

République Algérienne Démocratique Et Populaire  
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Université Amar Telidji Laghouat  
جامعة عمار ثليجي بالأغواط  
Faculté de génie civil et d'architecture  
كلية الهندسة المدنية و المعمارية  
Département de génie civil



Mémoire de Master

Présenté par :

OUNOUGHI BOUTHINA

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en :

Filière : Génie civil

Spécialité : Matériaux de génie civil

Thème :

# Stabilisation de la terre crue par des biopolymères

**Jury de soutenance :**

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr. GUEDDOUDA MED KAMEL	Pr	Président
Mr. MAKHLOUFI ZOUBIR	Pr	Examineur
Mme. DAMENE ZINEB	Dr	Encadreur

PROMOTION : 2020/2021

## DÉDICACE

***POUR TOI MAMAN, POUR TOI  
PAPA C'EST VOUS TOUTE MA  
VIE, TOUT CE QUE J'AI FAIT ET  
TOUT CE QUE JE VAIS FAIRE  
(IN CHAA ALALH) C'EST  
UNIQUEMENT POUR VOUS.***

# REMERCIEMENT

Tout d'abord je tiens à remercier ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la patience pour mener à terme ma formation et pourvoir réaliser ce travail de recherche.

En guise de reconnaissance, je tiens à remercier, très sincèrement, mon Professeur **Mme DAMENE ZINEB**, Avec qui j'ai eu l'honneur et la chance de bénéficier de ses connaissances et compétences, de ses précieux conseils et de son suivi tout au long de notre parcours académique. son sens élevé du devoir, le fait d'être toujours montré à l'écoute ainsi que sa rigueur scientifique impose l'estime et le respect . je vous remercie infiniment.

Je tiens à remercier les membres du jury pour leur présence, pour leur lecture attentive de ce mémoire, ainsi que pour les remarques qu'ils m'adresseront lors de cette soutenance afin d'améliorer mon travail. Ainsi mes enseignants, espérant que vous allez voir, dans ce manuscrit, les fruits du dévouement avec lequel vous avez fait preuve durant les enseignements que vous nous avez prodigué.

De peur d'en avoir oublier , je souhaite remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de ce parcours universitaire

## Table des matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

### *Chapitre 1 : Revue documentaire sur la construction en terre crue*

I.1 Introduction.....	3
I.2 Historique de la construction en terre crue.....	3
I.3 Généralités sur le matériau terre .....	5
I.3.1 Définition .....	5
I.3.2 Constituants de la terre crue.....	5
I.3.3 Composition granulométrique.....	6
I.3.4 Classification des sols .....	7
I.4 Propriétés et caractéristiques du matériau terre.....	9
I.4.1 Masse Volumique de la terre crue.....	9
I.4.2 Comportement mécanique de la terre crue.....	10
I.4.3 Comportement thermique de la terre crue .....	10
I.4.4 Comportement hydrique de la terre crue (L'échange avec le milieu extérieur) : ...	10
I.4.5 Comportement phonique et acoustique de la terre crue.....	11
I.4.6 Comportement Ignifuge de la terre crue .....	11
I.5 Techniques de construction en terre crue.....	12
I.5.1 Adobe .....	12
I.5.2 Le pisé.....	13
I.5.3 Le torchis.....	13
I.5.4 La bauge .....	14
I.5.5 Le bloc de terre comprimée (BTC) .....	14
I.6 Les Avantages de la construction en terre.....	15
I.7 Les essais d'identification sur terrain.....	16
I.7.1 Examen visuel et essai au toucher.....	16
I.7.2. Essai de morsure .....	16
I.7.3. Examen à l'odeur .....	17
I.7.4. Essai du lavage des mains .....	17
I.7.5. Test de la bouteille .....	17
I.7.6. L'essai de l'éclat .....	18
I.7.7. Test de la pastille.....	18

I.7.8. Test du cigare .....	19
I.7.9. Test du retrait .....	19
I.7.10. L'essai du 8 .....	20
I.7.11. Test carazas .....	20
I.8 Les essais d'identification au laboratoire .....	21
I.8.1. Essai granulométrique .....	21
I.8.2. Sédimentométrie .....	22
I.8.3. Granulométrie optimale .....	22
I.8.4. Limites d'atterberg .....	23
I.8.5. Essai proctor .....	24
I.8.6. Essai de compression .....	25
I.8.7. Résistance à la flexion .....	25
I.8.8. Essai d'absorption .....	26
I.8.9. Test d'érosion .....	26
I.8.10. Essai du mouillage séchage .....	26
I.9. Valeurs caractéristiques .....	27

*Chapitre 99 : Généralités sur les techniques de stabilisation du matériau terre*

II.1 Introduction .....	28
II.2 Définition .....	28
II.3 Objectifs de la stabilisation .....	28
II.4 Les procédés de la stabilisation .....	29
II.4.1 La stabilisation mécanique .....	29
II.4.2 La stabilisation physique .....	30
II.4.3 La stabilisation chimique .....	30
II.5 Les matériaux de stabilisation .....	31
II.5.1 Stabilisation par fibres .....	31
II.5.2 Stabilisation par le bitume .....	32
II.5.3 Stabilisation par les résines .....	32
II.5.4 Stabilisation au ciment .....	33
II.5.4.1. Mécanisme de stabilisation par le ciment .....	33
II.5.4.2 Mise en œuvre .....	34
II.5.4.3 Effet sur l'absorption totale .....	34
II.5.5 Stabilisation à la chaux .....	35

II.5.5.1 Mécanismes de stabilisation .....	36
II.5.5.2 Mise en œuvre.....	37
II.5.5.3 Effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé.....	38
II.5.6 Stabilisation par les bio-Polymères.....	39
<i>Chapitre 999 : Synthèse sur la stabilisation du matériau terre par les Biopolymères</i>	
• III.1 Introduction .....	40
III.2 Inventaire des recettes traditionnelles.....	40
III.3 Classification des biopolymères .....	41
III.4 Polysaccharides .....	41
III.4. 1 Composants principaux des polysaccharides .....	42
III.4.2 Bouse de vache et crottin.....	43
• Matière première .....	43
• Principes et interprétation.....	44
III.4.3 Papier washi .....	44
• Matière première .....	44
• Principes et interprétation.....	45
III.4.4 Jus végétaux gélatineux .....	45
III.4.4.1 Eau gluante .....	46
• Matière première .....	46
• Principes et interprétation.....	46
III.4.4.2 Cactus, agave, aloès.....	47
• Matière première .....	47
• Principes et interprétation.....	47
III.4.4.3. Amidon.....	48
• Matière première .....	48
• Principes et interprétation.....	48
III.4.4.4 Gomme naturelle : .....	49
III.5 Les lipides.....	50
III.6 Les protéines.....	51
III.7 Autres molécules complexes .....	51
III.8. La stabilisation aux liants organiques.....	52
III.8.1. Effet sur les résistances mécaniques.....	52
III.8.2. Effets sur la durabilité .....	54

III.8.3 Stabilisation de la terre crue par le gel d’Aloe-verra.....	56
III.8.3.1 Identification de la matière première utilisée pour cet éco matériau.....	57
• La terre .....	57
• La paille.....	57
• Le gel d’aloe Vera .....	57
III.8.3.2.Préparation des matériaux .....	58
III.8.3.3. Préparation du mélange .....	59
III.8.3.4. Le malaxage.....	59
III.9.Essais effectués et discussion des résultats.....	60
III.9.1 Effet sur le retrait volumique.....	60
III.9.2 Effet sur le comportement mécanique .....	60
III.9.3. Effet sur l’absorption capillaire .....	61
III.9.4. Effet sur les caractéristiques thermiques .....	61
III.9.5. Autres travaux de recherches.....	62
<b>Conclusion générale</b> .....	<b>64</b>
<b>Références bibliographiques</b>	

## **Liste des figures**

Figure I. 1:vue du ksar de tadjemout et jardins de Tadjemout.....	5
Figure I. 2:Bâtiments construits pendant la période coloniale à l'ancien ksar : (a) : Bab el -oued (b) : Ford Mourand, (c) : école laïque,(d) :Eglise saint Hilarion .....	5
Figure I.3:Les différents constituants de la terre crue.....	7
Figure I. 4:Représentation de différents types de sols sur un diagramme ternaire .....	7
Figure I. 5:Fuseau des indices de plasticité de terre utilisable pour les BTC .....	9
Figure I. 6 : Courbe granulométrique des différentes classes du sol .....	10
Figure I.7 : Techniques de construction en terre crue.....	13
Figure I.8:Adobe .....	14
FigureI. 9:Pisé .....	14
Figure I. 10: Torchis .....	15
Figure I.11:la bauge .....	15
Figure I.12 : Bloc de terre comprimée .....	16
Figure I.13 : test de la pastille.....	20
Figure I.14 :test du cigare .....	21
Figure I.15:test du retrait.....	21
Figure I.16:Test Carazas .....	23
Figure I.17:Essai de sédimentation .....	24
Figure I.18:Limites d'Atterberg, appareil de Cassangre et boudin de terre .....	25
Figure 19: essai proctor.....	27
Figure I.20 : Essai de compression .....	27
Figure 21: Schéma de l'essai d'absorption capillaire .....	28
Figure II.22:Les fibres .....	34
Figure II. 23:les bitumes .....	35
Figure II. 24:les résines.....	35
Figure II.25:Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression .....	36
Figure II.26:Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciment .....	38
Figure II.27:La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et l'âge (Ausroads,1998). .....	42
Figure III. 28:shéma représentant la lignine et la cellulose d'une plante.....	46
Figure III. 29: bouse de vache et crottin .....	47
Figure III. 30: papier washi.....	48
Figure III. 31:Les fibres du papier washi sont utilisées dans la couche de finition de cet enduit.....	48
Figure III. 32:L'eau devient instantanément gluante au contact des feuilles fougas: il se forme un gel, véritable colle des argiles .....	49
Figure III. 33:La pulpe de l'aloë vera donne un gel translucid .....	50
Figure III.34:La farine de blé contient de l'amidon. ....	51
Figure III.35:Visibles au microscope optique, les grains d'amidon gonflent puis éclatent en présence de soude. Dans l'eau chaude, on observerait le même phénomène. ....	52

Figure III. 36:Gomme arabique .....	53
Figure III.37:Le beurre de karité est extrait des noix de karité bouillies .....	53
Figure III. 38:L'huile de lin est extraite des graines par pression à froid .....	54
Figure III.39:Caséine .....	54
Figure III.40 : Les cosses de néré sont de couleur rouge-brun foncé. ....	55
Figure III.41:La paille .....	60
Figure III. 42:Aloe Vera .....	61
Figure III.43:Retrait volumique des matériaux TP et TPA en fonction du temps .....	63

## Liste des tableaux

<i>Table 1: Caractéristiques des minéraux argileux les plus courants</i> .....	8
<i>Table 2 :Mécanismes de stabilisation</i> .....	32
<i>Table 3:Recette traditionnelle de stabilisation de la terre à travers le monde</i> .....	44
<i>Table 4:Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants organiques</i> .....	56
<i>Table 5:Effet des liants organiques sur la tenue à l'eau</i> .....	58
<i>Table 6:Résistances mécaniques du TP et TPA</i> .....	64
<i>Table 7:Sorptivités de quelques matériaux en fonction de la densité</i> .....	64
<i>Table 8:Caractéristiques thermiques tirées de la littérature.</i> .....	65

*Introduction*  
*générale*

## Introduction générale

Le secteur bâtiment par sa consommation importante d'énergie (environ 40%), compte parmi les secteurs d'industrie responsables du réchauffement climatique de notre planète. La production du ciment relève d'une industrie lourde et complexe, qui consiste à transformer le calcaire et l'argile dans des fours puissants. La chaleur qui en résulte dégage d'importantes quantités de dioxyde de carbone. Le transport et l'extraction de ces matières premières sont également sources de rejet de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Ce gaz est responsable à lui seul de 75 % de l'effet de serre qui participe au réchauffement climatique [Pacheco-Torgal et al, 2011].

Avec l'augmentation démographique et la demande d'urbanisation qui est en croissance continue, on est confronté à construire de grands nombres de logements avec des quantités massives de matériaux de construction.

Mais comment répondre à ces besoins sans aggraver le problème des *émissions de gaz à effet de serre* (GES)? A cela s'ajoute également un *épuiement* noté de certains constituants de base du béton, en l'occurrence *le sable* dit constructible.

Les arguments majeurs de la reconsidération de ce matériau de construction, après près d'un siècle d'abandon dans les pays développés au profit des matériaux cimentaires, sont ses avantages écologiques et socio-économiques ainsi que ses propriétés hygroscopiques.

En outre, dans les pays développés, le secteur des BTP produit des **millions de m<sup>3</sup>** de terres d'excavation dont la gestion est problématique car considérées comme déchets ; pouvoir les revaloriser en matériau de construction serait une solution à double avantage. Enfin, une des qualités les plus promues de la terre crue, est sa capacité hygroscopique. En effet, son aptitude à absorber et rejeter l'humidité de l'air intérieur au gré des fluctuations du microclimat du bâtiment garantit un confort intérieur passif qui permettrait **d'économiser de l'énergie**.

Des études scientifiques ont été menées sur la stabilisation de la terre crue par des liants minéraux (ciment et chaux) pour la plupart [Danso et al, 2015]. Mais, l'utilisation de ces liants minéraux dans de fortes proportions peut remettre en question le caractère écologique du matériau [Van Damme et al, 2017].

En parallèle, certaines pratiques *traditionnelles*, notamment dans les pays en voie de développement, et quelques récentes études scientifiques ont montré que l'utilisation de liants

*organiques d'origine naturelle* pouvait être une alternative plus vertueuse du point de vue environnemental aux liants minéraux [Vissac et al, 2017]. Ces produits organiques présentent une très grande diversité et donc un potentiel important d'étude scientifique à l'image de la variété de pratiques selon l'endroit du globe [Anger et al, 2013].

Les recettes employées par les bâtisseurs à travers le monde sont variées. Elles découlent de savoir-faire qui se sont transmis de générations en générations. Elles ne sont pas nécessairement optimisées et les mécanismes physico-chimiques à l'œuvre ne sont généralement pas bien connus. Ces pratiques traditionnelles méritent donc d'être mieux étudiées et caractérisées car elles représentent un vivier d'innovations pour la confection **d'enduits écologiques** autant que pour envisager des **actions de restauration et de conservation adaptées concernant le patrimoine bâti**.

Cette recherche a donc pour objectif une *remise en valeur des anciennes recettes de construction par la terre crue* en utilisant des méthodes de *stabilisation* à faible impact environnemental et à limiter la quantité de liant minéraux, en l'occurrence le ciment et la chaux, au strict nécessaire et de *vérifier que* la solution ainsi obtenue répond aux critères de durabilité et de performances mécaniques. D'autre part, nous chercherons à identifier des *biopolymères* potentiels pouvant efficacement stabiliser la terre crue pour la construction.

Enfin, outre l'introduction générale, ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- ◆ Le premier chapitre offre tous les rappels nécessaires à la compréhension du matériau terre : Constituants, classifications du sol, caractéristiques et propriétés de la terre crue.
- ◆ Le deuxième chapitre est consacré à une revue documentaire sur une multitude de techniques de stabilisation du matériau terre.
- ◆ Le troisième chapitre présente une synthèse bibliographique sur la stabilisation par les biopolymères dans la construction en terre, un type d'inventaire et de l'état de l'art sur les interactions argiles/biopolymères. Les stabilisants organiques (poly et en particulier une synthèse des travaux de recherche effectués concernant la stabilisation de la terre par le gel d'aloé-verra.
- ◆ Enfin une conclusion, suivie par les perspectives d'une étude expérimentale.

*Revue  
documentaire sur  
la construction en  
terre crue*

## **I.1 Introduction**

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, depuis plus de onze millénaires.

Ce chapitre présente des rappels nécessaires à la compréhension du matériau terre et les différentes techniques de construction qui existent et ont existé de par le monde, également l'architecture contemporaine en terre crue y est également abordée.

## **I.2 Historique de la construction en terre crue**

Il s'agit d'un des matériaux de construction les plus anciens de l'histoire de l'Humanité. D'après l'UNESCO, 20% du nombre de site enregistrés comme patrimoine mondial sont entièrement ou partiellement construits en terre (Anger et al. 2011). Ceci témoigne du riche patrimoine architectural en terre crue. Au cours des temps, la terre est apparue comme le matériau de construction privilégié par l'Homme. Car construire en terre crue permet d'exploiter le matériau que l'on a sous les pieds [Anger et al. 2011]. Il est largement admis que parmi les facteurs qui ont présidé au choix d'un site par rapport à un autre pour la fondation des établissements humains à travers l'histoire de l'humanité figurent à des degrés variables : l'eau, la défense, les facteurs économiques, les communications et les croyances. Les ksour n'échappent pas à cette logique. Dans ces régions connues pour leur aridité et où l'échelle des distances entre les différents points d'eau se Cas d'étude : le vieux ksar de Tadjemout Chapitre II 49 compte par des centaines de kilomètres, il est logique de voir la vie s'installer autour des sources d'eau. Au cours de sa longue histoire, Tadjemout a vu fleurir des jardins qui se sont adaptées à la topographie du site. Toutes les maisons étaient avec un soubassement de pierre et la partie haute en brique de terre et présentaient une cour intérieure Ces groupements de maisons autour d'un noyau, qui est à savoir une mosquée, représentaient le cœur du ksar, la création de la ville s'effectuait progressivement



Figure 1. 1:vue du ksar de tadjemout et jardins de Tadjemout

La terre peut être utilisée dans le bâtiment, comme isolant associé à la paille ou pour la rénovation, réparateur des bâtiments construits en terre, couche de finition intérieure, mur porteur, enduit intérieur [Ecoconso, 2017].



Figure 1. 2: Bâtiments construits pendant la période coloniale à l'ancien ksar : (a) : Bab el –oued (b) : Ford Mourand, (c) : école laïque, (d) : Eglise saint Hilarion

## **I.3 Généralités sur le matériau terre**

### **I.3.1 Définition**

La terre est un matériau meuble à la surface du sol, d'épaisseur variable, qui supporte les êtres vivants et leurs ouvrages et où poussent les végétaux. La terre est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terres avec une variation illimitée de leurs caractéristiques. La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Lorsqu'ils sont meubles et contiennent peu de matière organique, les niveaux superficiels des sols sont utilisables pour la construction en terre [Houben, 1996].

### **I.3.2 Constituants de la terre crue**

La terre est constituée d'un mélange en proportions variables de quatre sortes d'éléments : les graviers (5-20 mm), les sables (0.08-5 mm), les limons (2  $\mu\text{m}$ -0.08 mm), et les argiles (< 2  $\mu\text{m}$ ). Elle est composée de matériaux inertes (graviers, sables) et de matériaux actifs (silts, argiles). Les premiers jouent un rôle de squelette et les seconds celui de liant, tel un ciment. La terre a donc une structure comparable à celle du béton avec un liant différent [Houben,1996]. Les proportions des éléments constituant les terres vont déterminer leurs comportements et leurs propriétés, par exemple, lorsqu'ils sont soumis à des variations d'humidité certains changent de volume, d'autres non. Les premiers sont instables et les autres stables. Cette notion de stabilité, c'est-à-dire d'aptitude à supporter les alternances d'humidité et de sécheresse sans variations des propriétés, est fondamentale pour un matériau de construction [Doat,1979].

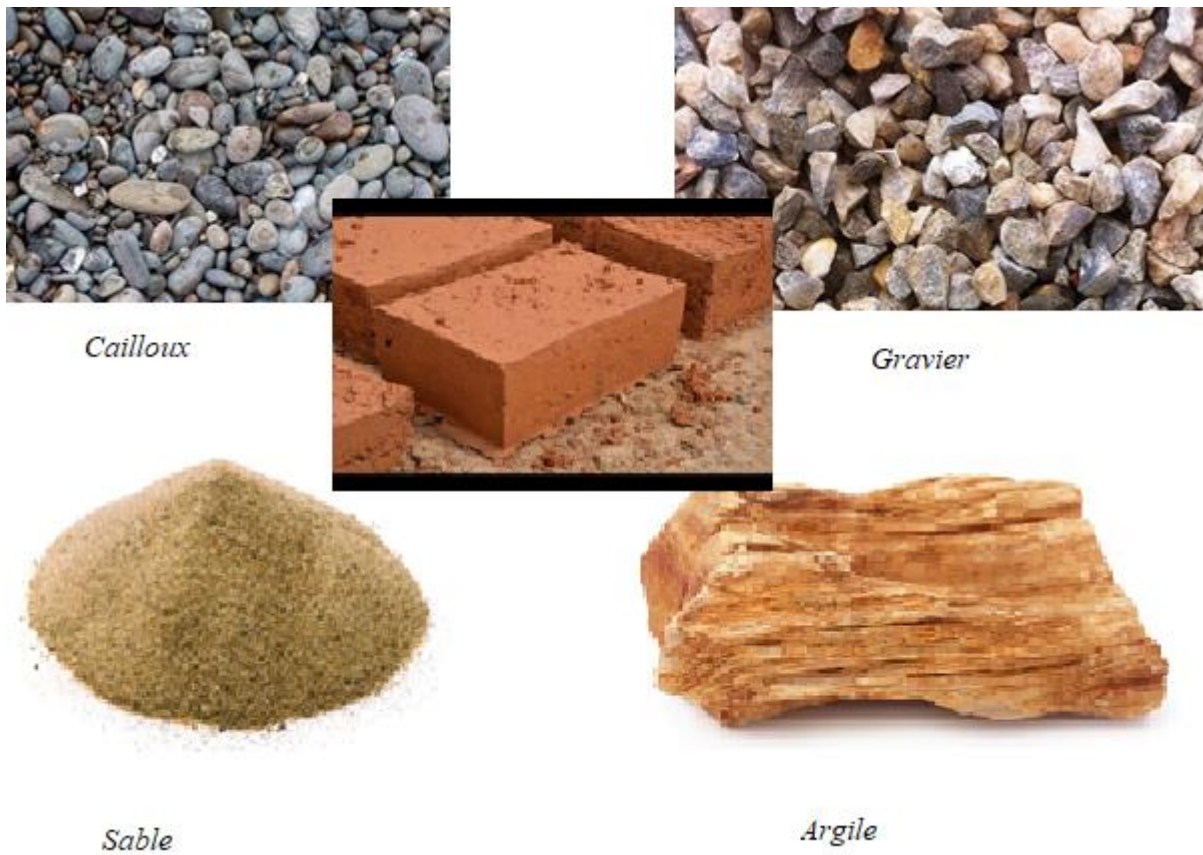


Figure I.3: Les différents constituants de la terre crue

### I.3.3 Composition granulométrique

La Figure I.4 représente les différents types de sol selon la distribution massique des grains qui le composent.

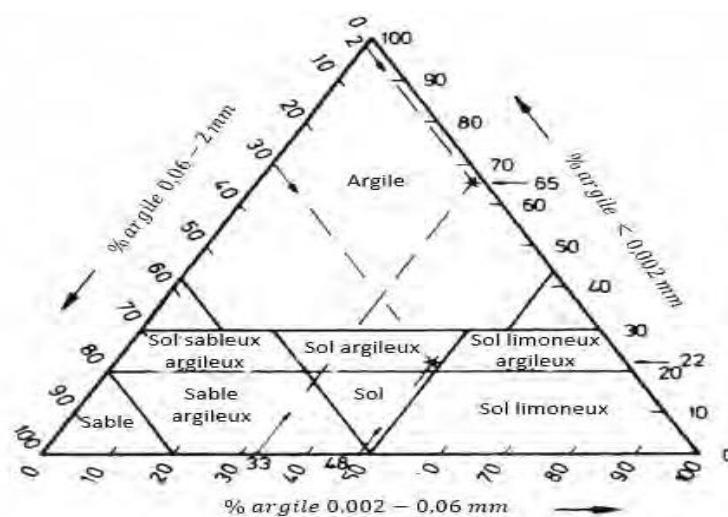
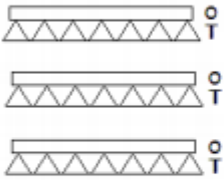
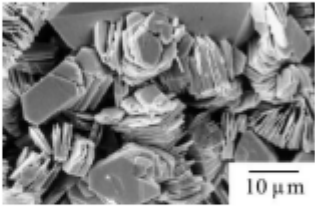
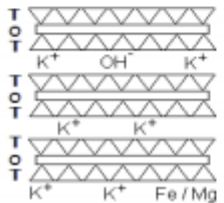
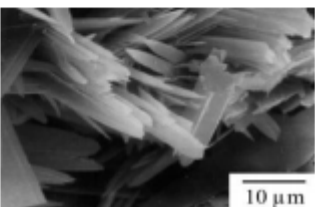
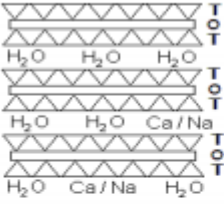
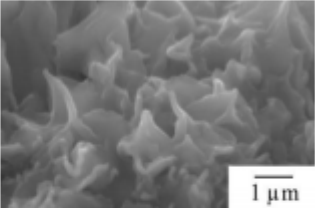
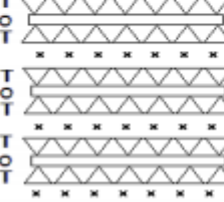
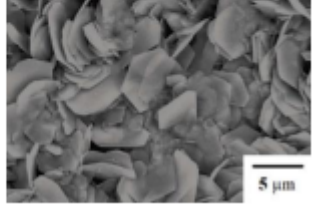


Figure I. 4: Représentation de différents types de sols sur un diagramme ternaire

La fraction argileuse est un constituant essentiel dans les sols utilisés pour la construction. Elle lui confère sa cohésion. En présence d'eau, la fraction argileuse forme une pâte qui agglomère les autres grains et forme un bloc cohérent après séchage. Le comportement du sol vis-à-vis de l'eau dépend de la proportion de sa fraction argileuse et de la nature minéralogique du ou des argiles qu'il contient.

Il existe un grand nombre de type d'argiles, mais les cinq minéraux argileux les plus courants sont présentés dans le **Tableau I.1**.

**Tableau I.1 : Caractéristiques des minéraux argileux les plus courants**

Argile	Nombre de feuillet / particule	Structure	Observation MEB
Kaolinite $Al_2O_3, 2SiO_2, 2H_2O$	100-200		
Illite $K Al_2 (OH)_2, (Al Si_3 (O, OH)_{10})$	1-10		
Smectites $2Al_2O_3, 8SiO_2, 2H_2O, n H_2O$ (Montmorillonite) (Mg, Ca), O, $Al_2O_3, 5SiO_2, n H_2O$	1		
Chlorite $Mg_5, (Al, Fe) (OH)_8 (Al, Si)_4 O_{10}$	1		

### I.3.4 Classification des sols

Plusieurs classifications des sols existent et s'appuient essentiellement sur les résultats d'essais géotechniques. L'analyse granulométrique [NF P94-041, 1995, p. 94; NF P94-057,

1992, p. 94], les limites d'Atterberg [NF P94-051, 1993] et la valeur au bleu de méthylène du sol (VBS) [NF P94-068, 1993] sont les essais géotechniques sur lesquels se basent la plupart des classifications. Les classifications les plus rencontrées sont :

- Le "American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO)"
- Le « Unified Soil Classification System (USCS) » équivalente à celle du laboratoire des Ponts chaussées (LPC),
- La classification du Guide des travaux Routiers (GTR).

La construction en terre s'appuie sur ces classifications développées pour des applications routières afin de proposer des recommandations de sols convenables aux différents types de construction. Ainsi, la norme [XP P 13-901, 2001] recommande pour la réalisation des BTC, des sols dont les caractéristiques sont inscrites respectivement dans les fuseaux **des Figure I-5 et Figure I-6**.

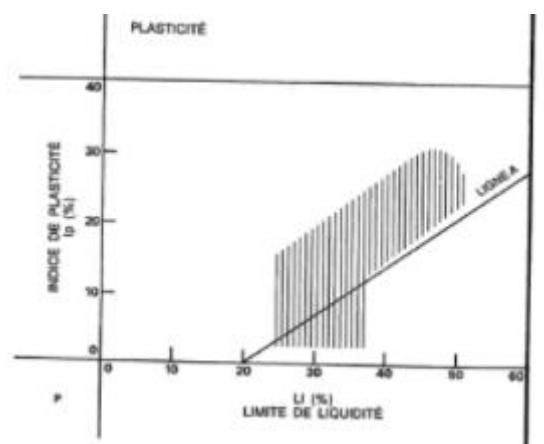


Figure I. 5: Fuseau des indices de plasticité de terre utilisable pour les BTC

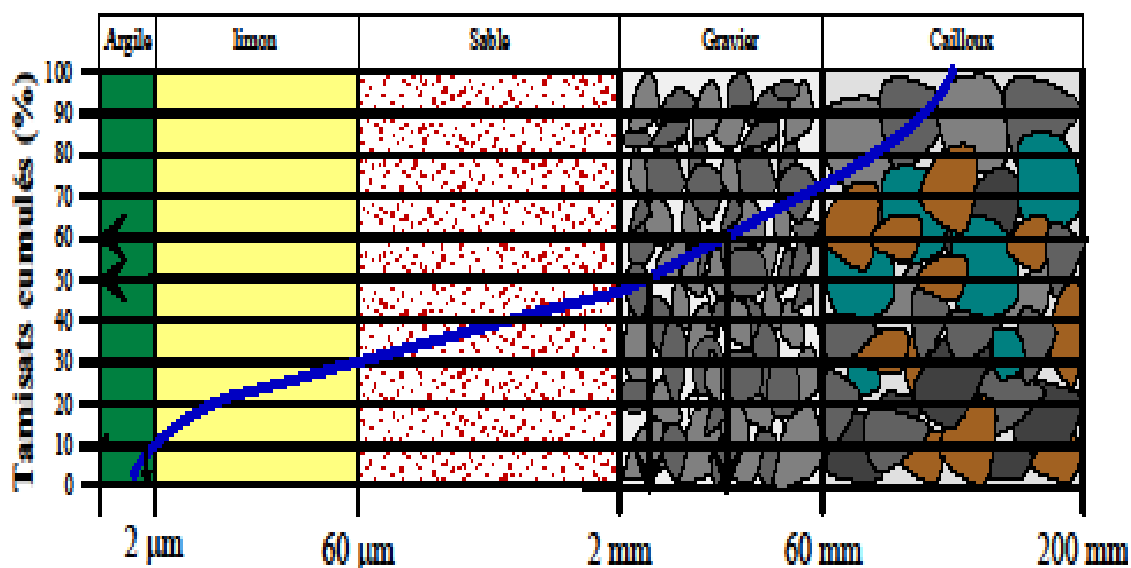


Figure I. 6 : Courbe granulométrique des différentes classes du sol

## I.4 Propriétés et caractéristiques du matériau terre

Les propriétés de la terre sont: sa **plasticité** (propriété de subir des déformations sans réaction élastique notoire), sa **compressibilité** (aptitude à se laisser compacter en fonction de son taux d'humidité), sa **cohésion** (résistance à la traction d'une éprouvette de terre crue), et sa **granularité**. La **couleur** plus ou moins rouge de la terre est essentiellement due à sa teneur plus ou moins importante en oxyde de fer, Ces oxydes n'ont que peu d'impact sur les qualités physiques du matériau de construction

### I.4.1 Masse Volumique de la terre crue

La masse volumique est liée à la quantité de matière gazeuse présente dans la terre. Elle s'étale de 1 200 kg/m<sup>3</sup> à 1 600 kg/m<sup>3</sup> pour de la terre foisonnée (dans un tas de terre par exemple). Cette valeur augmente suite à une mise en œuvre par compactage (pisé par exemple). On obtient alors idéalement une masse volumique de 2 000 kg/m<sup>3</sup>.

Les mélanges amendés en paille sont plus légers : en terre-paille, la masse volumique est de 300 kg/m<sup>3</sup> à 1 300 kg/m<sup>3</sup>.

### 1.4.2 Comportement mécanique de la terre crue

La terre crue est un matériau s'apparentant aux bétons. Du point de vue mécanique, elle fonctionne comme ces derniers, uniquement en compression (les valeurs de résistance à la traction, à la flexion et au cisaillement sont très faibles). La terre mise en œuvre de manière monolithique (pisé, bauge) a généralement une résistance à la compression d'environ 20 kg/cm<sup>2</sup> (2 MPa). Les éléments de maçonnerie (adobes) ont des résistances à la compression pouvant aller de 20 kg/cm<sup>2</sup> à 50 kg/cm<sup>2</sup> (2 MPa à 5 MPa). L'adjonction d'éléments fibreux (paille par exemple) permet de conférer au mélange une certaine résistance en traction, flexion et cisaillement, mais qui reste tout de même négligeable.

Les briques de terre crue sont d'autant plus dures que la terre utilisée est argileuse. La paille hachée, lorsque la pâte est laissée en repos avant séchage, augmente la résistance du matériau par la production d'acide lactique dû à la fermentation.

### 1.4.3 Comportement thermique de la terre crue

Contrairement aux idées reçues, la terre n'est pas un matériau isolant. En revanche, elle possède une excellente inertie thermique. Ceci se traduit par une régulation des différences de températures intérieures (pour l'été : plus frais le jour car le mur se rafraîchit la nuit, rendant cette fraîcheur le jour). Voici quelques valeurs, pour une terre à 1 500 kg/m<sup>3</sup> :

- Conductivité : 0,75 W/m.°C ;
- chaleur spécifique : 900 J/kg.°C ;
- capacité thermique : 1 350 kJ/m<sup>3</sup>.°C

• effusivité thermique : 1,00 J/(racine carrée de la capacité thermique).m<sup>2</sup>.°C. Soit, pour du pisé à 2 000 kg/m<sup>3</sup>, une capacité thermique de 1 800 kJ/m<sup>3</sup>.°C.

Pour des briques de terre crue filée (densité : 2,00) : conductivité = 1,05 W/m.°C, inférieure à celle de la brique cuite (1 à 1,35) ; capacité = 2000 KJ/m<sup>3</sup>.°C, supérieure à celle de la brique cuite (1360 à 2100).

### 1.4.4 Comportement hydrique de la terre crue (L'échange avec le milieu extérieur) :

Les matériaux en terre crue ont un régulateur hygrothermique, ils peuvent absorber jusqu'à 3% de leur poids en vapeur d'eau (évolution de leur teneur en eau de 4% à 7%, ce qui

permet d'avoir une inertie hydrique non négligeable en ce qui concerne le confort) Un mur de 1m<sup>2</sup> et de 22cm d'épaisseur (0.22m<sup>3</sup>) pèse 440 Kg peut donc absorber jusqu'à 13.2 Kg d'eau.

L'échange dynamique du mur et de son environnement est permanente, l'humidité en excès dans l'air est absorbée, stockée et restituée lorsque l'air ambiant s'assèche (maintien d'une hygrométrie constante).

La terre :

- peut absorber jusqu'à 3% de son poids en vapeur d'eau (évolution de sa teneur en eau de 4% à 7%, ce qui permet d'avoir une inertie " hydrique " non négligeable en ce qui concerne le confort)
- évite l'excès d'humidité qui provoque des rhumatismes
- évite-le manque d'humidité qui provoque des problèmes oculaires, inflammatoires et respiratoires.

#### **1.4.5 Comportement phonique et acoustique de la terre crue**

Les matériaux en terre crue permettent une isolation phonique exceptionnelle leur performances acoustiques sont assez bonnes à très bonnes et cela varient en fonction de la densité des matières premières utilisées.

La terre possède :

- un indice de correction acoustique à 500 Hz : 50 dB pour un mur de 20 cm en briques de terre crue filée
- une protection contre les nuisances associées aux ondes électromagnétiques générées par les appareils et circuits électriques

#### **1.4.6 Comportement Ignifuge de la terre crue**

La résistance au feu indique le temps durant lequel, lors d'un feu, un élément de construction (mur, plancher, plafond ...) conserve ses propriétés physiques et mécaniques. Les matériaux en terre crue résistent bien au feu.

## I.5 Techniques de construction en terre crue

Le matériau de construction que l'on nomme terre crue, boue séchée, terre battue, pisé, torchis, adobe, une très grande variété de techniques de constructions .Il a servi à construire les premières villes connues. Aujourd'hui, le 1/3 de l'humanité, peut-être d'avantage, vit dans des habitats de cette sorte.



Figure I.7 : Techniques de construction en terre crue

### I.5.1 Adobe

L'adobe est le nom le plus communément utilisé des briques séchées au soleil. Les briques d'adobe sont moulées à partir d'une terre argileuse humide. A l'origine, ces briques étaient formées à la main. Plus tard, elles sont fabriquées manuellement à l'aide de moules à formes prismatiques variées en bois ou en métal. Actuellement, des machines sont également employées.



Figure I.8: Adobe

### **I.5.2 Le pisé**

La terre est compactée dans les coffrages (Traditionnellement en bois, mais actuellement ils peuvent être en métal), couche après couche, par une dame (manuelle ou pneumatique).



*Figure I. 9: Pisé*

### **I.5.3 Le torchis**

Une structure en colombages et claies de bois est Hourdée avec une ou plusieurs couches de terre. Cette terre argileuse, amendée de paille ou d'autres Fibres, constitue les parois de la bâtisse.



*Figure I. 10: Torchis*

### **I.5.4 La bauge**

La bauge est un système de construction monolithique en terre crue empilée. La terre est dans un état plastique, généralement mélangée à des fibres (végétales ou animales). Les surfaces verticales sont dressées par découpe après un court temps de séchage, alors que le matériau n'est pas trop dur



*Figure I.11: la bauge*

### **I.5.5 Le bloc de terre comprimée (BTC)**

Pendant longtemps, on a fabriqué des blocs de terre à l'aide de moules dans lesquels on comprimait la terre à l'aide d'un petit pilon ou en rabattant avec force un couvercle très lourd. Ce procédé a été mécanisé et on utilise aujourd'hui des presses de toutes sortes. Les produits obtenus sont extrêmement variés.



*Figure I.12 : Bloc de terre comprimée*

## I.6 Les Avantages de la construction en terre

La terre crue ne contribue pas à la déforestation grâce à l'utilisation de ressources biologiques pour la cuisson des matériaux.

- ✚ Elle ne consomme aucune énergie non renouvelable comme le pétrole et le gaz, que ce soit au traitement et à la fabrication d'origine des matériaux; ou dans l'application, contrairement à la fabrication du ciment, de la chaux et d'autres matériaux liants conventionnels.
- ✚ L'exploitation de la strate à même les chantiers permet une économie d'énergie énorme de transport de matériaux. Cela ne contribue pas à la dégradation du paysage, contrairement à l'extraction de minéraux et de minerais qui creuse collines et sites à ciel ouvert. Une grande quantité de terre extraite au cours de grands travaux d'utilité publique, comme les routes, peut être recyclée et utilisée pour la construction (ce qui permet une distribution décentralisée très facile).
- ✚ La terre ne contribue pas à la réduction de ressources en agrégat, tels les graviers et le sable qui sont extraits de carrières ou de cours d'eau dans des sites insulaires ou des lagons, mettant ainsi en péril la balance écologique de ces environnements naturels.
- ✚ La terre n'utilise que très peu d'eau, ressource essentielle pour la vie des populations.
- ✚ La terre ne produit aucun déchet industriel ou chimique et a en plus l'avantage d'être presque entièrement recyclable non seulement l'utilisation de la terre non cuite ne pollue pas, mais elle garantit aussi l'absence d'effets nocifs dans le cadre de la vie quotidienne, tels l'absence d'émissions gazeuses et d'autres produits chimiques toxiques, émissions radioactives etc.
- ✚ La texture de la surface, la couleur, la forme et la luminosité de la terre non cuite en fait un matériau attrayant pour bâtir sans détruire l'environnement naturel [MEBARKI Houa. 2012-2013].

La terre crue est souvent comparable en prix, et même plus économique, que les technologies concurrentielles. Elle ne nécessite aucun coût majeur de transport grâce à sa légère infrastructure de fabrication.

- ✚ Elle ne nécessite qu'un mode de fabrication simple et des outils qui sont accessibles à un large groupe de maçons et de bâtisseurs individuels.
- ✚ Elle appartient à l'héritage architectural traditionnel de nombreux pays tout en utilisant des matériaux locaux, et permet aux populations de prendre en charge la

production de leur environnement et de contrôler leur habitat [Berrehail.Tahar. 2009]

Aussi, l'eau est l'ennemi inconditionnel de la terre crue ; par ses actions répétitives sur le matériau, il cause beaucoup de dégâts (érosion de la surface, écoulement partiel, insalubrité due à un état humide durable, murs creusés en leurs bases...

Pour faire face à ses difficultés, on peut retrouver 3 catégories de solutions : conceptuelles, couvrir de revêtements, ajout de stabilisant.

## I.7 Les essais d'identification sur terrain

### I.7.1 Examen visuel et essai au toucher

Les deux premiers essais sont *l'examen visuel et l'essai au toucher*. Ils permettent d'identifier la granulométrie du sol en examinant à l'oeil nu et au toucher la terre susceptible d'être employée. L'examen visuel permet d'identifier les graviers et les gros sables tandis que tous les grains d'un diamètre inférieur à 0,08mm seront associés à la fraction fine et seront identifiés au toucher. En effet, la limite de visibilité à l'oeil nu correspond à cette dimension. Pour réaliser le second test, on effrite une petite quantité de terre entre les doigts et la paume de la main. Si l'on éprouve une certaine rugosité au toucher et s'il n'y a aucune cohésion entre les grains même après humidification de l'échantillon, la terre sera désignée comme sableuse. Si l'on ressent une faible rugosité et qu'après humidification, l'échantillon devient moyennement plastique, la terre sera silteuse. Si la terre présente des mottes résistant à l'écrasement à l'état sec et qu'elle devient plastique et collante lorsqu'on l'humidifie, la terre sera argileuse. Bien entendu, on ne se limitera pas à analyser l'échantillon mais on observera également toute la zone environnante : les constructions en terre déjà présentes, la terre utilisée pour les routes avoisinantes, l'épaisseur des différentes couches de sol, etc. [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995].

### I.7.2. Essai de morsure

Pour *l'essai de morsure*, on écrase un morceau de terre entre les dents. Si les particules crissent d'une façon désagréable entre les dents, c'est que le sol est sablonneux. Si elles crissent entre les dents mais d'une manière non désagréable, c'est que le sol est limoneux. Si par contre les particules ne crissent pas du tout mais qu'elles semblent lisses et farineuses

entre les dents et qu'elles happent la langue, c'est qu'on est face à un sol argileux [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al, 1979].

### I.7.3. Examen à l'odeur

L'essai suivant est *l'examen à l'odeur*. Il permet de détecter la présence de matière organique. Pour ce faire, il faut respirer la terre que l'on vient d'extraire. Si l'odeur qui ressort évoque le « moisi », c'est que la terre est de nature organique. Si l'on chauffe ou humidifie la terre, cette odeur sera amplifiée [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al, 1979].

### I.7.4. Essai du lavage des mains

*L'essai du lavage des mains* permet quant à lui de confirmer s'il s'agit d'un sol argileux, silteux ou sableux. Pour cela, on mouille légèrement la terre et on s'en enduit les mains. Ensuite, on essaye de se nettoyer les mains. Si elles se rincent facilement, c'est que la terre est sableuse. Si les mains ne sont pas trop difficiles à laver et si l'aspect de la terre est pulvérulent, elle est silteuse. Si par contre, les mains sont difficiles à rincer et que l'on a une sensation savonneuse au lavage, la terre est argileuse [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979].

### I.7.5. Test de la bouteille

Le *test de la bouteille* permet de mesurer la propreté des sables et graviers ainsi que la proportion des grains inertes et des fines contenus dans la terre. Comme expliqué précédemment avec la loi de Stokes, les graviers et les sables se retrouvent au fond de la bouteille tandis que les silts et les argiles seront au sommet. Pour réaliser ce test, il faut remplir une bouteille transparente avec de la terre jusqu'au  $\frac{1}{4}$  de sa hauteur. Les autres  $\frac{3}{4}$  sont ensuite remplis avec de l'eau. On agite le mélange durant 1 minute puis on le laisse reposer durant 1 heure afin que l'argile puisse réagir avec l'eau. On agite alors à nouveau durant 2 minutes puis on laisse le mélange décanter environ  $\frac{3}{4}$  d'heure jusqu'à ce qu'on observe une couche d'eau propre horizontale au sommet de la bouteille. On constate que les sables se sont déposés au fond de la bouteille. Au-dessus de ceux-ci, on retrouve les silts et puis la couche des argiles. Les débris organiques, quant à eux, flottent sur l'eau. Afin d'analyser les résultats de ce test, on va mesurer les différentes couches de dépôts et les comparer à la hauteur totale des sédiments, équivalant à 100%. On obtient donc le pourcentage de chaque fraction

granulaire de la terre. Il faut faire attention au fait que les résultats sont légèrement faussés suite à l'expansion des matières argileuses et silteuses au contact de l'eau : on obtiendra donc un pourcentage de fractions fines un peu plus important qu'en réalité [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979].

### 1.7.6. L'essai de l'éclat

L'essai de l'éclat se réalise en coupant en deux une boulette de terre légèrement humide à l'aide d'un couteau. Si la surface entaillée semble terne, c'est que la terre est plutôt silteuse. Si par contre la surface apparaît brillante, c'est que la terre est argileuse plastique [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979].

### 1.7.7. Test de la pastille

Le test de la pastille permet de tester la résistance à sec de la terre. Pour réaliser ce test, il faut tout d'abord tamiser la terre avec un tamis de maille de 2mm. On ajoute de l'eau jusqu'à obtenir une terre à l'état plastique puis on la laisse reposer une heure. On moule alors cinq pastilles de 3cm de diamètre et de 1cm d'épaisseur à la main ou à l'aide d'un moule pour plus de précision. On attend alors que la terre soit sèche. À ce moment, on peut déjà évaluer s'il y a présence d'un phénomène de retrait ou non. On évalue ensuite la résistance de la terre à la rupture. Pour cela, on essaye d'écraser la pastille entre le pouce et l'index. Si la terre est facile à réduire en poudre et si l'on n'a pas observé de retrait, c'est que la terre est sableuse. Si la terre est facile à réduire en poudre mais que par contre, on a décelé un retrait, c'est que la terre est silteuse. Finalement, s'il est très difficile de réduire la terre en poudre et si le retrait observé est important, c'est que la terre est argileuse [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al., 1979].



Figure 1.13 : test de la pastille

### I.7.8. Test du cigare

Avec le *test du cigare*, on peut déterminer la cohésion du sol. Pour cela, on passe la terre dans un tamis de maille de 5mm afin d'éliminer toutes les particules de diamètre supérieur puis on ajoute la quantité d'eau nécessaire à l'obtention d'une terre plastique. On laisse le mélange reposer une heure afin que l'argile réagisse avec l'eau puis on fabrique un boudin de 3cm de diamètre et de 20cm de longueur à l'aide de la paume des mains. On le pousse ensuite délicatement dans le vide. Le « cigare » va se rompre sous son propre poids. On mesure alors la longueur de rupture. Si le bout de cigare rompu mesure moins de 5cm, c'est que la terre est sableuse. Si le cigare se rompt après 15cm, c'est que la terre est argileuse. Si le bout tombé mesure entre 5 et 15cm, on considère que la terre est adaptée aux techniques de construction en terre. Ce test est à répéter trois fois afin de s'assurer de la justesse des résultats obtenus [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995 ; Doat et al, 1979].



Figure I.14 :test du cigare

### I.7.9. Test du retrait

Le *test du retrait* linéaire se réalise à l'aide d'une boîte en bois de 60cm de long et de 4cm de profondeur. On la remplit de terre avec une teneur en eau optimale qu'on tasse dans les angles puis on aplanit la surface. On laisse la terre sécher durant plusieurs jours (minimum 3 jours au soleil ou 7 jours à l'ombre). Une fois ce délai passé, on mesure le retrait total de l'échantillon. Plus la terre étudiée sera argileuse et plus le retrait obtenu sera important et moins la terre sera adaptée à la construction [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995].



Figure 1.15: test du retrait

### I.7.10. L'essai du 8

L'essai du 8 (également appelé essai de cohésion ou essai à la traction humide) fut inventé par l'architecte allemand Niemeyer et permet de mesurer la cohésion de la terre ainsi que sa résistance en traction. Pour le réaliser, il faut avant tout éliminer les grains de diamètre supérieur à 2mm. Avec la terre ainsi obtenue, on constitue une boule de terre de 5cm de diamètre à l'état humide et homogène. On la laisse tomber d'une hauteur de 2m sur une surface lisse et dure. Si la partie qui s'aplatit mesure 5cm, c'est que la terre a la consistance requise pour le test. On remplit avec cette terre un moule en forme de 8 en trois couches. Chacune de ces couches est bien damée dans le moule. On démoule ensuite immédiatement la terre en laissant tomber le moule sur une surface dure d'une hauteur de 10cm. Le huit obtenu est accroché par sa partie supérieure à un appareil de mesure. On vient ensuite suspendre à la partie inférieure du huit un récipient qui recevra la charge de rupture. Ce test est recommencé 3 fois afin de faire la moyenne des mesures et ainsi obtenir la résistance en traction [Horsch & de Paoli, 2014 ; Guillaud & Houben, 1995].

### I.7.11. Test carazas

Le dernier test facilement réalisable permettant d'identifier les propriétés idéales du matériau à mettre en oeuvre a été mis au point par l'architecte **Wilfredo Carazas-Aedo**. Il a donc créé un tableau, appelé *test Carazas*, représentant l'influence qu'ont les proportions des différentes phases (solide, liquide et gazeuse) composant la terre sur son comportement (Fig.I. ) ci-dessous. Il s'agit donc de comparer différents blocs de terre qui ont été mis en oeuvre dans un même moule cubique en bois mais avec des quantités d'eau et d'air différentes. Ainsi, la terre est mise en oeuvre à l'état sec, humide, plastique, visqueux et liquide. Afin de faire varier la teneur en air, on compacte la terre de façons différentes : moule rempli simplement, terre

tassée ou encore compactée. On obtient alors des cubes d'aspects différents qui expliquent les interactions existant entre les phases solide, liquide et gazeuse. La terre se présente donc soit sous forme d'un « tas pulvérulent sans cohésion, soit comme un bloc cohérent, soit comme une pâte, soit comme une boue, etc. » [Anger & Fontaine, 2009 : p. 111].

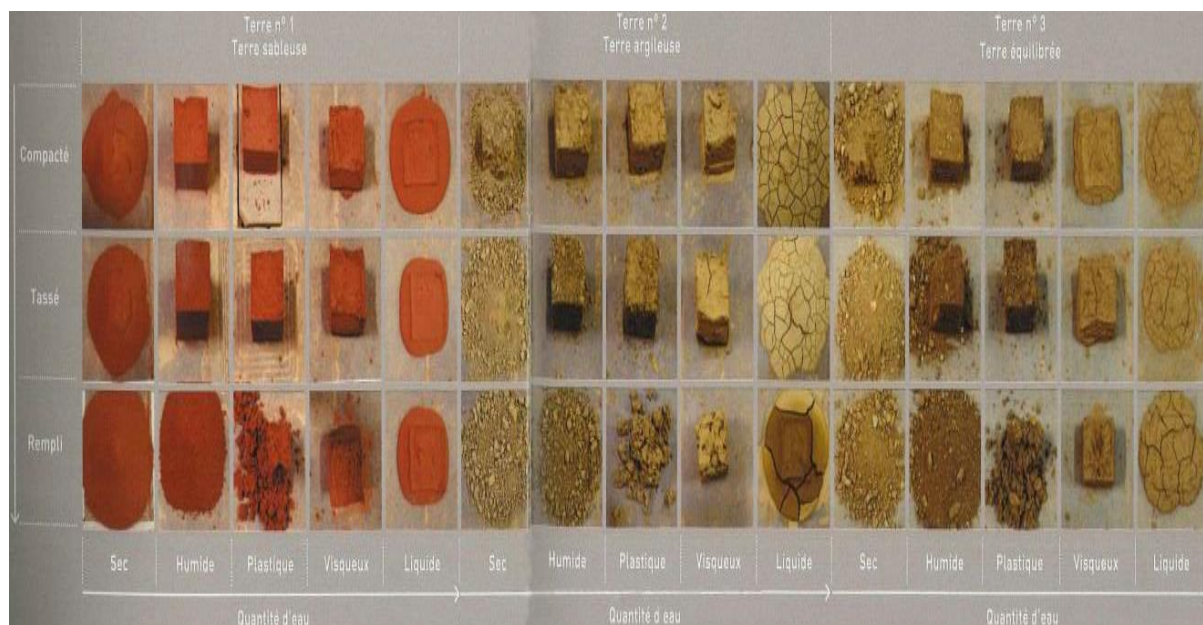


Figure I.16: Test Carazas

Une fois ces 11 tests réalisés, on peut facilement dire si la terre conviendra ou non à l'édification d'un bâtiment. Mais dans certains cas, des essais supplémentaires en laboratoire sont exigés [Anger & Fontaine, 2009 ; Horsch & de Paoli, 2014].

## I.8 Les essais d'identification au laboratoire

### I.8.1. Essai granulométrique

Le premier test réalisé en laboratoire est *l'essai granulométrique*. Pour celui-ci, la terre sera simplement passée dans plusieurs tamis aux mailles de tailles différentes, superposés par ordre d'ouverture décroissant. On pourra ainsi déterminer les différents éléments constituant le sol (graviers, sables, limons et argiles) et leur quantité respective en pesant après dessiccation les différents refus des tamis. Avec les résultats obtenus, on peut tracer sur un diagramme la courbe granulométrique de la terre. On notera la grosseur des grains en abscisse et le pourcentage des tamisats cumulés en ordonnée, exprimant « la proportion en poids par

rapport au poids de l'échantillon sec, de grains dont la grosseur est inférieure à la grosseur portée en abscisse » [Doat et al, 1979 : p. 168].

### 1.8.2. Sédimentométrie

Le second test est celui de la *sédimentométrie*. Il correspond en quelque sorte au *test de la bouteille* expliqué ci-avant. Il sert à mesurer les teneurs en particules fines en utilisant la propriété de différence de vitesses de chute des particules en suspension dans l'eau, exprimée par la loi de Stokes. Pour réaliser cet essai, il faut conserver les grains traversant le tamis de 0,1mm d'ouverture qui ont été recueillis au test précédent et puis on suit le même processus que celui du test de la bouteille, mais dans une éprouvette graduée dans ce cas-ci. On peut alors calculer les proportions des grains de tailles différentes (Doat et al., 1979).

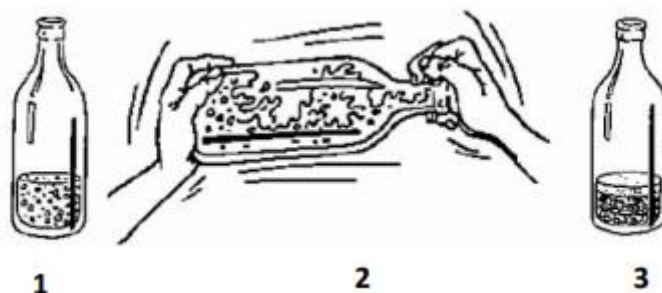


Figure 1.17: Essai de sédimentation

### 1.8.3. Granulométrie optimale

L'essai de la *granulométrie optimale* permet de comparer la courbe granulométrique de la terre analysée à la courbe optimale, encadrée de ses courbes limites inférieures et supérieures. Cette courbe idéale est la courbe qui permet de tirer le meilleur parti des qualités des éléments du sol. Elle est tracée à partir du regroupement des spécifications granulométriques de la terre. La courbe granulométrique doit être contenue dans le fuseau limite et être la plus proche possible de la courbe idéale. Elle doit également être quasiment parallèle aux courbes limites et à la courbe idéale. Si la courbe répond à ses trois critères, il n'y aura pas de problèmes pour construire avec cette terre. Si par contre elle n'y répond pas, on peut tout de même construire à l'aide cette terre mais il faudra auparavant résoudre d'importants problèmes [Doat et al., 1979].

### I.8.4. Limites d'Atterberg

En géotechnique, les **limites d'Atterberg** définissent à la fois un indicateur qualifiant la plasticité d'un sol, mais aussi l'essai qui permet de définir ces indicateurs. Cet essai a été établi par l'agronome suédois [Albert Atterberg](#).

La teneur en eau d'un sol peut en effet beaucoup varier au cours des opérations de terrassements.

Pour la fraction fine (graviers exclus), la cohésion tient à la présence d'eau : parfaitement sec, le matériau serait cohérent. Au-dessus d'une certaine teneur (**limite de plasticité**), on peut le pétrir en forme de boudin, de boulette ou de fil. Pour une teneur plus forte (**limite de liquidité**), il forme un liquide, visqueux, qui ne conserve pas la forme qu'on lui a donnée. La détermination, soigneusement normalisée, de ces deux teneurs caractéristiques appelées limites d'Atterberg, est un élément important d'identification, et permet déjà de prévoir certaines propriétés.

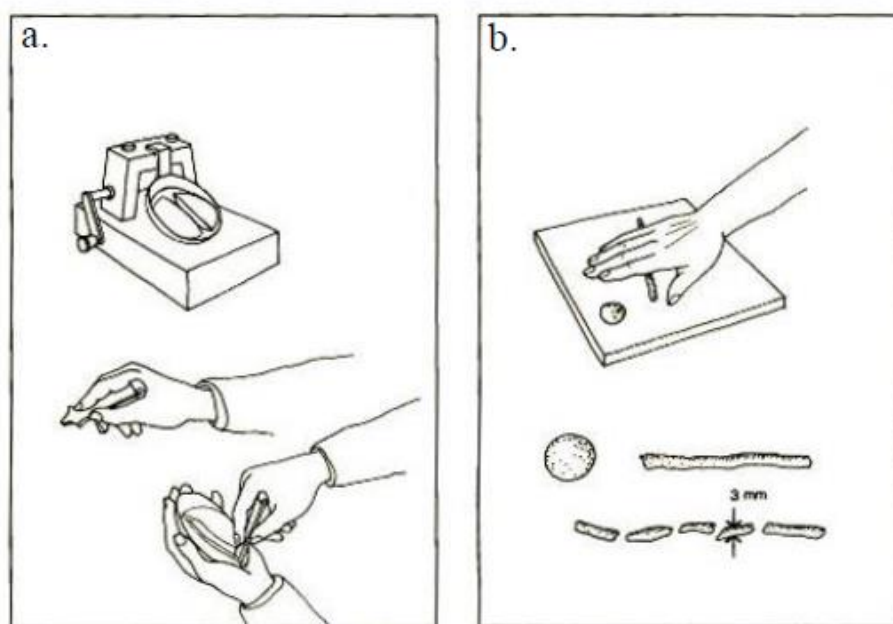


Figure I.18: Limites d'Atterberg, appareil de Cassangre et boudin de terre

Entre l'état plastique et l'état solide, on retrouve la limite de plasticité  $W_p$ . Elle correspond à la teneur en eau que contient un petit boudin de terre de 3mm de diamètre lorsqu'il se rompt en morceau (**Fig. 19.b**). Avec la limite de liquidité et la limite de plasticité, on peut calculer l'indice de plasticité  $I_p$  du sol, équivalent à  $I_p = W_l - W_p$ . Si le résultat est compris entre 5 et

10, la plasticité est faible. S'il se situe entre 10 et 20, la plasticité est moyenne et si le résultat est supérieur à 20, la plasticité est forte. La limite de retrait se situe entre l'état solide avec retrait et l'état solide sans retrait. Elle correspond à la teneur en eau qu'il ne faut pas dépasser pour que le volume reste constant, c'est-à-dire la teneur en eau limite à laquelle tous les grains sont encore en contact. La limite d'absorption  $W_a$  correspond quant à elle à la teneur en eau maximale qui peut pénétrer dans la terre. Si cette dernière limite est inférieure à la limite de retrait, le matériau se trouve à l'abri du gonflement, ce qui est préférable pour la construction. Afin d'avoir une idée du gonflement et du retrait du sol, il faut calculer le coefficient d'activité  $C_a$  qui est le rapport entre  $I_p$  et le pourcentage de grains inférieurs à  $2\mu\text{m}$  :

$$C_a = \frac{I_p}{\% \text{ argiles } (\varnothing < 2\mu\text{m})}$$

Le degré d'activité sera décrété comme inactif si  $C_a$  est inférieur à 0,75. Il sera d'activité moyenne si  $C_a$  est compris entre 0,75 et 1,25 et actif si compris entre 1,25 et 2. Si  $C_a$  est supérieur à 2, on dira que le degré d'activité est très actif. Il est plus avantageux d'utiliser une terre inactive car elle ne nécessitera pas l'emploi supplémentaire d'un stabilisant [Doat et al., 1979 ; Guillaud & Houben, 1995].

### 1.8.5. Essai proctor

L'essai Proctor permet de déterminer la teneur en eau optimale (T.E.O.) de compactage. Cette teneur en eau est celle qui permet d'assurer un enrobage de chaque grain du sol afin qu'ils puissent se réarranger de la façon la plus compacte possible. La T.E.O. coïncide avec la masse volumique la plus grande qu'il est possible d'atteindre avec l'énergie de compactage mise en oeuvre. L'interprétation des résultats obtenus est la suivante : « si la masse volumique sèche obtenue à la T.E.O. est comprise entre 1650 et 1760 kg/m<sup>3</sup>, le résultat est assez médiocre, entre 1760 et 2100 kg/m<sup>3</sup>, le résultat est très satisfaisant, le matériau assez argileux. Entre 2100 et 2200 kg/m<sup>3</sup>, le résultat est excellent, le matériau riche en gros éléments. Entre 2200 et 2400 kg/m<sup>3</sup>, le résultat est exceptionnel » [Doat et al., 1979 : p. 178]. La T.E.O. peut également être estimée rapidement sur chantier. Pour cela, il suffit de laisser tomber sur une surface dure une boule de terre d'une hauteur de 1,10m. Si celle-ci se décompose en 4 ou 5 morceaux, c'est que la teneur en eau est correcte. Par contre, si elle s'aplatit sans se

désagréger, c'est qu'elle contient trop d'eau et si elle s'émiette, c'est qu'elle en contient trop peu [Doat et al., 1979].



Figure 19: essai proctor

### I.8.6. Essai de compression

L'essai de compression se réalise sur 5 échantillons afin de faire la moyenne des résultats. Les éprouvettes cylindriques de 5cm de diamètre et de 5cm de haut sont passées à l'étuve après un premier séchage naturel. Une fois un poids constant atteint, on place une fine couche de plâtre sur les faces inférieures et supérieures du cylindre afin d'assurer une planéité parfaite. Ils sont ensuite placés dans une machine spécifique et sont soumis à une charge pouvant aller de 500 à 1500 kg [Doat et al., 1979].



Figure I.20 : Essai de compression

### I.8.7. Résistance à la flexion

La résistance à la flexion (ou module de rupture) se calcule par l'intermédiaire d'une charge concentrée, équivalente à une poussée de 250 kg par minute, appliquée sur 5 échantillons placés chacun à leur tour sur des supports parallèles espacés de 25cm. La charge à la rupture de chaque échantillon est notée. Le module de rupture se calcule comme suit :

$$R = \frac{3}{2} \times 25 \times \frac{P}{l \times e^2}$$

Où "R" est le module de rupture en kg/cm<sup>2</sup>, "25" la distance d'appui en cm, "l" la largeur de l'échantillon en cm et "e" l'épaisseur de l'échantillon en cm. On calcule ensuite la moyenne des 5 valeurs obtenues. Celle-ci équivaut au module de rupture de la terre testée [Doat et al., 1979].

### I.8.8. Essai d'absorption

L'essai d'absorption se réalise également sur 5 échantillons passés à l'étuve au préalable afin d'obtenir un poids constant. On pose ceux-ci sur une surface poreuse saturée d'eau en permanence, dans une atmosphère humide. Après 7 jours, on mesure l'augmentation du poids des échantillons. On l'exprime en pourcentage du poids sec. On calcule la moyenne des 5 résultats : celle-ci est la valeur d'absorption de la terre étudiée [Doat et al., 1979].

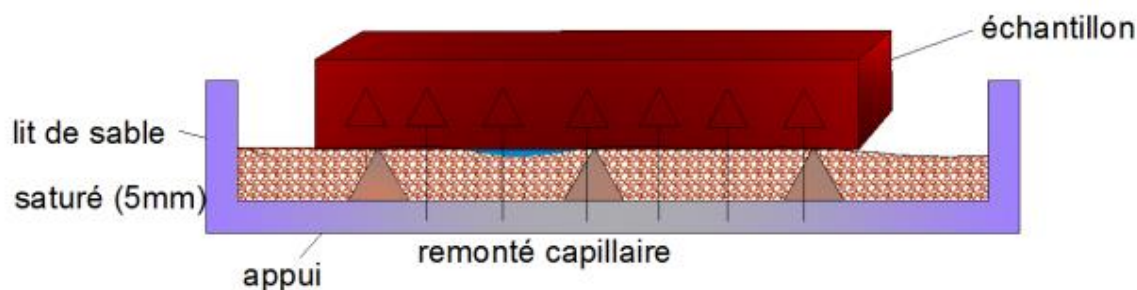


Figure 21: Schéma de l'essai d'absorption capillaire

### I.8.9. Test d'érosion

L'érosion est un test indicatif qui est calculé sur un bloc de terre placé verticalement sur une grille, 17cm devant un jet d'eau horizontal. Celui-ci arrose le bloc avec un jet horizontal d'une pression de 1,6 kg/m<sup>2</sup> durant deux heures. On mesure alors la perte de poids de l'échantillon ainsi que la profondeur des trous [Doat et al., 1979].

### I.8.10. Essai du mouillage séchage

Le dernier essai est celui du mouillage séchage. Il se fait à l'aide de trois éprouvettes : la première servira à calculer les variations du volume et de la teneur en eau tandis que les deux autres serviront à étudier la perte de poids de la terre après chaque cycle. Après séchage à

l'air, les échantillons sont soumis à 12 cycles de mouillage et de séchage. Un cycle correspond aux étapes suivantes : les échantillons sont d'abord immergés durant 5 heures, après quoi le premier échantillon est pesé et mesuré tandis que les deux autres sont brossés puis pesés. Ensuite, ils sont tous trois séchés à l'étuve à 60°C durant 42 heures. Après ces 12 cycles, les éprouvettes sont séchées à 100°C jusqu'à atteindre un poids stable. La perte de poids admissible après les 12 cycles ne doit pas excéder 10% [Doat et al., 1979].

## **I.9. Valeurs caractéristiques**

Ces tests de laboratoire permettent de connaître les caractéristiques de la terre disponible avec plus de précision qu'avec les tests réalisés sur chantier. À l'heure actuelle, il existe très peu de normalisation pour l'utilisation de la terre comme matériau de construction. On retrouve seulement quelques normes pour l'adobe et pour la terre damée stabilisée qui précisent la résistance minimale et la durabilité du matériau terre. Des essais expérimentaux réalisés par différents organismes de pays industrialisés permettent d'avoir tout de même une idée des performances techniques du matériau terre en général. Ces caractéristiques peuvent être comparées aux résultats obtenus aux essais énoncés précédemment afin de s'assurer de la fiabilité de ceux-ci.

[Doat et al. 1979] recommandent les caractéristiques suivantes pour une construction à un seul niveau :

- Résistance à la compression : 2 kg/cm<sup>2</sup>
- La résistance à la compression humide vaut environ la moitié de la résistance à sec
- Résistance à la traction : 0
- Résistance au cisaillement : 0,3 kg/cm<sup>2</sup>
- Module d'Young : 7000 à 70 000 kg/cm<sup>2</sup>
- Perméabilité : 1x10<sup>-6</sup> cm/sec
- Dilatation thermique : 0,012 mm/m par °C
- Coefficient de conduction thermique : 0,44 à 0,57 Kcal/h.m.°C
- Chaleur spécifique : 0,2 Kcal/kg
- Déphasage horaire pour un mur de 40cm : 8 à 12 heures
- Amortissement phonique pour un mur de 40cm et une fréquence de 500 Hz : 56 dB

*Généralités sur les  
techniques de  
stabilisation du  
matériau terre*

## **II.1 Introduction**

Les constructions en terre présentent une vulnérabilité élevée face aux phénomènes d'érosion liés aux pluies, vents ou gels. L'enjeu est donc de les préserver en utilisant des techniques de stabilisation. La stabilisation a pour objectif d'améliorer la dureté (i.e., résistance aux chocs et aux frottements, réduction de l'effritement) et l'imperméabilité. Cependant un stabilisant ne remplace pas l'action du liant principal qui est l'argile (**Rigassi, 1995**).

## **II.2 Définition**

Le Centre des Nations Unies pour les établissements humains a défini la stabilisation d'un sol comme étant, la modification des propriétés d'un système terre-eau-air pour obtenir des propriétés permanentes compatible avec une application particulière (**United Nations, 1992**).

Mais la stabilisation est un problème complexe car de très nombreux paramètres interviennent. Il faut en effet connaître : les propriétés de la terre, les améliorations envisagées, l'économie du projet, les techniques de mise en œuvre de la terre choisie pour le projet et la maintenance du projet réalisé (**Houben, 2006**).

## **II.3 Objectifs de la stabilisation**







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

- l'obtention de meilleures caractéristiques mécaniques de la terre (augmenter les résistances à la compression, à la traction et au cisaillement),
- la réduction de la porosité et les variations de volume (réduire le retrait et le gonflement à l'eau),
- l'amélioration de la résistance à l'érosion du vent et de la pluie (réduire l'abrasion de surface et la perméabilité à l'eau).

## II.4 Les procédés de la stabilisation

Le tableau ci-dessous résume les différents procédés de stabilisation,

Tableau II.1 : Mécanismes de stabilisation [Guillaud & Houben, 1995].

MOYENS DE STABILISATION DES TERRES REMANIÉES						
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 OMNI-DIRECTIONNELLE QUI RÉDUIT LE MOUVEMENT	
		FIBRES				
	STABILISANTS PHYSICO-CHIMIQUE	LIANTS	CHIMIQUE	ENCHAINER	CRÉER UN SQUELETTE INERTE QUI S'OPPOSE À TOUT MOUVEMENT	
				LIAISONNER	FORMER DES LIAISONS CHIMIQUES STABLES ENTRE LES CRISTAUX D'ARGILE	
		HYDROPHOBANTS		IMPERMÉABILISER	ENTOURER LES GRAINS DE TERRE D'UN FILM IMPERMÉABLE ET BOUCHER LES PORES ET CANAUX	
			HYDRO-FUGER	ÉLIMINER AU MAXIMUM L'ABSORPTION ET ADSORPTION D'EAU		

### II.4.1 La stabilisation mécanique

Elle consiste à modifier les propriétés de la terre en agissant sur sa structure - une manipulation mécanique permet d'évacuer l'air. Elle se fait en pétrissant la terre pour la rendre plus homogène et en la comprimant ; et plus particulièrement sur sa porosité, perméabilité, densité et compressibilité (Houben et Guillaud, 1989). Au niveau de la porosité, la stabilisation réduit le volume des vides entre les particules ainsi que les variations de volume du matériau (gonflement-retrait à l'eau). En ce qui concerne la perméabilité, la stabilisation agit en colmatant les vides. Cela améliore la résistance à l'érosion (du vent et de la pluie). La stabilisation améliore les liens entre les particules, ce qui augmente la résistance à la compression (Rigassi, 1995).

## **II.4.2 La stabilisation physique**

Elle consiste à modifier la texture de la terre en mélangeant des grains de tailles différentes (**Rigassi, 1995**).

- Un ajout de fibres animales, végétales, synthétiques permet de donner une armature à la terre. Ce moyen de stabilisation améliore la résistance à la traction et au cisaillement, et réduit le retrait du matériau terre en créant un réseau de fibres omni-directionnel ;
- Une imperméabilisation de la matière en remplissant les pores et les fissures par une matière insensible à l'eau telle que le bitume, ou par une matière gonflante comme la bentonite qui au contact avec l'eau va s'expanser et empêcher l'accès aux pores ;

## **II.4.3 La stabilisation chimique**

Elle consiste à mélanger la terre à d'autres matériaux ou des produits chimiques (**Rigassi, 1995**).

- Un ajout de « liant » à la terre. Celui-ci agit en enrobant les grains et en empêchant leurs mouvements. C'est généralement le ciment portland ou certaines colles et résines ;
- Un ajout d'une matrice qui interagit avec la fraction argileuse. En fonction des charges positives ou négatives des argiles ou de leur composition chimique, certains stabilisants chimiques (**polymères**, floculants, quelques acides) peuvent lier les plaquettes argileuses entre elles ou jouer le rôle de catalyseur de cette liaison.
- D'autres stabilisants tels que la chaux interagissent avec les particules argileuses par réaction pouzzolanique. Ils réagissent avec l'argile en formant un nouveau matériau insoluble et inerte par précipitation. La cinétique de cette dernière réaction dépend de la quantité et de la qualité d'argile ;
- Un ajout des produits chimiques (acides, amines, résines) pour réduire la sensibilité des plaquettes d'argile à l'eau (**CRAterre et al, 1979 ; Houben et Guillaud, 1989 ; Rigassi, 1995**).

## **II.5 Les matériaux de stabilisation**

### **II.5.1 Stabilisation par fibres**

**Les fibres** sont utilisées pour apporter une armature à la terre. Elles sont d'origine animale (poils et crins de bétail), végétale (les pailles, les balles de céréales, le chanvre, les fibres de noix de coco, de palmier, ...) ou synthétique (acier, fibres de verre, cellophane). La paille est la fibre la plus employée pour stabiliser la terre. Elle s'adapte à l'état plastique, visqueux, et même à la compression.

L'ajout des fibres selon des auteurs (**Houben et Guillaud, 1989**) permet :

- d'empêcher la fissuration au séchage en répartissant les tensions dues au retrait de l'argile dans toute la masse du matériau ;
- d'accélérer le séchage grâce aux canaux de fibres qui agissent comme un drainage de l'humidité vers l'extérieur. Inversement la présence de fibres augmente l'absorption d'eau;
- d'alléger le matériau en allégeant sa masse volumique et en améliorant ses propriétés d'isolation ;
- d'augmenter la résistance à la traction »

Il convient selon (**Houben et Guillaud, 1989**) d'éviter, une quantité trop importante de fibres pour ne pas diminuer les points de contact entre les fibres et la terre et diminuer donc la résistance du matériau. L'orientation des fibres est importante : les fibres doivent être placées dans toutes les directions.



*Figure II.1: Les fibres*

## **II.5.2 Stabilisation par le bitume**

**Le bitume** est un produit composé d'au moins 40% d'hydrocarbures lourds et de filler. Il doit être mélangé à des solvants (gasoil, kérosène, naphta) ou à l'eau pour être utilisé comme stabilisant. Il permet d'imperméabiliser en entourant les grains de terre d'un film imperméable et boucher les pores et fissures. L'emploi du bitume comme stabilisant reste limité (**Houben et Guillaud, 1989**).



*Figure II. 2:les bitumes*

## **II.5.3 Stabilisation par les résines**

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



*Figure II. 3:les résines*

## II.5.4 Stabilisation au ciment

Le ciment est sans doute l'un des meilleurs stabilisants pour BTC. L'ajout de ciment, 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.

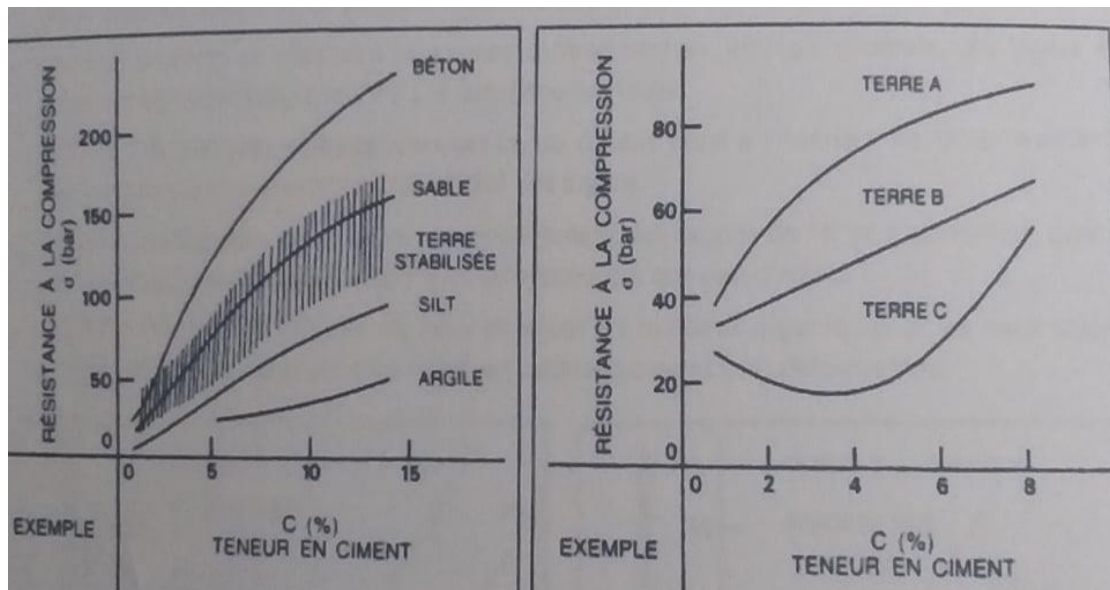


Figure II.4: Influence de la teneur en ciment sur la résistance à la compression

### II.5.4.1. Mécanisme de stabilisation par le ciment

Dans la terre, le ciment hydraté réagit de deux façons : réaction avec lui-même (formation d'un mortier de ciment pur hydraté) ; et réaction avec le squelette sableux (mécanisme classique du mortier).

Réaction avec l'argile selon trois phases :

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. Il en résulte en fait trois structures mêlées:
  - une matrice inerte sableuse liée au ciment,

- une matrice d'argile stabilisée,
- une matrice de terre non stabilisée.

#### **II.5.4.2 Mise en œuvre**

**Pulvérisation** : La qualité d'une stabilisation au ciment exige un mélange intime des constituants.

**Malaxage** : La bonne répartition du ciment et l'homogénéité du matériau stabilisé sont conditionnés par le malaxage

**Moulage, mise en forme** : Le matériau sera compacté juste après le malaxage, avant le début de la prise du ciment et à une teneur en eau contrôlée, proche de l'optimum.

**Séchage** : La résistance d'une terre ciment croit avec l'âge. Pendant cette période, le matériau sera maintenu en ambiance humide, à l'abri du soleil et en prenant garde au vent. La durée de cette cure de séchage humide augmentera la résistance du matériau.

#### **II.5.4.3 Effet sur l'absorption totale**

Les résultats de l'étude de Meukam, montrent que l'ajout du ciment a un effet bénéfique sur l'absorption d'eau du bloc de terre stabilisée. **La figure II-5** montre la variation du taux d'absorption d'eau en fonction du temps à différentes teneurs en ciment. L'auteur a constaté que le taux d'absorption de l'eau diminue avec l'augmentation de la teneur en ciment [Meukam,2004].

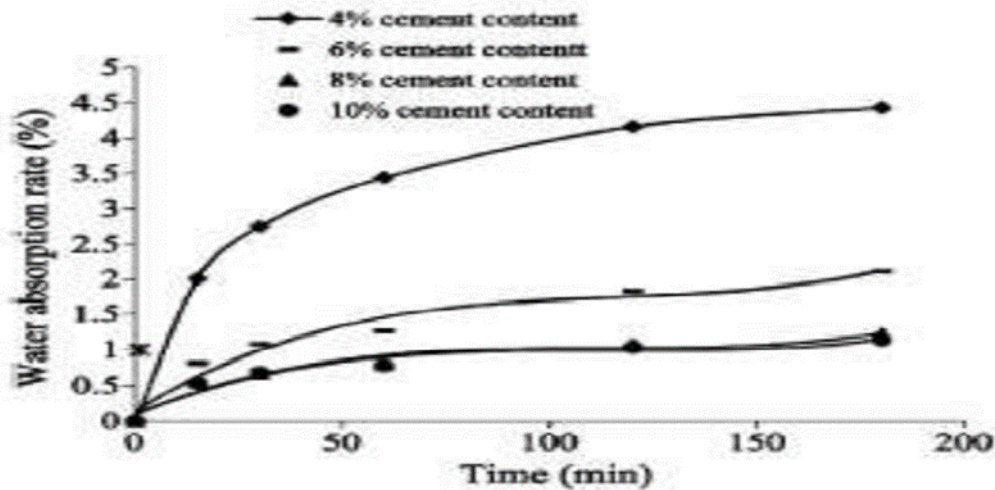


Figure II.5: Variation du taux d'absorption d'eau dans le temps du bloc de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciment

### II.5.5 Stabilisation à la chaux

Il semble que l'emploi systématique de la chaux pour la stabilisation des sols ait été seulement développé à partir de 1920, aux U.S.A. Produit d'une technologie simple ; en la mélangeant au sol humide, on introduit des ions  $\text{Ca}^{++}$  et  $\text{OH}^-$ . Un échange cationique se produit quand les ions calcium remplacent les cations du sol comme le magnésium, le sodium, le potassium et l'hydrogène. Des ponts se forment à court terme reliant entre elles les particules fines qui se trouvent ainsi agglomérées. Celles-ci sont peu sensibles à l'eau et possèdent une bonne résistance mécanique.

Ainsi, depuis les années soixante du siècle passé, on redécouvre les bienfaits de la chaux pour la construction, et surtout pour la rénovation du bâti ancien.

La chaux possède des caractéristiques physiques et techniques garantissant une construction saine qui permet l'évaporation (**Guillaud, 2010**) ;

- Son principal avantage est sa perméabilité à la vapeur d'eau de l'humidité contenue dans les murs. l'évaporation est favorisée par la chaleur du soleil et par le vent sur les façades extérieures ;
- Souple et élastique, elle limite l'apparition de fissures dans les enduits ;

- Elle résiste bien au gel (grâce à sa structure poreuse, l'eau peut se dilater) et aux agents atmosphériques agressifs;
- Elle a un bon pouvoir isolant (plus encore si on incorpore dans le mortier de chaux des particules de lin ou de chanvre);
- Elle possède des propriétés antiseptiques souvent mises à profit dans les étables ( on pratiquait le chaulage des murs pour les protéger des salissures, moisissures, larves d'insectes et bactéries );
- Hygroscopique, elle participe à réguler les variations d'humidité de l'air intérieur;

Un mortier de chaux dure des siècles, [Hubert Guillaud 2010.].

### II.5.5.1 Mécanismes de stabilisation

- Les théories de la stabilisation à la chaux suggèrent cinq mécanismes de base :
- **Absorption d'eau** : en présence d'eau, dans une terre humide, la chaux vive subit une réaction d'hydratation qui s'accompagne d'un important dégagement de chaleur environ 300kcal/kg de chaux vive.
- **Echange cationique**: lorsque l'on ajoute de la chaux à une terre humidifiée, celle-ci est saturée d'ions de calcium. Apparaît alors un phénomène d'échange de cations : les ions de calcium se substituent aux cations échangeables du complexe de la terre tels que magnésium, sodium, potassium et hydrogène. L'importance de cet échange cationique dépend de la quantité de cations échangeables présents dans la capacité totale d'échange cationique de la terre (Houben et Guillaud, 2006)
- **Floculation et agglomération** : du fait de l'échange de cations et de l'augmentation de la quantité d'électrolytes dans l'eau interstitielle, les particules de la terre flocculent et s'agglomèrent .Il y a augmentation de la taille des agrégats de la fraction fine la texture et la structure changent.
- **Carbonatation** : la chaux ajoutée à la terre réagit avec le dioxyde de carbone de l'air pour former des ciments carbonatés médiocres .cette réaction consomme une partie de la chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques
- **Réaction pouzzolanique** : c'est de loin le mécanisme le plus important qui influence principalement la stabilisation à la chaux .les propriétés de résistance du matériau résultent pour l'essentiel d'une dissolution des minéraux argileux

dans un environnement alcalin produit par la chaux et de la recombinaison de la silice et de l'alumine des argiles avec le calcium pour former des silicates complexes d'aluminium et de calcium qui cimentent les grains entre eux.

- La chaux doit être ajoutée à la terre en quantité suffisante afin de produire et de maintenir un ph élevé nécessaire à la dissolution des minéraux argileux, et pour une période suffisante qui permettra une réaction de stabilisation effective. (**Houben et Guillaud (2006)**).

### II.5.5.2 Mise en œuvre

- **Pulvérisation** : cette opération est importante et doit être effectuée avec grand soin. plus l'argile sera finement brisée ,plus la chaux sera active dans son action d'attaque de l'argile. L'opération peut être difficile car l'argile présente une forte cohésion .une terre trop humide peut être et brisée avec de la chaux vive. La stabilisation sera efficace si au moins 50 % des agglomérats argileux sont broyés au  $0 < 5\text{mm}$ .
- **Malaxage** : il devra être très soigné pour assurer un mélange intime de la terre et de la chaux .Pour les terres très plastiques ,on pourra procéder en deux étapes ,espacées d'un à deux jours , qui permettront à la chaux d'ameublir les mottes ;ce procédé en deux étapes peut néanmoins réduire l'action de la chaux sur la résistance .on peut contrôler l'homogénéité du mélange en appréciant l'unité de sa teinte ,aucune trainée de chaux non incorporée dans la terre ne devra apparaître ,( **Houben et Guillaud (2006)** ) .
- **Temps de retenue** : si la mise en œuvre se fait par voie humide, le mélange peut être laissé avantageusement au repos après le malaxage. On attendra au moins deux heures pour des dosages en chaux supérieurs au point de fixation de la chaux ; huit à seize heures sont préférables .L'effet est négligeable sur lamasse volumique sèche mais les résistances obtenues sont supérieures. Si l'on procède par voie plastique ,on a intérêt à laisser réagir le mélange de terre et de chaux vive ou éteinte pendant plusieurs semaines .c'est notamment le cas pour les enduits qui deviennent plus onctueux et collants .
- **Compression** : la masse volumique sèche est très sensible au compactage, surtout pour des dosages en chaux élevés. La teneur en eau de compactage

sera proche de l'optimum, du côté humide, après un temps de retenue suffisant du mélange (plus long pour les dosages élevés).

- La réaction exothermique provoquée par la chaux vive consomme près de 1% de teneur en eau par % de chaux vive ajoutée. on corrigera donc la teneur en eau pour approcher la T.E.O. lors de la deuxième étape de malaxage (**Houben et Guillaud, 2006**)
- **Cure de séchage** : On constate une augmentation de la résistance à la compression avec l'allongement du délai de cure. Ce phénomène s'étend sur plusieurs semaines et persiste pendant de long mois, évoluant d'autant mieux dans une ambiance chaude et humide. Les produits de terre stabilisés à la chaux peuvent être très avantageusement exposés à de haute température (>60°C). Une cure de séchage sous le soleil et sous un film de plastique ou sous un tunnel de tôle permet cette élévation de la température et de l'humidité relative.

Des recherches menées à l'université du Danemark ont montré que l'on obtient de très bons produits avec une cure de 24 h en chambre de haute pression de vapeur à 60-97°C et à 100% de H.R. (**Houben et Guillaud, 2006**)

### **II.5.5.3 Effet sur la résistance mécanique du matériau stabilisé**

La résistance en compression simple augmente considérablement avec l'utilisation de la chaux pour la stabilisation des sols (Akpokodje, 1985; Symons, 1999)

D'après Ausroads (Ausroads, 1998), des teneurs élevées en chaux ne donnent pas nécessairement des résistances initiales élevées. **La figure II-6** montre la variation de résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps. Il indique que le gain de résistance précoce (résistance à 7 jours) est faible, alors qu'après 28 jours il est significatif

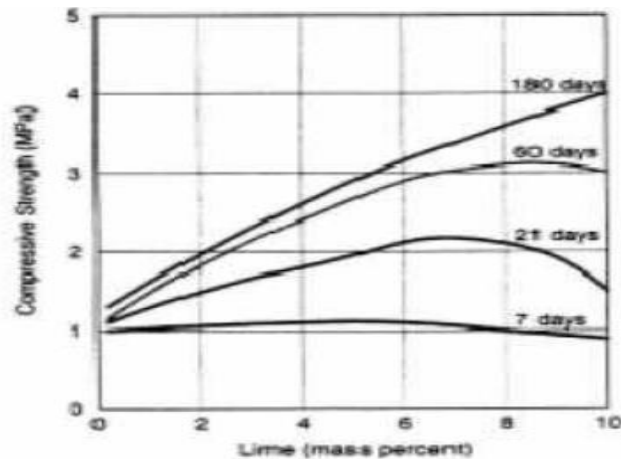


Figure II.6: La variation de la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et l'âge (Ausroads, 1998).

## II.5.6 Stabilisation par les bio-Polymères

L'affinité des argiles avec la matière organique n'est pas nouvelle. La terre est le substrat privilégié des plantes et, dans les sols, les argiles se lient avec la matière organique sous la forme de complexes argilo-humiques. Cette affinité s'applique également dans le champ de la construction en terre quand le matériau est renforcé par l'ajout de matière organique d'origine végétale (fibres, feuilles, écorces, fruits, graines, huiles, gommés, cires, etc.) ou animale (sang, excréments et urines, caséine du lait, poils et crins, etc.).

*Synthèse sur la  
stabilisation du  
matériau terre  
par les  
Biopolymères*

### III.1 Introduction

Il existe plusieurs recettes traditionnelles utilisant des composés organiques naturels pour stabiliser la terre crue comme matériau de construction. Ces ingrédients très divers, parfois semblables d'un continent à l'autre, d'origine animale ou végétale, apportent à la terre une meilleure résistance à la fissuration lors du séchage, une meilleure résistance à l'eau de pluie ou à l'érosion, une meilleure résistance mécanique, ou encore ils peuvent en faciliter l'application, par une texture plus souple ou une meilleure capacité d'adhésion.

Ce sont ces **biopolymères**, issus du vivant, qui font l'intérêt de notre recherche. Ils sont regroupés en quatre parties distinctes : les **polysaccharides**, les **lipides**, les **protéines** ainsi qu'une catégorie comprenant d'autres **molécules** complexes [Aurélien Vissac et al, 2012].

### III.2 Inventaire des recettes traditionnelles

Les recettes traditionnelles employées par les bâtisseurs à travers le monde sont très variées. Le travail d'inventaire à l'origine de cette synthèse cible les pratiques qui consistent à consolider la terre crue par l'ajout de matière d'origine végétale ou animale. Cette consolidation s'effectue grâce à l'affinité des molécules du vivant avec les argiles et à leur interaction à l'échelle moléculaire.

Bien souvent, les **biopolymères** capables de consolider la terre ne sont pas directement disponibles. En effet, la matière organique est extrêmement structurée et hiérarchisée et une étape de préparation préalable est nécessaire pour libérer ces molécules. Les étapes de préparation des adjuvants, lorsqu'elles sont décrites en détail, permettent de mieux comprendre les interactions organominérales et de supposer ou vérifier les mécanismes physico-chimiques de la stabilisation organique [Aurélien Vissac et al, 2017]. Dans notre cas nous nous intéressons qu'aux effets sur les propriétés mécaniques et de durabilité.

### III.3 Classification des biopolymères

Dans le cahier de recette, les stabilisants d'origine animale ou végétale sont répertoriés en fonction de la nature de la molécule responsable de l'amélioration de la cohésion et des mécanismes physico-chimiques mis en œuvre. Quatre catégories se distinguent : les polysaccharides, les lipides, les protéines et les autres molécules complexes.

Le **tableau III.1** ci-dessous regroupe quelques recettes traditionnelles utilisées dans diverses régions dans le monde.

*Tableau III.1: Recette traditionnelle de stabilisation de la terre à travers le monde*

Stabilisant organique	type	Pays	Exemple
<b>les Polysaccharides</b>	Cellulose et lignine	japon	Papier washi fermenté
	Jus végétaux gélatineux	Pérou	Jus de Cactus fermenté
	Amidon	France	Fécule de pomme de terre
	Gommes naturelles	mali	Gomme arabique
Les lipides	Huiles et graisses	mali	Beurre de karité
	cire	France	Cire de carnauba
Les protéines	globulaires	Maroc	Blanc d'œuf
	fibreuses	France	Colle de peau
Autres molécules	tanins	Burkina	Gousses d'acacia
	résines	brésil	latex

### III.4 Polysaccharides

La catégorie des polysaccharides regroupe toutes les recettes à base de fibres végétales, de bouse de vache ou crottin de cheval, de gomme, jus et gel végétaux divers (cactus, agave, racines et feuilles gluantes, algues, etc.), de farine de céréales et

de tubercules. Les polysaccharides sont de longues chaînes de sucres qui peuvent avoir un rôle de structure (cellulose et chitine) ou de stockage de l'énergie (amidon).

La plupart des stabilisants utilisés traditionnellement font partie de cette famille. Il en existe une très grande diversité. Ce sont des glucides complexes, de longues chaînes de sucres simples souvent linéaires, parfois ramifiées. Ces polymères sont généralement de très longues molécules.

Les polysaccharides consolident la terre en formant des armatures microscopiques entre les particules d'argile. Les longues chaînes de sucres complexes sont capables de relier plusieurs particules minérales entre elles, créant en quelque sorte un réseau. Par ailleurs, au contact de l'eau, les polysaccharides forment généralement des gels, modifiant la consistance du mortier à l'état frais. La pose de l'enduit est parfois facilitée par l'ajout de ces stabilisants.

### **III.4. 1 Composants principaux des polysaccharides**

La cellulose et la lignine sont les principaux composants (Fig III.1) d'une plante. Elles représentent plus de 70% de la biomasse.

La **cellulose**, la matière organique la plus abondante sur terre, est une macromolécule en forme de fibre, une longue chaîne dont les maillons sont des sucres.

La **lignine** est un biopolymère formant un réseau tridimensionnel complexe qui n'appartient pas à la famille des polysaccharides. Etant fabriquée par la grande majorité des plantes, la lignine est décrite ici, car elle va de pair avec la cellulose.

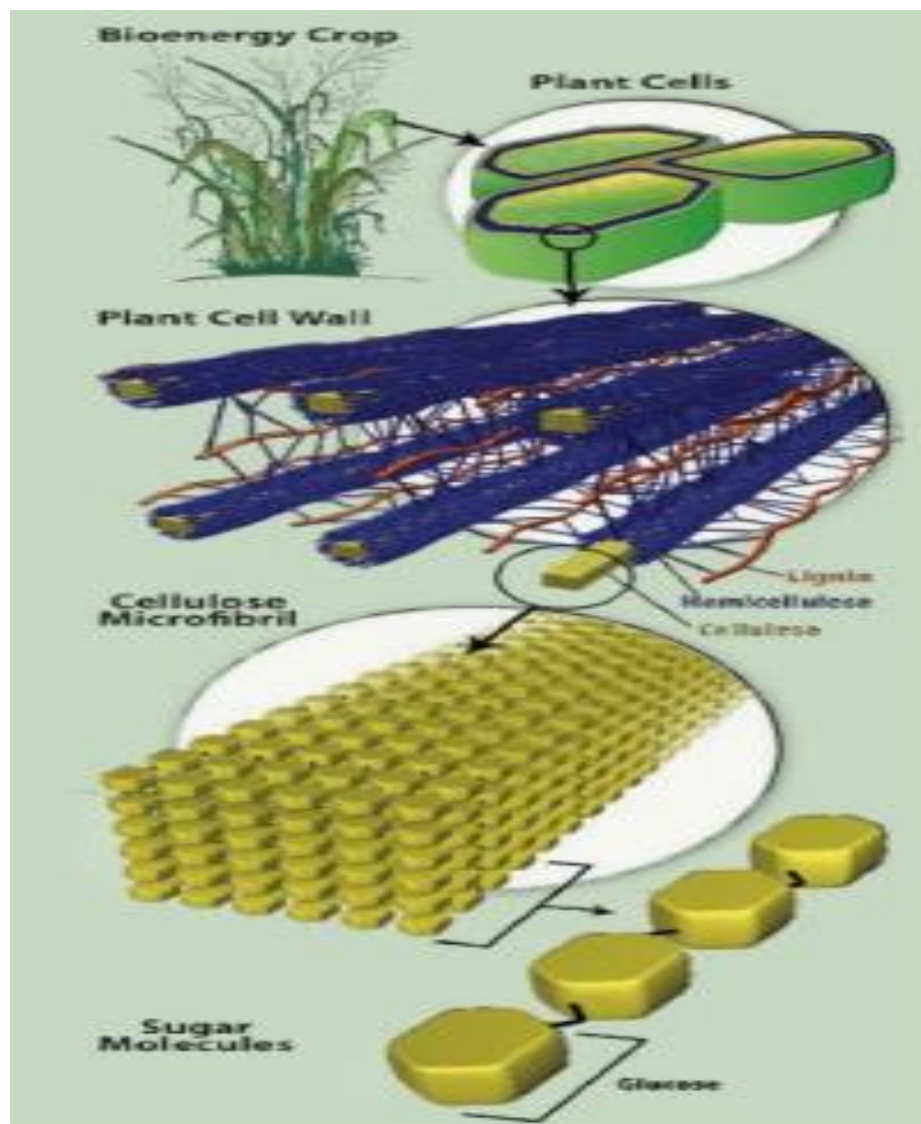


Figure III. 1: schéma représentant la lignine et la cellulose d'une plante

### III.4.2 Bouse de vache et crottin

#### ➤ Matière première

La bouse de vache est essentiellement composée de fragments d'herbe non digérés : cellulose et tissus lignifiés (assemblages de fibres assez rigides) et de produits d'origine animale ou microbienne contenus dans les sucs digestifs non digérés. Les micro-organismes sont très présents dans la bouse de vache fraîche.

### ➤ Principes et interprétation

La décomposition partielle des fibres de cellulose et autres tissus végétaux permet une distribution continue de la taille des fibres dans le mélange : du brin d'herbe à la macromolécule de cellulose micrométrique, toutes les tailles de fibres sont présentes. Ce sont de véritables armatures à plusieurs échelles : du grain de sable à la plaquette d'argile.

La macromolécule de cellulose est assez stable et rigide quel que soit le pH du milieu et les sels présents. Sa surface porte une faible charge négative, parfois nulle. Elle est capable de s'adsorber facilement sur des particules minérales. D'ailleurs, elle est suffisamment longue pour se fixer à plusieurs plaquettes d'argile à la fois et les relier entre elles. Lorsque cette adsorption est homogène et bien proportionnée, elle participe à la cohésion du mortier et augmente la résistance de l'enduit.



Figure III. 2: bouse de vache et crottin

### III.4.3 Papier washi

#### ➤ Matière première

Le papier washi (**Fig III.3**) est fabriqué à partir du bois de petits arbres sauvages du Japon, de Chine, de Corée et du Népal: le mitsumata, le kouzo et le ganpi. Les débuts de la fabrication de ce papier remontent à près de 1500 ans. Les Japonais utilisent traditionnellement les déchets de papier dans les enduits en terre.

### ➤ Principes et interprétation

Les étapes de trituration du papier sont déterminantes pour l'obtention de fines fibres de longueur millimétrique. Plus elles sont prolongées, plus le papier se divise en fines fibres. À l'identique de la paille à l'échelle du grain de sable, les *fines fibres de papier* sont de véritables *armatures pour les argiles*. Elles jouent un rôle **structurel important en renforçant l'enduit**. Lors de chocs, l'énergie emmagasinée se dissipe davantage le long des nombreuses interfaces entre les fibres et le liant, **augmentant la résistance** à la rupture du matériau. De plus, l'étape de trituration donne une consistance un peu gluante au papier gorgé d'eau : entourant les fibres millimétriques, une sorte de gel assure l'adhésion des fibres aux particules minérales.



Figure III. 3: papier washi

Figure III. 4: Les fibres du papier washi sont utilisées dans la couche de finition de cet enduit



### III.4.4 Jus végétaux gélatineux

Pour stabiliser la terre, de nombreux ajouts végétaux sont utilisés sous des formes variées. Parmi eux, les jus gélatineux sont obtenus par trempage dans l'eau de certaines plantes (tiges, feuilles, racines ou écorces). Au contact de l'eau, ces extraits végétaux, constitués de polysaccharides, forment quasiment instantanément une solution visqueuse.

### III.4.4.1 Eau gluante

#### ➤ Matière première

Différents végétaux sont susceptibles de former un gel au contact de l'eau. La recette du vuolu pratiquée au Ghana utilise les branches d'une sorte de vigne sauvage.

D'autres tiges et branches, mais aussi des feuilles et des racines, ont également cette capacité de rendre gluante l'eau dans laquelle elles trempent.

#### ➤ Principes et interprétation

Les molécules de ces différentes matières premières capables de former instantanément un gel au contact de l'eau ne sont pas identifiées. Il s'agit très probablement de diverses macromolécules de la famille des polysaccharides. Au contact de l'eau, ces macromolécules s'hydratent et se déploient tout en interagissant avec leurs voisines. Généralement, les gels de polysaccharides sont constitués d'un réseau tridimensionnel de macromolécules liées à quelques endroits par des liaisons faibles qui se forment à courte distance (ponts hydrogène, ponts ioniques et liaisons de Van der Waals). Ces gels jouent un rôle sur la consistance du mortier frais et sur le séchage des enduits. Ce dernier pourrait être un peu ralenti et plus homogène, réduisant la formation de fissures. De plus, au fur et à mesure de l'évaporation de l'eau lors du séchage, ces gels deviennent une véritable colle pour les particules minérales. En effet, lorsque l'eau s'évapore, les distances entre les particules minérales et les biopolymères se raccourcissent: leurs liaisons se renforcent. Parallèlement, les molécules ont alors moins de degré de liberté, elles se rigidifient, accentuant cet effet de colle. **Moriset, S., and Yaw Owusu, A. (2009).**

*Figure III. 5: L'eau devient instantanément gluante au contact des feuilles fougues: il se forme un gel, véritable colle des argiles*



### III.4.4.2 Cactus, agave, aloès

#### ➤ Matière première

La chair des tiges de deux grandes familles de cactus sont utilisées: les cactus du genre *Cereus* (tiges en forme de colonne) et ceux du genre *Opuntia*, dont les cladodes (partie de la tige en forme de feuille) sont aplaties et rondes. Pour les agaves et **les aloès, c'est la pulpe des feuilles qui s'emploie comme stabilisant.**

#### ➤ Principes et interprétation

Le *jus de cactus*, tout comme la pulpe d'agave ou *d'aloès*, est composé essentiellement d'eau et d'un polysaccharide dont la structure est proche de la pectine: une longue molécule ramifiée, capable de former un **gel**. Les gels de pectine se forment lorsque ces macromolécules peuvent s'approcher suffisamment les unes des autres et former des liaisons faibles (ponts hydrogènes et interactions hydrophobes). La formation de gel de pectine est facilitée par une baisse de pH (milieu acide), par l'effet déshydratant du sucre (saccharose) et/ou par la présence de cations comme le sodium ou le calcium qui neutralisent les charges négatives répulsives. L'étape de trempage, parfois de macération, est nécessaire pour réunir les conditions favorables de gélification. **Heredia Zavoni, E.A., Bariola Bernales, J.J., Vargas Neumann, J., and Mehta, P.K. (1988).**



Figure III. 6: La pulpe de l'aloé vera donne un gel translucide

### III.4.4.3. Amidon

#### ➤ Matière première

La farine de blé est essentiellement composée d'amidon. Ce polysaccharide est la principale réserve nutritive du monde végétal; il est emmagasiné dans les graines, les tubercules et les racines. Les grains de céréales en contiennent 40 à 90% de leur poids sec et les tubercules comme la pomme de terre entre 65 et 85%.

#### ➤ Principes et interprétation

Les grains d'amidon ont la particularité d'éclater lorsqu'ils sont en présence d'eau et chauffés à 70°C. Il se forme alors un empois, dispersion colloïdale plus ou moins visqueuse qui gélifie en refroidissant (phénomène qui provoque l'épaississement de la sauce béchamel). C'est sous cette forme d'empois que l'amidon est utilisé pour stabiliser la terre. La présence de sels (sel de table, eau calcaire, etc.) ont une action défavorable : ils ont tendance à inhiber la formation du gel d'amidon. Le gel d'amidon est rhéofluidifiant: plus il est agité, plus il devient fluide. L'ajout de colle de farine dans un mortier de terre modifie sa consistance: il devient plus souple lors de l'application. En séchant, les gels de polysaccharides collent davantage les argiles de la terre, renforçant les propriétés de l'enduit. **Guelberth, C.R., and Chiras, D. (2003).**



Figure III.7: La farine de blé contient de l'amidon.

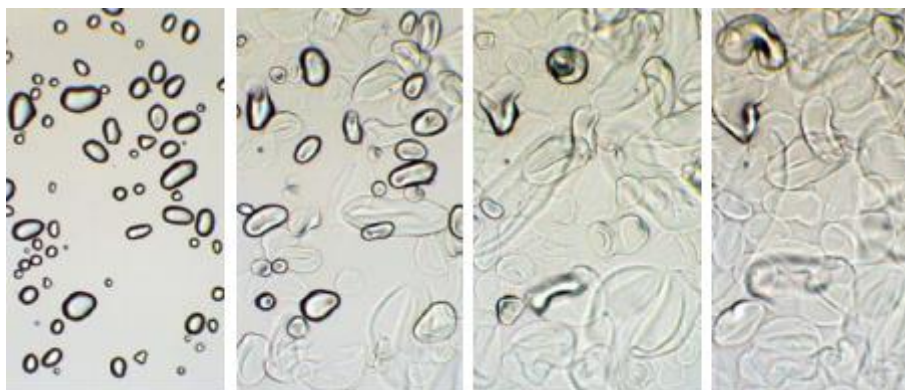


Figure III.8: Visibles au microscope optique, les grains d'amidon gonflent puis éclatent en présence de soude. Dans l'eau chaude, on observerait le même phénomène.

#### III.4.4.4 Gommages naturelles:

Les gommages naturelles sont des substances amorphes, composées de polysaccharides. Excepté la gomme Xanthane, toutes les gommages sont des exsudats produits par des plantes, ce qui les différencie des jus végétaux qui sont extraits de l'intérieur des plantes. Pour cicatriser leurs plaies, certains arbres produisent ces tissus pour se protéger de l'intrusion d'insectes, de champignons ou de micro-organismes qui se retrouvent alors englués.

La gomme arabique est produite par des arbres de la famille des Fabacées, famille des acacias. Le gommier blanc (*Acacia Sénégal*), très répandu de l'Afrique de l'Ouest à la mer Rouge au sud des régions désertiques, est le plus important d'entre eux ; il donne la gomme arabique officinale. **Polysaccharide acide**, la gomme arabique se dissout lentement mais facilement dans l'eau, jusqu'à un peu plus de 50%, formant des solutions visqueuses.

Diluée dans l'eau, elle est parfois mélangée à la terre pour rendre **l'enduit plus souple** à l'application et plus **résistant au retrait** pendant le séchage. Au Mali, malgré son prix, elle est quelquefois utilisée dans les enduits intérieurs. Pour la restauration de l'enduit de la mosquée de **Djingarey Ber**, de la terre de Bourem, 20% de sable et 3% de gomme arabique ont été utilisés.

Selon Joseph M. **Tibbets**<sup>31</sup>, lorsqu'elle est ajoutée à une terre sableuse, la gomme arabique donne un enduit intérieur de finition dure, sans fissures et qui adhérerait bien

au mur. Cependant, elle n'améliorerait pas la résistance à l'érosion des enduits extérieurs, notamment à cause de sa sensibilité à l'humidité.



*Figure III. 9: Gomme arabique*

### **III.5 Les lipides**

Les lipides constituent la matière grasse des êtres vivants. Ils sont caractérisés par leur propriété physique: la solubilité. Ils ne sont pas ou faiblement solubles dans l'eau. Les termes huile, beurre, graisse, cire ne désignent que leur état physique, liquide, solide ou de consistance intermédiaire à température ambiante. Les acides gras font partie de la famille des lipides. Les corps gras modifient l'ouvrabilité du mortier frais, agissant comme un lubrifiant entre les particules minérales et facilitant la pose de l'enduit. Les lipides, grâce à leur propriété hydrophobante, améliorent la résistance à l'eau des enduits. Cependant, de trop grandes proportions de corps gras peuvent altérer la perméabilité à la vapeur d'eau.



*Figure III.10: Le beurre de karité est extrait des noix de karité bouillies*



Figure III. 11: L'huile de lin est extraite des graines par pression à froid

### III.6 Les protéines

Les protéines interagissent fortement avec les argiles. Les parties hydrophiles s'adsorbent sur les particules argileuses recouvertes de fines couches de molécules d'eau, tandis que les parties hydrophobes restent à l'extérieur de la matière et donc au contact de l'air, formant une sorte de pellicule de surface qui repousse l'eau.

Les protéines sont de véritables colles des argiles et peuvent également présenter un effet hydrophobant en réduisant la **sensibilité à l'eau des enduits** en terre stabilisés.



Figure III.12: Caséine

### III.7 Autres molécules complexes

Les tanins sont des molécules très répandues dans le règne végétal. Ils sont présents dans quasiment toutes les parties des plantes. Le mot tanin trouve son origine dans le nom celtique du chêne tan. L'utilisation des tanins pour convertir les peaux en

cuir est connue depuis la haute Antiquité. Lors du tannage des peaux, les tanins établissent des liaisons entre les fibres de collagène (protéine) transformant les peaux fraîches en cuir imputrescible.

L'effet des tanins sur la cohésion argiles est bien moins visible que celui des ions de fer. Ces ions métalliques ont une densité de charge si élevée qu'ils collent fortement les plaquettes d'argile entre elles et rendent la terre insensible à l'eau. **Bourgès, A., and Joffroy, T. (2002).**



*Figure III.13 : Les cosses de néré sont de couleur rouge-brun foncé.*

## **III.8.La stabilisation aux liants organiques**

### **III.8.1.Effet sur les résistances mécaniques**

Le **Tableau III-2** présente les résistances à la compression des matériaux stabilisés avec des liants organiques. Dans une optique de cohérence, nous avons recalculé les pourcentages massiques équivalents des liants à partir des données disponibles dans les références. En effet, certains liants sont ajoutés sous forme liquide ou sous forme dilués dans de l'eau.

**Tableau III.2 :** Synthèse bibliographique sur les briques en terre crue stabilisées avec des liants organiques

Référence	Liant(s) organique (s)	% liant	Activation	Fibres	Type	Elancement	fc (MPa)
(Aguilar et al., 2016)	Chitosan dissoute à 0,5%-3% en masse dans une solution d'acide acétique	0%		-	adobe	2,1	2,1
		1%	Solution de 1% d'acide acétique				3,9
(Guerrieri, 2012)	Gluten	0%		-	BTC	n.m	1,5
		3%-5%	-				1,2-1,3
	5%-10% chaux						0,8-3
Caséine	1%-10%	5%-10% chaux + 0,37%-0,75% ammoniacue	1,3-7,5				
(Sorgho et al., 2014)	Tanins (décoction de cosses de Parkia Biglobosa)	0%	-	-	BTC	1	2,0
		1,44%					2,1
(Millogo et al., 2016)	Bouse de vache	1%-3%	-		adobe	1	2,1
				Bouse de vache			2,5-2,7

(Chang et al., 2015)	Gomme Xanthan	0%	-	-	adobe	1	0,4
		1%					3,7
(Yalley and Manu, 2013)	Bouse de vache	0%	-	-	BTC	n.m	4,6
		5%-30%		Bouse de vache			4,6-5,8
(Alhaik et al., 2017)	amidons	0%	Chauffage à 120°C	-	coulé	1	3,0
		1%					4,0-7,0

Bien qu'on retrouve les quatre grandes familles de polymères organiques naturels (polysaccharides, protéines, lipides et autres molécules complexes), le nombre de recherches sur ces types de liants reste faible au regard de la très grande variété de produits existants dans la nature. Dans la plupart des cas, les liants organiques sont utilisés en association avec des agents d'activation [Kouka Amed Jérémy Ouedraogo , 2019] .

### III.8.2.Effets sur la durabilité

Comme dans le cas de la stabilisation aux liants minéraux, la principale propriété liée à la durabilité étudiée dans les articles traitant des liants organiques est la résistance à l'eau des briques. Neuf études sur treize évaluent cette propriété et, comme nous l'avons vu pour la stabilisation aux liants minéraux, les méthodes d'évaluation de la tenue à l'eau sont très variées. On retrouve des méthodes quantitatives (résistances à la compression humides, profondeur d'érosion par la méthode de jet d'eau et absorption d'eau capillaire) dont les résultats sont présentés dans le **Tableau III-3**.

Tab.III.3. Effet des liants organiques sur la tenue à l'eau

Référence	Liant(s) organique (s)	% liant	Activation	Fibres	Type	Absorption d'eau	Profondeur d'érosion (mm) par jet d'eau	fc (MPa)
(Guerrieri, 2012)		0%	-	-	BTC		60	
	Gluten	3%-5%	5%-10% chaux				42-1	
	Caséine	1%-10%	5%-10% chaux + 0,37%-0,75% ammoniacale				11-0	
(Camões et al., 2012)	Huile usée de cuisine	0%	-	-	BTC/ Pisé	3,95 kg/(m <sup>2</sup> .√h)		disloqué
		1%	4% chaux vive (CaO) 0,1% soude (NaOH), + 4% chaux vive (CaO)			0,05-0,07 kg/(m <sup>2</sup> .√h)		0,6
(Millogo et al., 2016)	Bouse de vache	1%-3%	-		adobe	disloqué		
				Bouse de vache		11-4%		
(Yalley and Manu, 2013)	Bouse de vache	0%	-		BTC	17%		disloqué
		5%-30%		Bouse de vache		20-10%		0,8-2,8

L'absorption d'eau capillaire est la méthode la plus utilisée. Les résultats sont exprimés soit en % d'eau absorbée soit en  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \sqrt{h})$ . Ce test consiste à soumettre le matériau à une remontée d'eau capillaire et à mesurer dans le temps la hauteur du front de progression de l'eau ou à déterminer la quantité d'eau absorbée au bout d'une certaine durée. Plus l'absorption d'eau capillaire est faible, plus le matériau résiste à l'eau. La résistance à la compression humide est déterminée sur des échantillons immergés pendant une durée donnée. Les matériaux non stabilisés se disloquent pendant cette phase d'immersion. Enfin, la méthode de jet d'eau consiste à soumettre une surface du matériau à une érosion dynamique par jet d'eau à pression contrôlée sur une durée donnée. La profondeur de dégradation est mesurée à la fin de l'essai. Certains auteurs déterminent la perte de masse engendrée par cette érosion. Bien que les principes des essais soient les mêmes, les paramètres et conditions de leur réalisation diffèrent selon les auteurs. De ce fait, on ne peut que conclure sur l'amélioration globale de la tenue à l'eau des sols par l'ajout des liants organiques [Kouka Amed Jérémy OUEDRAOGO 2019].

### III.8.3 Stabilisation de la terre crue par le gel d'Aloe-verra

Les recettes employées par les bâtisseurs à travers le monde découlent de savoir-faire qui se sont transmis de générations en générations. Elles ne sont généralement pas bien connus. Ces pratiques traditionnelles méritent donc d'être revalorisées et mieux étudiées car elles représentent une tendance d'innovations pour la confection d'enduits écologiques autant que pour envisager des actions de **restauration et de conservation adaptées concernant le patrimoine bâti**. Un manque de données dans la littérature scientifique et un besoin clair de mener des recherches sur les mélanges terre-biopolymères pour la restauration de l'architecture en terre. C'est dans cette perspective qu'une étude a été franchi au sein du laboratoire de génie civil de l'université Amar Telidji de Laghouat [Z. Damene et al, 2020 ; I. Laroui et L. Chaoui, 2017].

Nous allons exposer les différents résultats des propriétés physico-mécaniques et de durabilité de l'éco-matériau élaboré à base de terre prélevée de la région de Tadjmout (Laghouat), stabilisée par des fibres de paille et gel de polysaccharide (L'Aloeverra).

### III.8.3.1 Identification de la matière première utilisée pour cet éco matériau

➤ La terre

La terre utilisée pour la fabrication de ce matériau provient de Tadjmout, région située à 50 km de la ville de Laghouat (prélevée de des jardins pas loin du oued). Elle se présente sous forme d'un sol de couleur marron

➤ La paille

La paille utilisée pour l'élaboration de notre matériau est la paille d'orge de Tiaret disponible dans notre région (Laghouat), et présentée en forme de botte comme indiqué sur **la figure III.14** ci-dessous.



Figure III.14: La paille

Cette fibre ne possède aucune flexibilité, elle se présente sous forme de fibre circulaire allongée de 1 à 4 mm de diamètre et 1 à 50 cm de longueur. Ces fibres sont constituées d'une partie central creuse de périmètre régulier présentant environ 60% de la section de fibre et d'une enveloppe d'épaisseur faible, présentant environ 40% de la section de fibre, ayant une face externe lisse et face interne légèrement rugueuse [Aouissi,2000].

➤ Le gel d'aloé Vera

L'aloé Vera est une plante de la famille des Aloacées qui compte environ 300 espèces et de nombreuses variétés de plantes vivaces originaires d'Afrique [gerbeaud.com] Ils furent utilisé pendant des millénaires à travers les civilisations (sumérienne, chinoise, égyptiennes mésopotamienne hindou ...) connu généralement pour ces vertus médicinales elles poussent dans les régions arides et semis arides [Emanuel Morin, 2008]. Pour l'élaboration de notre éco-matériau nous avons proposé d'utiliser le gel d'aloé vera (**figure III.15**) comme moyen de stabilisation pour notre matériau terre



Figure III. 15:Aloe Vera

### III.8.3.2 Préparation des matériaux

➤ La terre

Une fois ramenée de son site au laboratoire, la terre est séchée à l'air libre du laboratoire, prête dans quelques jours pour être écrasé à la main et tamisé par la suite au tamis de diamètre 2mm.

➤ La paille

Les différentes étapes suivies pour la préparation de fibre de paille sont :

- Se débarrasser de toute fibre d'autre nature.
- La limitation des dimensions des fibres de pailles inférieure ou égale à ( $\geq$ ) 6 cm ces dimensions, sont obtenues, à l'aide de ciseaux (opération manuelle difficile face à la quantité importante de la paille).
- Une fois les fibres découpées aux longueurs désirées, elles sont stockées dans des sacs en attendant leur utilisation.

➤ L'Aloe Vera

Les différentes étapes suivies pour la préparation de l'aloé vera sont :

- Choisir une plante d'aloé vera pulpeuse et l'extraire de la terre.
- Extraction du gel des feuilles à l'aide d'un couteau la veille de la conception de l'écomatériau pour éviter l'oxydation des feuilles.

- Une fois le gel récupéré il est placé dans un bocal hermétique en attendant son utilisation.

### **III.8.3.3 Préparation du mélange**

On a procédé à la préparation de deux mélanges :

Le mélange terre+ les fibres (TP): les fibres de paille sont mélangées une fois la terre est mouillé a l'eau.

Le mélange terre+ fibres+ le gel d'aloé Vera (TPA) : le malaxage de se mélange s'effectue de la même façon que le premier a l'exception d'ajouter le gel d'aloé Vera a l'eau de gâchage.

### **III.8.3.4 Le malaxage**

On a opté pour la méthode rustique, cette méthode permet de s'affranchir de toute machine c'est une méthode purement manuelle elle a été choisie a plus d'une raison, bien que l'utilisation du malaxeur a ses avantages il n'en manque pas d'inconvénients. Les étapes suivies sont :

- La terre prête à l'emploi sera divisée en deux quantités.
- La terre est mise en forme d'un tas au milieu dans une grande bassine duquel la quantité d'eau nécessaire pour le malaxage est versée (pour le premier mélange sans l'aloé vera, pour le deuxième avec le gel d'aloé vera).
- La terre est couverte par un film plastique et laissée s'imbiber d'eau.
- Une fois la terre imbibée, il s'agit de la mélanger avec les pieds (le port de bottes en caoutchoucs s'impose) jusqu'à l'obtention d'une pate homogène.
- On ajoute la quantité de paille désirée en pluie afin d'assuré une bonne distribution tout en continuent le malaxage aux pieds jusqu'à l'homogénéisation du composite.
- Le mélange obtenu sera divisé en petites parties égales au nombre de brique voulu.
- La dernière étape consiste à remplir immédiatement les moules pour confectionner les éprouvettes.

Il est à noter que le mélange (TPA) fut plus malléable et souple que le (TP) lors du malaxage et la confection des éprouvettes

### III.9 Essais effectués et discussion des résultats

#### III.9.1 Effet sur le retrait volumique

On remarque une évolution du retrait jusqu'au 20<sup>ème</sup> jour pour les 2 mélanges (TP) et (TPA) et après ce jour le retrait tend à se stabiliser ; selon le graphe on remarque que par rapport au mélange **TP** le mélange **TPA** possède l'avantage de réduire le retrait.

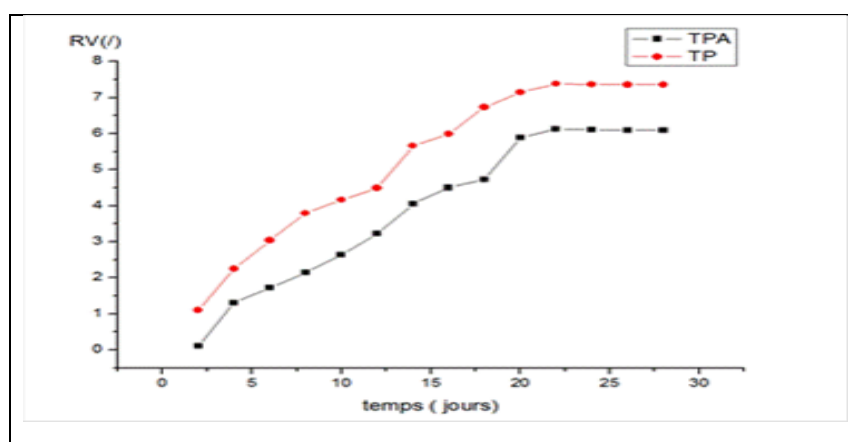


Figure III.16: Retrait volumique des matériaux TP et TPA en fonction du temps

#### III.9.2 Effet sur le comportement mécanique

Le tableau ci-dessous récapitule les résultats des essais mécaniques d'où on remarque une nette évolution en fonctions du temps et une augmentation des résistances mécaniques dû à l'introduction du gel d'aloé-vra .

Tableau III.4: Résistances mécaniques du TP et TPA

Types d'échantillons	Moyenne de la Résistance à la traction (MPa)		Moyenne de la Résistance à la Compression (MPa)	
	28 jours	60 jours	28 jours	60 jours
Témoin (terre +paille) <b>TP</b>	0.28	0.20	3.20	4.15
Traité (terre +paille +aloe Vera) <b>TPA</b>	0.41	0.35	4.05	4.31

### III.9.3. Effet sur l'absorption capillaire

L'introduction du gel d'aloë vera au mélange terre paillée diminue l'absorption capillaire par son influence sur la porosité du matériau. Ci-dessous, le tableau représente une liste des résultats tirés de la littérature.

**Tableau III.5:** Sorptivités de quelques matériaux en fonction de la densité

Matériau	Densité	Sorptivité (mm.mn <sup>-1/2</sup> )
Béton cellulaire autoclavé Purzak J et al. (1992)	0.390	0.287
	0.500	0.465
	0.650	0.503
Brique argileuse Purzak J et al. (1992)	1.700	1.239
Béton Purzak J et al. (1992)	2.300	0.929
Béton argileux cellulaire Goual M.S., (2000)	1.038	1.835
	0.953	1.673
	0.843	1.456
Béton Miniotaité R, (2004)	2.18	1.66
Brique de céramique Miniotaité R, (2004)	1.91	0.62
Bois de pin Miniotaité R, (2004)	0.385	0.090
Terre paillée <b>TP</b> Terre paillée adjuvanté de gel d'Aloeverra <b>TPA</b> <b>Chaoui Lina (2017)</b>	1271	<b>0,734</b> <b>0.519</b>

En comparant ces valeurs, on remarque que les matériaux **TP** et **TPA** possèdent une faible absorptivité par rapport aux briques argileuse et céramique et s'approche de celle des bétons légers cellulaires.

### III.9.4. Effet sur les caractéristiques thermiques

L'ajout de la paille à la terre ainsi que le gel d'aloë-verra apporte un effet bénéfique en termes d'isolation thermique. Selon les références bibliographiques (tableaux **III.6** ci-dessous), on remarque que les caractéristiques thermiques diminuent en fonction de la densité ; plus le matériau est dense, moins il est isolant.

Ce qui explique les résultats trouvés ; donc en ajoutant de la paille à la terre, on diminue la densité, et la conductivité thermique se trouve réduite, ce qui influence positivement sur le pouvoir d'isolation.

Tableau III.6 : Caractéristiques thermiques tirées de la littérature.

référence	terre	technique	T°c	P sèche (kg/m <sup>3</sup> )	λ (w/m/k)	Diffusivité mm <sup>2</sup> /s
[Boussaid 2001]	pise	méthode des boîtes	19-21	1276-1879	0,3-0,93	/
[CSTB2007]	torchis	méthode flux métrique	23	1217-1724	0,26-0,54	/
[CSTB2007]	enduit	méthode flux métrique	23	1223-1838	0,34-0,51	/
[Goodhew 2000]	bauge	fil chaud	ambiante	1230-1800	0,37-0,55	/
[Kleespies 1994a]	adobe	plaque chaude	/	1933	0,66-0,75	/
[Ola1987]	BTC	disque de Lee	/	1600-1900	0,5-1,5	/
[Wibart2010]	terre-chanvre	fil chaud	20	537-1236	0,11-0,5	/
<b>Terre T</b>	adobe	Hot disc	ambiante	1296	<b>0.777</b>	<b>0.634</b>
<b>Terre paillée TP</b>	Adobe paille	Hot disc	-	1271	<b>0.376</b>	<b>0.294</b>
<b>TPA (Chaoui L, 2017)</b>	Adobe paille aloe Vera	Hot disc	-	1271	<b>0.421</b>	<b>0.423</b>

### III.9.5. Autres travaux de recherches

- ✓ Au Mexique, elle s'emploie comme les cactus. Au Brésil, Marcio Albuquerque Buson<sup>23</sup> a réalisé une étude sur l'incorporation de **pulpe d'aloé vera** et de fibres de papier kraft dans des blocs de terre comprimée. Le procédé pour extraire la pulpe de l'aloé vera est simple (cf. illustrations page suivante). *La substance gélatineuse obtenue représente entre 1 et 4% de la composition totale de l'enduit.*
- ✓ Le jus de cactus Utilisé traditionnellement en Amérique latine, fait l'objet de recherches depuis une trentaine d'années. Il a été notamment employé dans les années soixante lors de la rénovation du site de Chan-Chan.

Les cactus, appelés *Nopal* sur le continent Américain, de la famille des **Cactacées**, du genre *Opuntia*, sont utilisés pour stabiliser la terre. Il en existe plusieurs sortes :

- le *figuier de barbarie* : **Opuntia Ficus Indica**, très répandu, est natif du Mexique. *Prickly pear* (Anglais)

- le cactus *tuna* : **Opuntia Tuna** est un genre d'Amérique centrale.

Plus récemment, Julio Vargas Neumann, Heredia Zavoni et al, ont notamment expérimenté des enduits stabilisés au jus de cactus.

*Conclusion  
générale et  
perspectives*

## **Conclusion générale**

Le passage des utilisations traditionnelles de la terre crue à un développement technologique de composites renforcés par des additions végétales ou organique pour des utilisations en bâtiment est relativement en perpétuelle *innovation*. Dès lors, de très nombreuses études ont été menées sur tous les continents pour réutiliser les techniques de stabilisation d'origine végétale dans les matériaux de construction, en particulier dans les pays en voie de développement vu leur disponibilité et leur faible coût économique et énergétique. Ainsi grâce au fonds documentaire spécialisé sur l'architecture en terre du laboratoire *CRATERRE-ENSAG* et à *l'expertise des membres du réseau de la chaire UNESCO « Architectures de terre, cultures constructives et développement durable »*, un travail d'inventaire a permis de sélectionner 172 références qui abordent le sujet de la stabilisation organique et 113 sources de recettes plus ou moins détaillées.

Dans un autre contexte de lutte contre le réchauffement climatique, le développement de la construction en terre crue s'avère une véritable alternative en vue de la réduction de la part d'émission de CO<sub>2</sub> du secteur du bâtiment.

Notre choix pour cet axe d'étude est du fait que plusieurs enjeux autour des quels s'articulent cette alternative de revalorisation du matériau terre à savoir :

- la restauration et conservation du patrimoine
- Une stratégie de restauration des Ksours patrimoniaux avec les mêmes matériaux locaux mais avec des techniques améliorées qui peuvent résoudre les problèmes de fissurations, d'étanchéité et de durabilité.
- Un investissement touristique public ou privé dans les quartiers historiques à travers des projets touristiques à valeur culturelle et patrimoniale

À travers certaines constructions anciennes et pratiques traditionnelles dans diverses régions du globe, l'usage des **biopolymères** a montré une efficacité promotrice. Ces liants organiques issus d'agro-ressources constitueraient donc des stabilisants prometteurs pour des constructions modernes en terre crue. D'où l'intérêt accordé

actuellement à ces ressources dites **renouvelables** d'autant plus que l'utilisation des ciments et chaux.

**Notre projet de fin d'étude** porte une recherche bibliographique sur le matériau terre et le recensement des recettes de stabilisation qui a donné un succès fulgurant à **l'habitat vernaculaire** qui est devenu une source d'inspiration très prisée pour la construction des maisons **confortables**, énergétiquement, de la mise en œuvre des stratégies bioclimatique et de l'emploi des matériaux de construction locaux à caractère économique et écologique.

### **En perspective : de stabilisation avec les biopolymères**

Pour adapter ces recettes utilisant des matériaux locaux, une phase d'expérimentation est nécessaire. Le type de terre, le type de polysaccharide, le climat, l'exposition des murs, la mise en œuvre, le contexte socio-culturel, etc. sont autant de facteurs à prendre en compte.

Une *phase d'expérimentation permet d'optimiser les performances du stabilisant et d'atteindre un résultat satisfaisant*. De plus, de constants allers-retours entre la pratique et la théorie sont très enrichissants et permettent une meilleure compréhension des mécanismes physico-chimiques de la stabilisation de la terre et facilitent ainsi l'utilisation des stabilisants organiques. Cette recherche dans cet axe de recettes nous invite à essayer les préparations décrites et à tester de nouveaux ingrédients disponibles à portée de main. Il s'agit donc d'une source d'inspiration pour mener à bien ses propres idées expérimentales.

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.

Une bonne maîtrise des techniques d'identification des terres orientera les choix en matière de stabilisation. De ce fait, il est important de rappeler que pour avoir un matériau durable l'utilisation de stabilisants est indispensable afin d'améliorer sa cohésion par changement des propriétés initiales des composantes terre-eau-air.

## Références bibliographiques

- **Aguilar, R., Nakamatsu, J., Ramírez, E., Elgegren, M., Ayarza, J., Kim, S., Pando, M.A., OrtegaSan-Martin, L., 2016.** The potential use of chitosan as a biopolymer additive for enhanced mechanical properties and water resistance of earthen construction. *Constr. Build. Mater.* 114, 625–637. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.218>
- **Akpokodje EG.** The stabilization of some arid zone soils with cement and lime. *Quarterly Journal of Engineering Geology London*, Vol. 18, 173-180, 1985.
- **Alhaik, G., Ferreira, M., Dubois, V., Wirquin, E., Tilloy, S., Monflier, E., Aouad, G., 2017.** Enhance the rheological and mechanical properties of clayey materials by adding starches. *Constr. Build. Mater.* 139, 602–610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.130>
- **Anger, R. (2011)** : Approche granulaire et colloïdale du matériau terre pour la construction (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- **Anger, R., & Fontaine, L. (2005)** : Grains de bâtisseurs. La matière en grains, de la géologie à l'architecture. Villefontaine, CRA Terre Edition.
- **Anger, R., & Fontaine, L. (2009)** : Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture. Paris, Belin / Cité des sciences et de l'industrie .
- **Anger, R., & Fontaine, L. (2009).** Bâtir en terre. Du grain de sable à l'architecture. Paris, Belin / Cité des sciences et de l'industrie
- **Anger, R., Fontaine, L., 2013.** Interactions argiles/biopolymères : Patrimoine architectural en terre et stabilisants naturels d'origine animale et végétale, CRA terre- ENSAG. ed.
- **ANGER, Romain ; FONTAINE, Laetitia, 2009.** Bâtir en terre : du grain de sable à l'architecture. Paris : Belin, Cité des sciences et de l'industrie. 223 p. ISBN 978-2-7011-5204-2.
- **Aouissi fatima 2000** : «comportement physique et mécanique de l'adobe paillé  
» thèse magistère

- **Aranda, J., 2010.** “Características del BTC ante diferentes concentraciones de mucilago de nopal y sabila agregadas al agua de mezclado”. TURRevista Digi.U@T Julio 2011. Año 5 Num. 19. URL
- **Aurélie Vissac, Laetitia Fontaine, Romain Anger** Laboratoire CRAterreTENSAG- Recettes traditionnelles & Classification des stabilisants d’origine animale ou végétale
- **Ausroads.** Guide to stabilisation in roadworks. Ausroads Research Group, Sydney, 1998.
- **BERREHAIL .Tahar .2009 :** La terre un matériau de construction, une alternative pour une solution durable université Mentouri Constantine KERROUM NADIR selmi hacen matériaux locaux et développement durable
- **Bourgès, A., and Joffroy, T. (2002).** Contribution aux recherches pour la préservation d’enduits de terre stabilisés au bitume et de décors polychromes - Cathédrale de Navrongo - Nord Ghana. Ed. ENSAG.
- **Bourgès, A., and Joffroy, T. (2002):** Contribution aux recherches pour la préservation d’enduits de terre stabilisés au bitume et de décors polychromes - Cathédrale de Navrongo - Nord Ghana. Ed. ENSAG.
- **Bruno Pignal,** « Terre crue, Technique de construction et de restauration », édition Eyrolles 2005
- **Buson, M.A., 2009.** Krafterra. Desenvolvimento e análise préliminária do desempenho técnico de componentes de terra com a incorporação de fibras de papel kraft provenientes de reciclagem de sacos de cimento para vedação certical.
- **Camões, A., Eires, R., Jalali, S., 2012.** Old materials and techniques to improve the durability of earth buildings. CIAV-ICOMOS 2012 AL AIN Int. Comm. Vernac. Archit. Terra 2012 1–14 .
- **Chandra S., Eklund L., Villarreal R.R., 1998.** “Use of Cactus in Mortars and Concrete”. In : Cement and Concrete Research 28, p 41–51.
- **Chang, I., Im, J., Prasadhi, A.K., Cho, G.-C., 2015.** Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening. Constr. Build. Mater. 74, 65–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.026>
- **CRAterre-ENSAG, UNESCO.** Rapport de mission. Tombouctou, Mali. Ed.

- **Djefour Imane & Merabet Hafidha** Elaboration et caractérisation des adobes, des mortiers et des enduits en terre pour la restauration de l'hôpital d'AdrAR .
- **Doat, P., Hays, A., Houben, H., Matuk, S., & Vitoux, F. (1979):** Construire en terre. Paris, Editions Parenthèses.
- **Emanuel Morin, 2008.** Thèse aloe Vera aspects pharmacologique et cliniques pour le diplôme d'état de docteur en pharmacie
- **Fontaine, L., Anger, R., 2007.** Omar. Recette du Perou : a base de crottin de cheval et d'âne.
- **Ghoumari F .** Matériau en Terre Crue Compactée: Amélioration de sa Durabilité à l'Eau. Thèse de Doctorat, INSA de Lyon, France, 1989.
- **Gras, R., 1988 :** Physique du sol pour l'aménagement, Masson. ed. Paris.
- **Guelberth, C.R., and Chiras, D. (2003).** The Natural Plaster Book : earth, lime and gypsum plasters for natural homes. Ed. New Society Publishers
- **Guelberth, C.R., and Chiras, D. (2003):** The Natural Plaster Book : earth, lime and gypsum plasters for natural homes. Ed. New Society Publishers
- Guerrieri, C., 2012. Characterization of compressed earth blocks built with natural low-cost energy stabilizers. *Rammed Earth Conserv.* 125.
- **Guillaud (2010)** [HUBERT GUILLAUD :Construire en terre . revue les cahiers techniques du bâtiment, N°295mars 2010.<http://www.groupemoniteur.fr>].
- **Guillaud, H., & Houben, H. (1995) :**Traité de construction en terre (2ème édition). Marseille, Editions Parenthèses.
- **Guillaud, H., Joffroy, T., Odul, P., & CRATerre-EAG (1995) :**Blocs de terre comprimée. Volume II. Manuel de conception et de construction. Eschborn, GTZ.
- **Heredia Zavoni, E.A., Bariola Bernales, J.J., Neumann, J.V.,***Méthode d'extraction du jus de cactus –essais stabilisation du béton*
- **Heredia Zavoni, E.A., Bariola Bernales, J.J., Vargas Neumann, J., and Mehta, P.K. (1988):** Improving the moisture resistance of adobe structures. Ed. RILEM

- **Heredia Zavoni, E.A., Bariola Bernales, J.J., Vargas Neumann, J., and Mehta, P.K. (1988).** Improving the moisture resistance of adobe structures. Ed. RILEM.
- **Horsch, B., & de Paoli, R. (2014).** Cours UE82 "Construire en terre crue", Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.
- **Houben et Guillaud, 2006 :** [Traité de construction en terre .CRATerre Editions parenthèses 2006 Marseille ISBN2-86364-161-1].
- **Houben H, Guillaud H :**Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.
- **Houben H, Rigassi V, Garnier P :** Blocs de terre comprimée : équipements de production. CRATerre, Bruxelles, Belgique, 149 p, 1996
- **HOUBEN, HUGO, and GUILLAUD, HUBERT** Traité de construction en terre Editions Parenthèses Marseille France 355 p 1989
- **Hoyle, A.M., 1990.** "Chan Chan : Apportes para la conservation de la - arquitectura de terra". Presented at the 6<sup>th</sup> international conference on the conservation of earthen architecture: Adobe 90 Preprints, Las Cruces, New Mexico: The Getty Conservation Institute.
- **ICCROM, -Tibbets, J.M., 1989:** The earthbuilders' encyclopedia: the master alphabetical reference for adobe & rammed earth. Southwest Solaradobe School
- **Imane Laroui et lina Chaoui** « Proposition d'une stratégie de réhabilitation durable des ksours algériens ; cas d'étude Ksar de Tadjmout ». **PFE de Master Architecture ; option Architecture et Patrimoine.**; Département d'architecture à Laghouat. Soutenu **Septembre 2017**
- **Joffroy, T., Moriset, S., 1996 :** Chantiers pilotes de formation à la conservation des mosquées de Tombouctou.
- **Kouka Amed Jérémy OUEDRAOGO 2019** stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par des liants organiques et/ou minéraux à faibles impacts environnementaux.
- **L. Idir Kaddour1, M. Dahli1** Réhabilitation du patrimoine architectural en terre, un héritage à sauvegarder .
- **MEBARKI Houa 2012-2013 :** Développement durable et tourisme : quels enjeux ? Cas de la wilaya de Bejaïa. Université Abderrahmane Mira de Bejaïa

- **Mehta, P.K., 1988.** ‘Improving the moisture resistance of adobe structures >> in : materials and Structures 21, p. 213–221.
- **Meukam P, Jannot Y, Noumowe A, Kofane TC.** Thermo physical characteristics of economical building materials. Construction and Building Materials, Volume 18, issue 6, pp. 437–443, 2004.
- **Millogo, Y., Aubert, J.-E., Sere, A.D., Fabbri, A., Morel, J.-C., 2016.** Earth blocks stabilized by cowdung. Mater. Struct. 49, 4583–4594. <https://doi.org/10.1617/s11527-016>
- **Mitchell, J.K., 2005:** Fundamentals of soil behavior, 3rd edition. ed. John Wiley & Sons, Hoboken, N.J.
- **Moriset, S., and Yaw Owusu, A. (2009).** Reconstruction of the Wa Naa Yiri, Ghana. Ed. CRAterre-ENSAG
- **Morton, T., Bennetts, R., 2008.** Earth masonry design and construction guidelines. IHS BRE Press, Bracknell.
- **Neumann, J.V., Bariola Bernales, J.J., 1990.** « Constructions de terra, en el Peru de hoy >>. Presented at the 6th international conference on the conservation of earthen architecture : Adobe 90 Preprints, Las Cruces, New Mexico : The Getty Conservation Institute.
- **Neumann, J.V., Heredia Zavoni, E.A., Bariola Bernales, J.J., 1986.** “preservation of adobe construction in rainy areas”. Presented at the CIB.86: advancing building technology : proceedings of the 10th Triennial Congress of the International Council for Building Research, Studies and Documentation, The Council.
- **NF P94-041, 1995 :** reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide. 14.
- **NF P94-051, 1993 :** Détermination des limites d’Atterberg. 15.
- **NF P94-057, 1992 :** Analyse granulométrique des sols, Méthode par sédimentation 17.
- **NF P94-068, 1993 :** Mesure de la quantité et de l’activité de la fraction argileuse. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol par l’essai à la tache 8
- **Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., 2011.** Eco-efficient construction and building materials. Springer, London.

- **Patrice Doat, Alain Hays, Hugo Houben, Silvia Matuk, François Vitoux** Construire en terre par le "CRATERRE" 1979.
- **Pesson, 1971** : « La vie dans les sols - aspects nouveaux - études expérimentales ouvrage collectif ».
- **Ponts de Vigilance** « Construction et Réhabilitation en Terre Crue » .
- **Rigassi V.** Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRATERRE-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995
- **SOLTNER D. (1992)** : « Base de la production végétale. Coll. Sciences et techniques agricoles ».
- **Sorgho, B., Zerbo, L., Keita, I., Dembele, C., Plea, M., Sol, V., Gomina, M., Blanchart, P., 2014.** Strength and creep behavior of geomaterials for building with tannin addition. Mater. Struct. 47, 937–946.  
<https://doi.org/10.1617/s11527-013-0104-7>
- **Symons WG.** Properties of Australian soils stabilised with cementitious binders. Structural Materials and Assemblies Group, University of South Australia, The Levels, South Australia, 1999.
- **United Nations.** Earth Construction Technology. United Nations Centre For Human Settlements, Nairobi, Kenya, 200 p, 1992.
- **Van Damme, H., Houben, H., 2017:** « Earth concrete. Stabilization revisited. Cem. Concr. Res. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.035> »
- **Vissac, A., Bourgès, A., Gandreau, D., Anger, R., Fontaine, L., 2017.** argiles biopolymères - les stabilisants naturels pour la construction en terre 81.
- **Voïnovitch, I., 1971.** l'analyse minéralogique des sols argileux, Eyrolles.
- **Winterkorn HF.** Soil stabilization, Chapter 8 in "Foundation Engineering Handbook",
- **Winterkorn, H.F. & Fang, H.-Y.,** Van Nostrand Reinhold Company, 750 pp, 1975.
- [www.lbl.gov/Publications/YOS/Feb/](http://www.lbl.gov/Publications/YOS/Feb/)
- [www.turevista.uat.edu.mx](http://www.turevista.uat.edu.mx) <consulte en 02/2012>
- **XP P 13-901, 2001** : Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications -Méthodes d'essais - Conditions de réception.

AFNOR 37.

- **Yalley, P.P.-K., Manu, D., 2013.** Strength and Durability Properties of Cow Dung Stabilised Earth Brick. *Civ. Environ. Res.* 3, 117–125.
- **Yves Baret** : Traiter l'humidité. Chantiers pratiques. Editions : Eyrolles. Février 2011. P. 36 à 47.
- **Z.damene, L. Chaoui et A. Chettih** “Contribution to the study of an eco-material based on earth Stabilized by vegetable fibers and aloe-véra juice”; *Journal of Fundamental and Applied Sciences* Janvier **2020**

## Résumé

Dans un contexte de lutte contre le réchauffement climatique, le développement de la construction en terre crue est une véritable alternative en vue de la réduction de la part d'émission de CO2 du secteur du bâtiment. Toutefois, ce matériau millénaire doit pouvoir justifier de bonnes résistances mécaniques et d'une tenue à l'eau convenable dans des conditions particulièrement sévères qu'imposent les réglementations en vigueur. Pour ce faire, la plupart des applications industrielles et des travaux scientifiques à ce jour ont recours au ciment et la chaux pour **la stabilisation** de la terre crue. Mais l'empreinte carbone élevée de ces liants minéraux conjuguée à leur taux d'incorporation élevé posent des questions sur le **caractère écologique** de la terre crue stabilisée d'autant plus que les gains de performances sont faibles. Or, à travers certaines constructions anciennes et pratiques traditionnelles dans diverses régions du globe, l'usage de **biopolymères** a montré une efficacité. Ces liants organiques issus d'agro-ressources notamment les **polysaccharides** constitueraient donc des stabilisants prometteurs pour des constructions modernes en terre crue.

**Mots-clés :** terre crue ; stabilisation ; écologique ; biopolymères ; polysaccharides.

## تلخيص

في سياق مكافحة الاحتباس الحراري ، فإن تطوير البناء الطيني هو بديل حقيقي لتقليل حصة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في قطاع البناء. ومع ذلك ، يجب أن تكون هذه المادة القديمة قادرة على تبرير المقاومة الميكانيكية الجيدة ومقاومة الماء المناسبة في ظل ظروف قاسية بشكل خاص تفرضها اللوائح المعمول بها. للقيام بذلك ، لجأت معظم التطبيقات الصناعية والعمل العلمي حتى الآن إلى الأسمنت والجير لتثبيت التربة الخام. لكن البصمة الكربونية العالية لهذه المواد اللاصقة المعدنية جنبًا إلى جنب مع معدل دمجها المرتفع تثير تساؤلات حول الطابع البيئي للأرض الخام المستقرة ، خاصة وأن مكاسب الأداء منخفضة. ومع ذلك ، من خلال بعض الإنشاءات القديمة والممارسات التقليدية في مناطق مختلفة من العالم ، أظهر استخدام البوليمرات الحيوية فعالية. هذه الروابط العضوية المشتقة من الموارد الزراعية ، ولا سيما السكريات المتعددة ، ستشكل بالتالي عوامل استقرار واعدة للمباني الحديثة في الأرض الخام

الطين الخام؛ التثبيت؛ بيئي؛ البوليمر الحيوي؛ السكريات : **الكلمات المفتاحية**

## ABSTRACT

In the context of the fight against global warming, the development of mud construction is a real alternative for reducing the share of CO2 emissions in the building sector. However, this ancient material must be able to justify good mechanical resistance and suitable water resistance under particularly severe conditions imposed by the regulations in force. To do this, most industrial applications and scientific work to date have resorted to cement and lime for the stabilization of raw earth. But the high carbon footprint of these mineral binders combined with their high incorporation rate raise questions about the ecological character of stabilized raw earth, especially as the performance gains are low. However, through some ancient constructions and traditional practices in various regions of the world, the use of biopolymers has shown effectiveness. These organic binders derived from agro-resources, in particular polysaccharides, would therefore constitute promising stabilizers for modern buildings in raw earth.

**Keywords:** raw earth ; stabilization ; ecological ; biopolymer ; polysaccharides