temps d'immersion

### 11. L'effet de la stabilisation par les fibres sur les propriétés des sols :

La stabilisation des sols a été effectuée depuis l'antiquité. Par exemple, les Mésopotamiens et les Romains ont découvert séparément qu'il était possible d'améliorer la capacité portante des voies en mélangeant les sols faibles avec un agent stabilisant comme le calcaire ou le calcium sous forme de poudre.

Le principe de la stabilisation du sol est une action de la nature, on peut le voir à travers la présence des racines des plantes dans les sols. Les fibres qui forment ces racines

pénètrent et s'orientent dans le sol de façon aléatoire. Ces fibres végétales améliorent la résistance du sol et la stabilité des pentes naturelles.

Par conséquent, le concept de stabilisation par des fibres a été reconnu il ya plus de 5000 ans

## **12. L'effet de la stabilisation par les fibres naturelles sur les propriétés des adobes :**

L'ajout des fibres naturelles est un moyen de stabilisation couramment utilisé dans la fabrication des adobes et autres produits de terre, et ceci depuis des milliers d'années

Le rôle des fibres est multiple, elles augmentent d'une part la résistance à la traction et par conséquent la souplesse du matériau. Une terre ordinaire, en effet, ne peut supporter que de faibles efforts de flexion, alors qu'un sol armé sera capable de subir des déformations importantes sans se fissurer. Cette élasticité empêche le mur de se craqueler au séchage, les fibres répartissent dans toute la masse du matériau les tensions provoquées par le retrait de l'argile.

D'autre part, le volume qu'elles occupent dans le mur diminue sa densité et améliore ses qualités iso thermiques. Les recherches actuelles réalisées sur l'adobe en utilisant plusieurs types de fibres végétales ont abouti à des résultats différents

## **13. 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

## **14. Effet des fibres sur l'absorption d'eau :**

On a vu auparavant que les fibres végétales ont un caractère hydrophile qui favorise l'adsorption d'eau, alors que d'autres types de fibres ont un caractère hydrophobe comme le cas des fibres de polypropylène. Cette faible insensibilité à l'eau des fibres végétales constitue un point faible dans son utilisation pour la fabrication des produits en terre crue, chose qui a poussé les chercheurs à essayer d'étudier ce problème et d'évaluer son ampleur.

## **15. Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis d'avoir plus d'informations sur les différents stabilisants qui peuvent être utilisés dans ce domaine tel que les fibres et le ciment ainsi que les moyens, les principes et les mécanismes de stabilisation de la terre. Les caractéristiques de très nombreuses variétés de terre peuvent être améliorées considérablement grâce à l'ajout de stabilisants. Mais, à chaque variété de terre correspond le stabilisant approprié. On dénombre à ce jour plusieurs produits employés pour la stabilisation des sols ou des terres à bâtir.

## *Chapitre IV*

---

*Matériaux de l'étude et techniques expérimentales*

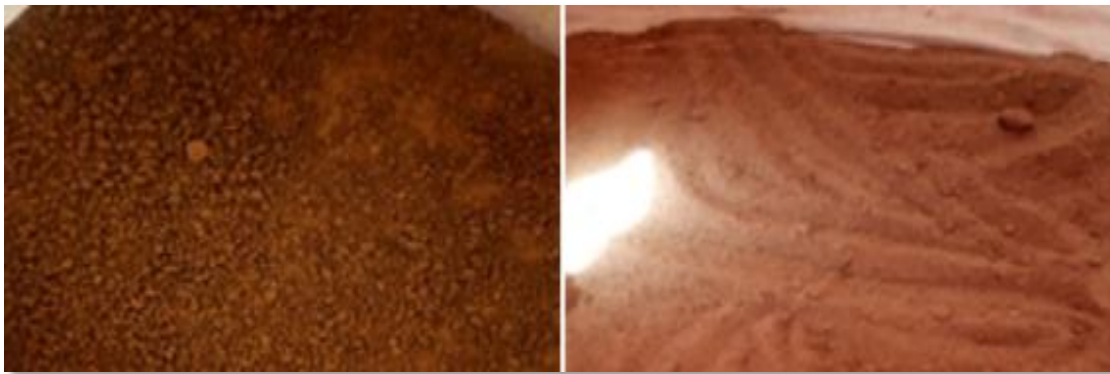
## 1. Introduction :

La nature du sol et celle des liants utilisés comme stabilisants ainsi que la nature des fibres employées et la contrainte de compactage sont des paramètres fondamentaux qui influent sur le comportement de la brique de terre. Donc pour étudier correctement les propriétés du Brique de terre fibré, on devra faire appel aux caractéristiques de ses constituants.

Dans ce chapitre, outre la caractérisation des matériaux, on présentera aussi l'ensemble des formulations à étudier, ainsi que les procédures des essais.

## 2. Origine du sol :

Le sol utilisé provient des sédiments de dragage (Tiaret) à des distances variables à proximité de vidange, il est choisi sur la base de sa disponibilité et son abondance dans la région.



**Figure IV.1** Les échantillons étudiés

## 3. Essais d'identification du sol (sédiment naturel) :

Le sédiment naturel présente un pourcentage de fractions fines non négligeables, les essais d'identification ont consisté à la réalisation des courbes de distribution granulométriques, d'essais spécifiques au matériau argileux comme les limites d'Atterberg, l'essai au bleu de méthylène, la teneur en matière organique et aussi des essais de compactage.

Essais d'identification	Norme
Teneur en eau Naturelle	NFP 94-050 AFNOR, 1995
Analyse Granulométrie (tamisage Par voie humide)	NFP 94-041 AFNOR, 1995
Les limites d'Atterberg (WL, WP, W <sub>r</sub> )	NFP94-051 /XPP 060-1AFNOR, 1993/1997.
Valeur au bleu de méthylène (VBS)	NFP 94-068 AFNOR, 1998

**Tableau IV.1**Présentation des essais géotechniques effectuées sur les échantillons

### 3.1 L'analyse granulométrique [Norme-NF-XP-P94-041, 1995] :

L'analyse granulométrique a été réalisée par un tamisage humide pour la fraction supérieure à  $80\mu\text{m}$  selon la norme française [Norme-NF-XP-P94-041, 1995].

Le principe de cette méthode est de séparer par lavage les grains agglomérés d'un échantillon de masse connue du matériau, puis les fractionner, au moyen d'une série de tamis ; et enfin peser successivement après séchage la quantité du matériau retenue sur chaque tamis (refus partiel). Le lavage du matériau a été réalisé manuellement. Les tailles des mailles des tamis utilisés sont les suivantes : 2mm ; 0.6mm 1.6mm, 1,25mm, 0.630mm, 0.4mm, 0.315mm, 0.2mm, 0.16mm, 0.125, 0.08. Les refus ont été séchés à l'étuve à une température de  $105^\circ\text{C}$  pendant 24 heures. La masse initiale exacte utilisée est de 500g.



Figure IV.2 Colonne de tamis au tamis de  $80\mu\text{m}$

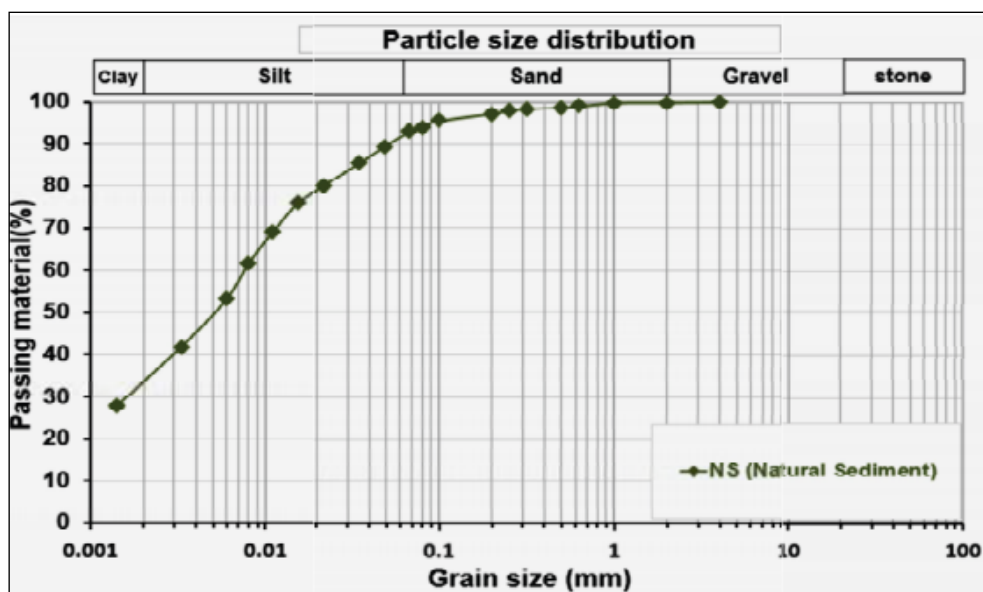


Figure IV.3 présente la distribution granulométrique du sol.

La courbe révèle un pourcentage de fines ( $<80\mu\text{m}$ ) de l'ordre 84% et un pourcentage d'argile ( $<2\mu\text{m}$ ) de l'ordre de 32 %. Le D50 est de l'ordre de 5  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 Teneur en eau :

Les résultats de la teneur en eau naturelle des sédiments du barrage BAKHADDA ont été mesurés selon la norme (NFP 94-050) est de l'ordre de  $W_n = 86(\%)$ , [Serbah, 2011]. Pour une valeur élevée de la teneur en eau, le sol se comporte à peu près comme un liquide, c'est de la vase : les forces de cohésion ne sont pas assez importantes pour maintenir les particules en place.

### 3.3 Limites d'Atterberg. Norme-NF-P94-051 [1993] :

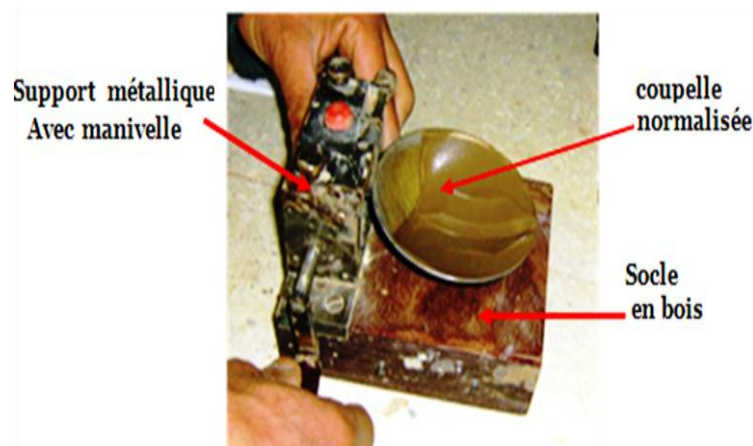
Cet essai a pour but de déterminer les teneurs en eau sur la fraction des sols (0/400  $\mu\text{m}$ ) de référence liées au changement d'état du matériau. Ces limites sont des paramètres géotechniques destinés à identifier le matériau et caractériser son état. On distingue :

1. La limite de liquidité  $W_L$
2. La limite de plasticité  $W_p$
3. La limite de retrait  $W_r$

Le sol peut être à l'état solide, plastique ou liquide selon la quantité d'eau qu'il contient

#### 3.3.1 La limite de liquidité $W_L$ :

La limite de liquidité  $W_L$  mesurée à la coupelle de Casagrande, représentant la teneur en eau du passage de l'état liquide à l'état plastique. Selon la norme Norme-NF-P94-051 [1993], la limite de liquidité  $W_L$  est la teneur en eau qui correspond à la fermeture de la rainure produite dans la pâte de l'échantillon pour un nombre de chocs  $N$  égal à 25. Sur la base de cet essai, la droite moyenne ajustée pour les couples de valeurs obtenus ( $\log N - W$ ) a été tracée et la limite de liquidité  $W_L$  correspondant à  $N = 25$  a été déduite. Les valeurs de limite de liquidité du matériau est de l'ordre de 62%





**Figure IV.4**Appareil de Casagrande pour déterminer la limite de liquidité**3.3.2 Limite de plasticité Wp :**

La limite de plasticité mesurée par la méthode au rouleau, représente la teneur en eau du passage de l'état plastique à l'état solide. Selon la norme, [Norme-NF-P94-051, 1993], cette limite de plasticité est la teneur en eau du rouleau qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3 mm. Une fois le couple (WL, WP) définit, d'autres paramètres mesurant l'étendue des phases plastiques et liquides peuvent être définis à savoir

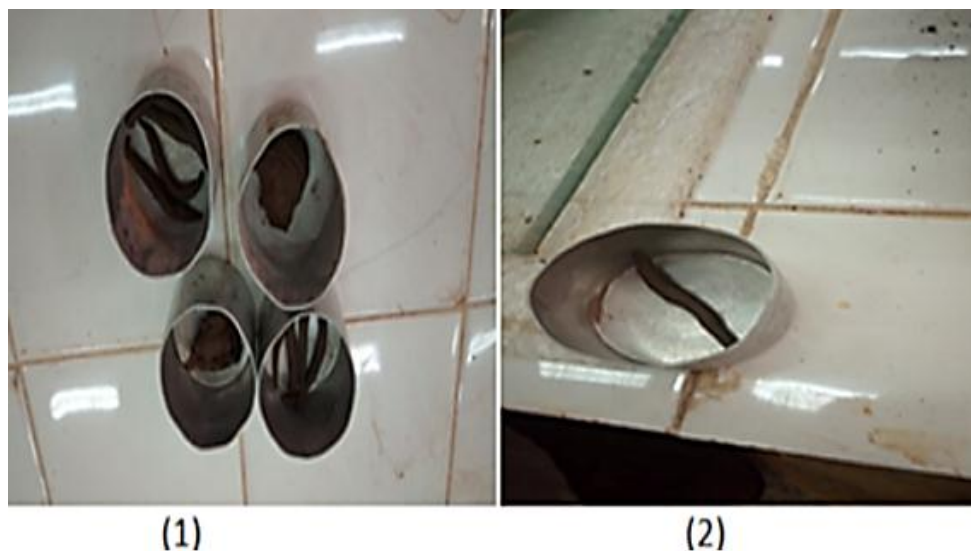
L'indice de plasticité :  $IP = WL - WP$

L'indice de consistance :  $Ic = (Wl - Wn) / Wl - Wp$

L'indice de liquidité :  $Il = Wn - Wp / Wl - Wp$

Les résultats obtenus des essais aux limites d'Atterberg sur le sol (le sédiment) sont présentés sur le Tableau suivante :

	<b>Wn(%)</b>	<b>Wl(%)</b>	<b>Wp(%)</b>	<b>Ic</b>	<b>Il</b>	<b>IP</b>	<b>Type de sols</b>
<b>Sol</b>	<b>86</b>	<b>62</b>	<b>31</b>	-0,79	1,79	31	Argile inactive plastique

**Tableau IV.2** Les résultats obtenus des essais aux limites d'Atterberg**Figure IV.5**La procédure pour la détermination de la limite de plasticité**3.3.3 La limite de retrait Wr**

Est la teneur en eau pondérale conventionnelle de dessiccation d'un sol remanié, au dessous de laquelle le volume de l'échantillon est supposé ne plus varier. Elle est déterminée

par la norme XP P 94-60-1. Après l'étuvage des échantillons de sédiments étudiés, on a constaté un taux de retrait élevé



**Figure IV.6** taux de retrait pour sol (le sédiment)

Ce retrait est dû principalement au départ par séchage d'une grande quantité d'eau. Ceci était prévisible puisque le sédiment étudié possède une teneur en eau très élevée

**Tableau IV.3:** Les Résultats de la détermination de la limite de retrait( $W_r$ )

Les paramètres	Sb1	Sb2	Sb3	Sb4
$W_r(\%)$	12	7	10	9
$W_{rmoy}(\%)$	9			

### 3.4 Valeurs au bleu de méthylène VBS :

Cet essai a pour but de caractériser globalement la fraction argileuse contenue dans le matériau.

Il consiste à mesurer la quantité de bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir les particules d'argile mis en suspension exprimée en grammes de bleu par 100 g de la fraction 0/50 mm de matériau.

L'essai permet de mesurer indirectement la surface spécifique des grains solides et l'argilo site par adsorption d'une solution de bleu méthylène jusqu'à la saturation donc on peut évaluer l'activité argileuse des sédiments.

Plus la quantité de bleu de méthylène adsorbée sera importante, plus l'activité argileuse sera importante.



Figure IV.7 Mise en œuvre de l'essai au bleu de méthylène et Test de la tache

Les résultats obtenus pour le sol étudiés (sédiment) de valeur au bleu de méthylène et leur Surface spécifique sont présentés sur Tableau IV.3

VBS	6,33
S.S.T(m <sup>2</sup> /g)	133

Tableau IV.4 Récapitulatif de valeur au bleu méthylène.

(g/100g de sol sec) et leur surface Spécifique totale de échantillons

• La valeur de bleu (VBS) s'exprime par la quantité de bleu en grammes consommée par 100 grammes de fines.

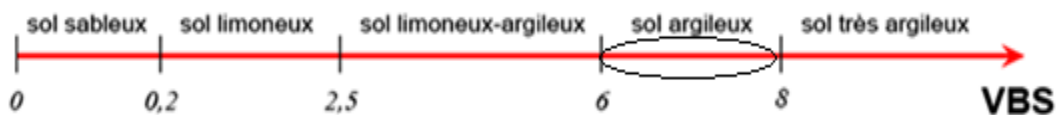


Figure IV.8 Nomination d'un sol en fonction de sa valeur au bleu de méthylène (VBS)

### 3.5 Classification LPC-USCS :

Cette classification adoptée par les laboratoires des Ponts et Chaussées a été adaptée à partir de la classification américaine U.S.C.S. (Unified Soil Classification System). Les modifications initiales tiennent aux valeurs légèrement différentes d'ouverture de tamis, donc de classes granulométriques.

Elle est tout d'abord basée sur 2 critères : la granulométrie (passant à 80 µm) et la présence visible de matières organiques.

Trois grandes familles de sols sont mises en évidence

- Les sols organiques

- Les sols fins
- Les sols grossiers (grenus)

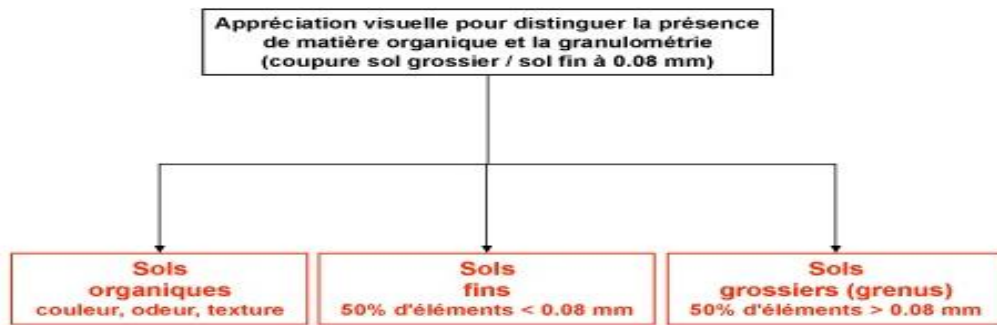


Figure IV.9 Les grandes familles de la classification LPC

Tableau IV.5 Les résultats des essais d'identification du sol (sédiment), Selon la classification LPC–USCS :

tests	sédiment Naturel (NS)	valeurs
Propriétés physiques	Sable (%)	10
	Limon (%)	56
	Argile (%)	34
	LL (%)	55
	PL (%)	34
	PI (%)	21
Propriétés chimiques	VBS(g/100g)	1.7-2.4
	SST( $m^2/g$ )	37 – 51
	MO (%)	0-1.5
Paramètres de compactage	$w_{SPO}$ (%)	27
	$\gamma_{dmax(SPO)}$ ( $kN/m^3$ )	14.86
	$w_{MPO}$ (%)	23.5
	$\gamma_{dmax(MPO)}$ ( $kN/m^3$ )	16.33

### 3.6 Essai de compactage dans un moule Proctor et CBR modifié

Compactage Proctor d'un matériau sont déterminées à partir des essais dits: Essai CBR modifié ou Essai Proctor modifié.

Les caractéristiques de compactage d'un matériau et montre l'importance de la teneur en eau vis à vis du poids volumique sec obtenu pour une énergie de compactage donnée.



Figure IV.10 Appareillage pour l'essai Proctor

	$W_{OPM}$ (%)	$\gamma_{dmax}$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$IPI_{OPM}$
Sol	23	1,9	16

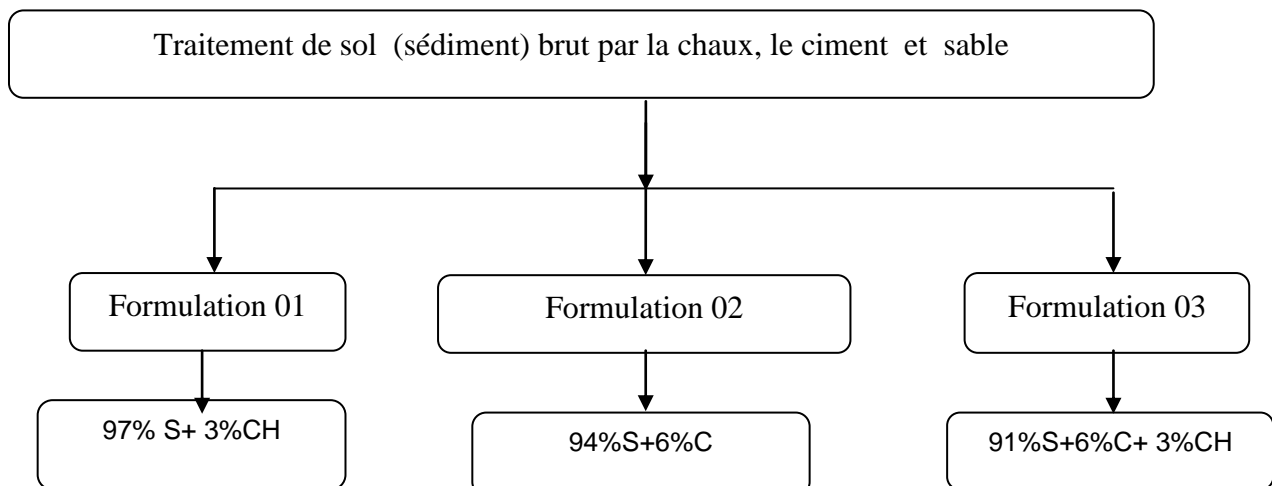
Tableau IV.6 : Les valeurs de l'optimum Proctor modifié de sol étudié

#### 4. le Traitement de sol par un correcteur granulométrique et par des liants hydraulique (ciment, chaux) :

Le sol étudié a été mélangé à d'autres composants granulaires dans des proportions intéressantes sur le plan économique, qui permettent une application facile à l'échelle industrielle et une réduction intéressante de la teneur en eau. L'ajout de liants hydrauliques, pour l'obtention de matériau de construction final, va permettre d'une part de diminuer la teneur en eau, par les phénomènes d'hydratation et d'apports de matières sèches et d'autre part la mise en place de liens forts entre les particules, pour augmenter les résistances.

Le traitement consiste à ajouter 6 % de ciment et 3 % de chaux

#### 4.1 Diagramme des Formulations étudiées :



#### 4.2 La Correction Granulométrique :

Pour être utilisé en tant que sol support, couche de structure, un matériau à distribution granulométrique étalée est conseillé.

L'objectif est de limiter les vides en permettant aux particules de différentes tailles de s'imbriquer de manière optimale. Il est donc important d'utiliser des matériaux permettant, avec la granulométrie des sédiments, d'obtenir un bon squelette granulaire.

Les ajouts granulaires introduits sur le sol (sédiment naturel), ont permis de constater sur les courbes granulométriques obtenues :

- La distribution granulométrique des sédiments traités aux liants hydrauliques présente une granularité moyenne très proche à la courbe du sédiment brut sans traitement

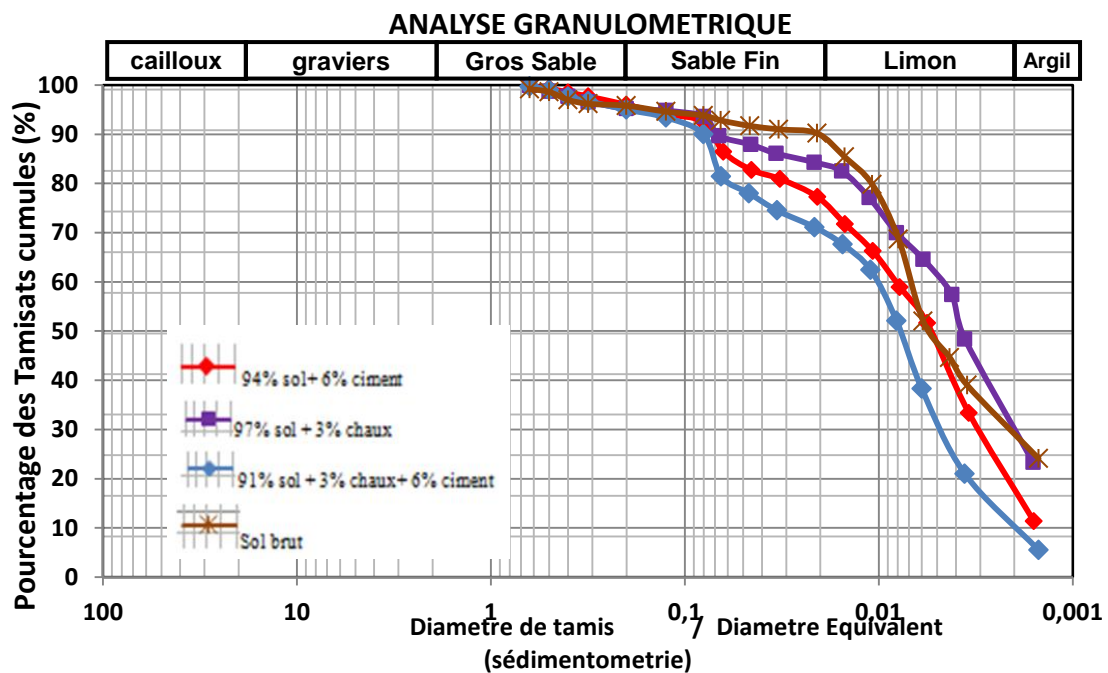


Figure IV .11 la courbe de correction granulométrique.

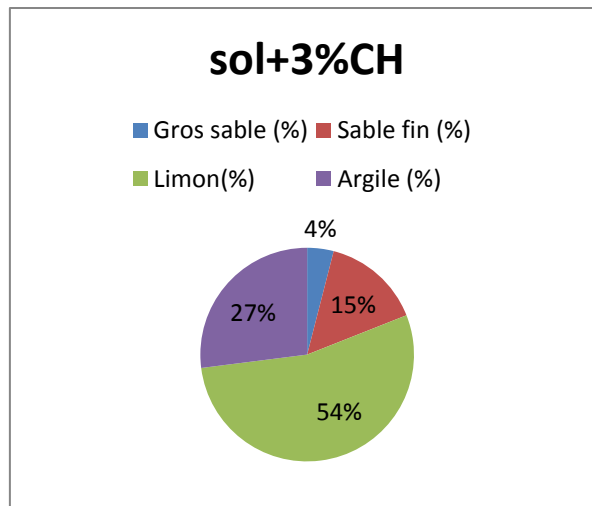


Figure IV.12 Pourcentage de formule 1

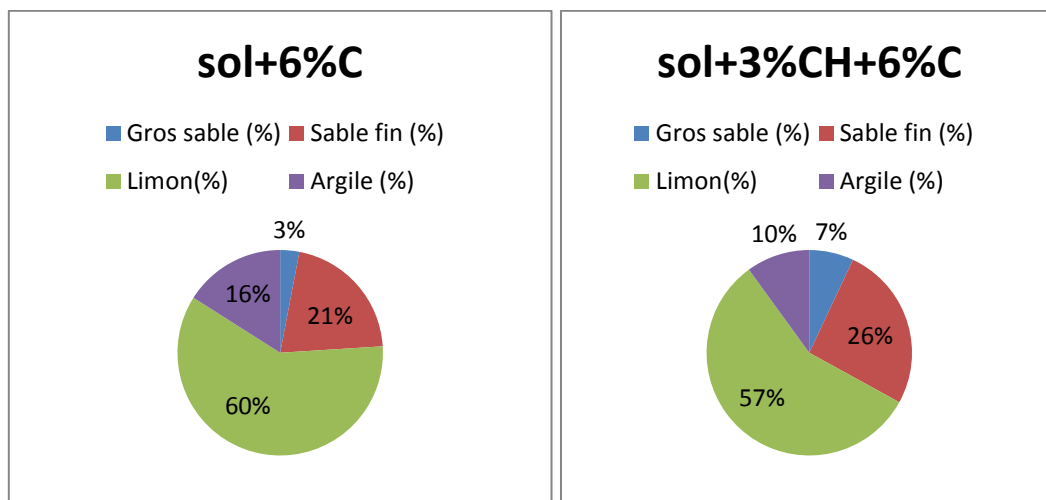


Figure IV.13 Pourcentage de formule 2 et formule 3

Le coefficient d'uniformité de HAZEN :  $C_u = D_{60} / D_{10}$

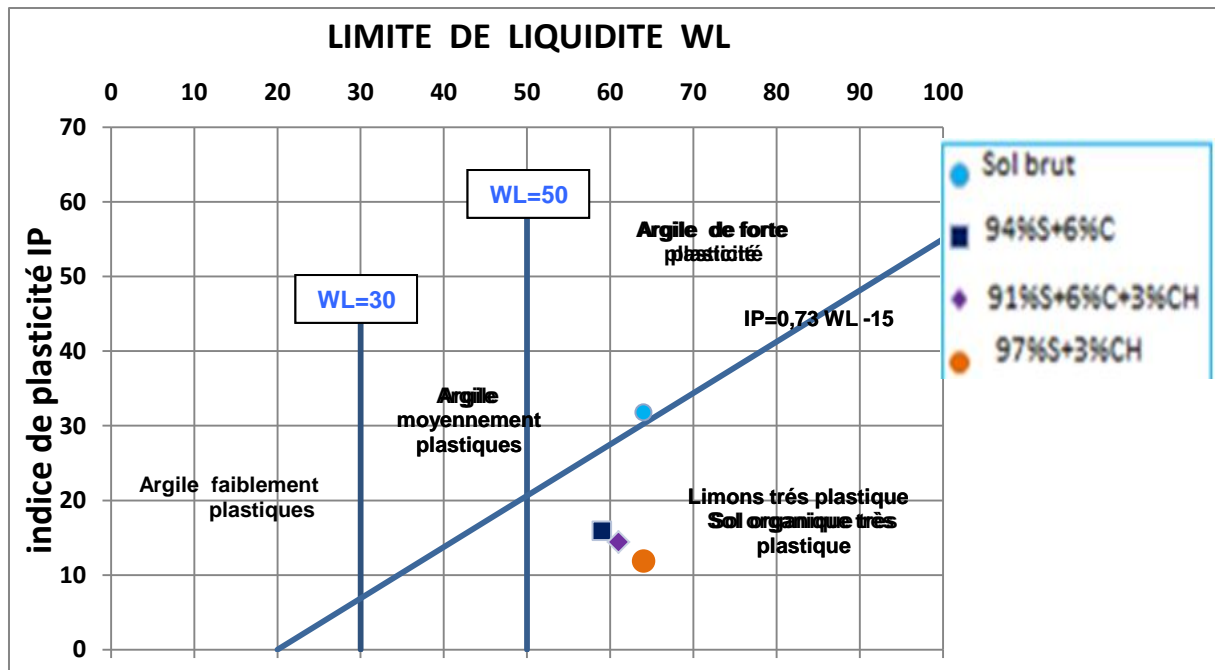
Formulation(1)  $C_u = 5$

Formulation(2)  $C_u = 4$

Formulation(3)  $C_u = 28$

#### 4.3 Variation de l'état de plasticité des formulations étudiées :

La mesure des limites d'Atterberg du sol traité pour les formulations étudiées nous a permis de constater : La plasticité diminue fortement après traitement par les liants hydrauliques, ce qui montre l'influence d'ajouts de liants hydrauliques sur la floculation des particules. Cette floculation se traduit géo techniquement par une élévation importante de la limite de plasticité du sol sans modification significative de sa limite de liquidité qui conduira par conséquent à une réduction de son indice de plasticité IP.



**Figure IV.14** Résultats des Limites d' Atterberg des formulations étudiées placés dans l'abaque de Casagrande

Formulations étudiées	$\gamma_s$ (KN/m <sup>3</sup> )	WL(%)	WP (%)	Wr (%)	IP
Sol brut	26.57	63	32	9	31
97% S+ 3%CH	26.50	64	52	37	12
94% S+ 6%C	26.60	59	43	34	16
91% S+6%C+ 3%CH	26.45	61	47	33	14

Tableau IV.7 résultats de la limite des Formulations étudiées



Constat :

La plasticité diminue fortement après traitement par les liants hydrauliques, ce qui montre l'influence d'ajouts de liants hydrauliques sur la floculation des particules.

Cette diminution de l'étendue plastique des formulations peut aussi être attribuée à la diminution de la fraction organique (**Tableau IV.5**) qui conduit par la suite à une réduction notable de son pourcentage de retrait gonflement.

### 5. Confection des éprouvettes la norme (NF P98-230-2) :

De part la finesse du matériau à étudier ( $D_{max} < 6,3$  mm) et en suivant la norme (NF P 98-114-3) relative à l'étude des matériaux traités aux liants hydrauliques, d'éprouvettes cylindriques sont utilisées pour réaliser l'essai de compression simple : «5 x 10» ( $\varnothing = 5$  cm;  $h = 10$  cm), qui sont fabriquées avec une teneur en eau optimale WOPM et 98,5 % de la masse volumique sèche Proctor pdOPM, confectionnées par un compactage statique suivant la norme (NF P98-230-2)



Figure IV.15 la mise en place de l'échantillon dans le moule



Figure IV.16 les étapes de compactage de l'éprouvette



Figure IV.17 démoulage de l'éprouvette

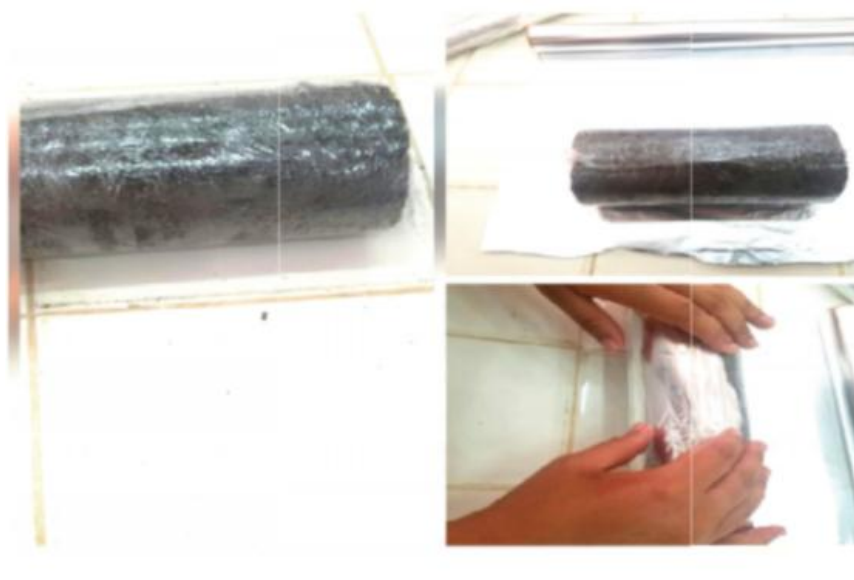


Figure IV.18 Le développement des éprouvettes dans la cellophane et le papier d'aluminium



Figure IV.19: l'éprouvette pour l'essai à la résistance à la compression

### 6. Compression simple selon la Norme-NF-XP-P13-901 :

Les essais de résistance à la compression simple (RC) sont effectués sur des éprouvettes cylindriques de 5 cm de diamètre et de 10 cm de longueur (d'élanement 2), confectionnées à WOPM et  $0.985 \times \rho d OPM$  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 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 3 formulations proposées après, 7 jours, 21 jours, 28 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, (cm<sup>2</sup>)

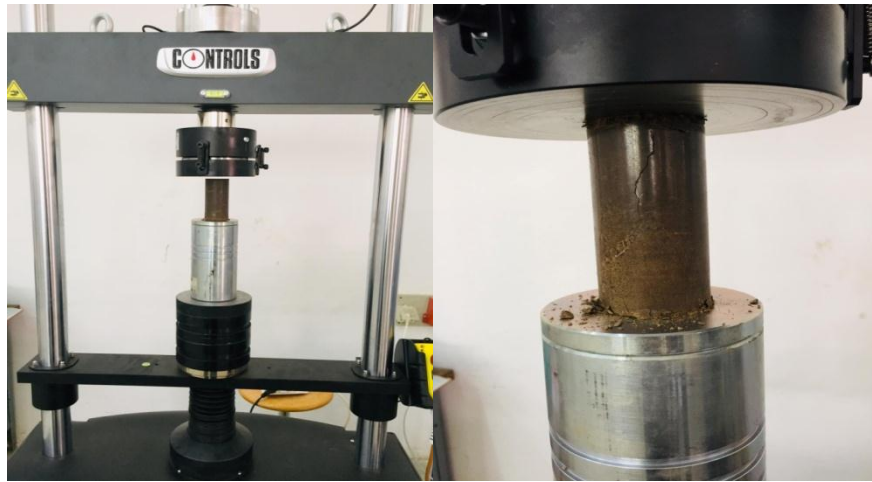


Figure IV. 20: mode opératoire de la compression simple

## 7. Résistance à la compression simple et le module d'élasticité des Formulations étudiées:

**Formulation 01** :97% Sol+ 3%Chaux

**Tableau IV.8:** Résistance à la compression simple (7jrs) et le module d'élasticité

ECH	$\sigma_{max}/2$	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\epsilon_{50}(\%)$	E50 (MPa)
1	0.77579618	1.55159236	0.829	6.13
2	0.42980892	0.85961783	0.814	5.58

ECH	mh(g)	ms(g)	W(%)
1	416.32	361.87	13.84
2	407.95	361.52	14.93

ECH	W(%)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	E50 (MPa)
1	13.84	1.55159236	6.13
2	14.93	0.85961783	5.58

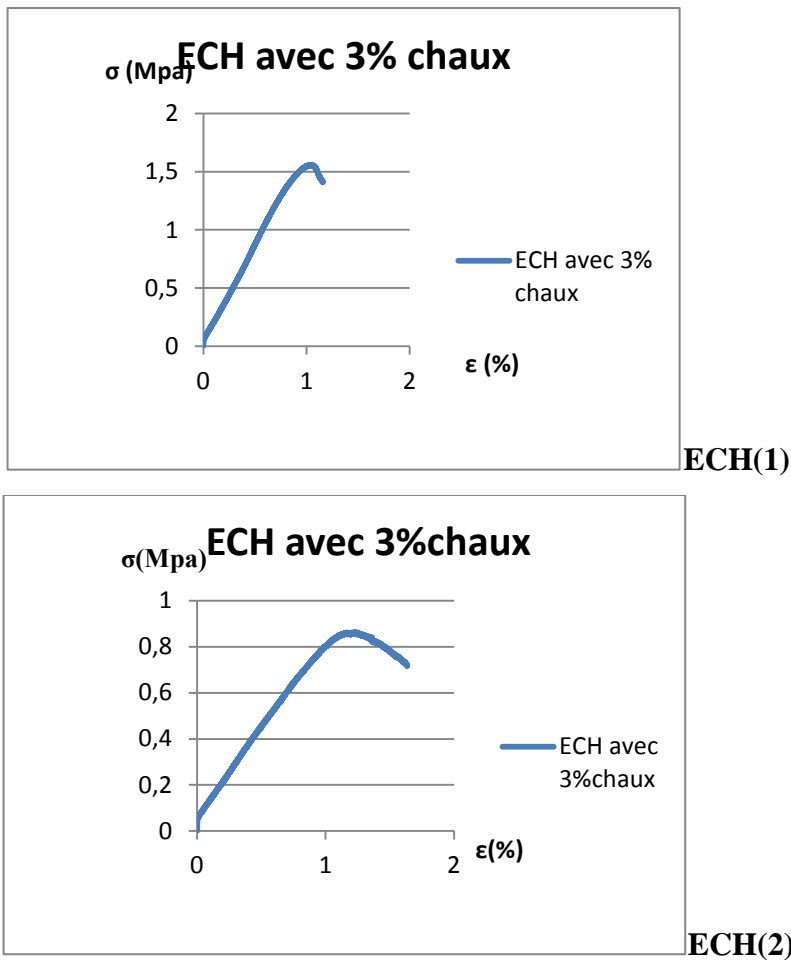


Figure IV. 21 Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 7jrs

Tableau IV.9: Résistance à la compression simple (21jrs) et le module d'élasticité

ECH	$\sigma_{max/2}$	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\epsilon_{50}$ (%)	E50 (MPa)
1	1.37528662	2.75057325	0.448	20.50
2	1.36484076	2.72968153	0.721	20.47

ECH	mh(g)	ms(g)	W(%)
1	415.22	378.11	9.81
2	417.01	379.09	10

ECH	W(%)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	E50 (MPa)
1	9.81	2.75057325	20.50
2	10	2.72968153	20.47

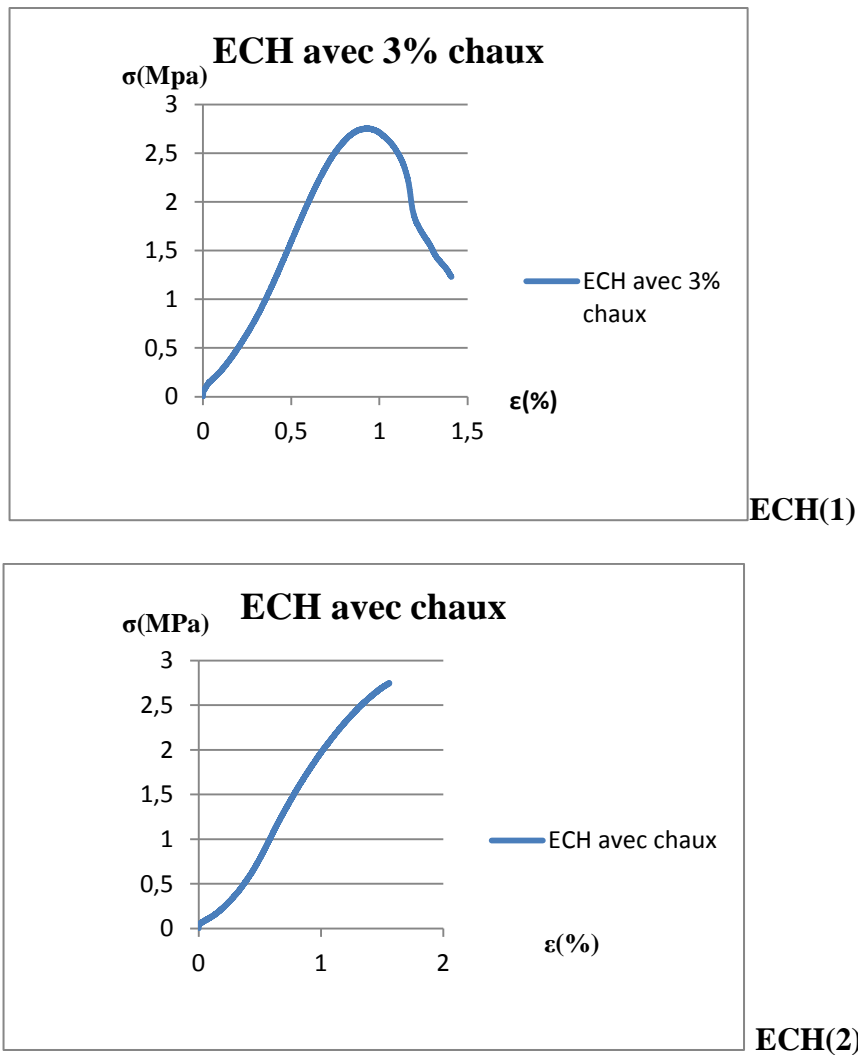


Figure IV. 22 Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 21jrs

Tableau IV.10: Résistance à la compression simple (28jrs) et le module d'élasticité

ECH	$\sigma_{max/2}$	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\epsilon_{50}$ (%)	E50 (MPa)
1	1.79821656	3.59643312	0.786	36.57
2	1.8277707	3.6555414	0.999	38.89

ECH	mh(g)	ms(g)	W(%)
1	415.22	389.11	6.71
2	417.01	387.2	7.69

ECH	W(%)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	E50 (MPa)
1	6.71	3.59643312	20.50
2	7.69	2.75057325	38.89

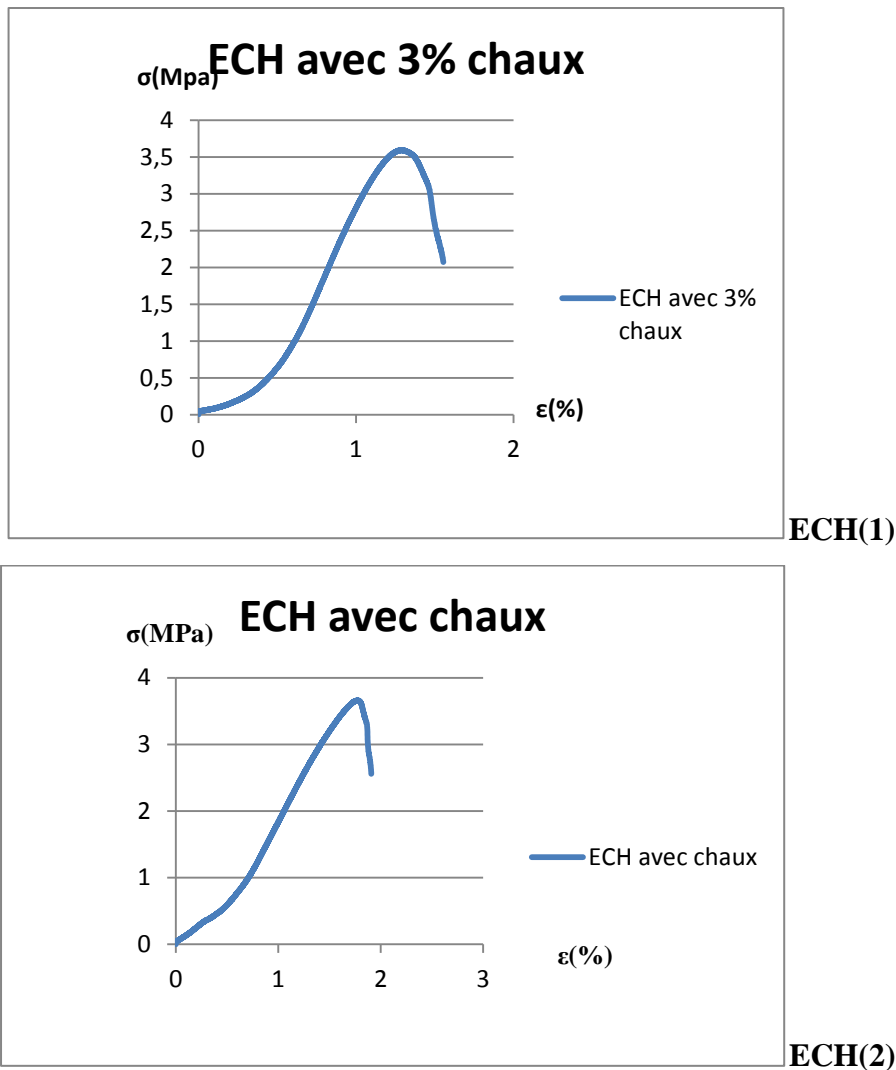


Figure IV. 23 Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 28jrs

Formulation 02 : 97% Sol+ 6% Ciment

Tableau IV.11: Résistance à la compression simple (7jrs) et le module d'élasticité

ECH	$\sigma_{max/2}$	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\epsilon_{50}$ (%)	E50 (MPa)
1	1.3910828	2.78216561	0.734	11.49
2	0.57146497	1.14292994	0.695	8.65

ECH	mh(g)	ms(g)	W(%)
1	430	371.91	15.80
2	417.25	373.1	14.96

ECH	W(%)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	E50 (MPa)
1	15.80	2.77859873	11.49
2	14.96	1.12866242	8.65

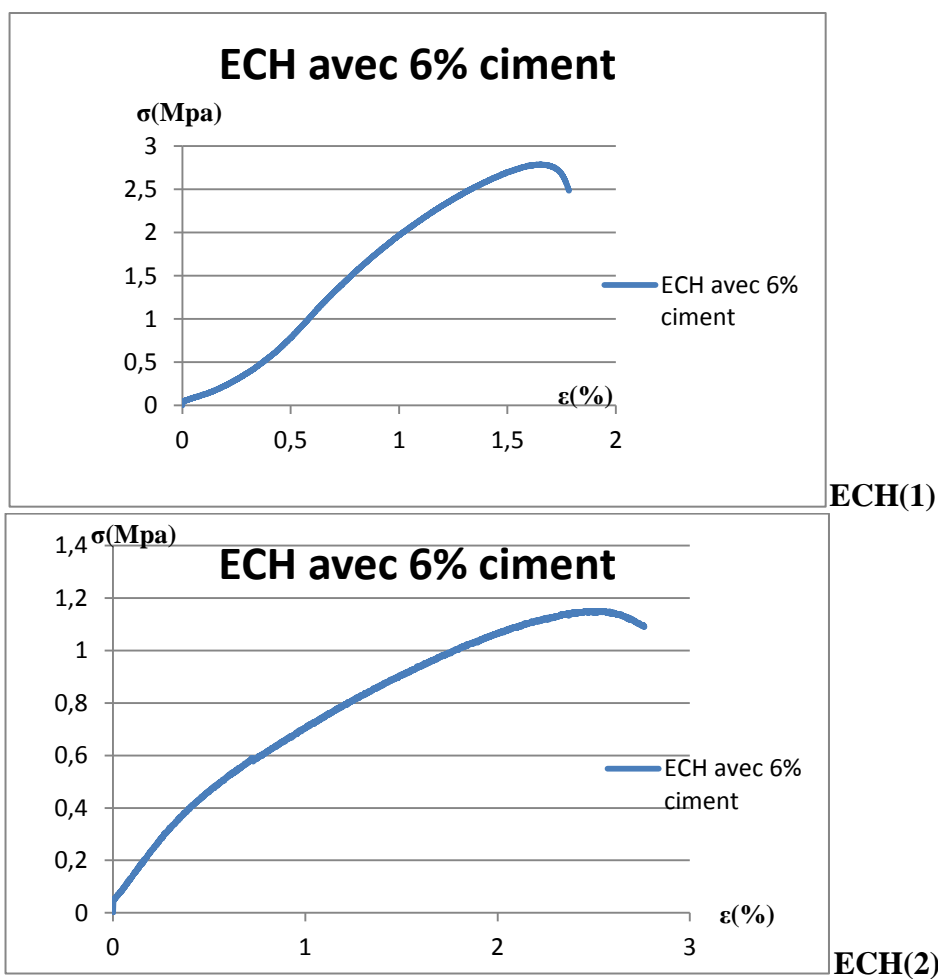


Figure IV. 24 Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 7jrs

Tableau IV.12: Résistance à la compression simple (21jrs) et le module d'élasticité

ECH	$\sigma_{max/2}$	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\epsilon_{50}$ (%)	E50 (MPa)
1	1.74038217	3.48076433	0.925	22.64
2	1.3943949	2.78878981	0.734	27.88

ECH	mh(g)	ms(g)	W(%)
1	416.76	373.1	12.24
2	419.32	374.91	11.84

ECH	W(%)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	E50 (MPa)
1	12.24	3.48076433	22.64
2	11.84	2.78878981	27.88



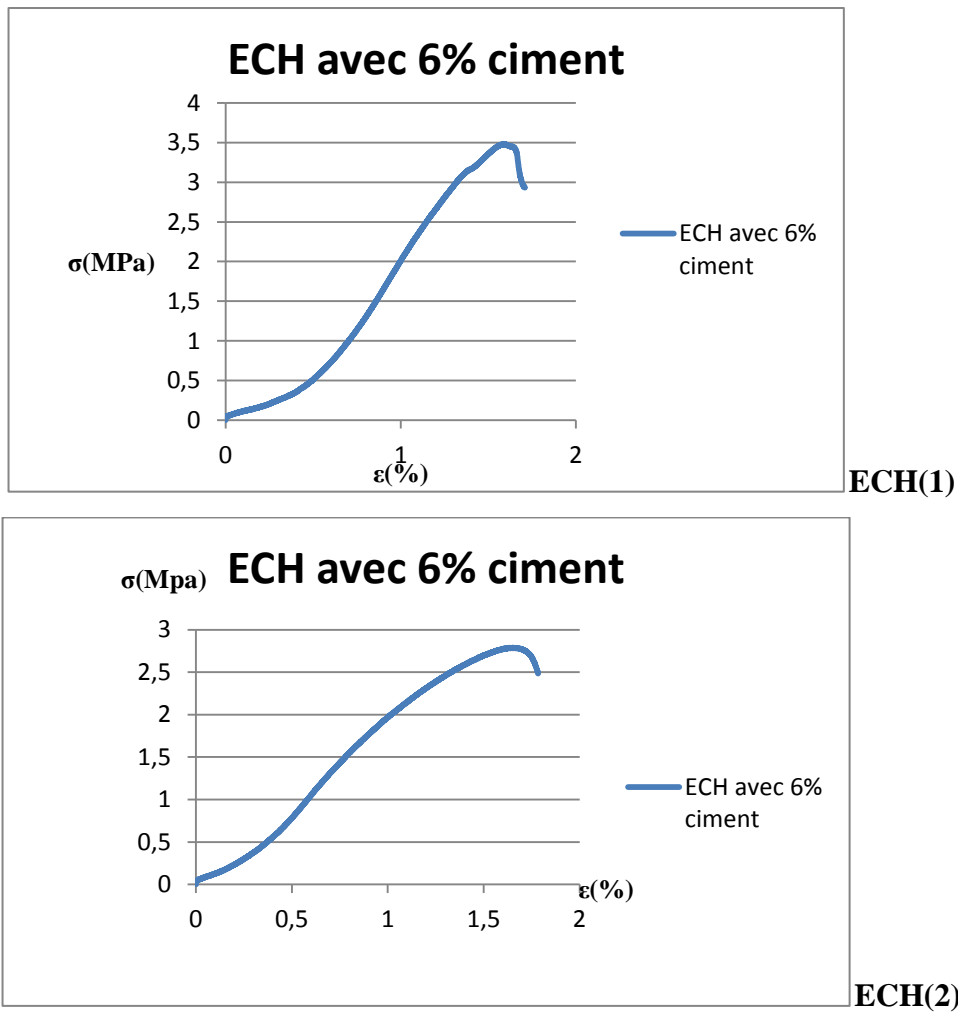


Figure IV. 25 Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 21jrs

Tableau IV.13: Résistance à la compression simple (28jrs) et le module d'élasticité

ECH	$\sigma_{max/2}$	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\epsilon_{50}$ (%)	E50 (MPa)
1	2.2733758	4.54675159	0.918	54.46
2	2.09681529	4.19363057	0.573	31.17

ECH	mh(g)	ms(g)	W(%)
1	416.22	381.3	9.15
2	418.71	385.21	8.96

ECH	W(%)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	E50 (MPa)
1	9.15	4.54675159	54.46
2	8.96	4.19363057	31.17

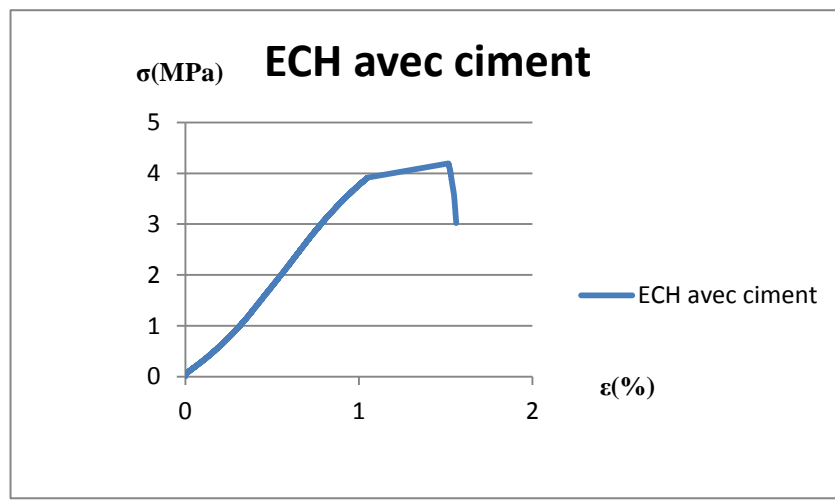
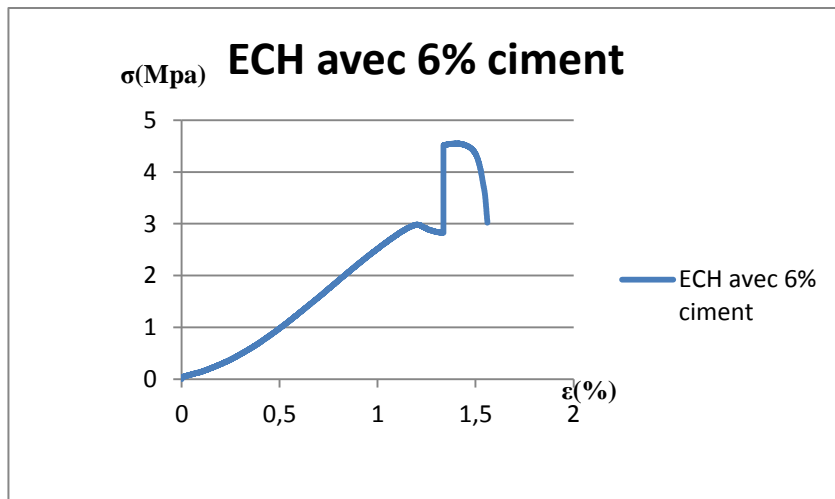


Figure IV. 26 Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 28jrs

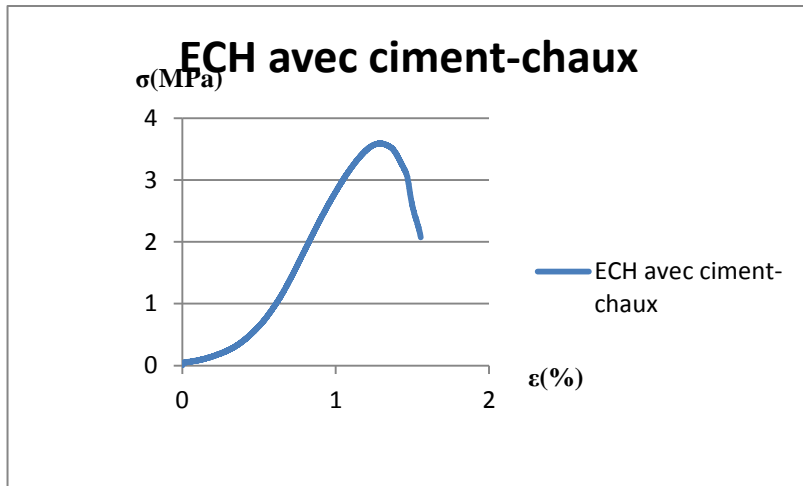
Formulation 03 : 97% Sol+ 6% Ciment+3% Chaux

Tableau IV.14: Résistance à la compression simple (7jrs) et le module d'élasticité

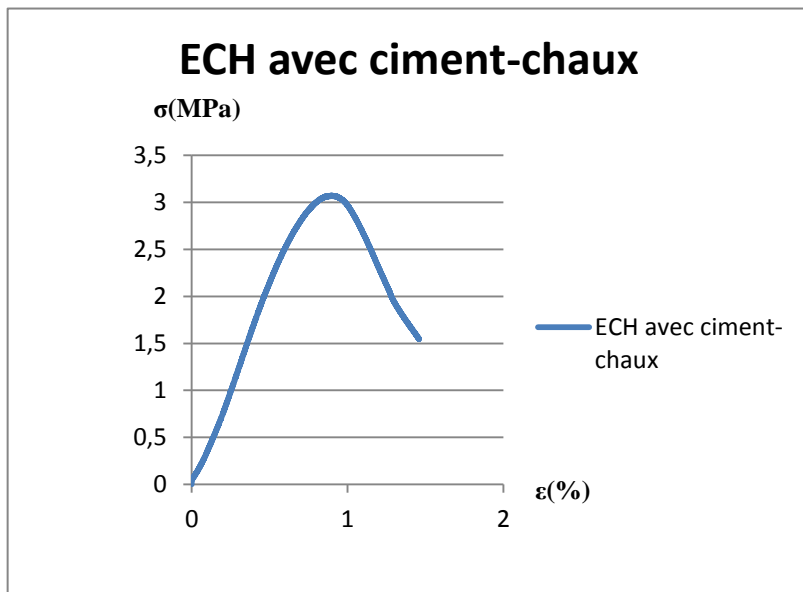
ECH	$\sigma_{max/2}$	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\epsilon_{50}$ (%)	E50 (MPa)
1	1.79464968	3.59286624	0.997	11.23
2	1.53605096	3.07210191	0.363	13.08

ECH	mh(g)	ms(g)	W(%)
1	415.31	372.1	15.3
2	417.73	372.3	12.2

ECH	W(%)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	E50 (MPa)
1	15.3	3.59286624	11.23
2	12.2	3.07210191	13.08



ECH(1)



ECH(2)

Figure IV. 27 Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 7jrs

Tableau IV.15: Résistance à la compression simple (21jrs) et le module d'élasticité

ECH	$\sigma_{max/2}$	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\epsilon_{50}$ (%)	E50 (MPa)
1	2.2733758	4.54675159	0.613	26.9
2	2.21401274	4.42802548	0.56	23.08

ECH	mh(g)	ms(g)	W(%)
1	418.21	375.3	11.43
2	419.27	384.07	9.16

ECH	W(%)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	E50 (MPa)
1	11.43	4.54675159	26.9
2	9.16	4.42802548	23.08

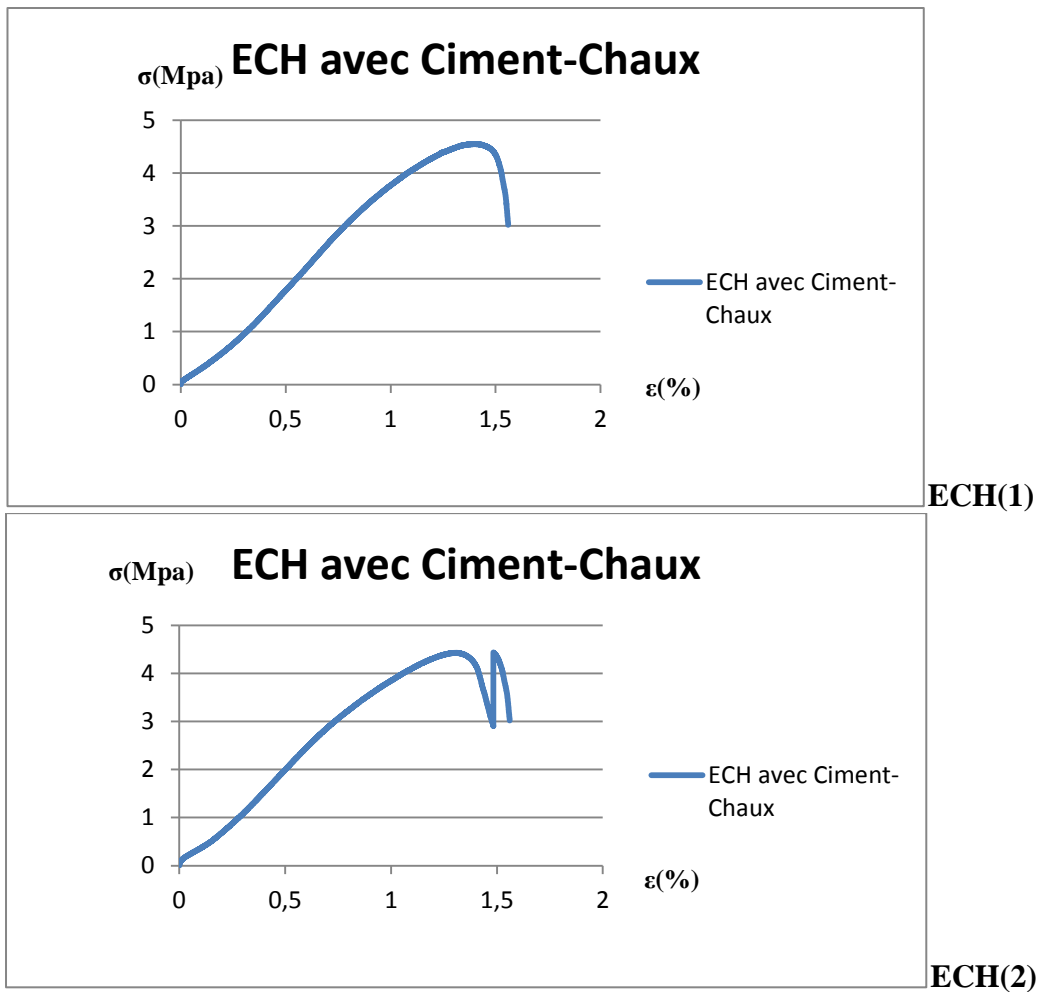


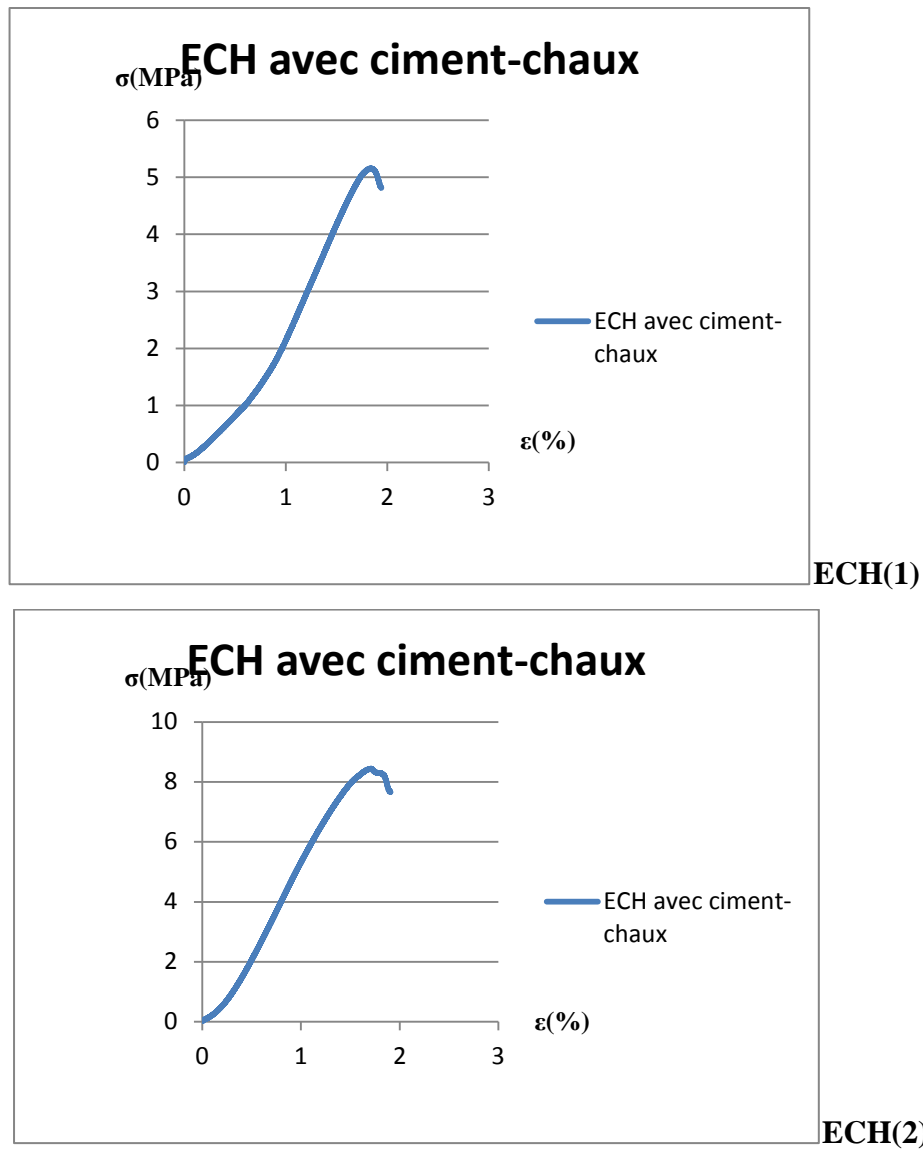
Figure IV. 28 Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 21jrs

Tableau IV.16: Résistance à la compression simple (28jrs) et le module d'élasticité

ECH	$\sigma_{max/2}$	$\sigma_{max}$ (Mpa)	$\epsilon_{50}$ (%)	E50 (MPa)
1	2.57579618	5.15159236	1.109	36.75
2	4.21834395	8.4366879	0.831	51.49

ECH	mh(g)	ms(g)	W(%)
1	416.32	387.7	7.38
2	407.93	371.52	9.8

ECH	W(%)	$\sigma_{max}$ (Mpa)	E50 (MPa)
1	7.38	5.15159236	36.75
2	9.8	8.4366879	51.49



**Figure IV. 29** Evolution de la résistance RC en fonction de déplacement 28jrs

**Constat :**

On remarque d'après les graphes des figures (IV. 25) (IV. 26) (IV. 27) (IV. 28) (IV. 29) (IV. 30) (IV. 31) (IV. 32) (IV. 33) ci-dessus qu'on ajoutant a chaque de 3%chaux ou 6% ciment ou 3%chaux+6% ciment on aura une augmentation de la résistance de compressions

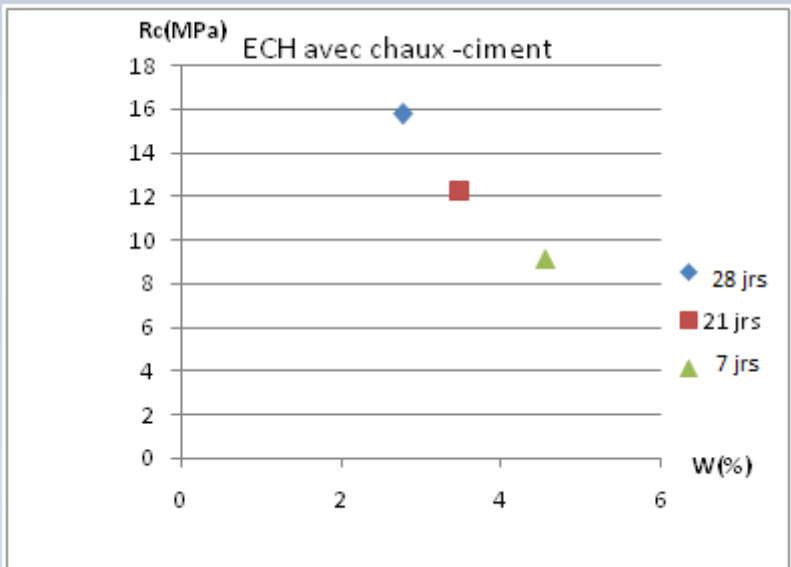
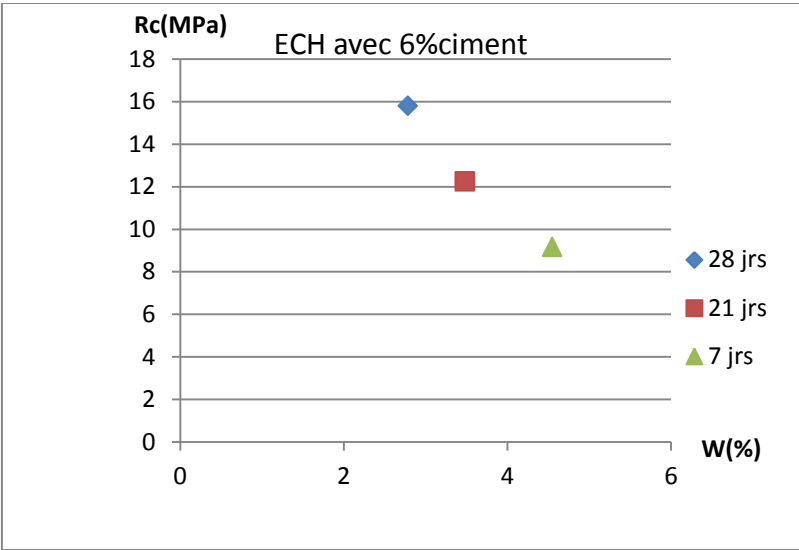
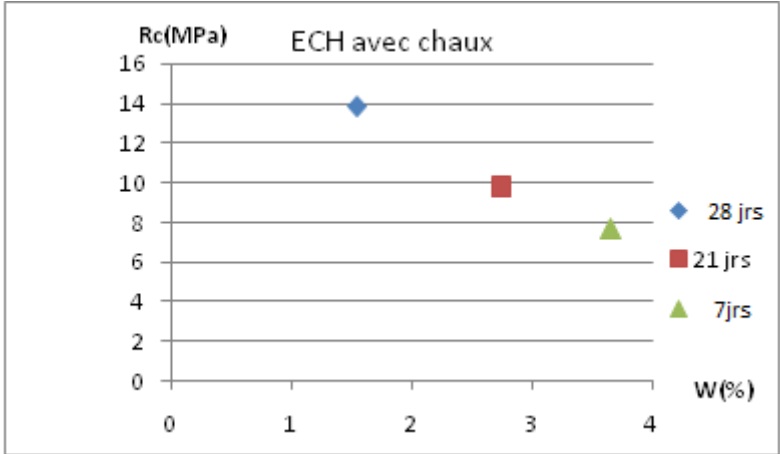


Figure IV. 30 Evolution de la résistance RC en fonction de la teneur en eau

**Constat :**

On remarque d'après les graphes de la figure (IV. 34) ci-dessus que lorsque la quantité d'eau diminue la résistance à la compression augmente.

**8. Fabrication des adobes selon la norme française XP-P13-901 :**

Les adobes sont fabriqués dans des moules de bois séchés au soleil à même le sol après démoulage.

Leur procédé de mise en forme nécessite une préparation à l'état plastique donc une teneur en eau de fabrication ( $W_m$ ) élevée. Cependant, cette préparation doit avoir une consistance suffisante pour ne pas couler sous son propre poids.

A notre connaissance, il n'existe pas dans la littérature de méthodes de détermination de cette teneur en eau mais, en général, les adobes sont réalisés sur les chantiers à des teneurs en eau voisines de la limite de plasticité. Pour la confection de nos adobes, sédiment est gâchée à des teneurs en eau différentes. Nous l'avons baissée pour les autres échantillons.

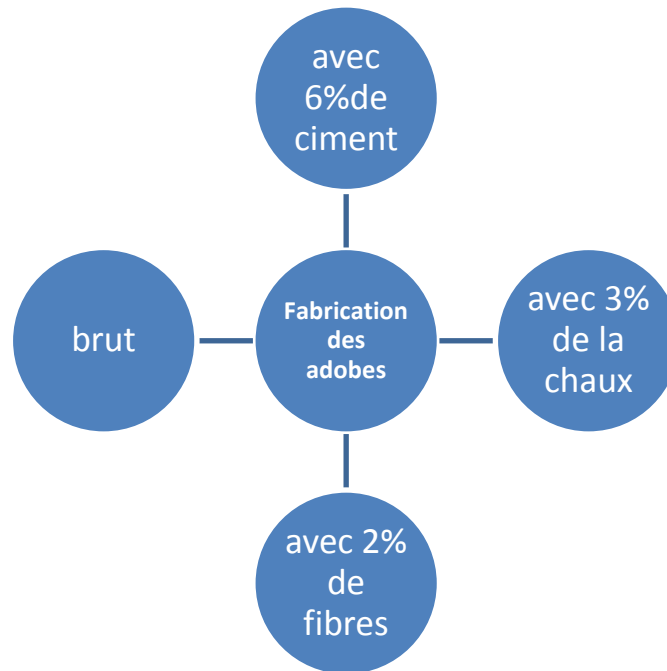
Cette terre est malaxée jusqu'à l'obtention d'un Mélange homogène à la vue. Ensuite, ce mélange eau-terre homogène est coulé à même le sol dans un moule en bois de dimension 295x14x95 mm.

Avec les mains, Ce mélange est tassé ou pétri dans les coins et le surplus est enlevé avec une réglette en bois. Enfin, les adobes sont séchés à la température de laboratoire jusqu'à masse constante (Environ 3 semaines).



**Figure IV. 31** Le moule d'adobe 295x14x95 mm

### 8.1 Organigramme pour fabrication des adobes :



### 8.2 Mode de production de l'adobe :

Pour qu'une terre devienne brique, elle doit passer par plusieurs phases de fabrication qui sont enchaînées, chaque phase nécessite un travail minutieux, et certaines règles à respecter. Les différentes phases sont :

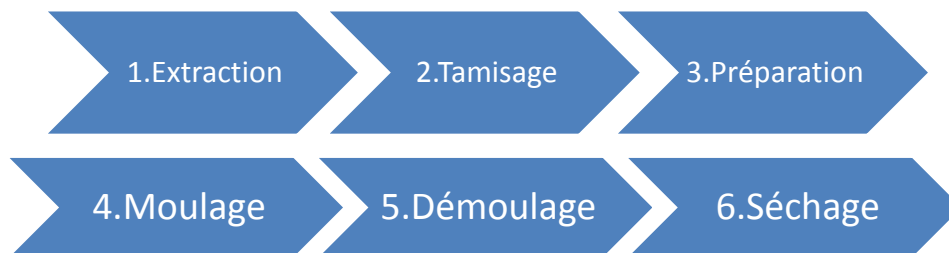


Figure IV. 32: les ajouts





**Figure IV. 33:** Mode opératoire de fabrication des adobes

## **9. les essais de durabilité :**

### **9.1 Essai de remontée capillaire ASTM-D559:**

Afin de rapprocher des conditions réelles d'utilisation du matériau terre, nous avons préféré un essai de remontée capillaire, qui est plus représentatif de l'action de la remontée capillaire dans les murs eau de pluie en pied de mur, ...).

Pour ce faire, ces échantillons vont subir des immersions dans un récipient rempli d'eau. Des pesées seront faites à des intervalles de temps en fonction de la vitesse d'absorption d'eau.

Champ d'application:

La mesure de la sorptivité est un moyen simple et facile de caractériser la vitesse d'absorption des matériaux. Plus la sorptivité est élevée, plus le matériau est susceptible d'être rapidement envahi par le liquide en contact. C'est aussi une propriété qui caractérise la disposition des pores du matériau absorbant et transmettant l'eau par capillarité.

Résumé de la méthode d'essai:

L'essai d'absorption d'eau est destiné à déterminer la quantité d'eau absorbée par capillarité. Cet essai consiste à mesurer l'accroissement de l'éprouvette dans le destinataire dont le niveau

d'eau est maintenu à 5 mm au-dessus de la face inférieure de l'éprouvette. All rights reserved.  
Of the ads of the water of absorber of the block of water in the time and on the time to one up.

### Signification et utilisation:

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succès capillaires des éprouvettes enduites, non saturées, en contact avec de l'eau sans pression hydraulique. La pente de la droite qui s'ajuste au mieux avec les points à expiration en fonction de la racine carrée du temps, représente le coefficient d'absorption d'eau par capillarité. Les résultats sont exprimés en g / cm<sup>2</sup> pour chaque temps, Le mécanisme d'essai: Les éprouves préalablement séchées sont placées verticalement dans un plastique contenant de l'eau de petites subventions suivant le schéma suivant figure 114, de sorte que l'eau ne touche pas l'éprouvette qui a une hauteur de 5mm restez au fond de l'éprouvette est imperméabilisé par un ruban adhésif imperméable sur tous les autres visages. On mesure alors l'évolution de la masse de l'éprouvette en fonction du temps à 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 180 et 240 minutes

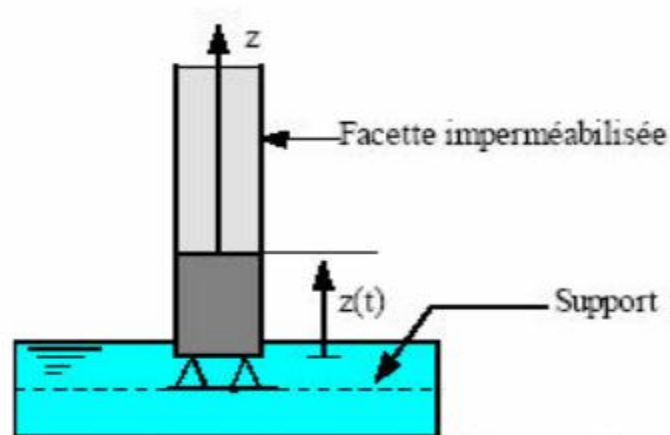


Figure IV. 34: Schéma du dispositif de l'essai d'absorption



**Figure IV. 35:** mode opératoire de l'essai remontée capillaire**Procédure :**

Avant d'entamer l'essai, les spécimens seront pré-conditionnés en les séchant dans l'étuve à environ 105°C, jusqu'à une masse constante. Ils seront ensuite pesés, puis mis en contact avec de l'eau à une profondeur de 5 mm. La petite surface de l'échantillon (la face immergée) sera mesurée et enregistrée. Le gain de poids sera lui également mesuré à plusieurs moments sur une période de 13 heures 20 minutes (typiquement 5, 10, 20, 40, 60, 90, 120, 180 et 240 minutes).

– Procédé d'interprétation.

Les résultats de l'essai d'absorptivité des différentes briques, sont présentés en traçant toutes les droites lissées sur les segments d'augmentation des masses des éprouvettes en fonction de la racine carrée du temps. L'équation de ces droites a la forme :  $Q/A = S$

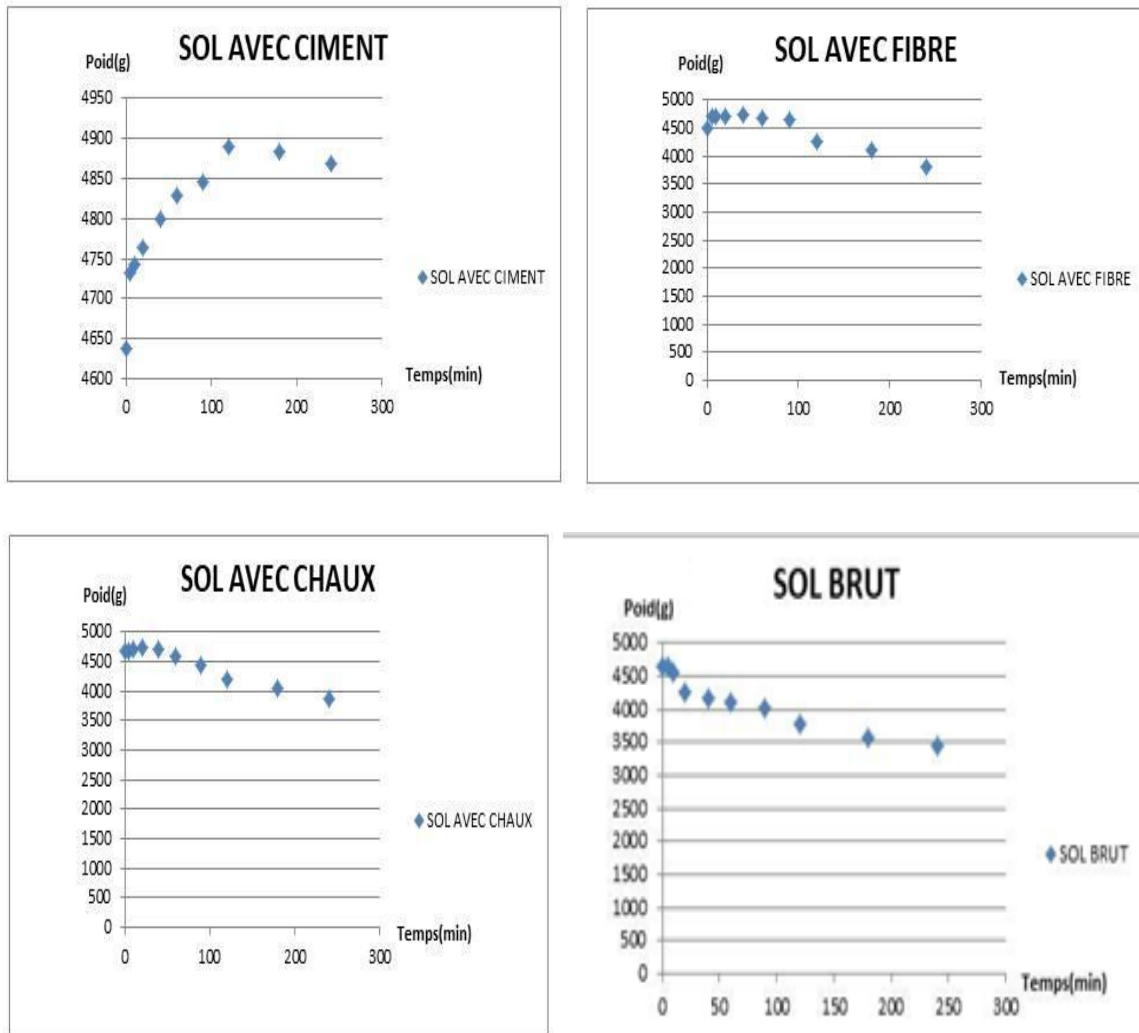
Q : La quantité d'eau absorbée en (cm<sup>3</sup>) ;

A : La surface du spécimen en contact avec l'eau (cm<sup>2</sup>) t : Le temps (s),

S : Le coefficient de Sportivité du spécimen (cm/s<sup>1/2</sup>).

**Les résultats :****Tableau IV.17:** des résultats de l'essai de remontée capillaire

Les échantillons	Brut(g)	Ciment(g)	chaux(g)	Fibres (g)
<b>0 min</b>	4644	4638	4687	4493
<b>5 min</b>	4654	4733	4694	4716
<b>10 min</b>	4555	4742	4723	4716
<b>20 min</b>	4360	4764	4755	4722
<b>40 min</b>	4178	4799	4715	4729
<b>60 min</b>	4116	4829	4600	4687
<b>90 min</b>	4013	4846	4449	4645
<b>120 min</b>	3786	4890	4190	4267
<b>180 min</b>	3576	4884	4060	4109
<b>240 min</b>	3463	4869	3870	3809



**Figure IV. 36** Résultats de l'essai de remontée capillaire

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

Basé sur l'essai : ASTM - D4977, Méthode d'essai standard de frottement par abrasion, des grains des surfaces des toitures minérales.

Cette partie est consacrée à l'observation du comportement des briques échantillonnes face à un essai de vieillissement accéléré. Pour ce faire, échantillons ont subi des contraintes de frottement par une brosse métallique lestée d'un fardeau.

A la fin de cet essai, des mesures de poids seront effectuées pour apporter les éventuelles observât L'appareil de l'essai, est conçu pour réaliser le test en assurant horizontalement, et en mouvement rectiligne, 50 cycles en aller et retour sur l'échantillon.

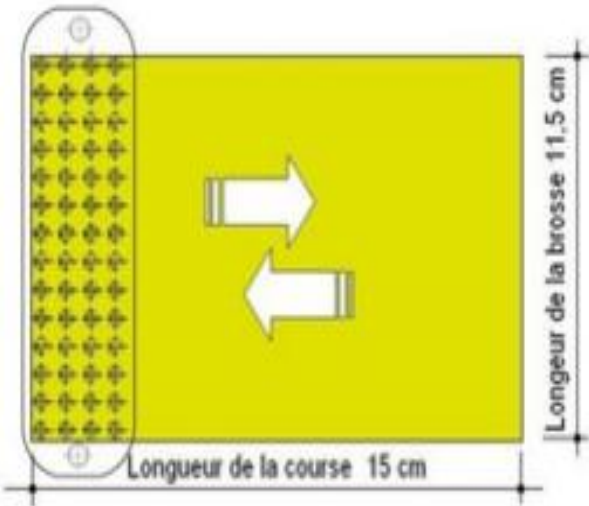


Figure IV. 37: Résistance à l'abrasion (Surface broyée)

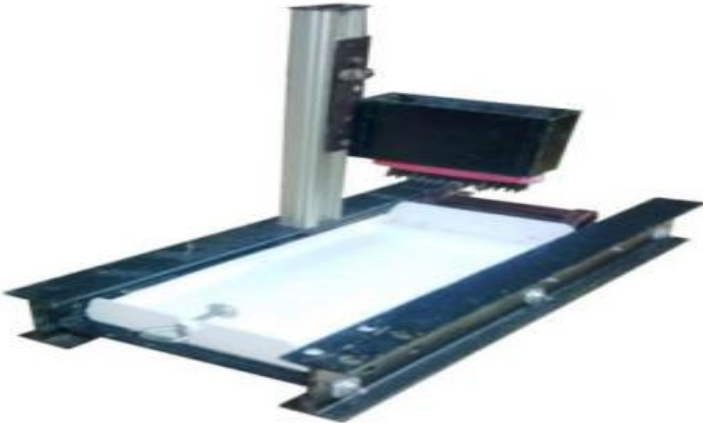


Figure IV. 38: Résistance à l'abrasion (Dispositif de l'essai)

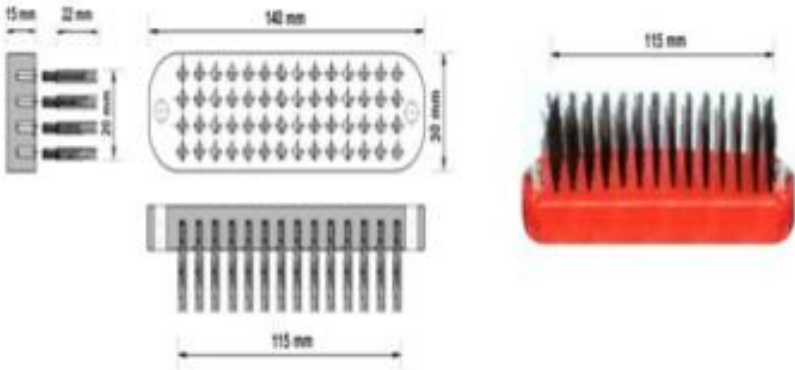


Figure IV. 39: Brosse utilisée pour l'essai



**Figure IV. 40:** mode opératoire de l'essai

La brosse utilisée est procurée à partir d'un magasin de quincaillerie, elle a 140mm de long et 30mm de large, la hauteur des poils varie de 22 à 23 mm Ce sont les dimensions de la brosse et les dimensions des fers plats, utilisés comme masses qui ont engendré celles du bac porte-poids. La brosse comporte 56 trous (4 files de 14) contenant chacun 24 poils raids réalisés à partir de fil d'acier traité, le diamètre du poil est de l'ordre de 0.35 mm

Préparation du Dispositif.

Avant de lancer l'opération, une procédure de dispositions a été effectuée pour faire achever dans des bonnes conditions les tests, il s'agit notamment de :

- faire coulisser le bac porte-poids à l'état vide vers le haut afin libérer l'espace pour la mise en place du brique échantillon.
- Introduire la brique dans le plateau coulissant en la posant sur sa grande surface de 295x140 mm
- Immobiliser la brique sur le plateau par la vis de serrage prévue à cet effet, des calles parallépipédiques en bois seront nécessaires.
- Faire coulisser le bac porte-poids à l'état vide vers le bas jusqu'au contact de la brosse avec la brique.
- S'assurer que tous les poils de la brosse ont presque la même longueur et que le plan formé par les extrémités des poils est bien parallèle à celui de la brique.
- Introduire dans le bac porte

- Poids la masse constituée par les pièces de fer plat pour lester la brosse de son poids de 3kg. S'assurer du chevauchement de la surface frottée par la brosse par rapport à la surface de la brique.
- Commencer les 50 cycles d' « aller et retour» en couissant le plateau par sa pognée.
- Vérifier après chaque essai l'état des composants du dispositif.
- En utilisant un pinceau plat à poils souples, enlever les grains dégagés de l'échantillon avec des légers petits coups.
- Peser avant l'essai, l'échantillon à 0,01 g près et enregistrer sur un papier la masse initiale.
- Nettoyer le plateau coulissant de tout résidu et fixer l'échantillon dans ce dernier avec la face choisie pour être testée de la surface enduite vers le haut. (Contrôler visuellement et s'assurer du chevauchement de la surface frottée par la brosse par rapport à la surface de la brique.
- Placez la brosse en contact avec l'échantillon.
- Commencer à coulisser le plateau par sa pognée jusqu' à ce que l'échantillon soit brossé 50 cycles complets (50 coups aller et 50 coups retour) avec une trajectoire de la brosse parallèle à l'axe longitudinal de l'échantillon.
- Retirer l'échantillon du plateau coulissant, et nettoyer doucement à laide d'un pinceau plat l'échantillon de tous grains détachés.
- Peser après l'échantillon à 0,01 g près et enregistrer sur un papier la masse
- Procédé d'interprétation.

Le poids en grammes de grains qui se sont détachés dans l'essai d'abrasion sera Calculé comme suit =A – B

Où: P étant le poids des grains détachés

A = poids de l'échantillon en g, avant l'essai, et

B = poids de l'échantillon en g, après l'essai.

## IV.18: les résultats de 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)	$\frac{\Delta p}{p} * 100$	$\frac{\Delta p}{s} (\text{g}/\text{cm}^2)$	Évaluation
Brut(1)	4843	4822	21	0.433	0.050	D
Brut(2)	4850	4830	20	0.412	0.048	D
94%Sol+6%de ciment(1)	4829	4780	49	1.101	0.118	C
94%Sol+6%de ciment(2)	4840	4823	17	0.35	0.041	C
98%sol+2% fibres(1)	4801	4786	15	0.31	0.036	C
98%sol+2% fibres(2)	4849	4830	19	0.39	0.046	C

Évaluation : A  $\Delta P/S \leq 0.003$  =====>Excellent

B  $0.004 \leq \Delta P/S \leq 0.028$  =====>Bon

C  $0.028 \leq \Delta P/S \leq 0.051$  =====>Acceptable

D  $\Delta P/S \geq 0.051$  =====>Médiocre

**Constat :**

Selon la norme ASTM-D4977 les résultats de l'essai d'abrasion sont médiocre pour les briques qui contiennent les fibres les résultats sont acceptables.

**10. Conclusion :**

L'objectif de ce travail était d'améliorer le sol sédiment pour être utilisé comme un matériau de construction dans le domaine du bâtiment et de réaliser notre projet (gîtes ruraux) par des briques en terre moulées (adobe).

- La première phase : l'identification du sol et le positionnement de ses propriétés par rapport aux normes d'adobe
- La deuxième phase : traitement et amélioration de sol par des formulations



Formulation(1) : 70% sol + 30% sable

Formulation(2) : 97% S+ 3%CH

Formulation(3) : 94%S+6%C

Formulation(4) 91%S+6%C

- La troisième phase : fabrication des adobes avec des différentes formulations
- Enfin, l'étude de durabilité à l'abrasion et a l'absorption. Les résultats obtenus sur le sol montrent que leurs propriétés en Termes de granulométrie, plasticité et résistance sont loin de satisfaire les normes Et les recommandations concernant son aptitude à être utilisé comme matière première Pour les BTM.

## *Conclusion générale*

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

La terre crue est utilisée dans la construction depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de notre planète, vu son intérêt économique et sa facilité d'exploitation. Après avoir été abandonnée et oubliée avec l'avènement des matériaux de construction industriels, en particulier le béton et l'acier, elle fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays industrialisés

A travers le patrimoine mondial de construction en terre, on dénombre plusieurs techniques d'utilisation de terre pour la construction : l'adobe, le pisé, le torchis, la terre-paille, la bauge, la terre façonnée, la terre extrudée, la terre comprimée.....etc.

Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique des adobes est une technique ancienne, mais la recherche pour ce type de technique est d'actualité afin d'améliorer par des ajouts les propriétés physiques et mécaniques et de durabilité (fibres, ciment, chaux....).

Le renforcement des matériaux de construction par des fibres naturelles fut très tôt utilisé dans l'histoire. Les blocs de terre crue renforcée par de la paille est un exemple qui remonte à plusieurs milliers d'années. Pourtant, le passage de ces utilisations traditionnelles à un développement technologique de composites renforcés par des fibres végétales pour des utilisations en bâtiment est relativement récent. Il remonte au début des années 1970.

Dès lors, de très nombreuses études ont été menées sur tous les continents pour utiliser des fibres de renforcement d'origine végétale dans les matériaux de construction, en particulier dans les pays en voie de développement, en raison de leur disponibilité, de leur faible coût économique et énergétique ainsi que de la relativement faible technicité nécessaire à leur production

L'utilisation des fibres naturelles comme un matériau de construction pose un défi particulier à la science et à la technologie, à savoir : l'adhérence fibre / matrice, la faible résistance, le problème de stockage sur de longues périodes, les fibres sont hydrophiles, les problèmes de compatibilité, la sensibilité à l'humidité, la dégradation des fibres pendant le traitement, l'orientation et la distribution des fibres.

Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terre paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé

## Conclusion générale

---

Nous nous intéresserons dans ce mémoire à l'étude de à l'amélioration de la stabilisation de la terre crue à l'aide des fibres. Pour améliorer l'insensibilité à l'eau de la terre crue on a fait appel aux liants, à savoir le ciment, la chaux et les fibres.

L'objectif de ce travail est l'étude de la sensibilité à l'eau de la brique de terre fibré, en examinant son absorption totale et son gonflement après son immersion dans l'eau. Le comportement mécanique en compression de la brique de terre fibré a fait l'objet aussi de cette étude qui est scindée en 4 phases :

■ **La première phase** : Identification du sol et positionnement de ses propriétés par rapport aux normes d'adobe (granulométrie, plasticité, compactage).

■ **la deuxième phase** : le traitement et l'amélioration du sol par des formulations :

- Formulation(1) : 97% sol + 3% chaux
- Formulation(2) : 93% sol+6% ciment
- Formulation(3) : 91% sol+6% ciment+3% chaux

■ **La troisième phase** : Sa résistance en compression UCS

■ **La quatrième phase** : La fabrication des adobes avec des différentes formulations, l'étude de la durabilité des adobes (remontée par capillarité et l'abrasion).

Les résultats obtenus sur ce matériau terre montrent que leurs propriétés en termes de plasticité et résistance sont non concluants (loin de satisfaire les normes) et les recommandations concernant son aptitude à être utilisé comme matière première pour les adobes.

L'ajout de 3% chaux et 6% de ciment pour une bonne résistance à la compression  
Formulation (1) :  $R_{cmoy}=1.2038\text{MPa}$  (7jrs)

$R_{cmoy}=2.7400\text{MPa}$  (21jrs)

$R_{cmoy}=3.6259\text{MPa}$  (28 jrs)

✓ Formulation (2) :  $R_{cmoy}=1.9625\text{MPa}$  (7jrs)

$R_{cmoy}=3.1347\text{MPa}$  (21jrs)

$R_{cmoy}=\text{MPa}$  (28 jrs)

✓ Formulation (3) :  $R_{cmoy}=3.3324\text{MPa}$  (7jrs)

$R_{cmoy}=4.4873\text{MPa}$  (21jrs)

$R_{cmoy}=6.7940\text{MPa}$  (28 jrs)

Dans le contexte de l'étude du degré d'insensibilité à l'eau, il a été constaté que l'absorption totale de l'eau par l'adobe à base de chaux et ciment augmente dans le temps de la même façon que pour les fibres de paille.

## **Conclusion générale**

---

Finalement, on conclue que la présence des fibres dans la fabrication des briques de terre comprimée est désirable, si le critère de choix est la sensibilité à l'eau.

---

*Références bibliographique*

### Liste des références :

- [1] Salmi.S. (2014). La Construction en pisé entre performances énergétiques et perception des usagers cas du village kabyle Ait Itchir
- [2] CRA Terre, P. DOAT, .et AL, Construire en Terre, Edition Alternative Paris, 1983.
- [3] Guillaud, H., & Houben, H. (1995). Traité de construction en terre (2ème édition). Marseille, Editions Parenthèses
- [4] MAKRI M., « Projet GE12 Construction en terre » Technologie Compiègne, 2010.
- [5] CRA Terre EAG « Bloc de terre comprimée volume I » Manuel de production.
- [6] DJOUHRI M., « Confection d'une brique à base de sable de dune » mémoire magister, Université de Ouargla, 2007.
- [7] MAKRI M., « Projet GE12 Construction en terre » Technologie Compiègne, 2010
- [8] 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)
- [9] B.GIVONI (Architecture, docteur en médecine, directeur du département de climatologie)
- [10] CNERIB /1994 [Guide technique de béton de terre stabilisé]. Pp -19 L'homme, l'architecture et le climat.] Édition du moniteur 1978. Pp 121-151/308-345/351-373.
- [11] Eco construction et efficacité énergétique – Juin 2017
- [12] Ben Purvis, Yong Mao et Darren Robinson, « Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins », *Sustainability Science*, vol. 14, 3 septembre 2018, p. 681-695 (lire en ligne [archive]).
- [13] Rapport Brundtland » [archive] [PDF], sur *Ministère de l'Europe et des Affaires étrangères* (consulté le 9 décembre 2015).
- [14] M. DAYRE- ' protection du matériau Terre ' Synthèse bibliographique – Stage terre – paille Université catholique de Louvain – centre de recherches en architecture – Habitat et développement – Louvain- La Neuve -1986-Annexe n°4
- [15] Mahamat S. (2010). Étude comparative entre l'amélioration des briques en terre comprimée stabilisée par le ciment et la chaux éteinte.
- [16] Rigassi V. Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATERre-EAG, Friedrich Vieweg&Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995
- [17] Houben H, Guillaud H. Traité de construction en terre. CRATERre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.
- [18] United Nations. Earth Construction Technology. United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992.
- [19] Arnold J. C., Alston S. M., Life cycle assessment of the production and use of polypropylene tree shelters. *Journal of Environmental Management*, 94 (1), pp. 1-12, 2012.
- [20] Alonson C., Fernandez L., Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments, *Journal of Materials Science*, 39 (9), pp. 3015-3024, 2004.
- [21] 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
- [22] Fibres et renforts végétaux Solutions composites, Fibres Recherche Développement (FRD), Troyes – France, 2012.

## Références bibliographiques

---

- [23] Akbulut S, Arasan S, Kalkan E. Modification of clayey soils using scrap tire rubber and synthetic fibers. *App Clay Sci* 2007; 38:23–32.
- [24] Ford W, Grogan P, Chill S. Strength and life of stabilized layers containing fibrillated polypropylene. *Trans Res Rec* 1993; 1418:60–6.
- [25] H, Chill S. Stabilization of earth slope with fiber reinforcement. In: 6th Int conf geosynt, Atlanta, USA; 1998
- [26] Baley. C. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. *Techniques de l'ingénieur AM6 (AM5130)*, 2004, p 1-12.
- [27] Yetimoglu T, Salbas O. A study on shear strength of sands reinforced with randomly distributed discrete fibers. *Geotext Geomembr* 2003; 21:103–10.
- [28] Kumar A, Walia B, Mohan J. Compressive strength of fiber reinforced highly compressible clay. *Construct Build Mater* 2006; 20:1063–8.
- [29] Maher H, Gray H. Static response of sand reinforced with randomly distributed fibers. *J Geotech Eng ASCE* 1990; 116:1661–77.
- [30] Michael, S., 2000. *Alternative Construction: Contemporary Natural Building Methods*. John Wiley and Sons, Inc., New York, ISBN: 0-471-24951-3.
- [31] Tang C, Shi B, Zhao L. Interfacial shear strength of fiber reinforced soil. *Geotext Geomembr* 2010; 28:54–62.
- [32] Miller J, Rifai S. Fiber reinforcement for waste containment soil liners. *J Environ Eng ASCE* 2004; 130:981–5.
- [33] <http://www.fredericbekas.com/memzeh-bioclimatique-construit-en-briques-dadobe-route-de-lourikamarrakech->
- [34] [Ideesrevues.com](http://Ideesrevues.com); [lab.rtve.es](http://lab.rtve.es); [www.marketing-chine.com](http://www.marketing-chine.com); [blog.webviajes.com](http://blog.webviajes.com); [inspirationgreen.com](http://inspirationgreen.com); [wallpapers.brothersoft.com](http://wallpapers.brothersoft.com)
- [35] FONTAINE Laetitia, ANGER Romain. *Op.cit.*, p28
- [36] Estabragh AR, Bordbar AT, Javadi A. Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers. *Geotech Geol Eng*, 29:899–908, 2011
- [37] Prabakar J, Sridhar RS. Effect of random inclusion of sisal fiber on strength behavior of soil. *Construction and Building Materials*, 16, 123-131, 2002.
- [38] Benouali H, Brara A, Mahdad M, Mokhtari F. Caractérisation thermo physique et suivi Thermique de deux bâtisses réalisées en blocs de terre comprimés, Actes de la 29ème rencontre de l'Association Universitaire de Génie Civil (AUGC), Tlemcen p. 265, 29-31, 2011.
- [39] *architecture écologique par Dominique Gauzin Muller*
- [40] Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. *Construire en terre*. Editions Alternatives ETParallèles, collection An Architecture, Paris, France, 265p, 1979.
- [41] Gooding DEM. Improved processes for the production of soil-cement building blocks. Unpublished doctoral dissertation: Warwick, University of Warwick, 1993.



## Références bibliographiques

---

- [42] Rogers CDF, Glendenning S, Dixon N. Lime Stabilization. Proceedings of the seminar held at Loughborough University Civil & Building Engineering Department. 25 September, 1996. Thomas Telford, London, England. 183 p, 1996b.
- [43] Prusinski JR, Bhattacharja S. Effectiveness of Portland cement and Lime in Stabilizing Clay Soils. p. 215--227. Présenté au Seventh International Conference on Law-Volume
- [44] Holtz RD. Introduction à la géotechnique. Edition de l'école Polytechniques de Montréal, Canada, 808 p, 1991
- [45] Bergado DT, Anderson LR, Miura N, Balasubramaniam AS. Soft Ground Improvement in lowland and other Environments. ASCE Press. New York, 1996
- [46] Estabragh AR, Bordbar AT, Javadi A. Mechanical Behavior of a Clay Soil Reinforced with Nylon Fibers. GeotechGeolEng, 29:899–908, 2011.
- [47] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-construire-developpement-durable-43820210/construction-dans-le-developpement-durable-tba1400/application-du-developpement-durable-a-la-construction-tba1400niv10001.html#:~:text=1>
- [48] Magniont, C. (2010). Contribution à la formulation et à la caractérisation d'un éco-matériau de construction à base d'agroressources (Thèse de doctorat). Université Toulouse III.